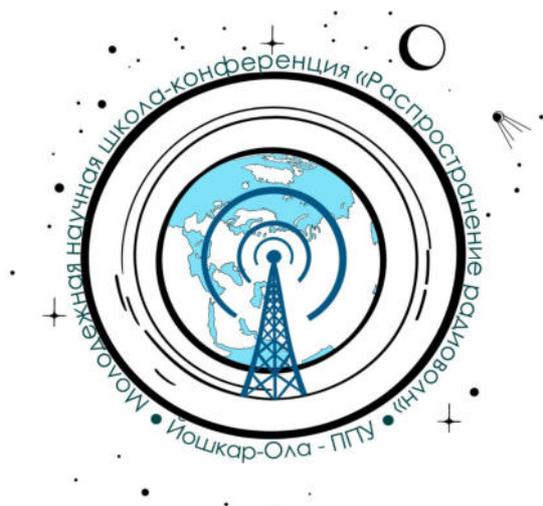


---

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн  
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
Поволжский государственный технологический университет  
Российский новый университет

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

СБОРНИК ДОКЛАДОВ  
I Всероссийской молодежной научной школы-конференции,  
посвященной памяти Д. С. Лукина  
(Йошкар-Ола, 11–14 ноября 2024 года)



Йошкар-Ола  
Поволжский государственный технологический университет  
2024

---

УДК 621.37  
ББК 32.841  
Р 24

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

Д. В. Иванов, *председатель редакционной коллегии;*  
Н. В. Рябова, *заместитель председателя редакционной коллегии;*  
А. С. Крюковский, В. А. Иванов, Б. Г. Кутуза, Д. В. Растягаев;  
А. А. Кислицын, *ответственный секретарь*

**Распространение радиоволн:** сборник докладов I Всероссийской молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти Д. С. Лукина (Йошкар-Ола, 11–14 ноября 2024 года) / редколлегия: Д. В. Иванов, Н. В. Рябова, А. С. Крюковский и др. – Электронные данные. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2024. – 123 с. – URL: [https://science.volgatech.net/upload/documents/science/!!!RRVmol\\_2024.pdf](https://science.volgatech.net/upload/documents/science/!!!RRVmol_2024.pdf)  
ISBN 978-5-8158-2420-1

В сборник включены доклады участников конференции, отражающие результаты исследований в области распространения радиоволн от километрового до субмиллиметрового диапазона в различных средах; дистанционного зондирования атмосферы, ионосферы, космического пространства, земных покровов; физических проблем радиолокации, радионавигации и радиосвязи; интеллектуального анализа и обработки экспериментальных данных в задачах распространения радиоволн и их приложений.

Представленные новые научные результаты в области распространения радиоволн могут быть полезны исследователям и специалистам по радиофизике, геофизике, радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также студентам, аспирантам и докторантам соответствующих специальностей.

УДК 621.37  
ББК 32.841

---

*Электронное научное издание*

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

Сборник докладов I Всероссийской молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти Д. С. Лукина (Йошкар-Ола, 11–14 ноября 2024 года)

Ответственный за выпуск *А. А. Кислицын*

Редакторы *Л. С. Емельянова, П. Г. Павловская*. Компьютерная верстка *Е. А. Головина*

Сборник разработан с помощью программного обеспечения Microsoft Office Word, Adobe Acrobat Pro.

Подписано к использованию 08.11.2024. Объем издания 13,8 Мб.

Поволжский государственный технологический университет. 424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

---

ISBN 978-5-8158-2420-1

© Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн, 2024  
© Поволжский государственный технологический университет, 2024

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

### Председатель

Лукин Дмитрий Сергеевич, д.ф.-м.н., профессор, Российский новый университет, Москва

### Сопредседатель

*Иванов Дмитрий Владимирович*, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

### Заместители председателя

*Кутуза Борис Георгиевич*, д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва

*Крюковский Андрей Сергеевич*, д.ф.-м.н., профессор, Российский новый университет, Москва

*Рябова Наталья Владимировна*, д.ф.-м.н., профессор, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

### Учёный секретарь

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

### Члены программного комитета

*Башкуев Юрий Буддич*, д.т.н., Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

*Булкин Владислав Венедиктович*, д.т.н., профессор, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, Муром

*Дмитриев Александр Сергеевич*, д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва

*Захаров Александр Иванович*, д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Фрязинский филиал, Фрязино

*Зернов Николай Николаевич*, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

*Иванов Владимир Алексеевич*, д.ф.-м.н., профессор, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

*Истомина Наталья Леонидовна*, д.ф.-м.н., профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва

*Банков Сергей Евгеньевич*, д.т.н., с.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

*Калошин Вадим Анатольевич*, д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

*Клименко Максим Владимирович*, д.ф.-м.н., Западное отделение Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Калининград

*Колесник Сергей Анатольевич*, к.ф.-м.н., доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

*Котонаева Надежда Геннадьевна*, д.ф.-м.н., доцент, Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва

*Куркин Владимир Иванович*, д.ф.-м.н., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

*Медведев Андрей Всеволодович*, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

*Насыров Игорь Альбертович*, к.ф.-м.н., доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

*Падохин Артем Михайлович*, к.ф.-м.н., доцент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

*Палкин Евгений Алексеевич*, к.ф.-м.н., профессор, Российский новый университет, Москва

*Смирнов Владимир Михайлович*, д.ф.-м.н., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. Фрязинский филиал, Фрязино

*Грач Савелий Максимович*, д.ф.-м.н., с.н.с., Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

*Шерстюков Олег Николаевич*, д.ф.-м.н., профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

*Щукин Георгий Георгиевич*, д.ф.-м.н., профессор, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург

*Ясюкевич Юрий Владимирович*, д.ф.-м.н., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В условиях стремительного развития науки и технологий многогранная область распространения радиоволн требует не только новых научных исследований, но и регулярной площадки для обмена опытом и совместной работы молодых учёных. Именно поэтому в соответствии с утвержденным Президиумом РАН Планом научных конференций, симпозиумов, съездов, семинаров и школ на 2024 год и решением XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» от 18 мая 2023 года с большим энтузиазмом и надеждами открываем Всероссийскую молодежную научную школу-конференцию «Распространение радиоволн», которая позволит объединить перспективных молодых исследователей, экспертов, аспирантов и студентов со всей страны.

Цель научной школы-конференции – предоставить участникам уникальную возможность познакомиться с основами и новейшими исследованиями в областях дистанционного зондирования атмосферы, ионосферы, космического пространства, земных покровов, распространения радиоволн различных диапазонов, физических проблем радиолокации, радионавигации и радиосвязи, интеллектуального анализа и обработки экспериментальных данных в задачах распространения радиоволн и их приложений, узнать о значимых достижениях науки и практики на лекциях ведущих ученых страны, обсудить актуальные научные проблемы и представить результаты собственных исследований.

Школа-конференция будет проводиться раз в два года в г. Йошкар-Оле, столице Республики Марий Эл, на базе Поволжского государственного технологического университета, известного своими достижениями в разработке когнитивных подходов, методов и алгоритмов коррекции дисперсионных искажений широкополосных КВ-сигналов, методов создания маломощных диагностических средств КВ-радиоканалов (вертикальных, наклонных активных и пассивных радиозондов, работающих на сложных сигналах), а также в области разработки методов и программных средств радиопрогнозирования их состояния с внедрением подходов для систем искусственного интеллекта с применением технологий машинного обучения, нейронных сетей и анализа больших данных. Организаторами школы-конференции являются Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн, Поволжский государственный технологический университет, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН), Российский новый университет (РосНОУ) при участии и поддержке Российской академии наук (РАН), Министерства науки и высшего образования РФ.

Первая школа-конференция проводится 11–14 ноября 2024 года и посвящена памяти Дмитрия Сергеевича Лукина, выдающегося российского ученого в области распространения и дифракции радиоволн, председателя Научного совета ОФН РАН по распространению радиоволн, доктора физико-математических наук, профессора, лауреата Государственной премии СССР в области науки и техники, заслуженного деятеля науки РФ, почётного работника высшего профессионального образования РФ.

Школа-конференция в г. Йошкар-Оле продолжит традиции известной в Советском Союзе школы-конференции по дифракции и распространению радиоволн, проводившейся в г. Москве под эгидой Научного совета по распространению радиоволн.

В сборнике представлены доклады участников конференции – молодых ученых из институтов РАН, различных научных организаций, вузов России и других стран. География участников конференции широка – от Дальнего Востока до Калининграда.

Представленные в сборнике актуальные научные результаты в области распространения радиоволн могут быть интересны и полезны специалистам по радиофизике, геофизике, радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также студентам, аспирантам и докторантам соответствующих специальностей.

Желаем всем участникам насыщенного, продуктивного и увлекательного участия в нашей школе-конференции! Пусть этот опыт принесет новые знания, полезные знакомства, мотивирует на дальнейшие научные поиски и станет стимулом к будущим научным достижениям!

*Д.В. Иванов, сопредседатель программного комитета конференции, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор*

*Б.Г. Кутуза, председатель Научного совета ОФН РАН по распространению радиоволн, д-р физ.-мат. наук, профессор*

## СЛУЖИТЬ НАУКЕ, СЛУЖИТЬ РОССИИ



**Дмитрий Сергеевич ЛУКИН** (06.10.37–21.08.2024) – выдающийся российский учёный в области распространения и дифракции радиоволн, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР в области науки и техники, заслуженный деятель науки РФ, почётный работник высшего профессионального образования РФ. Его работы получили широкое признание в нашей стране и за рубежом.

Д. С. Лукин начал научную работу, поступив в МФТИ в 1956 году. После окончания института в 1962 году Дмитрий Сергеевич продолжил работу в Московском физико-техническом институте на кафедре «Антенны и распространение радиоволн» и в 1965 году защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Одним из первых направлений научной работы Д. С. Лукина, выполненной под руководством заведующего кафедрой профессора А. Н. Казанцева, стал цикл работ по численному моделированию распространения радиоволн при связи с искусственными спутниками Земли и пилотируемыми космическими кораблями. Д. С. Лукиным предложен метод бихарактеристик для оперативного прогнозирования условий радиосвязи в околоземном космическом пространстве.

Значительные успехи были также достигнуты при моделировании волновых полей в области фокусировки электромагнитных волн в неоднородных средах. Дмитрий Сергеевич внёс большой вклад в развитие и применение асимптотических методов в теории дифракции, фокусировки и распространения радиоволн в реальных природных средах (в сильно-поглощающих грунтах с дисперсией, строительных материалах, в атмосфере Земли и планет, в ионосферной и магнитосферной плазме, в подземной радиолокации), в теорию полифокальных антенн. Один из результатов его педагогической и исследовательской деятельности – научная школа, в рамках которой совместно с профессорами В. А. Зерновым, А. С. Крюковским, Е. А. Палкиным, доцентами Е. Б. Ипатовым, Д. В. Растягаевым, П. П. Савченко, Ю. Г. Спиридоновым и другими учеными Д. С. Лукин создал новое научное направление в радиофизике – волновую теорию катастроф.

Работы Д. С. Лукина имеют не только важное теоретическое, но практическое значение. Идеи ученого используются при проектировании линий связи, радиолокации и радионавигации, создании антенно-фидерных устройств для ряда космических аппаратов, построении моделей тропосферы и ионосферы Земли, Марса, Венеры и Юпитера.

В 1979 году Дмитрий Сергеевич возглавил кафедру «Распространение радиоволн и космическая радиосвязь» в МФТИ, которая с 1985 года стала называться кафедрой «Физико-математические проблемы волновых процессов». Под его руководством коллектив кафедры продолжил работу в таких областях радиофизики, как распространение, дифракция и фокусировка радиоволн в ионосфере, магнитосфере и тропосфере Земли, дистанционное зондирование сред, динамический хаос. В 1984 году Д. С. Лукин защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Неоценим вклад Д. С. Лукина в воспитание научных кадров. Непосредственно под его руководством защищены 35 кандидатских и семь докторских диссертаций.

С 1975 года Дмитрий Сергеевич работал председателем секции «Распространение и дифракция радиоволн» в Центральном правлении Русского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. В течение многих лет он являлся заместителем председателя, а с 2009 года – председателем Научного совета по комплексной

проблеме «Распространение радиоволн» при Президиуме АН СССР (в настоящее время Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн).

Д. С. Лукин входил в состав редколлегии журналов «Радиотехника и электроника», «Физические основы приборостроения», «Электромагнитные волны и системы», «Нелинейный мир», «Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы», «Вестник Российского нового университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика».

Дмитрий Сергеевич был организатором и руководителем Всероссийского научного семинара «Математическое моделирование волновых процессов». На протяжении многих лет он выполнял обязанности заместителя председателя и председателя программного и организационного комитетов всероссийских научных конференций «Распространение радиоволн», всероссийских школ-конференций «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», всероссийских Армандовских чтений, научной школы «Фундаментальные проблемы сверхширокополосной радиосвязи и радиозондирования».

Научная и педагогическая работа Д. С. Лукина получила признание и оценку. Он лауреат премии Ленинского комсомола 1971 года за цикл научных работ по исследованию распространения радиоволн, излучаемых ИСЗ, ракетами и космическими межпланетными станциями, и премии Совета министров СССР за работу «Телец» (1985 г.). За разработку и применение асимптотических методов в теории дифракции и распространения электромагнитных волн Д. С. Лукину и его ученикам в 1990 году присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники. Исследования Д. С. Лукина отмечены Государственной научной стипендией в области физики и астрономии СССР и стипендией DAAD, а также почётными грамотами Минвуза РСФСР и России. В 1987 учёный награждён знаком «Высшая школа СССР. За отличные успехи в работе». За личный вклад в развитие фундаментальных исследований в области распространения радиоволн, создание научной школы, разработку и создание систем космической связи, активную и плодотворную работу по подготовке научных кадров высшей квалификации в 1996 году Д. С. Лукин удостоен почётного звания «Заслуженный деятель науки РФ», а в 2008 году – звания «Почётный работник высшего профессионального образования РФ».

Дмитрий Сергеевич Лукин обладал талантом организатора, высоким чувством ответственности, профессионализмом, доброжелательностью, желанием и умением помочь людям. Неутомимая энергия и личное обаяние снискали Дмитрию Сергеевичу заслуженное уважение коллег, товарищей по работе и многочисленных учеников. Он всегда работал с полной отдачей. Вся его жизнь была посвящена служению науке, служению России.

## Секция 1

# ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ИОНОСФЕРЫ, КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

---

УДК 550.388.2

## АНАЛИЗ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ЗА 23-й, 24-й ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

**А. М. Аппалонов, Ю. С. Масленикова, О. Н. Шерстюков**

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1  
E-mail: artem309\_97@mail.ru*

**Аннотация.** В работе представлены результаты анализа разложения карт полного электронного содержания ионосферы при помощи нейронной сети глубокого обучения типа автокодировщик. Показано, что первая компонента пространственного разложения содержит данные об экваториальной ионосферной аномалии, а временные компоненты имеют циклические составляющие, близкие к периоду вращения Солнца, что согласуется с результатами предыдущих работ.

**Ключевые слова:** ионосфера; полное электронное содержание; карты ПЭС; солнечная активность; нейронные сети; автокодировщик; экваториальная аномалия

## THE ANALYSIS OF THE GLOBAL DYNAMICS OF TOTAL ELECTRON CONTENT FOR 23, 24 SOLAR CYCLES USING DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS ALGORITHMS

**A. M. Appalov, Y. S. Maslennikova, O. N. Sherstyukov**

**Abstract.** The results of the work present an analysis of the decomposition of the ionospheric total content map using a deep learning neural network of the autoencoder type. It is shown that the first component of the spatial decomposition contains data on the equatorial ionospheric anomaly, and the temporal components have cyclic components close to periods of sunlight, which is consistent with the results of previous works.

**Keywords:** ionosphere; full electronic content; PES cards; solar activity; neural networks; autoencoder; equatorial anomaly

### Введение

Анализ динамики ионосферы остается актуальной задачей современной радиофизики на протяжении последних десятилетий. Состояние ионосферы в значительной степени влияет на прохождение электромагнитных волн широкого диапазона частот и, как следствие, на функционирование многих радиотехнических устройств, таких как, например, глобальные спутниковые системы радионавигации. Важнейшим параметром для описания данного слоя Земли является полное электронное содержание (ПЭС).

Для расчета ПЭС используются данные о плотности электронов на различных высотах ионосферы. Плотность электронов может быть определена с помощью радиолокационных измерений, спутниковых наблюдений или наземных станций. Одним из распространенных методов является использование GNSS (Global Navigation Satellite System), который позволяет получать данные о фазах сигналов, проходящих через ионосферу [1].

Процесс вычисления ПЭС включает несколько этапов. Сначала измеряется задержка сигнала, вызванная прохождением через ионосферу. Эта задержка пропорциональна количеству электронов на пути сигнала. Затем, используя модель ионосферы, можно оценить распределение плотности электронов по высоте. Обычно ионосфера делится на несколько слоев, каждый из которых имеет свою характерную плотность.

Затем интегрируется плотность электронов по высоте от нижней границы ионосферы до верхней. Это позволяет получить общее количество электронов на единицу площади. Важно отметить, что ПЭС может варьироваться в зависимости от времени суток, солнечной активности и геомагнитных условий.

Существующие эмпирические модели ПЭС обеспечивают достаточную точность прогнозирования глобального распределения величин ПЭС в спокойных магнитных условиях [2]. Однако спонтанные всплески магнитной возмущенности вызывают резкое снижение качества прогноза. Во время магнитных бурь полярная шапка расширяется, авроральная зона и главный ионосферный провал сдвигаются в сторону низких широт, «горбы» экваториальной аномалии расходятся от экватора [3]. Однако внедрение современных математических методов исследования глобальных карт позволяет выловить большее число закономерностей, в том числе и нелинейных, и, как следствие, построить более точную модель прогнозирования.

Особой популярностью в последнее время пользуются нейронные сети. В работе [4] авторы улавливают аномалии на основе «сжатия» карт полного электронного содержания при помощи сетей типа автокодировщик, в статье [5] авторы реализуют алгоритм сжатия масштабных карт ПЭС при помощи сверточных нейронных сетей для анализа основных вариаций.

*Целью настоящей работы* является анализ пространственно-временной динамики ионосферы с использованием карт полного электронного содержания за 24-й, 25-й циклы солнечной активности при помощи нейронных сетей глубокого обучения.

*Решаемые задачи:*

1. Подготовка базы данных карт ПЭС, предварительная обработка карт.
2. Разложение карт ПЭС с использованием нейросетевых подходов на пространственные и временные составляющие.
3. Анализ пространственной и временной динамики полученных компонент разложения.

### **Предварительная обработка данных**

В данной работе были использованы глобальные карты ПЭС, полученные лабораторией JPL (NASA Jet Propulsion Laboratory), которая является одной из пяти ведущих аналитических лабораторий, обеспечивающих построение глобальных карт абсолютного вертикального значения ПЭС ионосферы путем интерполяции данных, получаемых на мировой сети приемников IGS. Прогностические модели, построение по таким картам ПЭС, являются наиболее приемлемым с практической точки зрения способом, позволяющим обеспечить потребителей информацией о пространственно-временном распределении ПЭС [6].

Карты ПЭС представлены в географической системе координат с пространственным диапазоном по долготе  $-180^\circ$  до  $180^\circ$  (с разрешением  $5^\circ$ ) и диапазоном по широте  $-87.5^\circ$  до  $87.5^\circ$  (с разрешением  $2.5^\circ$ ). Карты доступны на официальном сайте JPL в формате IONEX (Ionosphere Map Exchange) по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 часа. В настоящей работе были использованы карты ПЭС за период с 1 января 1999 по 31 декабря 2018 года.

Перед тем как проводить разложения, данные необходимо предварительно отфильтровать того, чтобы уменьшить влияние суточной и сезонных периодичностей, так как они будут вносить наибольший вклад в динамику первых компонент разложения ПЭС.

В работе [7] показано, что результат анализа главных компонент существенно зависит от методики предварительной обработки данных, используемой системы координат и методики центрирования данных. Следуя рекомендациям из [7], при анализе главных компонент были предварительно исключены доминирующие периодичности (суточная и сезонная), а также учтены особенности сферической системы координат, которая используется при построении карт ПЭС. При задании условия ортогональности базисных векторов необходимо учитывать, что значения ПЭС представлены в сферической системе координат в точках, равноотстоящих по широте и долготе. Таким образом, различным узлам координатной сетки соответствуют различные площади на земной поверхности. Применительно к данным ПЭС учет координатной сетки производится путем домножения каждого отсчёта  $X_{i,j}$  на величину  $\sqrt{\cos \phi_i}$ , где  $\phi_i$  – широта соответствующего узла сетки.

### Анализ разложения полного электронного содержания ионосферы при помощи нейронных сетей глубокого обучения

Как уже упоминалось выше, в задачах сжатия данных для анализа вариаций наиболее популярным методом в последнее время стало использование нейронной сети типа автокодировщик.

*Автокодировщик* – это тип нейронной сети, предназначенной для обучения компактного представления данных [8]. Он состоит из двух основных частей:

1) *кодировщик* (Encoder). Эта часть принимает входные данные и сжимает их в более низкоразмерное латентное пространство. Кодировщик учится извлекать важные признаки из данных, игнорируя шум и несущественную информацию.

2) *декодировщик* (Decoder). Декодировщик принимает латентное представление и восстанавливает исходные данные. Целью является минимизация различий между входными данными и восстановленными данными, что позволяет модели учиться на примерах.

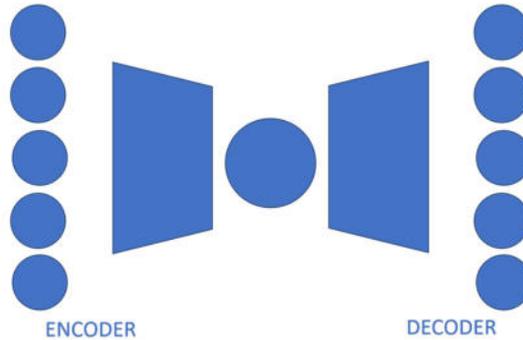


Рис. 1. Схематичное представление нейронной сети типа автокодировщик

Именно средний или так называемый *скрытый слой* (Latent layer) содержит в себе сжатое представление исходных данных (скрытое векторное пространство). Так как для взаимодействия между слоями используются нелинейные функции активации [9], то данные модели могут уловить большее количество вариационных паттернов.

В нашем случае была использована комбинация полносвязного слоя и нелинейной функции активации ReLU (Rectified Linear Unit) (1):

$$f(x) = \text{ReLU}(x) = \max(0, x), \quad (1)$$

На рисунке 2 представлены первые четыре пространственные компоненты разложения карт ПЭС, полученные из скрытого пространства нейронной сети типа автокодировщик. Пространственное распределение на первой компоненте показывает наличие сильной корреляции между точками, отстоящими друг от друга на широтах 20 градусов выше и ниже от экватора, которые соответствуют экваториальной аномалии.

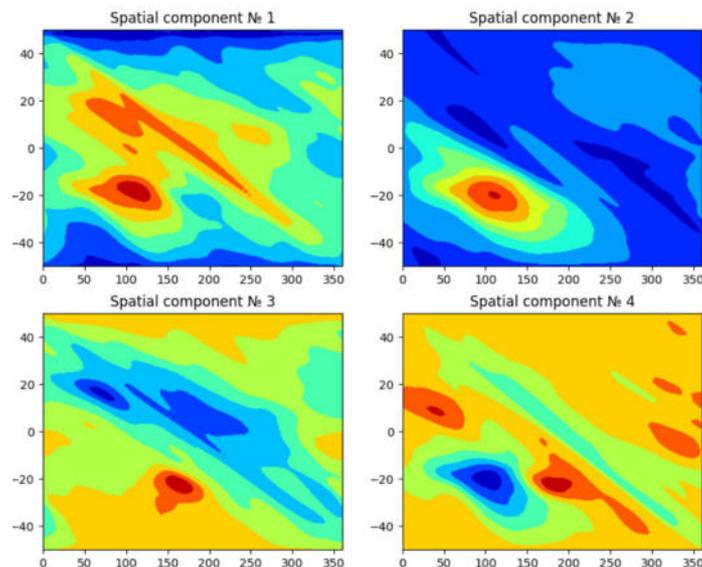


Рис. 2. Первые четыре пространственные компоненты разложения из скрытого представления нейронной сети карт ПЭС за период с 1999 по 2019 год

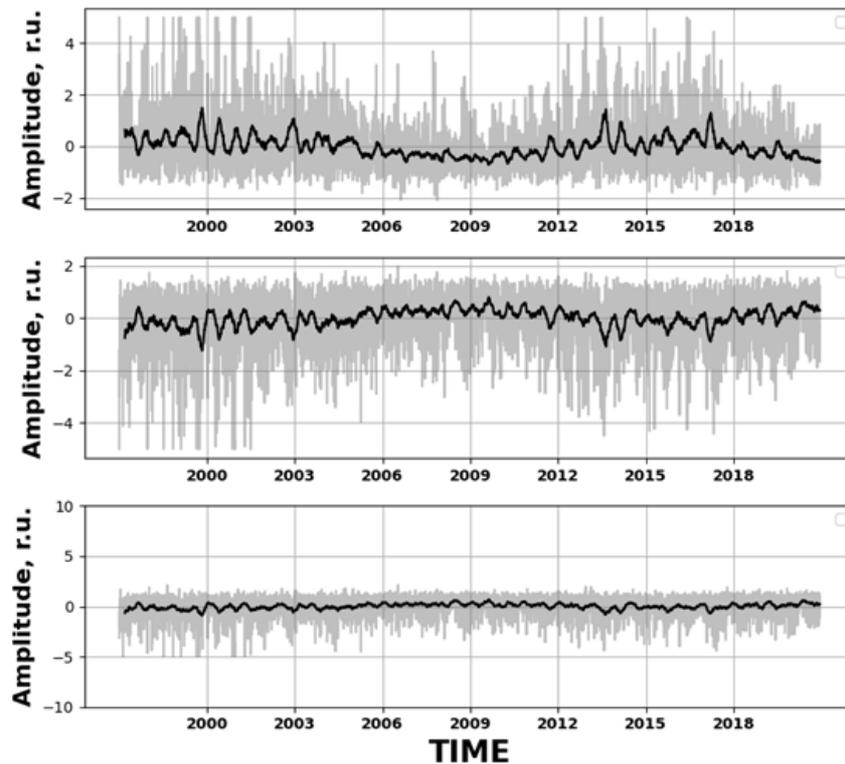


Рис. 3. Первые три временные компоненты разложения из скрытого представления нейронной сети карт ПЭС за период с 1999 по 2019 год

Временная динамика первой временной компоненты показала наличие циклических изменений с периодом  $\sim 27$  дней.

### Заключение

В работе представлены результаты проведенного анализа пространственно-временной динамики ионосферы с использованием карт полного электронного содержания за 23-й, 24-й циклы солнечной активности при помощи нейросетевого подхода.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии корреляции между точками, близкими к экватору, соответствующими экваториальной аномалии при рассмотрении первой пространственной компоненты разложения, а также о присутствии циклических изменений в период повышенной солнечной активности у первой компоненты временного разложения. Данные результаты согласуются с анализом, проводимым ранее и описанным в работе [10], в основу которого были положены классические линейные алгоритмы разложения.

### Список литературы

1. Пашинцев В. П., Ахмадеев Р. Р. Прогнозирование помехоустойчивости спутниковых радиосистем по данным GPS-мониторинга ионосферы // Электросвязь. – 2015. – № 11. – С. 58–65.
2. Tsagouri I., Koutroumbas K., Elias P. A new short-term forecasting model for the total electron content storm time disturbances // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2018. – No. 8. – Pp. 2–12. DOI: 10.1051/swsc/2018019.
3. Влияние солнечных вспышек на ионосферу Земли в 24-м цикле солнечной активности / С.В. Сыроватский, Ю.В. Ясюкевич, А.М. Веснин и др. // Ученые записки физического факультета МГУ. – 2018. – № 4. – С. 1840403
4. Ahmad Muhammad, Fatih Kùlahcı. A semi-supervised total electron content anomaly detection method using LSTM-auto-encoder // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2022. – Vol. 241. – Pp. 1364–6826, DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105979.
5. Khristoforov Stanislav, Bochkarev Vladimir. Model of the global distribution of the total electron content based on deep dense convolutional autoencoder // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1141, 012067, DOI 10.1088/1742-6596/1141/1/012067

6. JPL. – URL: <https://www.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 15.02.2023).
7. Maslennikova Yu. S., Bochkarev V. V. Principal Component Analysis of Global Maps of the Total Electronic Content // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2014. – Vol. 54(2). – Pp. 216–223. DOI: 10.1134/s0016793214020133.
8. Autoencoder for Words / Liou C.-Y., Cheng C.-W., Liou J.-W., Liou D.-R. // *Neurocomputing*. – 2014. – Vol. 139. – Pp. 84-96. DOI:10.1016/j.neucom.2013.09.055
9. Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on Image Net Classification / He Kaiming, Zhang Xiangyu, Ren Shaoqing, Sun Jian. 2015.
10. Аппалонов А.М., Масленникова Ю.С. Анализ глобальной динамики полного электронного содержания за 23-й и 24-й циклы солнечной активности с использованием метода главных компонент // *Радиотехника*. – 2023. – Т. 87, № 12. – С. 46–55. DOI: 10.18127/j00338486-202312-06

УДК 551.051

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ И ВЛАЖНОЙ КОМПОНЕНТ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ В РЕГИОНАХ РОССИИ

О. А. Королёва, Д. М. Караваяев, А. Н. Ефременко

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13  
E-mail: vka@mil.ru*

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования статистических характеристик основных компонент тропосферной задержки сигналов радионавигационных систем для различных регионов России. В качестве исходных использовался архив данных стандартных метеорологических измерений за период 2012-2021 гг. Выявлены особенности сезонной изменчивости компонент тропосферной задержки. Обсуждаются вопросы оценивания полной тропосферной задержки с применением уточненной модели тропосферной задержки и данных микроволновой радиометрии для задач радионавигации.

**Ключевые слова:** радионавигация; тропосферная задержка радиосигнала; гидростатическая задержка; влажная задержка; влагозапас атмосферы; микроволновый радиометр

## STATISTICS OF THE HYDROSTATIC AND WET TROPOSPHERIC DELAY IN REGIONS OF RUSSIA

O. A. Koroleva, D. M. Karavaev, A. N. Efremenko

**Abstract.** The results of the study of the statistical characteristics of the main components of the zenith tropospheric delay of radio navigation signals for various regions of Russia are presented. An archive of standard meteorological measurements for the period from 2012 to 2021 years was used as a starting point. Features of seasonal variability of tropospheric retention components are revealed. The problems of estimating the total tropospheric delay using a refined tropospheric delay model and microwave radiometry data for radio navigation tasks are discussed.

**Keywords:** radio navigation; tropospheric delay of signal; hydrostatic delay; wet delay; atmospheric water vapor; microwave radiometer

### Введение

Развитие технологии глобальной спутниковой радионавигации требует все более точного учета эффектов среды при распространении радионавигационных сигналов в тропосфере [1]. Влияние тропосферы обусловлено естественной изменчивостью метеорологических параметров атмосферы (давление, влажность, температура, водность облаков, осадки) вдоль трассы распространения радионавигационных сигналов. Возникает необходимость совершенствования методов тропосферной коррекции и моделей тропосферной задержки для территории России, исследование возможностей уменьшения погрешностей координатных определений за счет более строгого учёта эффектов в тропосфере.

Для решения проблемы актуально совершенствование методов моделирования тропосферной задержки, а также методов оперативного контроля параметров тропосферы и тропосферной задержки. В частности, перспективным представляется комплексный метод на основе объединения моделей тропосферной задержки и методов наземной микроволновой радиометрии для определения переменной влажной компоненты тропосферной задержки [1,2].

Целью работы является исследование статистических характеристик тропосферной задержки в регионах России для уточнения региональных моделей тропосферной задержки и разработки комплексных методов коррекции тропосферной задержки.

### Методология исследований тропосферной задержки

Известно, что полная тропосферная задержка определяется двумя основными компонентами [1,2]: гидростатической компонентой задержки ( $dL_d$ ) и влажной (обусловленной водяным паром) тропосферной задержки ( $dL_q$ ). Величина гидростатической компоненты в зенитном направлении оценивается из следующего выражения:

$$dL_d = 10^{-6} \int_{z=0}^{\infty} \left[ K_1 \frac{p_d(z)}{T(z)} \right] \cdot Z_d^{-1} dz, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент,  $K_1 = 76.607$  К/гПа;  $p_d(z)$  – давление «сухого» воздуха,  $p_d(z) = P(z) - e(z)$ ;  $P(z)$  – давление воздуха, гПа;  $T(z)$  – абсолютная температура воздуха, К;  $z$  – высота, км;  $Z_d^{-1}$  – корректирующий коэффициент.

Обусловленная водяным паром компонента тропосферной задержки в зенитном направлении определяется таким соотношением:

$$dL_q = 10^{-6} \int_{z=0}^{\infty} \left[ K_2 \frac{e(z)}{T(z)} + K_3 \frac{e(z)}{T^2(z)} \right] \cdot Z_q^{-1} dz, \quad (2)$$

где  $K_{2,3}$  – коэффициенты,  $K_2 = -6.007$  К/гПа,  $K_3 = 3.747 * 10^5$  К<sup>2</sup>/гПа;  $e(z)$  – парциальное давление водяного пара. Используя (1) и (2), возможно определить компоненты  $dL_d$  и  $dL_q$  и полную тропосферную задержку  $dL_{trop} = dL_d + dL_q$  безоблачной атмосферы по данным стандартных аэрологических наблюдений температуры, давления и влажности воздуха, которые проводятся на сети Росгидромета два раза в сутки в 00 и 12 GMT.

С другой стороны, тропосферная задержка может оцениваться по приближенным соотношениям на основе приземных измерений метеорологических величин и модели о вертикальном распределении метеопараметров. В общем виде такая региональная модель тропосферной задержки записывается в виде

$$dL_{trop} = dL_d(p_{d0}, T_0, h) + dL_q(e_0, T_0, h) + \delta, \quad (3)$$

где  $p_{d0}$  – давление «сухого» воздуха на высоте станции  $h$ ;  $e_0$ ,  $T_0$  – парциальное давление водяного пара, температура воздуха на высоте станции;  $\delta$  – погрешность модели.

### Обсуждение результатов моделирования тропосферной задержки

Для проведения статистических исследований гидростатической и влажной компонент тропосферной задержки для регионов России использовался специализированный массив данных ВНИИГМИ-МЦД «Массив срочных данных об основных метеорологических параметрах» [3]. Включенные в массив данные представляют собой срочные метеорологические наблюдения приземных значений температуры, давления, влажности воздуха, проводимые с интервалом в 3 часа. Период анализа данных – с 2012 по 2021 год.

Для примера в докладе обсуждаются результаты анализа основных компонент тропосферной задержки для трех станций наблюдений, расположенных в г. Уссурийске (координаты: 43 с.ш., 131 в.д.), г. Армавире (44 с.ш., 41 в.д.) и г. Воркуте (66 с.ш., 66 в.д.). Результаты статистических расчётов средних значений и средних квадратических отклонений

(СКО) гидростатической и влажной компонент тропосферной задержки для выбранных станций представлены ниже в таблицах 1 и 2 соответственно.

Гидростатическая компонента задержки составляет около 88-95 % величины полной тропосферной задержки, причем среднее значение слабо меняется от сезона к сезону, в то время как СКО имеет выраженный сезонный ход, который по-разному проявляется для разных станций. Вклад влажной компоненты тропосферной задержки хоть и значительно меньше вклада гидростатической компоненты, но сильно изменчив, что обусловлено особенностями климатического режима регионов. Для всех станций наибольшие вариации влажной компоненты отмечаются в теплый период, что обусловлено высоким влагосодержанием атмосферы и сильной синоптической изменчивостью влажности воздуха атмосферы.

В годовом цикле изменчивости тропосферной задержки основную роль играет изменчивость обусловленной водяным паром компоненты. Причем в теплый период это проявляется наиболее отчетливо: с одной стороны, уменьшаются синоптические вариации гидростатической компоненты; с другой стороны, увеличивается влагозапас атмосферы и его вариации как результат вариации влажной компоненты задержки.

Анализ обнаруживает отрицательную корреляцию  $dL_d$  и  $dL_q$  для выбранных станций. Коэффициент корреляции составляет -0.12 (г. Уссурйск), -0.453 (г. Армавир) и -0.623 (г. Воркута). Отрицательные коэффициенты корреляции, по всей видимости, обусловлены высокой повторяемостью циклонов в осенне-зимний период в регионах.

Таблица 1. Данные статистического анализа гидростатической компоненты

Месяц	г. Уссурйск		г. Армавир		г. Воркута	
	$d\bar{L}_d$	$\sigma$	$d\bar{L}_d$	$\sigma$	$d\bar{L}_d$	$\sigma$
Январь	2.3139	0.0127	2.2687	0.016	2.288	0.0355
Апрель	2.2886	0.0146	2.2625	0.0119	2.2761	0.0222
Июль	2.2766	0.0105	2.2519	0.0075	2.2788	0.0153
Октябрь	2.3033	0.0135	2.2721	0.0137	2.2789	0.0271

Таблица 2. Данные статистического анализа влажной компоненты тропосферной задержки

Месяц	г. Уссурйск		г. Армавир		г. Воркута	
	$d\bar{L}_q$	$\sigma$	$d\bar{L}_q$	$\sigma$	$d\bar{L}_q$	$\sigma$
Январь	0.1315	0.0062	0.1678	0.0138	0.1336	0.011
Апрель	0.1738	0.0177	0.1997	0.0230	0.1562	0.0127
Июль	0.3213	0.0326	0.2775	0.0267	0.2339	0.0292
Октябрь	0.1902	0.0308	0.2128	0.0245	0.1686	0.0165

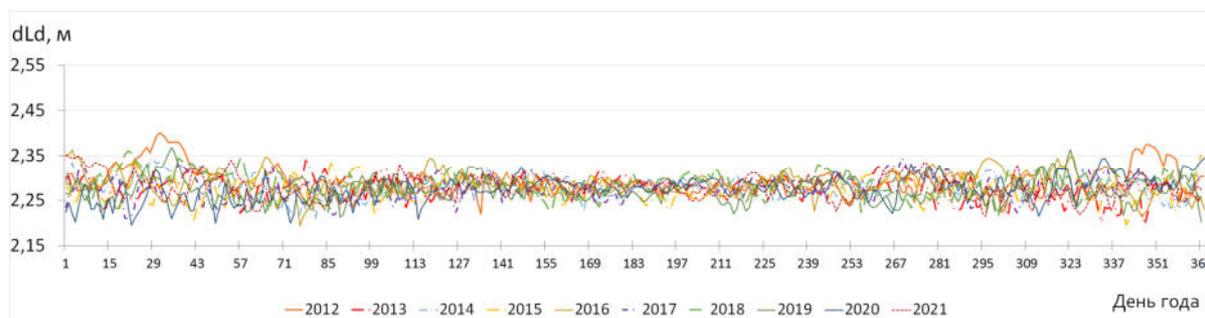


Рис. 1. Годовой ход гидростатической компоненты тропосферной задержки для г. Воркуты

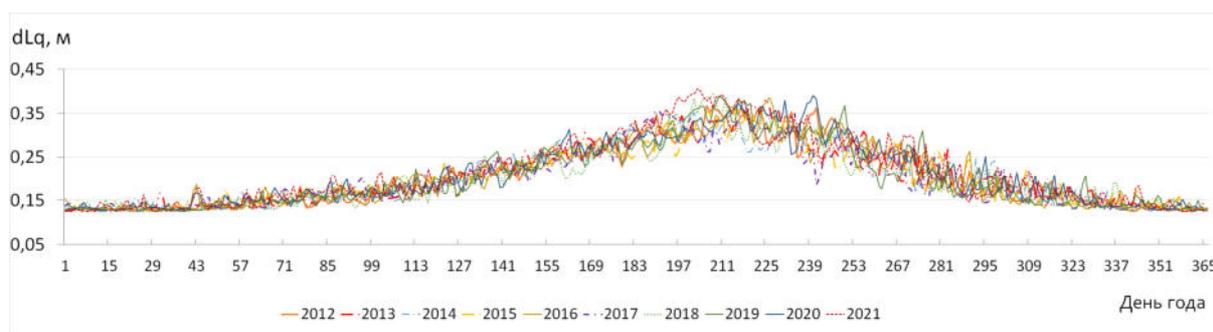


Рис. 2. Годовой ход влажной компоненты тропосферной задержки для г. Усурийска

Для примера на рисунке 1 приведены кривые годового хода гидростатической компоненты тропосферной задержки  $dL_d$  по станции г. Воркута за десять лет (с 2012 по 2021 г.). Здесь отчетливо выявляется годовой ход СКО гидростатической компоненты тропосферной задержки. На графике кривые за 10 лет сливаются в единую полосу годового хода, на которой для всех трёх станций прослеживается тенденция к уменьшению вариаций компоненты в теплое время года и, наоборот, увеличение амплитуды вариаций значений компоненты по отношению к холодному времени года, что подтверждается соответствующими значениями стандартного отклонения, приведенными в таблице 2.

На рисунке 2 приведены кривые годового хода влажной компоненты тропосферной задержки  $dL_q$  для г. Усурийска за 10 лет. На графике обнаруживается значительный рост значений влажной компоненты задержки в теплый период и увеличение амплитуды ее вариаций в июле (самый дождливый месяц для г. Усурийска). Данная закономерность проявляется для всех станций, что подтверждается статистическими данными из таблицы 2. Уменьшение значений регулярной составляющей влажной компоненты в холодный период года связано с уменьшением содержания водяного пара в атмосфере. Напротив, влажная компонента тропосферной задержки для г. Воркуты имеет меньшие значения на протяжении всего года, чем значения для г. Усурийска и г. Армавира (см. табл. 2), — это связано с расположением города в субарктическом регионе, где невысокие показатели влажности равномерно распределены на протяжении года. Наоборот, климат г. Усурийска относится к муссонному типу, наибольшие значения влажности наблюдаются в июле — отсюда высокое значение влажной компоненты задержки в июле (см. табл. 2).

Практическое использование в схемах тропосферной коррекции упрощенных моделей, основанных только на данных приземных метеорологических измерений температуры воздуха, атмосферного давления и парциального давления водяного пара, не позволяет обеспечить точную коррекцию необходимого уровня. Более точная коррекция может осуществляться при решении основной проблемы тропосферной коррекции, связанной с учетом вариаций влажной компоненты тропосферной задержки. Поэтому для более точной компенсации вариаций влажной тропосферной задержки преимущества заслуживает внимание метод микроволновой радиометрии. При таком подходе полная тропосферная задержка в зените определяется на основе комплексирования уточненной модели, данных приземных метеорологических параметров и микроволновых радиометрических измерений:

$$dL_{trop} = dL_d(p_{d0}, h) + dL_q(Q) + \delta'. \quad (4)$$

Для определения влагозапаса атмосферы ( $Q$ ) и влажной тропосферной задержки применяется метод микроволнового радиометрического зондирования атмосферы на частотах вблизи линии водяного пара 22.235 ГГц [1,2].

### Заключение

В докладе рассмотрены результаты исследования статистических характеристик основных компонент тропосферной задержки в различных регионах РФ на основе архива стандартной метеорологической информации за период 2012-2021 гг.

### Список литературы

1. Оценка обусловленной водяным паром тропосферной задержки радиоволн на основе модели и данных микроволновой радиометрии / И.А. Готюр, Д.М. Караваев, В.М. Краснов, Ю.В. Кулешов и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2017. – №3. – С. 223-230.
2. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. Коррекция модели оценивания тропосферной задержки радиосигналов по данным СВЧ-радиометрии // Распространение радиоволн: труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции (Йошкар-Ола, 16-19 мая 2023) в 2 т. – Йошкар Ола, 2023. – Т.2. – С. 409-411.
3. Специализированный массив данных ВНИИГМИ-МЦД «Массив срочных данных об основных метеорологических параметрах». URL: <http://meteo.ru/it/178-aisori>. (Дата обращения 15.06.2024).

УДК 550.388.2

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ КВ-РАДИОВОЛНАМИ O- И X-ПОЛЯРИЗАЦИИ

А. О. Мингалева, Н. Ф. Благовещенская, А. С. Калишин, И. М. Егоров, Г. А. Загорский

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета,  
199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38*

*E-mail: aomingaleva@aari.ru; nataly@aari.ru; askalishin@aari.ru; imegorov@aari.ru;  
gazagorskiy@aari.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в  $F$ -области высокоширотной ионосферы, вызванных контролируемой инъекцией мощных КВ-радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации. Результаты базируются на большом объеме экспериментов, выполненных в 2010–2024 гг. на КВ-нагревном стенде EISCAT / Heating вблизи г. Тромсё. Было выполнено сравнение характеристик МИИН при O- и X-нагревах. Обсуждается возможный механизм генерации МИИН при X-нагреве  $F$ -области высокоширотной ионосферы.

**Ключевые слова:** высокоширотная ионосфера; мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности; ракурсно-рассеянные сигналы; мониторинг; мощная КВ-радиоволна, поляризация

## COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF SMALL-SCALE ARTIFICIAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES IN THE HIGH-LATITUDE F-REGION OF THE IONOSPHERE INDUCED BY POWERFUL HF-RADIO WAVES OF O- AND X-MODE POLARIZATION

A. O. Mingaleva, N. F. Blagoveshchenskaya, A. S. Kalishin, I. M. Egorov, G. A. Zagorskiy

**Abstract.** The results of experimental studies of small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAI) in the  $F$ -region of the high-latitude ionosphere caused by the controlled injection of powerful HF radio waves of ordinary (O-mode) and extraordinary (X-mode) polarization are presented. The results are based on a large volume of experiments performed in 2010-2024 at the EISCAT / Heating facility placed near Tromsø, Norway. The characteristics of the O- and X-mode AFAI were compared. A possible mechanism for the generation of AFAI excited by the X-mode high-power HF radio wave in the  $F$ -region of the high-latitude ionosphere is discussed.

**Keywords:** high latitude ionosphere; small-scale artificial field-aligned irregularities; bi-static scattered signals; monitoring; powerful HF radio wave; polarization

### Введение

Одним из основных явлений, обнаруженных в ходе экспериментов по воздействию мощных КВ-радиоволн на ионосферную плазму, является создание искусственных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (МИИН). Для модификации верхней ионосферы ( $F$ -область)

традиционно используются мощные КВ-радиоволны обыкновенной поляризации (О-мода) на частотах нагрева  $f_H$ , ниже критической частоты слоя  $F2$  ( $f_H < foF2$ ). Это объясняется тем, что в соответствии с теоретическими представлениями мощная КВ-радиоволна необыкновенной поляризации (Х-мода) не может возбуждать искусственную ионосферную турбулентность в  $F$ -области [1]. Однако результаты многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на КВ-нагревном стенде EISCAT/Heating, убедительно продемонстрировали, что мощная КВ-радиоволна накачки необыкновенной поляризации (Х-мода) также способна возбуждать МИИН в  $F$ -области ионосферы [2-4].

В данной статье представлены результаты сравнительного анализа характеристик и поведения МИИН, вызванных КВ-радиоволнами высокой мощности О- и Х-поляризации.

Целью данной работы является обзор результатов дистанционного диагностирования поведения и анализ характеристик МИИН, генерируемых мощным КВ-радиоизлучением обыкновенной (О-моды) и необыкновенной (Х-моды) поляризации нагревного стенда EISCAT/Heating, возникающих в высокоширотной  $F$ -области ионосферы. Основное внимание уделяется результатам экспериментов, направленных на изучение характеристик МИИН при Х-нагреве и сравнение поведения и характеристик неоднородностей при О- и Х-поляризации мощной КВ-радиоволны.

### Характеристика экспериментов, используемых средств и методов

Для модификации высокоширотной  $F$ -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами использовался КВ-нагревной стенд EISCAT/Heating ( $69.6^\circ$  N,  $19.2^\circ$  E,  $L=6.2$ ,  $I=78^\circ$ ), расположенный вблизи г. Тромсе, Норвегия. Специалисты ААНИИ провели обширный цикл экспериментов по воздействию мощных КВ-радиоволн на  $F$ -область высокоширотной ионосферы в период с 2009 по 2024 год. Эксперименты проводились как на низких ( $f_H = 4.0\text{--}5.4$  МГц), так и высоких ( $f_H = 5.4\text{--}8.0$  МГц) частотах нагрева при спокойных магнитных условиях в дневные часы. Мощные КВ-радиоволны О- или Х-моды поляризации излучались в направлении магнитного поля ( $12^\circ$  от вертикали на юг) циклами: 10 мин – нагрев, 5 мин – пауза.

Для диагностики и изучения МИИН использовался когерентный КВ-радар CUTLASS (SUPERDARN), расположенный в Hankasalmi (Ханкасалми), Финляндия ( $62.3^\circ$  N,  $26.6^\circ$  E), приблизительно в 1000 км к югу от КВ-нагревного стенда.

Для дистанционной диагностики МИИН также использовался разработанный в ААНИИ и установленный на обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» под г. Санкт-Петербургом (на расстоянии 1140 км от нагревного стенда) многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, обеспечивающий регистрацию диагностических КВ-сигналов методом ракурсного рассеяния от ионосферных неоднородностей.

### Результаты наблюдений

Исследование МИИН в  $F$ -области высокоширотной ионосферы при Х-нагреве в диапазоне  $4.0\text{--}8.0$  МГц показало, что их образование возможно при спокойных магнитных условиях. При этом, в отличие от О-нагрева, возбуждение МИИН при Х-нагреве наблюдалось как на частотах ниже ( $f_H / foF2 \leq 1$ ), так и существенно выше ( $f_H / foF2 > 1$ ) критической частоты слоя  $F2$ .

На рисунке 1 приведены результаты наблюдений рассеянных на МИИН сигналов одновременно на нескольких частотах с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) 7 ноября 2010 года. Мощная КВ-радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте  $f_H = 4.544$  МГц циклами 10 мин – нагрев, 5 мин – пауза. Эффективная мощность излучения составляла  $P_{эфф} = 85$  МВт. На верхней панели (см. рис. 1) приведены усредненные в искусственно возмущенной области ионосферы мощности рассеянных на неоднородностях сигналов одновременно на трех частотах 10, 11.5 и 13 МГц, соответствующих обратному рассеянию от неоднородностей с поперечными к магнитному полю масштабами  $l_{\perp} = 15, 13$  и  $11.5$  м. Три нижние панели (см. рис. 1) характеризуют поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность – мировое время (UT) для тех же частот. К концу цикла О-нагрева (13:35 – 13:45 UT) генерация неоднородностей прекратилась. Это связано с тем, что частота нагрева  $f_H$  превысила  $foF2$  ( $f_H > foF2$ ). Далее значения  $foF2$  продолжали постепенно уменьшаться от 4.1 МГц в 13:45 UT до 3.1 МГц в 15:15 UT. В этот период времени нагрев производился на Х-поляризации волны накачки в условиях, когда частота нагрева 4.544 МГц существенно превышала значения  $foF2$ .

На рисунке 1 ясно видно, что в первом цикле X-нагрева (13:50 – 14:00 UT), т.е. при нагреве с холодного старта, МИИН появились через ~ 1 мин после начала цикла. Абсолютно неожиданным явился факт длительного времени релаксации неоднородностей после выключения стенда в 14 UT. На частотах 11.5 и 13 МГц обратное рассеяние от неоднородностей происходило в течение всей 5-минутной паузы между циклами нагрева. Это привело к тому, что к началу следующего цикла нагрева так же, как и в последующих циклах X-нагрева, неоднородности уже существовали, а в самом цикле происходило только возрастание их интенсивности. Анализ всего объема экспериментальных данных позволил установить, что на низких частотах нагрева ( $f_H = 4.0 - 5.4$  МГц) времена релаксации МИИН при X-нагреве существенно больше, чем на высоких частотах нагрева ( $f_H = 6.0 - 8.0$  МГц). Таким образом, при X-нагреве времена нарастания и релаксации неоднородностей существенно зависят от частоты и предыстории нагрева. Характеристики МИИН при O- и X-нагреве сведены в таблицу 1.

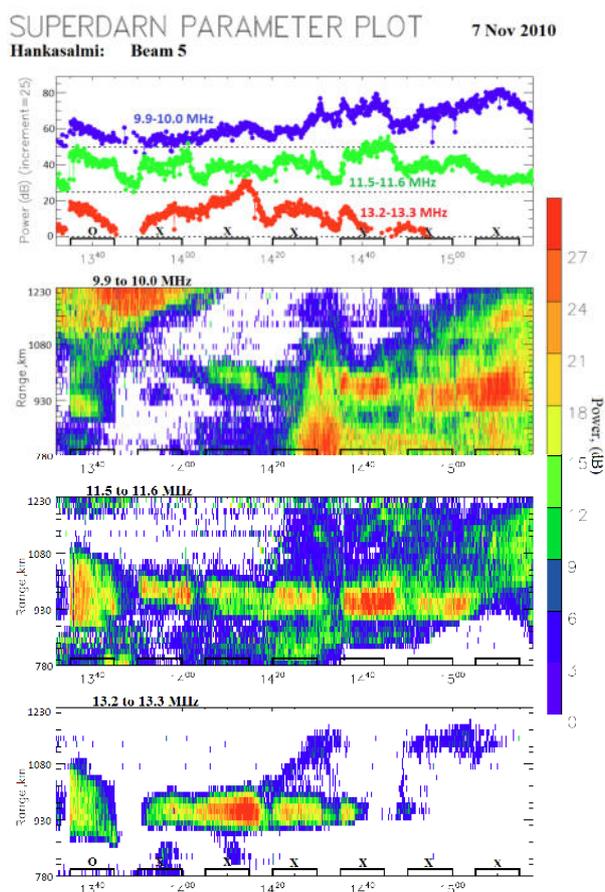


Рис. 1. Поведение МИИН по данным радара CUTLASS в Ханкасалми на частотах 10, 11.5 и 13 МГц 7 ноября 2010 г. при O/X-нагреве на частоте  $f_H = 4.544$  МГц

Таблица 1. Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при X- и O-нагревах F-области высокоширотной ионосферы

Характеристика	X-мода поляризации	O-мода поляризации
Условия возбуждения	$f_H \leq foF2; f_H > foF2$ (до 2 МГц)	$f_H \leq foF2$
Масштаб, $l_{\perp}$ , м	7.5 - 15	7.5 - 15
Время нарастания, с	12 – 120	3 - 9
Время релаксации, с	40 – более 300	12 - 30
Порог возбуждения на низкой частоте нагрева ( $f_H = 4.0$ МГц), МВт	60	8 - 10
Порог возбуждения на высокой частоте нагрева ( $f_H = 8.0$ МГц), МВт	150	26

На рисунке 2 приведены динамические доплеровские спектры диагностических КВ-сигналов на трассе Окичоби – Тромсе – Санкт-Петербург 11 марта 2024 года. Расстояние от Окичоби до Санкт-Петербурга по дуге большого круга составляет ~ 9000 км.

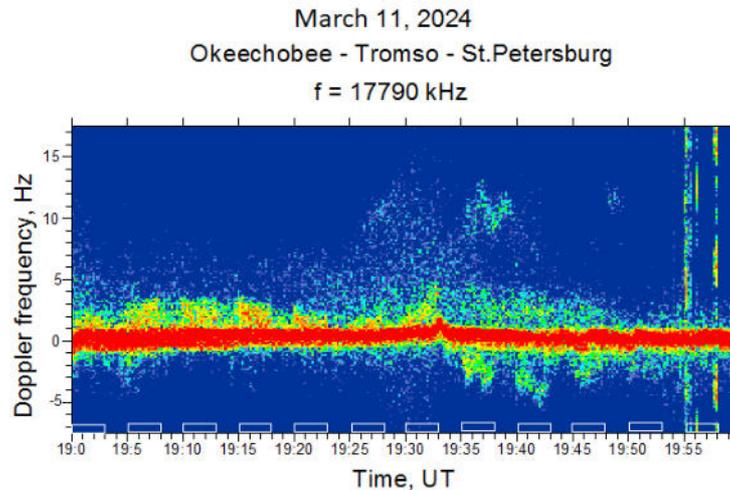


Рис. 2. Динамические доплеровские спектры диагностических КВ-сигналов, зарегистрированных на трассе Окичоби – Тромсе – Санкт-Петербург на частоте 17790 кГц 11 марта 2024 г. (Циклы нагрева отмечены на оси времени белыми прямоугольниками)

Механизм генерации МИИН при X-нагреве (как на частотах  $f_H \leq f_oF2$ , так и  $f_H > f_oF2$ ) не до конца ясен. Предполагается, что он происходит в два этапа: сначала образуются крупномасштабные неоднородности из-за самофокусирующей неустойчивости, а затем возбуждаются МИИН из-за градиентно-дрейфовой неустойчивости.

### Заключение

1. Показано, что МИИН при X-нагреве возбуждаются в регулярной ионосфере при спокойных условиях на частотах нагрева как ниже, так и существенно выше (до 2 МГц) критической частоты слоя  $F2$ , в то время как возбуждение МИИН при O-нагреве при эффективных мощностях излучения Рэфф < 250 МВт принципиально возможно только при  $f_H \leq f_oF2$ .
2. Выявлено, что времена нарастания и релаксации МИИН при X-нагреве существенно зависят от предыстории и частоты нагрева. МИИН, возбуждаемые при O- и X-нагревах, имеют существенно различные времена нарастания и релаксации, а также пороги возбуждения.
3. Установлено, что МИИН как при O-, так и X-нагреве, оказывают существенное влияние на распространение КВ-радиоволн на протяженных радиотрассах ( $D = 8 - 12$  тыс. км).

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>).

### Список литературы

1. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. – 2007. – Т.177, №11. – С.1145–1177.
2. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave / N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, T. Yeoman, M.T. Rietveld, I.M. Ivanova, L.J. Baddeley // Geophys. Res. Lett. – 2011. – Vol. 38. – L08802. doi:10.1029/2011GL046724.
3. Blagoveshchenskaya N. F. Perturbating the High-Latitude Upper Ionosphere ( $F$  Region) with Powerful HF Radio Waves: A 25-Year Collaboration with EISCAT // Radio Science Bulletin. – 2020. – № 373 (June 2020). – P. 40–55. doi:10.23919/URSIRSB.2020.9318436.
4. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T.K. Yeoman, I. Häggström, A.S. Kalishin // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2015. – Vol.135. – P. 50–63.

УДК 629.056.8

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU

Л. А. Никитина, Д. А. Когогин

Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, Республика Татарстан,  
г. Казань, ул. Кремлевская, д.18  
E-mail: lyuanikitina@kpfu.ru

**Аннотация.** В работе была проведена оценка точности расчёта местоположения навигационных спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU с помощью различных исходных данных и разработаны алгоритмы построения траекторий движения навигационных спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU, расчёта подыоносферных точек и прогнозирования траекторий движения спутников. Проведён сравнительный анализ двух форматов данных sp3 и tle и прогнозных траекторий движения спутников с их действительным перемещением.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы; ГНСС; ионосфера; эфемериды

## ESTIMATION OF ACCURACY IN FORECASTING GEOCENTRIC COORDINATES FOR NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS: GLONASS, GPS, GALILEO AND BEIDOU

L. A. Nikitina, D. A. Kogogin

**Abstract.** The work assessed the accuracy of calculating the positions of the navigation satellites GLONASS, GPS, GALILEO, and BEIDOU, using various data sources and developed algorithms for creating trajectories for these satellites, calculating ionospheric pierce points, and predicting their paths. A comparative analysis was performed between two data formats, sp3 and TLE, and predictive satellite trajectories were also calculated.

**Keywords:** global navigation satellite systems; navigation satellites; ephemerides; comparative analysis; sp3, tle

### Введение

Данная работа посвящена оценке точности расчёта местоположения навигационных спутников с помощью различных исходных данных. Было необходимо решить следующие задачи:

1) разработать алгоритм построения траектории движения спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU и прогнозирования траектории движения спутника;

2) провести сравнительный анализ двух форматов данных, в которых хранятся координаты траектории движения спутников и информация об их орбите; данных, публикуемых в различных источниках; прогнозных траекторий движения спутников с их действительным перемещением.

На данный момент существует четыре глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), обеспечивающие полное покрытие земного шара и бесперебойную работу: ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou [1, 2].

### Сравнительный анализ двух форматов данных sp3 и tle

Для проведения сравнительного анализа двух форматов данных sp3 и tle были выбраны 37 дней в 2023 году (каждые 1, 10 и 20 числа месяца + 30 декабря). Блок-схему расчёта можно увидеть на рисунке 1.

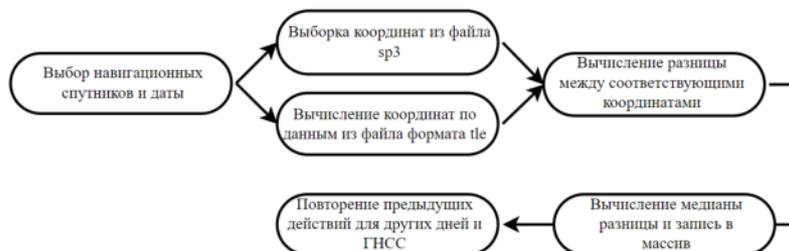


Рис. 1. Блок-схема расчёта координат навигационных спутников по двум форматам: sp3 и tle и их сравнения

Первый этап заключается в выборе даты и спутников, для которых осуществляется сравнение. Далее реализуется выборка из файла *sp3* координат космических аппаратов и вычисление второго набора координат по параметрам орбиты, записанных в файле *tle*. Следующий шаг – расчёт разницы между координатами каждого спутника. Затем вычисляется медиана разницы по всем спутникам и полученное значение записывается в массив. Предыдущие действия повторяются для других дней и ГНСС.

После проведения всех расчётов по полученным результатам построен график зависимости медианы разницы геоцентрических координат *x*, *y*, *z* *sp3* и *tle* от даты (рис. 2).

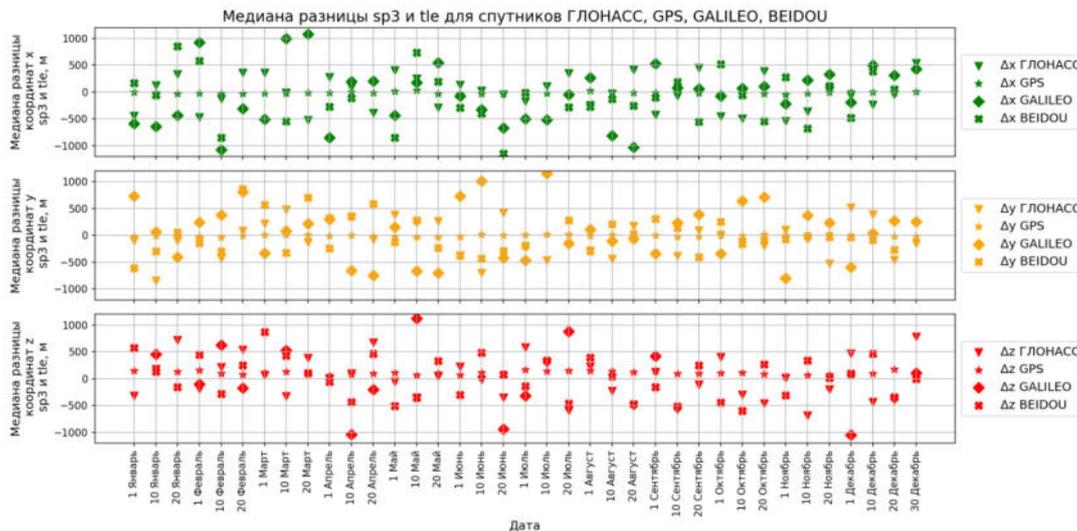


Рис. 2. Изменение за 2023 год медианы разницы координат *x* (зелёные маркеры), *y* (оранжевые маркеры), *z* (красные маркеры), рассчитанных по файлам *sp3* и *tle* для четырёх ГНСС ГЛОНАСС (треугольник), GPS (звезда), GALILEO (ромб), BEIDOU (крест)

### Сравнение точных эфемерид *sp3*, предоставляемых различными источниками

Точные координаты навигационных спутников фиксируют многие организации, такие как ГЛОНАСС (IGS), NASA, ESA (IAC), SOPAC. Каждая организация по-разному рассчитывает координаты спутников, поэтому было принято решение сравнить эфемериды, публикуемые в разных источниках. За эталон были выбраны координаты из ГЛОНАСС.

Сравнение проводилось по следующему алгоритму:

- 1) выборка эфемерид из файлов формата *sp3* разных источников;
- 2) вычисление разницы между координатами *x*, *y*, *z* IGS и IAC(SOPAC);
- 3) построение графика зависимости разницы между координатами от времени суток.

На примере одного спутника ГЛОНАСС показано, как меняются в течение суток разницы между координатами *x*, *y*, *z*.

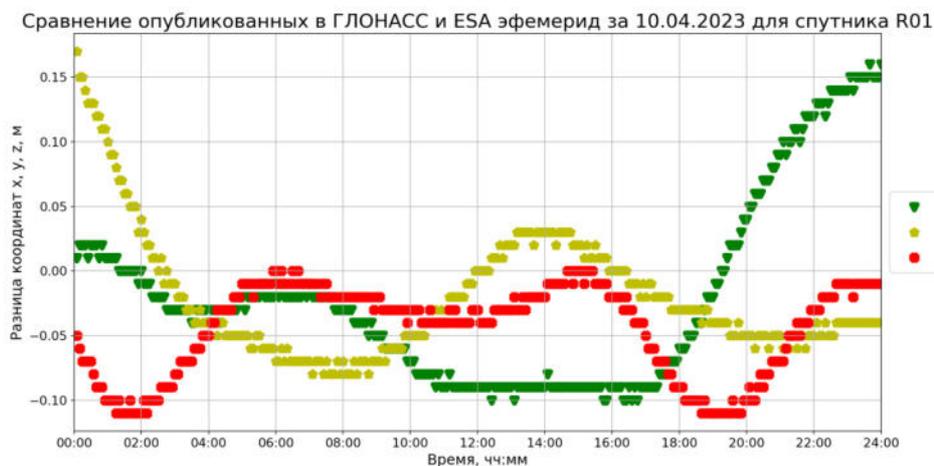


Рис. 3. График зависимости разницы координат *x*, *y*, *z* ГЛОНАСС и ESA за 10 апреля 2023 года для спутника R01

### Прогнозирование местоположения спутников

Прогнозирование положения спутников на орбите осуществляется с использованием файлов формата tle по блок-схеме, представленной на рисунке 3.



Рис. 4. Блок-схема прогнозирования положения спутников на орбите

Первый шаг в прогнозировании – это выбор спутников, для которых будет совершён прогноз, и даты, на которую реализуется прогноз (в работе в качестве примера выбрана дата 1 апреля 2024 года); вычисление прогнозных координат по параметрам орбиты, хранящимся в файле формата tle; запись полученных данных в массив; повторение указанных выше действий каждый день до выбранной даты в течение месяца.

Следующий шаг после наступления исследуемой даты – сравнение местоположений спутника. Оно заключается в вычислении медианы разницы прогнозных и точных координат. В работе используется два набора точных координат: финальные эфемериды sr3 и координаты, вычисленные по файлам tle, после 1 апреля.

Завершающий этап заключается в построении представленного на рисунке 4 графика зависимости медианы разницы прогнозных и точных координат x, y, z от даты для спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU.

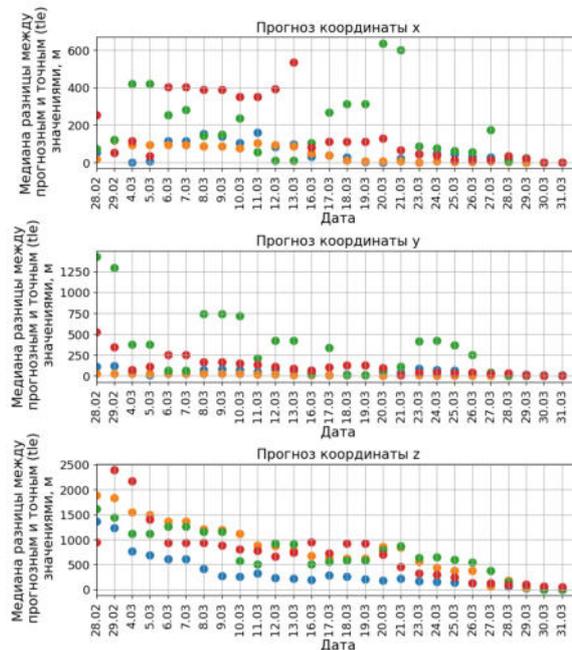


Рис. 5. Графики зависимости медианы разницы прогнозных и точных координат x, y, z навигационных спутников ГЛОНАСС (синий цвет маркера), GPS (оранжевый), GALILEO (зелёный), BEIDOU (красный) за 1 апреля 2024 года.

### Скорость подыоносферных точек

Скорость  $v$  подыоносферных точек рассчитывается следующим образом [3]:

$$v = \frac{d \cdot R_3}{t},$$
  $R_3$  – радиус Земли;  $t$  – время между двумя отсчётами;  $d$  – расстояние между соседними точками 1 и 2;

$$d = \arccos(\sin \phi_{p_2} * \sin \phi_{p_1} + \cos \phi_{p_2} * \cos \phi_{p_1} * \cos(l_{p_2} - l_{p_1})).$$

На рисунке 6 представлена суточная зависимость скорости навигационного спутника ГЛОНАСС R01 от времени суток.

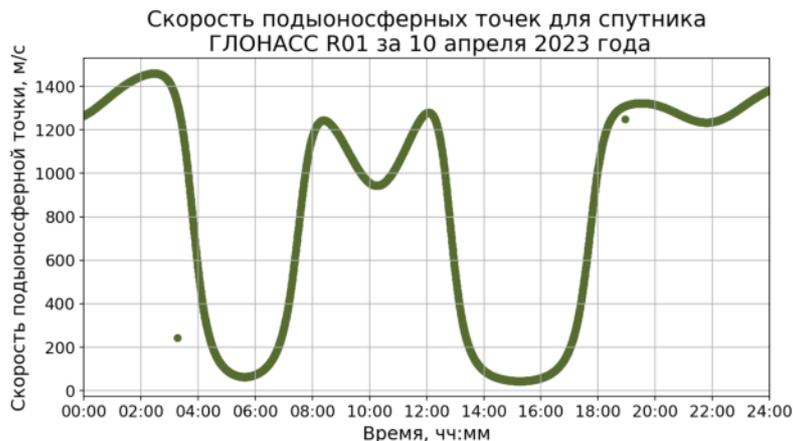


Рис. 6. График изменения скорости подыоносферной точки в течение суток для спутника ГЛОНАСС R01 за 10 апреля 2023 года

### Заключение

Проведена оценка точности расчёта местоположения навигационных спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU с помощью различных исходных данных и разработаны алгоритмы построения траекторий движения этих спутников, расчёта подыоносферных точек и прогнозирования траекторий движения спутников. Выполнен сравнительный анализ двух форматов данных sp3 и tle и прогнозных траекторий движения спутников с их действительным перемещением.

По полученным в ходе исследования результатам можно сделать следующие выводы:

1) Координаты навигационных спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU, рассчитанные по хранящимся в файле формата tle параметрам орбиты, отличаются от точных эфемерид формата sp3. Например, за 2023 год СКО по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  составили:

для GPS: по  $x \approx 17,1$  м, по  $y \approx 17,5$  м, по  $z \approx 32,7$  м;

для ГЛОНАСС: по  $x \approx 319,6$  м, по  $y \approx 337,6$  м, по  $z \approx 392,5$  м;

для GALILEO: по  $x \approx 535,3$  м, по  $y \approx 510,1$  м, по  $z \approx 1778,2$  м;

для BEIDOU: по  $x \approx 965,4$  м, по  $y \approx 554,6$  м, по  $z \approx 372,5$  м.

2) По результатам сравнения точных эфемерид sp3, предоставляемых различными источниками, можно заключить, что центры ГЛОНАСС, ESA, SOPAC определяют местоположения спутников с небольшими отличиями в несколько сантиметров, СКО для геоцентрических координат не превышает 10 см.

3) Прогнозировать траекторию навигационных спутников с высокой точностью, используя формат tle, можно за 7-10 дней до интересующей даты. На основании полученных результатов положения спутников для системы GPS за 10 дней будут иметь расхождения по  $x$  менее 50 м, по  $y$  – менее 100 м, по  $z$  – менее 500 м; для ГЛОНАСС по  $x < 200$  м,  $y < 1300$  м,  $z < 3400$  м; для GALILEO по  $x < 2000$  м,  $y < 1800$  м,  $z < 4000$  м; для BEIDOU по  $x < 1200$  м,  $y < 50$  м,  $z < 1000$  м.

4) Скорость подыоносферных точек при низких углах возвышения достигает значений, превышающих 1400 м/с, и при высоких углах возвышения – менее 50 м/с.

### Финансирование

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10029.

### Список литературы

1. О глобальных навигационных спутниках и ионосфере // Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. – URL: <https://glonass-iac.ru/>.
2. Куприянов А.О. Глобальные навигационные спутниковые системы. – Москва: МИИГАиК, 2017. – 76 с.
3. Перевалова Н.П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS зондирования: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29. – Иркутск, 2014. – С. 286.

УДК 550.388.2

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛИТОСФЕРНО–ИОНОСФЕРНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ

М. А. Титова<sup>1</sup>, В. И. Захаров<sup>2</sup>, С. А. Пулинец<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
РАН, 108840, г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, 119991, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, 117997, г. Москва, Россия  
e-mail: marititova@yandex.ru

**Аннотация.** Используемый методологический подход к обработке спутниковых данных позволил выделить вероятные литосферные источники в качестве проявления их влияния на ионосферу во время сейсмических событий, напрямую не связанных с гелио- и геомагнитной активностью. В выбранном регионе был проведен комплексный анализ данных наземных станций, интегрированных в международные сети IGS и UNAVCO. Всего для анализа нами использовались данные 123 наземных приемных станций. Обширная статистика пространственно-временных измерений, свыше 10 млн отсчетов фазы было обработано. Для достоверного геофизического анализа были использованы данные обновленной цифровой модели границ литосферных плит.

**Ключевые слова:** навигационная система, фаза, ионосфера, полное электронное содержание

## THE TECHNIQUE OF PROCESSING OF RADIOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL INFORMATION ABOUT CONDITIONS OF SATELLITE RADIO SIGNAL PROPAGATION FOR STUDYING LITHOSPHERIC–IONOSPHERIC MANIFESTATIONS

M. A. Titova, V. I. Zakharov, S. A. Pulinets

The using methodological approach to the processing of satellite data made it possible to identify probable lithospheric sources as a manifestation of their influence on the ionosphere during seismic events, these not directly related to helio- and geomagnetic activity. The complex analysis of the ground-based stations data integrated into the international IGS and UNAVCO networks was carried out in the selected region. Overall we used data of 123 receiving stations. Extensive spatial-time measurements statistics of more than 10 million phase data were processed. The data of an updated digital model of the lithospheric plate boundaries were employed by reliable geophysical analysis.

**Keywords:** navigation system, phase, ionosphere, the total electron content, earthquake

### Введение

Возникновение структурных ионосферных аномалий и влияние неоднородностей ионосферы на распространение радиоволн образуют единство важной и актуальной проблемы для изучения, поскольку они имеют научное и практическое значение в области физики верхних слоев атмосферы и радиофизики. Кроме того, данные ГНСС всегда представляют значительный объем информации, которую необходимо обработать, прежде чем можно будет обеспечить интерпретацию. Часто это необходимо сделать быстро, поскольку ГНСС данные используются во многих направлениях. Например, в передаче поправок для высокоточной навигации, предоставление в реальном времени данных в систему оповещения о безопасности самолетовождения. Поэтому нужен надежный способ, позволяющий эффективно и быстро обрабатывать большой объем спутниковых данных.

Целью работы является оперативное и структурированное исследование литосферно-атмосферных-ионосферных-магнитосферных проявлений, а именно ионосферных неоднородностей при последовательном использовании известных дифференцированных методов обработки данных спутниковых радиосигналов.

### **Метод выделения ионосферной составляющей из радиофизических измерений сигналов на сети приемников системы GPS**

Обычно рефракцию в ионосфере учитывают с помощью метода измерения полного электронного содержания – ПЭС (*англ.* total electron content – TEC), вдоль пути распространения от спутника до приемника на двух когерентных рабочих частотах  $f_1=1575.42$  МГц,  $f_2=1227.60$  МГц [1–3]. Информация об измерениях представлена в публичном доступе, в стандартном формате RINEX, с временным разрешением данных 30 секунд. Погрешность в определении вариаций ПЭС от фазовых измерений составляет менее 0.1% относительно фоновой концентрации [4].

### **Методы GPS интерферометрии и кластерного анализа для исследования ионосферы**

Определить направление и скорость перемещения ионосферных неоднородностей помогает способ приема радиосигнала в нескольких разнесенных точках пространства. Такая конфигурация, состоящая из трех приемников, получила название GPS-интерферометр. Практичное расположение станции такого интерферометра соответствует направлениям север – юг, запад – восток. Расстояния между станциями должны быть менее 50–100 км [1], что позволяет использовать приближение плоского фронта волнового возмущения при обработке данных.

В данной работе при помощи кластерного анализа [5] осуществляется классификация тождественных неоднородных структур ионосферы. В качестве параметров для кластерного анализа выбраны четыре признака: первые два – географические координаты, третий – направление движения неоднородной структуры и четвертый – время наблюдения структуры ячейками сети, подробнее см. [6]. Общеизвестное действие итеративного алгоритма  $k$ -средних следующее: он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров, сама кластеризация происходит за счет смещения этих центров [9].

### **Выбор расчетного периода мониторинга для рассматриваемого сейсмического события**

Землетрясения, как правило, не бывают единичными, они группируются в пространстве и времени. Энергия перемещается в среде вместе с возмущением, что учитывается при выборе расчетного периода наблюдений. Сейсмическая энергия землетрясения может быть измерена непосредственно по скоростным сейсмограммам и преобразована в магнитуду  $M$  по шкале моментной величины, определенной Канамогі [1977]. Серия форшоков, которая предшествует основному толчку, а затем зарегистрированные афтершоки после основного толчка оконтуривают очаговую область пространства, определяют выбор периода мониторинга значимых событий [7].

### **Геофизический анализ**

Результаты, полученные после использования методов GPS-интерферометрии, кластерного анализа, требуют качественной и количественной систематизации для понимания их геофизической сути. Для этого был осуществлен геофизический анализ с применением обновленной цифровой модели границ литосферных плит [8]. Произведя географическую привязку полученных кластерным анализом волновых структур к топографической карте местности, следующим необходимым шагом стало вычисление минимальных горизонтальных расстояний между выделенными ионосферными неоднородностями (взятых в проекции на поверхность Земли) и границами литосферных плит.

В цифровом формате обновленной модели границ литосферных плит и орогенов данные содержатся в виде последовательности дискретных точек, расстояния между соседними точками не длиннее 111 км ( $1^\circ$ ), ошибка округления в месторасположениях не превышает  $\pm 60$  м [8]. Учитывая изложенное, интервал дальности между проекцией выделенной ионосферной структуры на поверхность Земли и ближайшими к ней границей литосферной плиты или орогенами задается меньше либо равным  $1^\circ$  в заданном азимуте, в  $k$  непересекающихся полосах одинаковой площади [10].

### **Статистический анализ**

Статистический анализ позволяет дать количественную и качественную итоговые оценки для выделенных неоднородных структур как отклика в ионосфере на сейсмическую активность в регионе. Получив в ходе геофизического анализа расстояния между выделенными в

ионосфере неоднородными структурами и ближайшими к ним литосферными границами или орогенами, имеет значение рассмотреть их распределение относительно конкретных границ соприкосновения литосферных плит, например, Карибской и Кокос и др. [8].

### Основные результаты

Применение дифференцированного подхода к специальным методам и программным алгоритмам обработки радиотехнической и геофизической информации об условиях распространения спутниковых радиосигналов делает методику в целом гибкой и универсальной, способной оперативно адаптироваться для необходимых целей исследования. Последовательно используемые методы GPS-интерферометрия, кластерный анализ, геофизический анализ и статистический анализ позволяют выделять и изучать неоднородные структуры реакции ионосферы на сейсмическую активность в регионе.

Распределение по ориентированию границ литосферных плит, горизонтальной удаленности каждой неоднородной структуры от литосферной границы или орогена удобно представить совместно на круговой диаграмме, применяя для этого полярные координаты, как представлено на рисунке 1 а, б. Круговые диаграммы содержат равные секторы для двух случаев мониторинга. Число секторов зависит от количества литосферных границ плит в выбранном регионе. Каждой границе соприкосновения литосферных плит соответствует определенный сектор на диаграмме. Единица измерения полярного угла принимается по аналогии с военной сферой, представляет собой долю радиана (0.07 рад или  $4.01^\circ$ ) с таким расчетом, чтобы каждый сектор состоял из равных частей, цена деления составляет десятые доли километра внутри каждого сектора. Например, в секторе Карибской и Северо-Американской (CA-NA) плит возьмем радиус-вектор 60 км, он соответствует нулевому повороту, один поворот на 0.07 рад соответствует 60.1 км и так до 60.9 км. Аналогично во всех секторах. Это позволяет наглядно представить плотность распределения удаленности выделенных неоднородных структур от границ литосферных плит, выражаясь военной терминологией – кучность, что, в свою очередь, дает количественную оценку удаленности расположения неоднородных структур относительно всех литосферных границ. Иными словами, данное представление статистических результатов делает наглядно понятным, на какое расстояние приходится наибольшее количество выделенных структур по всем секторам в целом.

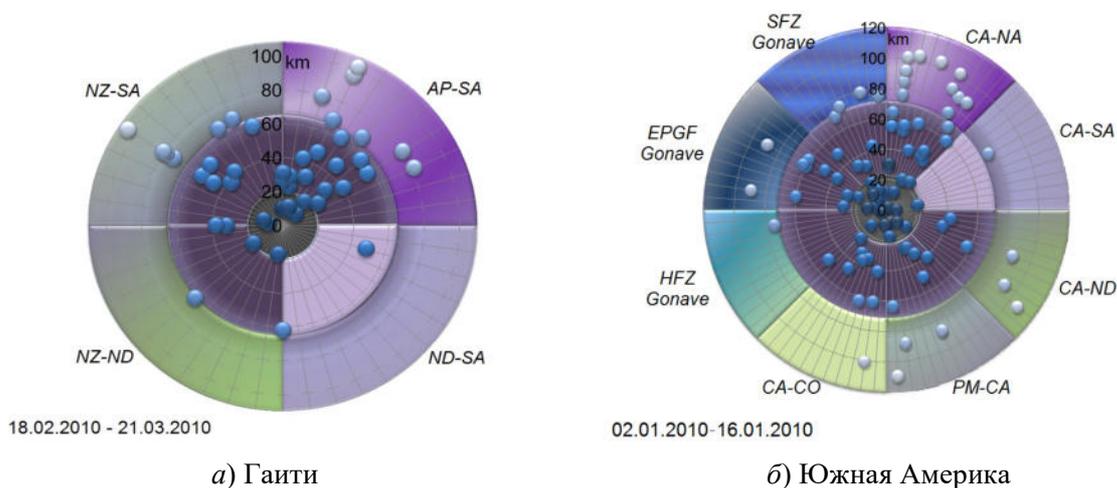


Рис. 1. Распределение расстояний между неоднородными структурами ионосферы, детектированными за весь период мониторинга, и ближайшими к ним границами литосферных плит (дифференцированными цветами, охватывающими на диаграмме  $2\pi$  радиан, демонстрируются расстояния, на которые приходится различная плотность – «кучность» выделенных структур по всем секторам в целом)

Устойчиво выделились три области расстояний, по которым распределяются неоднородные структуры ионосферы: от менее 1 до 20 км; от 20 до 70 км; от 70 до 110 км. Наибольшая локализация неоднородных ионосферных структур от границ литосферных плит – в интервале

расстояний от 20 до 70 км. В случае землетрясения на Гаити на этот интервал расстояний пришлось 55 % неоднородных ионосферных структур за весь период мониторинга в целом. В случае землетрясений в Южной Америке на этот интервал расстояний пришлось 67 % неоднородных ионосферных структур за весь период мониторинга. Угол распространения возбуждаемой акустической волны от вероятных литосферных источников имеет значения  $\sim 73^\circ$ - $89^\circ$ .

### Выводы

На обширном объеме данных было проведено исследование для крупных землетрясений, произошедших в начале 2010 года. Последовательно примененные в работе известные пространственно-временные методы обработки данных позволили выделить неоднородные структуры отклика в ионосфере на сейсмическую активность в регионах. Над сейсмически активными районами происходят интенсивные изменения параметров ионосферы, относительно показателей их регулярной изменчивости, не только во время основного события, но также в период подготовки землетрясений и после его активной фазы. Причем источником неоднородных структур является не только будущий эпицентр, но и вся область подготовки землетрясения, например, активный разлом.

Установлено, что часть волновых возмущений, проявившаяся на ионосферных высотах, связана с влиянием морфометрических признаков рельефа (орографией).

Применение дифференцированного подхода к специальным методам и программным алгоритмам обработки радиотехнической и геофизической информации об условиях распространения спутниковых радиосигналов, делает методику в целом гибкой и универсальной, способной оперативно адаптироваться для необходимых целей исследования.

### Список литературы

1. Афраимович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: Изд-во ГУНЦ ВВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
2. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. GPS Theory and practice. – Wien; New York: Springer-Verlag, 1997. – 389 p.
3. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network / X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C.M. Ho // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – Vol. 24, no. 18. – P. 2283–2286.
4. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. – Москва: Наука, 2007. – 335 с.
5. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ / ред. А. Я. Боярский. – Москва: Статистика, 1977. – 128 с.
6. Захаров В. И., Будников П. А. Использование кластерного анализа для обработки данных GPS-интерферометрии // *Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия.* – 2012. – № 1. – С. 26–32.
7. Лютиков А. И., Родина С. Н. Временные и энергетические характеристики афтершокового процесса на примере Курило-Камчатских землетрясений // *Геофизические исследования.* – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 23–35.
8. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // *Geochemistry Geophysics Geosystems.* – 2003. – Vol. 4, no. 3. – P. 1027. DOI: 10.1029/2001GC000252.
9. Coates A., Ng A. Y. (2012) Learning Feature Representations with K-Means. In: Montavon G., Orr G.B., Müller KR. (eds) *Neural Networks: Tricks of the Trade. Lecture Notes in Computer Science.* V. 7700. Springer. Berlin. Heidelberg. 2012. P.561-580. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35289-8_30)
10. Титова М. А., Захаров В. И., Пулинец С. А. Интерпретация ионосферных возмущений в период крупного землетрясения при дифференцированном использовании специальных методов обработки спутниковых радиосигналов // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2022. – Т. 62, № 6. – С. 797–816. DOI: 10.31857/S0016794022060153.

УДК 621.396.67

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО НАКОПЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

И. Ю. Холодов, М. А. Матюков

*Муромский институт ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», 602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д. 23*

*E-mail: johncold511@gmail.com*

*E-mail: maks.matyukov@mail.ru*

**Аннотация.** В работе приведены результаты цифрового накопления выходных сигналов 4-диапазонной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы. Рассмотрена взаимосвязь чувствительности СВЧ радиометрической системы зондирования атмосферы с временем накопления ее выходных сигналов. Определены задачи выбора величины времени накопления выходных сигналов. Приведены результаты применения цифрового накопления данных СВЧ радиометрической системы за 08.09.2023 и 11.09.2023. Показаны результаты корреляционного анализа результатов измерений и метеопараметров пограничного слоя атмосферы при разных периодах накопления выходных сигналов и определены условия их оптимизации.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование атмосферы; СВЧ радиометрическая система; чувствительность; время накопления выходных сигналов; цифровое накопление выходных сигналов.

## IMPLEMENTATION OF DIGITAL ACCUMULATION OF MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM OUTPUT SIGNALS

I. Yu. Kholodov, M. A. Matyukov

**Abstract.** The article presents the results of digital accumulation of output signals of a 4-band microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere. The relationship between the sensitivity of the microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere and the accumulation time of its output signals is considered. The tasks of selecting the value of the accumulation time of output signals are defined. The results of the application of digital data accumulation of the microwave radiometric system for 08.09.2023 and 11.09.2023 are presented. The results of the correlation analysis of the measurement results and meteorological parameters of the atmospheric boundary layer at different periods of accumulation of output signals are presented and the conditions for their optimization are determined.

**Keywords:** remote sensing of the atmosphere; microwave radiometric system; sensitivity; time of accumulation of output signals; digital accumulation of output signals.

### Введение

Микроволновая радиометрия является средством пассивного дистанционного зондирования атмосферы и оценки ее метеопараметров (таких как температура, относительная влажность воздуха, влаго- и водосодержание, интенсивность осадков) по результатам измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы, являющегося результатом теплового движения заряженных частиц [1-3]. Величина мощности радиощумового сигнала, создаваемого исследуемой областью пространства, имеет существенно малые значения, поэтому одной из основных задач построения СВЧ радиометрических систем является выделение измеренного шумового сигнала на фоне собственных шумов системы, что характеризуется чувствительностью системы [4]. Величина чувствительности зависит от полосы частот входного высокочастотного фильтра и от постоянной времени интегрирования выходного низкочастотного фильтра системы.

Переход к цифровым методам измерения с формированием выходных сигналов в цифровом виде расширяет возможности повышения чувствительности СВЧ радиометрических систем путем изменения объема выборки исходных отсчетов выходного сигнала при выполнении их суммирования для получения накопленного выходного сигнала. Однако при использовании данного метода необходимо решить вопрос о величине времени накопления. При этом задача может быть сформулирована как нахождение времени накопления, при котором выходной сигнал системы наиболее точно отражает тенденцию изменения метеопараметров пограничного слоя атмосферы.

В данной работе рассматривается вопрос оценки оптимальности времени накопления выходных сигналов 4-диапазонной СВЧ радиометрической системы по величине коэффициента корреляции выходных сигналов системы и метеопараметров пограничного слоя атмосферы – температуры и относительной влажности воздуха.

### Исходные данные для реализации цифрового накопления выходного сигнала СВЧ радиометрической системы

Метод цифрового накопления выходных сигналов для решения задачи повышения чувствительности был реализован в СВЧ радиометрической системе зондирования атмосферы, обеспечивающей прием радишумового излучения на длинах волн 7,5 см, 3,2 см, 1,35 см и 0,8 см на горизонтальной и вертикальной поляризациях, а также на дополнительном канале приема в области боковых лепестков ДН антенны системы [5-6]. Выборка сигналов проводилась через интервал 0,1 с. СВЧ радиометрическая система расположена на крыше главного корпуса МИ ВлГУ в г. Муроме, направление главного лепестка ДНА – строго в зенит.

Для применения цифрового накопления использовались данные системы за два периода времени: 08.09.2023 и 11.09.2023. Также были получены данные метеопараметров – температуры и относительной влажности воздуха, которые формировались с датчиков метеостанции, расположенной вблизи СВЧ радиометрической системы. Данные дни были выбраны в качестве исследования в связи с различной метеобстановкой в месте базирования системы: в течение 08.09.2023 наблюдались обильные осадки (в среднем 1 мм осадков в час в промежуток с 7:00 до 22:00), в течение 11.09.2023 осадков не наблюдалось.

### Результаты реализации цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы

Цель цифрового накопления выходных сигналов состояла в нахождении времени накопления, при котором коэффициент корреляции между выходными сигналами системы и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы был максимален. Верхний предел времени накопления был задан равным 300 секунд (5 минут), что обусловлено режимом функционирования метеостанции, которая импортирует данные с датчиков каждые 5 минут.

Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы на длинах волн 7,5 см и 0,8 см показаны в таблицах 1-2. В таблицах введены следующие сокращения:  $K_1$  – коэффициент корреляции без цифрового накопления;  $K_2$  – коэффициент корреляции с цифровым накоплением;  $\Delta K$  – относительное увеличение коэффициента корреляции при цифровом накоплении, %;  $\tau_{опт}$  – значение времени оптимального накопления, с.

На рисунках 1 и 2 представлены выходные сигналы СВЧ радиометрической системы в периоды 08.09.2023 и 11.09.2023 на длине волны 7,5 см на горизонтальной поляризации и длине волны 0,8 см на вертикальной поляризации соответственно без цифрового накопления и с цифровым накоплением с оптимальным временем накопления.

Таблица 1. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в период 08.09.2023

Канал	Параметр корреляции	$K_1$	$K_2$	$\Delta K$	$\tau_{опт}$
7,5 ГОР	Корреляция по температуре	0,3743	0,5529	47,71	239
7,5 ВЕРТ		0,2236	0,3123	39,6	147
0,8 ГОР		0,4692	0,55563	18,58	300
0,8 ВЕРТ		0,5549	0,6252	12,65	300
7,5 ГОР	Корреляция по относительной влажности воздуха	0,0289	0,0875	203,26	117
7,5 ВЕРТ		0,3901	0,5331	36,64	300
0,8 ГОР		0,6283	0,7703	22,6	300
0,8 ВЕРТ		0,4338	0,4997	15,17	300

Таблица 2. Результаты оценки эффективности цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в период 11.09.2023

Канал	Параметр корреляции	$K_1$	$K_2$	$\Delta K$	$\tau_{ОПТ}$
7,5 ГОР	Корреляция по температуре	0,3914	0,5229	33,59	277
7,5 ВЕР		0,2992	0,4397	46,95	261
0,8 ГОР		0,8579	0,9066	5,67	299
0,8 ВЕР		0,7293	0,7541	3,4	258
7,5 ГОР	Корреляция по относительной влажности воздуха	0,3815	0,5095	33,55	277
7,5 ВЕР		0,3136	0,4666	48,8	261
0,8 ГОР		0,8714	0,9214	5,73	300
0,8 ВЕР		0,7788	0,8065	3,56	298

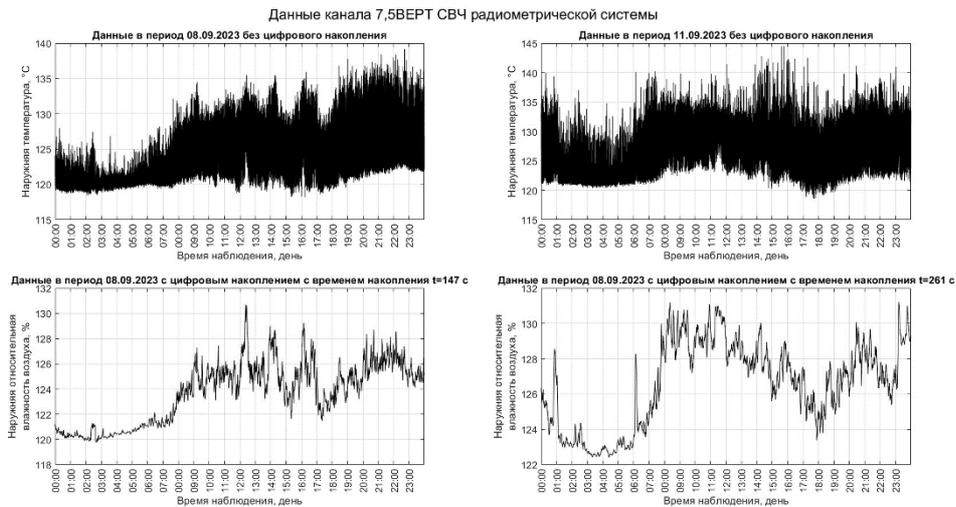


Рис. 1. Временные зависимости выходного сигнала СВЧ радиометрической системы в периоды 08.09.2023 и 11.09.2023 на длине волны 7,5 см на вертикальной поляризации

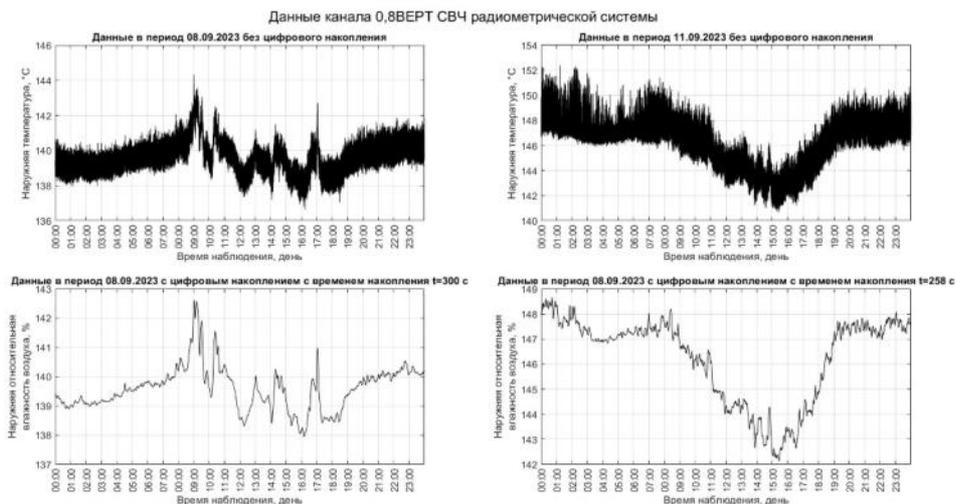


Рис. 2. Временные зависимости выходного сигнала СВЧ радиометрической системы в периоды 08.09.2023 и 11.09.2023 на длине волны 0,8 см на вертикальной поляризации

По анализу полученных результатов применения цифрового накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы были сделаны следующие **выводы** [7]:

1. Применение цифрового накопления выходных сигналов высокочастотных каналов измерения не приводит к существенному увеличению коэффициента корреляции между

выходными сигналами системы и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы (относительное увеличение корреляции  $\Delta K = 3-5\%$ ), что может быть обусловлено более высокой исходной чувствительностью сигналов высоких частот к изменению состояния пограничного слоя атмосферы. Однако при возникновении осадков эффективность цифрового накопления увеличивается до  $\Delta K = 15-25\%$  на данных каналах измерения.

2. Применение цифрового накопления выходных сигналов для низкочастотных каналов измерения в среднем приводит к увеличению коэффициента корреляции между выходными сигналами системы и метеопараметрами пограничного слоя атмосферы на 25-45% в зависимости от центральной частоты канала.

### Заключение

В целом полученные результаты оценки эффективности применения цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы показали возможность его реализации при значительном увеличении времени накопления, а следовательно, и повышения чувствительности системы, при этом ограничивающим фактором в данном процессе может служить скорость изменения состояния атмосферы.

Предложенный вариант определения ограничений на длительность процесса цифрового накопления учитывает степень взаимосвязи выходного сигнала СВЧ радиометрической системы с метеопараметрами путем оценки их корреляции, что позволяет сформулировать общие требования к включению процедуры цифрового накопления в алгоритмы обработки выходных сигналов при непрерывном мониторинге состояния пограничного слоя атмосферы.

Возможность оперативного изменения времени накопления в зависимости от скорости развития атмосферных процессов определяет перспективность использования цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрических систем для повышения точности краткосрочного прогнозирования метеопараметров пограничного слоя атмосферы.

### Список литературы

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 283 с.
2. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. – Москва, 2020.
3. Шарков Е. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы : в 2 т. – Т. 1. – Москва : ИКИ РАН, 2014. – 544 с. : ил. ; +2 л. цв. вкл.
4. On estimation of cloudiness characteristics and parameters of DOAS retrieval from spectral measurements using a neural network / O.V. Postylyakov, A.N. Borovski, A.I. Chulichkov, S.V. Nikitin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol.489 012031 DOI 10.1088/1755-1315/489/1/012031.
5. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростоккина // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – 1(13). – С.50-62.
6. Корреляционный анализ результатов дистанционного зондирования атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой / Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, Г.Г. Щукин, И.Ю. Холодов // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн: материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром, 2022. – С. 290-298.
7. Вопросы цифрового накопления выходных сигналов многодиапазонной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы / И.Ю. Холодов, М.А. Матюков, Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, Г.Г. Щукин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2024, июль. – № 2. – С. 5-14. ISSN 2221-2574.

## Секция 2

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

УДК 538.566.2; 621.372.8

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМОНОВ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ Н-ТИПА НА КОЛЬЦЕ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ 6H-SiC И КАРБИДА БОРА B<sub>4</sub>C

**Н. Д. Аниутин**

*Российский новый университет, 105005, г. Москва, ул. Радио, 22*

*E-mail: blnikan@mail.ru*

**Аннотация.** В работе рассматривается двумерная задача дифракции плоской электромагнитной волны Н-типа на кольце для двух типов полупроводникового материала: карбида кремния (6H-SiC) и карбида бора (B<sub>4</sub>C). Приводится сравнение частотных зависимостей нормированного поперечника рассеяния от длины волны источника  $\lambda$ , компоненты поля Hz в точке на поверхности структуры в зависимости от длины волны  $\lambda$ , распределение ближнего поля компоненты поля Hz. Исследуется зависимость плазмонных резонансов от размеров кольца с учетом потерь сред.

**Ключевые слова:** карбид кремния; карбид бора; плазмонные резонансы; поперечник рассеяния; кольцо; структура ближнего поля

## COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PLASMON EXCITATION BY H-TYPE PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE ON SILICON CARBIDE 6H-SiC AND BORON CARBIDE B<sub>4</sub>C RINGS

**N. D. Aniutin**

**Abstract.** In this paper considers a 2D problem of diffraction of a plane electromagnetic wave of the H type on a ring for two types of semiconductor material: silicon carbide (6H-SiC) and boron carbide (B<sub>4</sub>C). A comparison is given of the frequency dependences of the normalized scattering cross-section on the source wavelength  $\lambda$ , the field components Hz at a point on the structure surface depending on the wavelength  $\lambda$ , the distribution of the near field component Hz. The dependence of plasmon resonances on the ring dimensions is studied taking into account the losses of the media.

**Keywords:** silicon carbide; boron carbide; plasmon resonances; scattering cross-section; ring; near-field structure

### Введение

В настоящее время исследование свойств поверхностных волн–плазмонов вызывает значительный интерес [1]. Зачастую такой интерес связан с исследованием 2D- и 3D-наноструктур из благородных металлов или полупроводников. Отметим, что такие материалы в оптическом и терагерцовом диапазонах длин волн имеют отрицательную относительную диэлектрическую проницаемость, а следовательно, на их поверхности образуются поверхностные волны – плазмоны. Заметим, что этот эффект широко используется в медицине [2] и наноэлектронике [1]. Отметим, что особый интерес вызывает исследование плазмонов на полупроводниковых структурах [3]. Например, недавние исследования показали возможность синтезировать наноструктуры из карбида кремния [4] и карбида бора [5]. Выбор таких сред для исследования связан с тем, что отрицательная диэлектрическая проницаемость указанных материалов имеет место в разных диапазонах длин волн. При этом выбор геометрии структуры в виде кольца позволяет исследовать как внутреннюю, так и внешнюю структуру ближнего поля плазмонов. Заметим, что в первом случае рассматривается терагерцовый диапазон длин волн  $10.3 \text{ мкм} < \lambda < 11 \text{ мкм}$  (где  $\epsilon_{SiC} < 0$ ), при этом средой являлся карбид кремния (6H-SiC) [6]. Во втором случае исследовался ультрафиолетовый диапазон длин волн  $50 \text{ нм} < \lambda < 150 \text{ нм}$  (где  $\epsilon_{B4C} < 0$ ) и средой выступал карбид бора (B<sub>4</sub>C) [7, 8].

Таким образом, целью работы является сравнение характеристик структуры в виде кольца, материал которого представлен двумя видами полупроводника, указанными выше.

### Теоретическая формулировка

Рассматривается 2D-задача дифракции плоской  $H$  поляризованной электромагнитной волны на кольце из карбида кремния (6H-SiC) и карбида бора ( $B_4C$ ). Геометрия решаемой задачи представлена на рисунке 1 ( $\varphi_0$  – угол падения плоской электромагнитной волны;  $a$  – внешний радиус кольца;  $b$  – внутренний радиус кольца).

Для удобства введем обозначение  $j$ , которое будет определять среду рассматриваемого кольца:  $j = 1$  – 6H-SiC,  $j = 2$  –  $B_4C$ . Предполагалось, что длина волны в ТГц диапазоне длин волн ( $10.3 \text{ мкм} < \lambda < 11 \text{ мкм}$ ) для 6H-SiC ( $j = 1$ ) и УФ диапазоне ( $50 \text{ нм} < \lambda < 150 \text{ нм}$ ) для  $B_4C$  ( $j = 2$ ). В указанных диапазонах длин волн выбранные материалы имеют отрицательную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_1(\lambda) = \varepsilon'_{SiC} - i\varepsilon''_{SiC} = \text{Re}(\varepsilon_{SiC}) - i \text{Im}(\varepsilon_{SiC})$ ,  $\varepsilon_2(\lambda) = \varepsilon'_{B_4C} - i\varepsilon''_{B_4C} = \text{Re}(\varepsilon_{B_4C}) - i \text{Im}(\varepsilon_{B_4C})$ , а соответственно на поверхности структуры будут образовываться плазмоны и их резонансы. Расчет относительной диэлектрической проницаемости 6H-SiC проводился по формуле (1), см. рис. 2b [6], а  $B_4C$  осуществлялся на основе кубической интерполяции экспериментальных данных [7, 8] и приведен на рисунке 2a.

$$\varepsilon_{SiC}(\omega) = \varepsilon_{\infty} \left( 1 + \frac{\omega_{LO}^2 - \omega_{TO}^2}{\omega_{LO}^2 + i\omega\gamma - \omega^2} \right) \quad (1)$$

В (1)  $\omega_{LO}=970\text{см}^{-1}$ ,  $\omega_{TO}=797\text{см}^{-1}$  – имеют смысл резонансных частот,  $\gamma=4.76\text{см}^{-1}$  – определяет потери карбида кремния,  $\varepsilon_{\infty}=6.7$  – статическая диэлектрическая проницаемость [6]. Распределение относительной диэлектрической проницаемости в пространстве представим следующим образом:  $\varepsilon(r, \varphi) = \varepsilon_j$  если  $b < r < a$ ;  $\varepsilon(r, \varphi) = 1$  если  $r > a$ ;  $\varepsilon(r, \varphi) = 1$  если  $r < b$ .

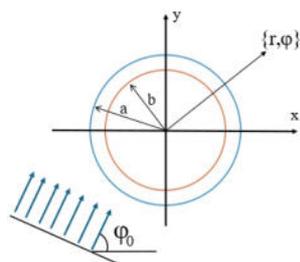


Рис. 1. Геометрия задачи

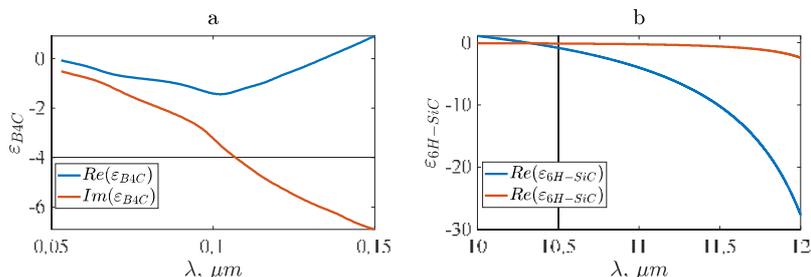


Рис. 2. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_j$  от длины волны  $\lambda$  мкм

Плоская падающая  $H$  поляризованная электромагнитная волна имеет компоненту поля  $H_z$  и может быть представлена в виде

$$H_z = U^0(r, \varphi) = \exp(-ikr \cos(\varphi - \varphi_0)), \quad (2)$$

где  $k = 2\pi / \lambda = \omega / c$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны;  $\omega$  – частота;  $c$  – скорость света. Зависимость полей от времени выбрана в виде  $\exp(i\omega t)$ . Задача дифракции в этом случае сводится к нахождению скалярной функции  $U(r, \varphi) = H_z(r, \varphi)$ . Полное поле  $U(r, \varphi)$  в кусочно-однородной среде удовлетворяет уравнению Гельмгольца [9].

Полное поле вне кольца ( $r > a$ ) представим в виде суперпозиции  $U(r, \varphi) = U^0(r, \varphi) + U^S(r, \varphi)$ , где  $U^S(r, \varphi)$  – рассеянное поле. Поле в области  $r$  ( $b < r < a$ ) обозначим  $U^P(r, \varphi) = U_1^P(r, \varphi) + U_2^P(r, \varphi)$ . Поле внутри кольца ( $r < b$ ) обозначим  $U^D(r, \varphi)$ .

Уравнение Гельмгольца необходимо решать при следующих граничных условиях для полного поля  $U(r, \varphi)$  и сред  $j = 1, 2$ :

$$\begin{aligned} U^P(a-0, \varphi) &= U^S(a+0, \varphi) + U^0(a+0, \varphi); & U^D(b-0, \varphi) &= U^P(b+0, \varphi); \\ \frac{1}{\varepsilon_j} \frac{\partial U^P}{\partial r}(a-0, \varphi) &= \frac{\partial U^S}{\partial r}(a+0, \varphi) + \frac{\partial U^0}{\partial r}(a+0, \varphi); & \frac{\partial U^D}{\partial r}(b-0, \varphi) &= \frac{1}{\varepsilon_j} \frac{\partial U^P}{\partial r}(b+0, \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того, поле  $U^S(r, \varphi)$  в цилиндрической системе координат должно удовлетворять условиям излучения в дальней зоне ( $kr \rightarrow \infty$ ):

$$U^S(r, \varphi) = \Phi(\varphi) \left( \frac{2}{\pi kr} \right)^{1/2} \exp(-ikr + i\pi/4), \quad (4)$$

где  $\Phi(\varphi)$  – диаграмма рассеяния структуры. Важной характеристикой рассеянного поля является поперечник рассеяния  $\sigma_s$ , который определяется по формуле

$$\sigma_s = \frac{2}{\pi k} \int_0^{2\pi} |\Phi(\varphi)|^2 d\varphi. \quad (5)$$

### Численные результаты

Сформулированная задача решалась методом дискретных источников МДИ [10, 11]. Для начала рассмотрим случай дифракции на кольце из карбида кремния 6H-SiC. Семейство кривых компоненты поля  $H_z$  в точке  $(-a, 0)$  на поверхности структуры и нормированного поперечника рассеяния  $k\sigma_s$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  (мкм) представлено на рисунках 3 и 4 соответственно. Угол падения плоской электромагнитной был равным  $\varphi_0=0$ , потери среды равнялись  $\gamma = 100 \text{ см}^{-1}$ , а геометрические параметры структуры были следующими:  $a = 5 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.8a$  (кривая 1);  $a = 10 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.8a$  (кривая 2);  $a = 5 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.5a$  (кривая 3);  $a = 10 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.5a$ , (кривая 4). Из представленных данных на рисунках 3 и 4 видно, что существует большое количество максимумов (резонансов) как компоненты поля  $H_z(-a, 0)$ , так и нормированного поперечника рассеяния  $k\sigma_s$  в области длин волн  $\lambda$ , где величина относительной диэлектрической проницаемости карбида кремния 6H-SiC  $\epsilon_{SiC}$  принимает отрицательное значение ( $\epsilon_{SiC} < 0$ ).

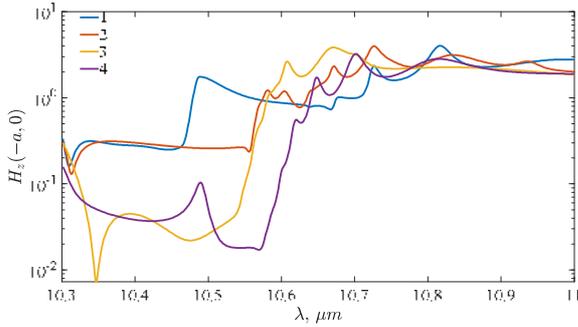


Рис. 3. Зависимость компоненты поля  $H_z(-a, 0)$  от длины волны  $\lambda$  (мкм)

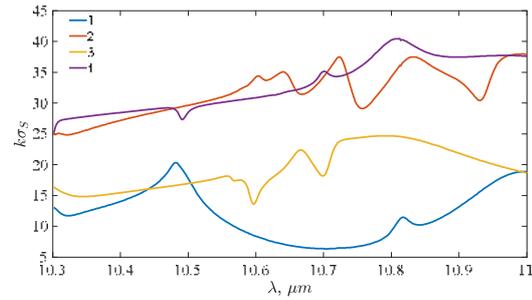


Рис. 4. Зависимость нормированного поперечника рассеяния  $k\sigma_s$  от длины волны  $\lambda$  (мкм)

Теперь рассмотрим случай дифракции на кольце из карбида бора  $B_4C$ . Семейство кривых компоненты поля  $H_z$  в точке  $(-a, 0)$  на поверхности структуры и нормированного поперечника рассеяния  $k\sigma_s$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  (мкм) представлено на рисунках 5 и 6 соответственно. Угол падения плоской электромагнитной был равным  $\varphi_0=0$ , потери среды равнялись  $\gamma = 0.25\gamma_{B_4C}$ , а геометрические параметры структуры были следующими:  $a = 50 \text{ нм}$ ,  $b = 0.8a$  (кривая 1);  $a = 100 \text{ нм}$ ,  $b = 0.8a$  (кривая 2);  $a = 50 \text{ нм}$ ,  $b = 0.5a$  (кривая 3);  $a = 100 \text{ нм}$ ,  $b = 0.5a$ , (кривая 4). Из представленных данных на рисунке 5 следует существование резонансов  $H_z(-a, 0)$  в области  $\epsilon_{B_4C}$ , где  $\epsilon_{B_4C} < 0$ .

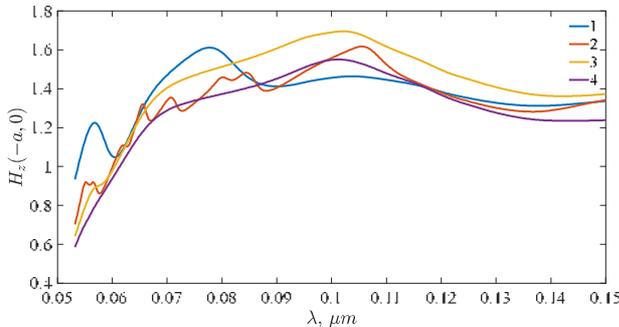


Рис. 5. Зависимость компоненты поля  $H_z(-a, 0)$  от длины волны  $\lambda$  (мкм)

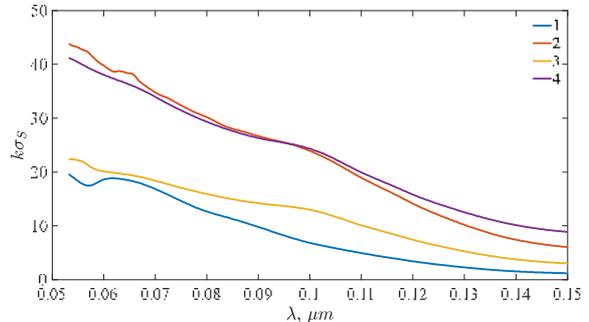


Рис. 6. Зависимость нормированного поперечника рассеяния  $k\sigma_s$  от длины волны  $\lambda$  (мкм)

Приведем распределение линий равных амплитуд компоненты поля  $H_z$  в ближней зоне структуры для резонансных длин волн  $\lambda$ . Для кольца, средой которого является карбид кремния  $6H-SiC$ , параметры расчета были следующими:  $a = 5 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.8a$ ,  $\lambda = 10.489 \text{ мкм}$ ,  $\varepsilon = -0.7824 - 0.0261i$  (рис. 7а),  $a = 5 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.8a$ ,  $\lambda = 10.8152 \text{ мкм}$ ,  $\varepsilon = -2.6213 - 0.0392i$  (рис. 7б). Для кольца, среда которого представляла из себя карбид бора, параметры расчета таковы:  $a = 0.05 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.8a$ ,  $\lambda = 0.056298 \text{ мкм}$ ,  $\varepsilon = -0.1635 - 0.1553i$  (рис. 7в),  $a = 0.05 \text{ мкм}$ ,  $b = 0.8a$ ,  $\lambda = 0.1 \text{ мкм}$ ,  $\varepsilon = -1.4065 - 0.8052i$  (рис. 7г). Рисунки 7а и 7б представляют четный и нечетный резонанс плазмонов соответственно. Рисунок 7в демонстрирует увеличение амплитуды компоненты поля  $H_z$  во внутренней области кольца.

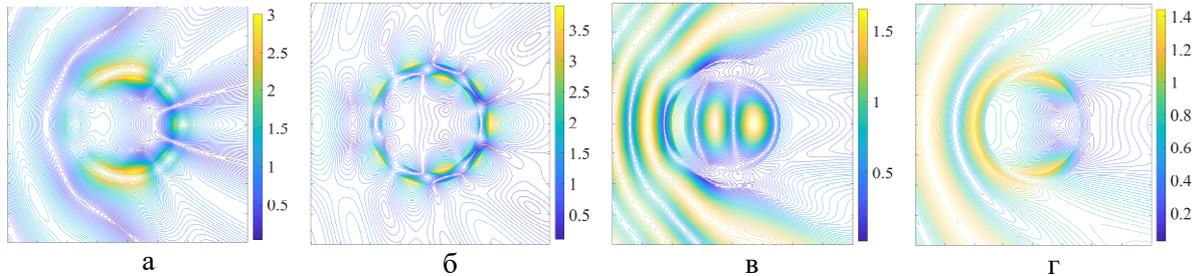


Рис. 7. Распределение линий равных амплитуд компоненты поля  $H_z$

### Заключение

В результате исследования двумерной задачи дифракции плоской электромагнитной волны Н-типа на кольце для двух типов полупроводникового материала: карбида кремния ( $6H-SiC$ ) и карбида бора ( $B_4C$ ) было установлено, что максимумы (резонансы) компоненты поля  $H_z$  в точке на поверхности кольца имеют более ярко выраженный характер для случая дифракции на кольце из  $6H-SiC$  по сравнению с кольцом из  $B_4C$ , что связано с меньшими потерями этого материала. При этом кривые нормированного поперечника рассеяния  $k\sigma_s$  имеют большую амплитуду для случая рассеяния на кольце из  $B_4C$ , чем на кольце из  $6H-SiC$ , но полностью лишены резонансных значений (ярко выраженных максимумов). Показано существование четных и нечетных типов резонансов плазмонов на кольце из  $6H-SiC$ . Продемонстрировано увеличение амплитуды компоненты поля  $H_z$  во внутренней области кольца из  $B_4C$ .

### Список литературы

1. Климов В. В. Наноплазмоника. – Москва: Физматлит, 2009. – 480 с.
2. Masson J. F. Surface plasmon resonance clinical biosensors for medical diagnostics // ACS sensors. – 2017. – Vol. 2, no. 1. – P. 16-30.
3. Taliercio T., Biagioni P. Semiconductor infrared plasmonics // Nanophotonics. – 2019. – Vol. 8, no. 6. – P. 949-990.
4. Формирование биосовместимых  $SiC$ -нанотрубок «сверху-вниз» / А.Д. Буравлев, А.Н. Казакин, Ю.А. Нащекина и др. // Физика и техника полупроводников. – 2023. – Т. 57, № 5. – С. 343.
5. Synthesis of star-shaped boron carbide micro-crystallites under high pressure and high temperatures / V. P. Filonenko, P. V. Zinin, I. P. Zibrov, A. S. Anokhin, E. V. Kukueva, S. G. Lyarin, V. Y. Fominski // Crystals. – 2018. – Vol. 8, no. 12. – P. 448.
6. Optical properties of single infrared resonant circular microcavities for surface phonon polaritons / T. Wang et al. // Nano letters. – 2013. – Vol. 13, no. 11. – P. 5051-5055.
7. Self-consistent optical constants of sputter-deposited  $B_4C$  thin films / J. I. Larruquert, A. P. Pérez-Marín, S. García-Cortés, L. Rodríguez-de Marcos, J. A. Aznárez, J. A. Méndez // JOSA A. – 2012. – Vol. 29, no. 1. – P. 117-123.
8. Polyanskiy M. N. Refractiveindex. info database of optical constants // Scientific Data. – 2024. – Vol. 11, no. 1. – P. 94.
9. Марков Г.Т., Чаплин. А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – Москва, Ленинград: Энергия. – 1967. – 376 с.
10. Кюркчан А.Г., Смирнова Н. И. Математическое моделирование в теории дифракции с использованием априорной информации об аналитических свойствах решения. – Москва: Медиа Паблишер, 2014. – 226 с.
11. Doicu A., Wriedt T., Eremin Y. Acoustic and electromagnetic scattering analysis using discrete sources. – London: Academic, 2000. – 317 p.

УДК 537.86.029.42, 537.862

## МЕСТНАЯ ОБЛАЧНОСТЬ КАК ПРИЧИНА ВОЗМУЩЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРАЙНЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ФОНА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ТОМСКЕ

С. А. Белоногов, А. А. Колмаков, И. Е. Проваренко, И. Е. Родионов  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36  
E-mail: kolmakov@mail.tsu.ru

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию облачности как причины возмущений электромагнитного крайне низкочастотного фона в зимний период. Получены статистические оценки возмущенности ЭМ КНЧ-фона в Томске, вызванной слабыми внутриоблачными электрическими разрядами в отсутствие региональной грозовой активности в сезоне 2022–2023 гг.

**Ключевые слова:** электромагнитный фон, крайне низкие частоты, шумановские резонансы, возмущенность электромагнитного фона, облачность.

## LOCAL CLOUDY AS A CAUSE OF DISTURBANCE IN THE ELECTROMAGNETIC EXTREMELY LOW FREQUENCY BACKGROUND IN WINTER ACCORDING TO MEASUREMENT DATA IN TOMSK

S. A. Belonogov, A. A. Kolmakov, I. E. Provarenko, I. E. Rodionov

**Abstract.** The paper is devoted to the study of cloudiness as a cause of disturbances in the electromagnetic extremely low-frequency background in winter. The paper provides statistical estimates of the disturbance of the EM ELF background in Tomsk caused by weak intra-cloud electrical discharges in the absence of regional thunderstorm activity in the 2022–2023 season.

**Keywords:** electromagnetic hum, extremely low frequencies, Schumann resonances, electromagnetic disturbance of background, cloudiness.

### Введение

Шумановские резонансы (ШР) являются основным физическим механизмом, определяющим глобальное распределение электромагнитной энергии в окружающей среде в диапазоне крайне низких частот (3–30 Гц) [1]. Этот механизм впервые был теоретически предсказан В.О. Шуманом в 1952 году, в силу чего и получил свое название. Впоследствии М. Бальсер и Ч. Вагнер обнаружили это явление в окружающей среде экспериментально. К настоящему времени достаточно глубоко исследованы регулярные вариации компонент ЭМ-фона и влияние на них гелиогеофизических факторов. По современным представлениям, шумановские резонансы – явление интерференции волн, длина которых соизмерима с геометрическими размерами Земли, вызванное излучением от импульсных источников глобальной грозовой активности [2].

Было установлено, что в ряде случаев появляются характерные сигналы повышенного уровня с широкой полосой спектра (перекрывающей несколько первых мод ШР), не связанные с техногенными источниками. Такие сигналы имеют длительность от нескольких минут до десятков часов. В зимнем сезоне такие возмущения не могут быть вызваны локальной грозовой активностью (носящей сезонный – причем, летний характер). При этом было отмечено, что появление таких сигналов, как правило, связано с присутствием в пункте регистрации облачности, которая, как известно, тесно связана с атмосферными электрическими явлениями [3], например, внутриоблачными электрическими разрядами (ВР) [4]. Исследование возмущенности ЭМ КНЧ-фона может оказаться полезным для объяснения эффекта метеочувствительности [5], наблюдаемого в человеческой популяции.

Целью данной работы является получение статистических оценок возмущенности ЭМ КНЧ-фона, вызванной слабыми внутриоблачными электрическими разрядами в отсутствие местной грозовой активности в сезоне 2022–2023 гг.

## Основная часть

На кафедре космической физики и экологии ТГУ создан и эксплуатируется измерительно-вычислительный комплекс [6], который регистрирует вертикальную электрическую компоненту ( $E_z$ ) КНЧ ЭМ-фона с 1997 года. В результате работы комплекса данные измерений уровня ЭМ-фона в полосе частот до 40 Гц сохраняются в памяти ПК в двух формах: 1) результаты цифровой регистрации временных реализаций вертикальной электрической компоненты ЭМ-фона  $E_z$ ; 2) спектрограммы в графическом формате (JPEG).

Особенность реализованного в данном исследовании подхода заключается в работе с графическими файлами – спектрограммами, которые представляют собой изображения уровня КНЧ ЭМ-фона в виде цветового рельефа, в зависимости от частоты и времени суток. Цвет на спектрограмме соответствует уровню сигнала. Росту уровня сигнала соответствует последовательность цветов от темно-синего цвета к голубому, зеленому, розовому и далее к белому, включая промежуточные оттенки цвета (ресурс в сети ИНТЕРНЕТ – [sosrff.tsu.ru](http://sosrff.tsu.ru)).

При таком подходе единичным элементом анализа является пиксель изображения, который соответствует объему данных размером – 3 мин\*0.1 Гц. Тождественность уровня сигнала и цвета изображения позволяет использовать пороговые методы выделения сигналов [7] на спектрограммах, исключая этап спектральной обработки исходных временных реализаций сигнала  $E_z$ .

Работа алгоритма по выделению возмущений (ВР) схематически представлена на рисунке 1. Для получения итогового результата требуется на спектрограмме (рис. 1а) выделить сигналы повышенного уровня (рис. 1б), потенциально связанные с облачностью (рис. 1в) (то есть устранить слабые сигналы и техногенные помехи). Результат обработки необходимо сохранить в удобном виде для анализа и последующей обработки. Реализация алгоритма была проведена в среде программирования Borland Delphi 6.0.

Цвет на спектрограмме (см. рис. 1а) кодируется 24 битами в цветовой схеме RGB (red/green/blue), для которой итоговый цвет задается 3 байтами – по одному байту для каждого цвета: красного, зеленого и синего. Вводя пороговые значения для каждого из 3 байтовых величин, можно устранять различные комбинации оттенков в итоговом цвете выбранного пикселя. Далее результат обнаружения является бинарным (выше порога/ниже порога). Или иначе – есть сигнал или нет сигнала. Как и в классическом пороговом обнаружении [7], в зависимости от величины порога можно получить ситуацию «ложной тревоги» или «пропуска цели». Для решения данной задачи желательно устранить как можно больше шумов и не пропустить полезные сигналы (см. рис. 1б). Опытным путем был выбран порог 155/64/0 (RGB), что соответствует уровню исходного сигнала ~8 единиц АЦП, что перекрывает регулярные вариации амплитуд мод ШР [1, 6], которые рассматриваются здесь и далее как помеха.

Кроме мод ШР на спектрограммах присутствуют и другие помехи (рис. 1б), имеющие техногенное происхождение, от которых требуется качественно избавиться. Для решения данной задачи принималось в расчет следующее: 1) сигналы ВР – вертикально ориентированные на спектрограммах, их уровень уменьшается с частотой; 2) помехи – узкополосные, горизонтально ориентированные на спектрограммах.

Были введены следующие критерии устранения таких помех: а) длина линии < 3 Гц; б) пропуск в линии > 1 Гц; в) длительность менее 6 мин; г) плотность точек в линии  $\rho < 0.55$  (см. (1)). Поясним, что под «линией» здесь понимается вертикальный разрез (соответствующий каждым 3-м минутам) от точки с минимальной частотой  $f_n$  до точки с максимальной частотой  $f_b$ . Значения частот определяются в герцах. Для определенности «точка» – пиксел с заданным цветом-маркером (121212) (см. рис. 1б и 1в).

Плотность вводится согласно следующему выражению ( $N$  – количество пикселей в линии):

$$\rho = 10 * (f_b - f_n) / N. \quad (1)$$

## Результаты обработки сигналов ВР

Была построена динамика интегральной величины возмущений  $N_{VP}$  ( $\langle N_{VP} \rangle$  – рассчитывается за каждые сутки) за период с октября 2022 по март 2023 года. Дни с высокой возмущенностью группируются и чередуются с периодами со слабой возмущенностью. Причем 60 дней из 182 зафиксировано без возмущений ЭМ-фона от ВР, что составляет ~33 %.

Далее был проведен совместный анализ интегральной возмущенности  $\langle N_{BP} \rangle$  и суточных максимумов давления  $P_{\max}$ . Значение давления, равное 1000 мбар, было условно выбрано в качестве опорного уровня (рис. 2). Выше 1000 мбар давление будем называть высоким (повышенным), ниже – низким (пониженным). Замечена тенденция – при понижении давления в целом растет величина возмущенности  $\langle N_{BP} \rangle$ . При высоком давлении (выше 1000 мбар) вероятность появления  $\sim 2.5$  раза ниже, чем для всей статистической выборки.

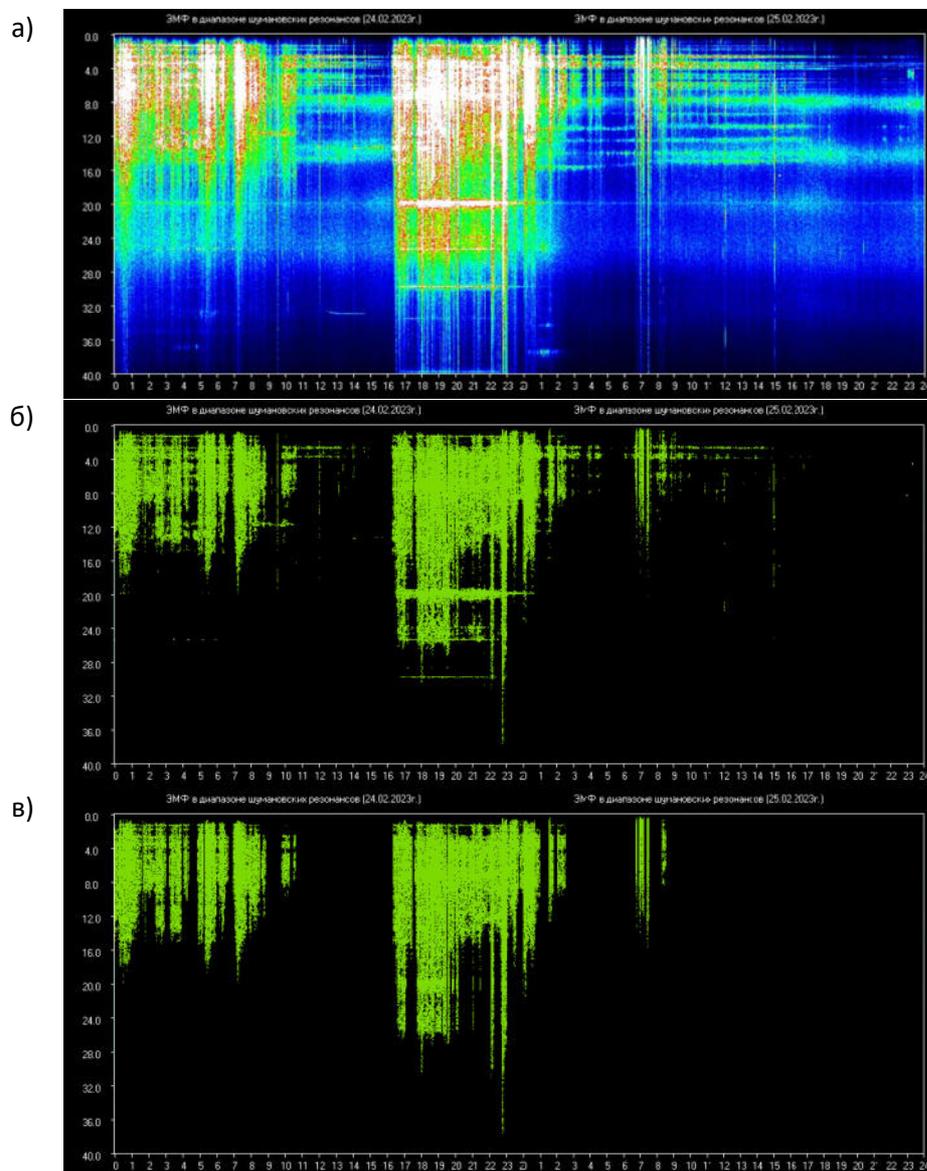


Рис. 1. Основные этапы выделения возмущений КНЧ ЭМ-фона (по вертикальной оси – частота в герцах, по горизонтальной оси – местное время в часах)

В качестве **резюме** отметим следующее:

- 1) высокое атмосферное давление не тождественно полному отсутствию облачности;
- 2) наличие облачности не тождественно наличию возмущенности ЭМ-фона. Поэтому анализ возмущений ЭМ-фона далее проводился с учетом плотности облачности [8].

Для оценки величины статистической связи использовались данные по плотности облачности в Томске [9] и методы непараметрической статистики [10]. Как и любой коэффициент ранговой корреляции, коэффициент Спирмена [10] используется для обнаружения и описания статистической зависимости между признаками, а также проверки гипотез о наличии этой зависимости. Для сезона 2022-2023 гг. получено значимое значение коэффициента корреляции Спирмена, равное 0.253 при уровне достоверности 0.95.

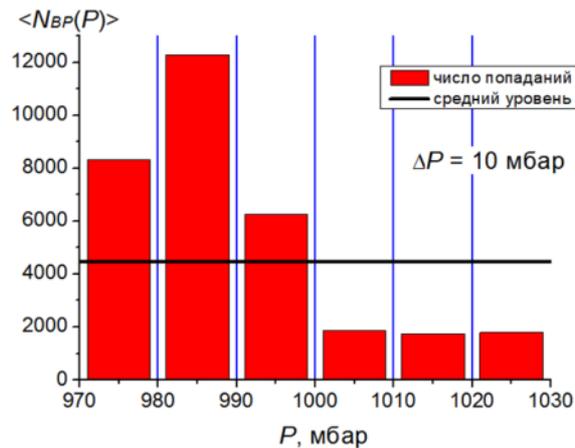


Рис. 2. Распределение сигналов ВР от атмосферного давления в сезоне 2022-2023 гг.

### Заключение

Проведен статистический анализ характеристик таких сигналов за зимний период с 1 октября 2022 года по 31 марта 2023 года. Получено, что для 60 дней из 182 (~33% случаев) возмущения КНЧ электромагнитного фона не наблюдались. Слабые возмущения ( $N < 200$  за сутки) наблюдаются для 70 дней (~38 % случаев) за сезон.

Совместный анализ интегрального числа возмущений ЭМФ и атмосферного давления в пункте наблюдений показал, что для сезона 2022-2023 гг. при низком давлении (менее 1000 мбар) в среднем вероятность появления сигналов ВР выше в ~4.4 раза, чем при высоком. Для этого интервала давлений возмущенность выше в ~2.7 раза, чем для всей статистической выборки.

Полученные результаты подтверждают базовую гипотезу об атмосферном происхождении таких сигналов и их связи с внутриоблачными разрядами.

### Список литературы

1. Колесник А. Г., Колесник С. А., Побаченко С. В. Электромагнитная экология. – Томск: Изд-во ТМЛ-Пресс, 2009. – 336 с.
2. Колесник С. А. Математическое моделирование шумановских резонансов // Распространение радиоволн : сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16-19 мая 2023 года – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2024. – С. 309-312.
3. Ковриго П. А. Метеорология и климатология : учебник. – 2-е изд, испр. – Минск : Высшая школа, 2022. – 414 с.
4. Betz H. D., Schumann U., Laroche P. Lightning: Principles, Instruments and Applications. – Springer Science, 2009. – 641 p.
5. Иванова Е. Г., Потемина Т. Е. Предикторы метеочувствительности у пациентов с артериальной гипертензией в условиях Крайнего Севера // Вестник новых медицинских технологий. – 2023. – Т. 30, № 4. – С. 6-11. – DOI 10.24412/1609-2163-2023-4-6-11.
6. Шумановские резонансы / А. Г. Колесник, С. А. Колесник, А. А. Колмаков, Б. М. Шинкевич // Изв. вузов. Физика. – 2003. – №2. – С. 69–73.
7. Пономарев Г. А., Пономарева В. Н., Якубов В. П. Статистические методы в радиофизике. – Томск : Издательство Томского университета, 1989. – 235 с.
8. Атлас облаков / Д. П. Беспалов [и др.]; Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. Обсерватория им. А. И. Воейкова. – Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. – 248 с.
9. Погода в Томске-РП5. [Б. м.], 2024. – URL: Rp5.ru (дата обращения: 15.04.2024).
10. Закс Л. Статистическое оценивание. – Москва: СТАТИСТИКА, 1976. – 598 с.

УДК 551.510.535, 537.876.2

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКОПОЛОСНОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Г. А. Загорский, А. С. Калишин, Н. Ф. Благовещенская, Т. Д. Борисова, И. М. Егоров

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,*

*199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38*

*E-mail: gazagorskiy@aari.ru*

**Аннотация.** В статье приводятся данные по спектральным характеристикам узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ), полученные во время экспериментов по нагреву ионосферы с помощью мощных КВ-радиоволн необыкновенной поляризации (X-мода) стенда EISCAT/Heating. Рассмотрены зависимости спектров УИРИ от угла излучения относительно направления магнитного зенита, от напряженности электрического поля волны накачки и от условий нагрева. Регистрация УИРИ выполнялась в Ленинградской области на расстоянии 1140 км.

**Ключевые слова:** узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы; волна накачки; X-мода; ионосфера; мощная КВ радиоволна; нагревной стенд

## SPECTRAL CHARACTERISTICS NARROWBAND STIMULATED ELECTROMAGNETIC EMISSION

G. A. Zagorskiy, A. S. Kalishin, N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, I. M. Egorov

**Abstract.** The article presents data on the spectral characteristics of narrowband stimulated electromagnetic emission (SEE) obtained during experiments on ionospheric heating using high power HF wave of extraordinary polarization (X-mode) at the EISCAT/Heating facility, depending on the angle of emission relative to the magnetic zenith direction, the intensity of the electric field of the pump wave, and the heating conditions. The registration of SEE was carried out in the Leningrad region at a distance of 1140 km.

**Keywords:** narrowband stimulated electromagnetic emission; pumping wave; X-mode; ionosphere high power HF wave; heating stand

### Введение

Воздействие на ионосферу мощными КВ-радиоволнами (волной накачки) нагревных стендов порождает целый ряд разнообразных нелинейных эффектов в ионосферной плазме. Одним из представляющих значительный интерес эффектов является узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ). Впервые эффект широкополосного ИРИ был обнаружен в 1982 году на стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе [1]. Позднее на стенде HAARP, на Аляске, было обнаружено узкополосное ИРИ, для которого характерным являлось наличие одной или нескольких спектральных линий в диапазоне  $\pm 1$  кГц, против  $\pm 10$  кГц у классического ИРИ, и с интенсивностью ниже на 10–50 дБ относительно волны накачки. УИРИ было зарегистрировано в 20 км от нагревного комплекса, то есть в непосредственной близости и исключительно при O-нагреве [2].

Важным отличием спектров УИРИ, рассматриваемым в данной статье, является то, что они впервые были зарегистрированы на значительном расстоянии от области модификации ионосферы, на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» близ г. Санкт-Петербурга, удаление  $\sim 1140$  км, и при работе комплекса на X-моду [3]. Сотрудниками лаборатории радиофизических исследований отдела геофизики ФГБУ «АНИИ» были проведены многократные эксперименты на нагревном стенде EISCAT/Heating по генерации УИРИ с помощью X-моды волны накачки [4–6].

В ходе экспериментов был выявлен ряд закономерностей. Так, в зависимости от угла между волновым вектором нагревного сигнала и вектором магнитной силовой линии возбуждались разные типы волн, вдоль магнитной силовой линии возникали ионно-акустические (IA – ion acoustic), а в поперечном направлении – ионно-циклотронные (EIC – electrostatic ion cyclotron) волны. Важным параметром, оказывающим существенное влияние на генерацию радиоизлучения ионосферы, является и мощность нагревной волны, только при

прохождении определённого порога в спектре возникают линии УИРИ. Другой значимой составляющей, влияющей на генерацию данного типа эффектов, является соотношение частоты излучения  $f_H$  к критической частоте  $f_{ch}F2$ .

Основной целью, реализуемой авторами в данной работе, является обобщение результатов экспериментов, охватывающих временной промежуток с 2013 по 2021 год. Приводятся спектры узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы, зарегистрированные при различных режимах работы комплекса. Демонстрируются сложность и многообразность исследуемого явления.

### Описание экспериментов, используемых средств и методов

Сигнал от нагревного комплекса EISCAT/Heating расположенного в г. Тромсе, Норвегия (69.6° с.ш., 19.2° в.д.) и искусственное радиоизлучение регистрировались на НИС «Горьковская» недалеко от г. Санкт-Петербурга (60.28° с. ш. и 29.3° в. д.) на удалении ~1140 км. Прием сигнала осуществлялся на антенну типа двойной горизонтальный ромб, ориентированную на нагревной комплекс, регистрация осуществлялась на анализатор спектра декаметрового диапазона длин волн, созданного на базе трансивера ICOM IC-R75.

В рамках серии экспериментов нагревной стенд работал в разных режимах. Общим для всех экспериментов было то, что комплекс работал на X-моду. Излучение осуществлялось при помощи двух фазированных антенных решёток (ФАР) комплекса, ФАР 1 или ФАР 3, диапазон частот от 5 до 8 МГц, эффективная мощность излучения  $P_{эфф} = 50 \text{ МВт} - 750 \text{ МВт}$  в непрерывном режиме (Continuous wave, CW), циклами с различной длительностью. Для определения спектральных характеристик, зависящих от угла наклона диаграммы направленности (ДН), осуществлялся наклон луча, комплекс работал на фиксированной частоте. Для определения порогов возбуждения мощность волны накачки изменялась от цикла к циклу, частота была постоянной. Для определения спектральных характеристик УИРИ от условий нагрева, комплекс работал на фиксированной частоте, мощность оставалась неизменной, менялись только фоновые характеристики ионосферы. Диагностика эффектов проводилась с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) (температура электронов  $T_e$ , ионов  $T_i$ , концентрация электронов  $N_e$ ),  $F_p = 930 \text{ МГц}$  в направлении магнитного зенита, диапазон обзереваемых высот от 90 до 600 км с разрешением 1,5 км по высоте и временное разрешение – 5 с.

### Спектр УИРИ в зависимости от угла излучения волны накачки

В данном разделе приводятся результаты экспериментальных наблюдений от 21 октября 2013 года. Фоновые вечерние условия были отмечены спадом критических частот, геофизические условия были спокойные. Стенд работал в режиме CW при фиксированной частоте 7953 кГц циклами 10/5 минут (нагрев/пауза (н/п)). Нагревной сигнал излучался на X-моду при наклоне ДН в разных циклах на 78 и 86 градусов соответственно.

На рисунке 1 представлен спектр УИРИ в полосе частот  $\pm 200 \text{ Гц}$  от частоты волны накачки.

При излучении мощной волны накачки в магнитный зенит (78°) и при излучении под углом 86° (4° от вертикали) разность интенсивности спектральных составляющих равнялась 15 - 20 дБ. Хорошо видно, что для выбранного в качестве примера цикла, в области отрицательных отстройек, на частоте -51 Гц, разность между уровнями сигнала составляет 15 дБ.

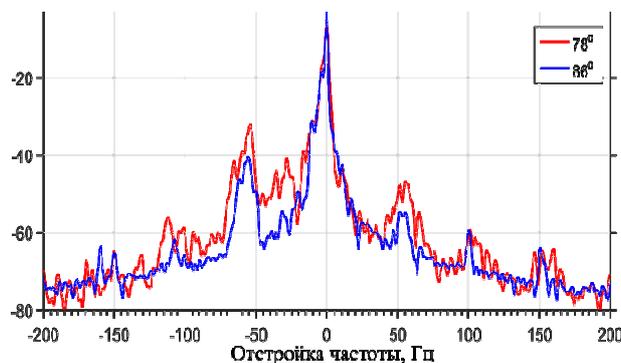


Рис. 1. Мгновенные спектры УИРИ при разных углах наклона диаграммы направленности

### Спектр УИРИ в зависимости от мощности волны накачки

Представлены экспериментальные данные, полученные в ходе нагревной кампании в 2021 году. Нагревной стенд работал на X-моду при частоте  $f_H = 5423$  кГц, циклы  $n/p$  2/2, циклограмма работы: 15%, 25%, 50%, 75%, 100%, 100%, 75%, 50%, 25%, 15% (% от максимальной мощности в день проведения эксперимента).

В первом цикле  $P_{эфф} = 55,1$  МВт спектральные компоненты УИРИ не фиксировались. УИРИ начало формироваться во втором цикле, при  $P_{эфф} = 89$  МВт в спектре наблюдались до пяти линий, смещённых относительно частоты волны накачки  $\pm n \cdot 54$  Гц, а также компонент на частоте  $-28$  Гц. С ростом  $P_{эфф}$  в следующих циклах увеличивались интенсивности линий, возбуждались новые гармоники  $n = 6, 7$ . При увеличении  $P_{эфф}$  формировались новые максимумы на частотах  $\pm 29, \pm 82, \pm 134, \pm 188, \pm 240$  Гц, а наивысшая интенсивность УИРИ наблюдалась при  $P_{эфф} = 355$  МВт. При снижении  $P_{эфф}$  интенсивность УИРИ уменьшалась, исчезали дискретные линии на высоких частотах. Спектральные линии УИРИ были замечены также при  $P_{эфф} = 52,4$  МВт, что указывает на эффект гистерезиса в ионосферной плазме [7].

Для оценки напряженности электрического поля волны накачки в свободном пространстве на высотах ионосферы можно воспользоваться выражением [8]

$$E \left[ \frac{V}{m} \right] = \frac{0,25 \sqrt{ERP[kW]}}{h[km]}, \quad (1)$$

где ERP – эффективная мощность излучения;

$h$  – высота искусственно-возмущенной области, на которой рассчитывается электрическое поле волны, для октября 2021 года согласно (1)  $E_{пор} = 0,34$  В/м. С учетом ионосферного поглощения порог возбуждения УИРИ в октябре 2021 года составил  $E_{пор} = 0,23$  В/м.

На рисунке 2 представлен моментальный спектр УИРИ пяти двухминутных циклов нагрева.

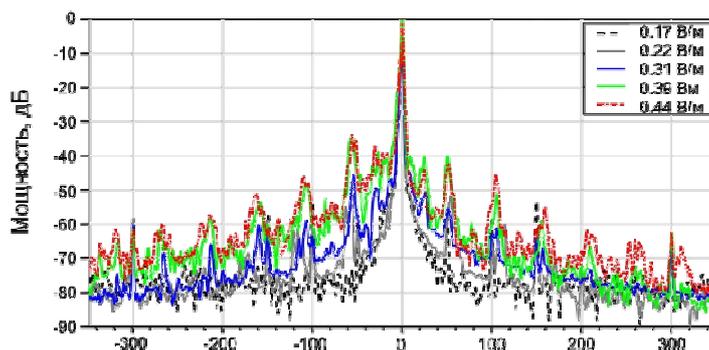


Рис. 2. Мгновенные спектры УИРИ при различных значениях поля

### Спектр узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы в зависимости от условий нагрева

В результате экспериментов 2013 и 2015 годов было зарегистрировано возбуждение УИРИ на X-моду. Были получены спектры при различных условиях отношения  $f_H/f_{XF2}$  (больше, меньше и  $\sim 1$ ). Нагревной комплекс излучал на частоте 6770 кГц циклами  $n/p$  10/5 на фоне снижающейся критической частоты F2-слоя.

Наиболее показателен эксперимент от 28 октября 2015 года. В первом цикле (14.16-14.26 UT) частота нагревного сигнала была ниже  $f_{XF2}$ , наблюдались дискретные спектральные составляющие с положительной и отрицательной отстройкой. Преобладали гармоники с отстройкой частоты кратной  $\pm n \cdot 56$  Гц. В следующем цикле (14.46-14.56 UT) частота волны накачки равнялась  $f_{XF2}$ , фиксировались несколько гармоник. В цикле с 15.16 до 15.26 UT частота излучения была выше  $f_{XF2}$ , и спектр УИРИ содержал единственную дискретную составляющую с частотой, изменяющейся от  $-48$  до  $-58$  Гц.

### Заключение

По результатам серии экспериментов на нагревном комплексе EISCAT/Heating было установлено, что угол ДН антенны оказывает существенное влияние на генерацию УИРИ. Наибольший эффект наблюдается при излучении мощного нагревного сигнала необыкновенной поляризации в направлении магнитного зенита ( $78^\circ$ ). Возможными механизмами генерации УИРИ

в данных экспериментах может быть стимулированное ионное рассеивание Бернштейна (SIBS) и намагниченное стимулированное рассеяние Бриллюэна (MSBS). В спектрах УИРИ выделяются четкие дискретные структуры. Ионные гирогармонические структуры на частотах  $\pm 56$  Гц связаны с ионно-циклотронными волнами атомарного кислорода ( $O^+$ ), а линии на частотах  $\pm 35 \cdot n$  Гц могут быть связаны с гирочастотами ионов  $NO^+$ . Наблюдается эффект магнитного зенита: интенсивность, ширина спектра и количество дискретных линий зависят от направления излучения относительно магнитной силовой линии.

Пороги возбуждения УИРИ при X-нагреве в возмущенной области ионосферы составили  $E_{\text{пор}} = 0,23 - 0,24$  В/м с учетом поглощения в нижележащих слоях. Спектральные линии формировались в диапазоне  $\pm 300$  Гц от частоты волны накачки. Увеличение напряженности электрического поля повышало интенсивности существующих дискретных линий и возбуждало новые с большими отстройками частот, что расширяло спектр до  $\pm 400$  Гц. Максимальное количество линий и ширина спектра наблюдались при  $E = 0,44$  В/м.

Внешние условия значительно влияют на условия генерации УИРИ. Соотношение  $f_H$  к критической частоте F2-области ионосферы  $f_{XF2}$  в значительной мере определяет число линий в спектре и их интенсивность. При  $f_H = f_{XF2}$  распад волны накачки происходит вблизи высоты отражения, при  $f_H > f_{XF2}$  волна накачки «высвечивалась», образуя в зоне распада рассеянную электромагнитную волну с пониженной частотой.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>.

### Список литературы

1. Observations of stimulated electromagnetic emissions in ionospheric heating experiments / B. Thide, H. Derblom, A. Hedberg et al. // *Radio Sci.* – 1983. – Vol. 18. – P. 851–859. doi:10.1029/RS018i006p00851;
2. Determination of the electron temperature in the modified ionosphere over HAARP using the HF pumped Stimulated Brillouin Scatter (SBS) emission lines / P. A. Bernhardt, C. A. Selcher, R. H. Lehmborg, S. P. Rodriguez, J. F. Thomason, M. J. McCarrick, G. J. Frazer // *Annales Geophysicae.* – 2009. – Vol. 27. – P. 4409–4427; DOI: 10.5194/angeo-27-4409-2009;
3. Comparison of the Effects Induced by the Ordinary (O-Mode) and Extraordinary (X-Mode) Polarized Powerful HF Radio Waves in the High-Latitude Ionospheric F Region / N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, A. S. Kalishin et al. // *Cosmic Research.* – 2018. – Vol. 56 (1).
4. Ion Gyro-Harmonic Structures in Stimulated Emission Excited by X-Mode High Power HF Radio Waves at EISCAT / A. S. Kalishin, N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2021. Vol. 126. e2020JA028989. <https://doi.org/10.1029/2020JA028989>;
5. Comparison of Spectral Features of Narrowband Stimulated Electromagnetic Emission Excited by an Extraordinary Pump Wave in the High-latitude Ionospheric F Region at Frequencies below and above the F2 Layer X-component Critical Frequency / A. S. Kalishin, N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova et al. // *Russian Meteorology and Hydrology.* – 2022. – Vol. 47, no. 12. – P. 921–930. DOI: 10.3103/S1068373922120032;
6. First observations of electron gyro-harmonic effects under X-mode HF pumping the high latitude ionospheric F-region / N. F. Blagoveshchenskaya, T. D. Borisova, A. S. Kalishin et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* – 2017. – Vol. 155. – P. 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.02.003>;
7. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // *УФН.* – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145–1177. DOI: 10.3367/UFNr.0177.200711a.1145;
8. Robinson T. R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // *Phys. Rep.* – 1989. – Vol. 179. – P. 79–209.

УДК 52-655.5

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОФИЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛОСКИХ ГАЛАКТИК

Д. А. Коновалова<sup>1</sup>, Е. В. Юшков<sup>1,2</sup>, Д. Д. Соколов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра математики, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: 89627604684k@gmail.com

**Аннотация.** Один из основных способов реконструкции крупномасштабных магнитных полей астрофизических тел основан на эффекте поворота плоскости поляризации синхротронного излучения релятивистских электронов. Этот поворот возникает при прохождении радиоизлучения через область с ненулевым средним магнитным полем, при этом отличие данного процесса от классического «фарадеевского экрана» заключается в том, что каждая точка вдоль пути прохождения луча не только отвечает за поворот плоскости поляризации, но и является источником излучения, эффективность которого также зависит от амплитуды магнитного поля. Такое усложнение классической задачи дает одновременно и существенное преимущество в реконструкции, позволяя не только восстанавливать среднее вдоль луча поле, но и его профиль поперек галактики. В работе предложено решение проблемы реконструкции профиля магнитного поля через разложение его в ряд Фурье по фарадеевской глубине и нахождение коэффициентов ряда по зависимости степени поляризации от квадрата длины волны.

**Ключевые слова:** синхротронное излучение электронов; эффект Фарадея; реконструкция магнитного поля; плоская галактика; задача фарадеевского синтеза.

## RECONSTRUCTION OF MAGNETIC FIELD PROFILES OF FLAT GALAXIES

D.A. Konovalova, E.V. Yushkov, D.D. Sokoloff

**Abstract.** One of the main ways to reconstruct large-scale magnetic fields of astrophysical bodies is based on the effect of rotation of the polarization plane of synchrotron radiation of relativistic electrons. This rotation occurs when radio emission passes through a region with a non-zero mean magnetic field, and the difference between this process and the classical «Faraday screen» is that each point along the beam path is responsible not only for the rotation of the polarization plane, but is also a source of radiation, the efficiency of which also depends on the amplitude of the magnetic field. Such a complication of the classical problem gives at the same time a significant advantage in the reconstruction, allowing not only to reconstruct the average field along the beam, but also its profile across the galaxy. In this paper, we propose a solution to the problem of reconstructing the magnetic field profile by decomposing it into a Fourier series over the Faraday depth and finding the coefficients of the series from the dependence of the degree of polarization on the square of the wavelength.

**Keywords:** synchrotron electron radiation; Faraday effect; magnetic field reconstruction; flat galaxy; Faraday synthesis problem.

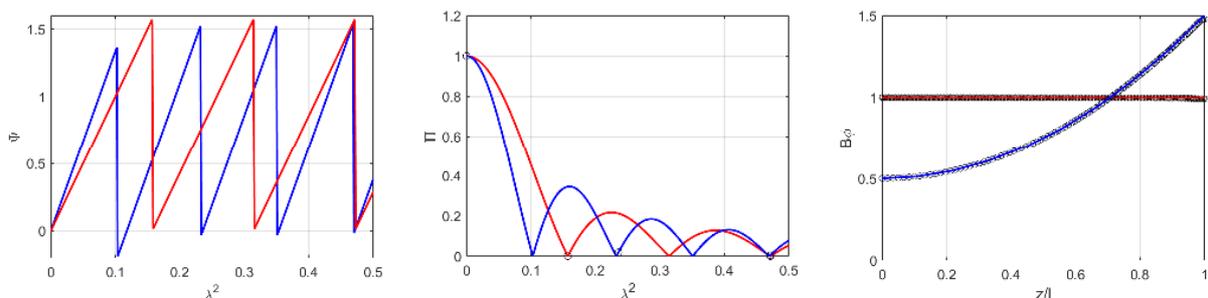
Идея использования поляризации синхротронного излучения релятивистских электронов для реконструкции астрофизических магнитных полей основана на эффекте поворота плоскости поляризации света при распространении в магнитоактивной среде, так называемом эффекте Фарадея. Причина этого эффекта заключается в разной скорости распространения лево- и правополяризованных волн, при этом слабая разность в скоростях может быть компенсирована большими расстояниями, что дает возможность восстанавливать амплитуды даже чрезвычайно слабых магнитных полей. Эта идея, высказанная в 60-х годах прошлого века академиком Виталием Лазаревичем Гинзбургом [1], была успешно реализована с помощью современных радиотелескопов и наряду с эффектом Зеемана на сегодняшний день является одним из основных источников наших знаний о магнитных полях в окружающем нас космическом пространстве.

Задача реконструкции магнитного поля по поляризации излучения в целом похожа на задачу «экрана Фарадея», отличие заключается в том, что каждая область магнитоактивной среды не только отвечает за поворот плоскости поляризации, но и при этом сама является источником такого излучения. В предположении постоянного магнитного поля вдоль луча зрения, пронизывающего, например, галактический диск, задача реконструкции была решена в 1966 году Бёрном, с тех пор полученная им формула для комплексной поляризации носит название формула Бёрна [2]. Эта формула определяет степень комплексной поляризации

синхротронного излучения как функцию синка, а аргумент (угол) комплексной поляризации как линейную функцию от квадрата длины волны. Коэффициенты, стоящие перед квадратом длины волны, что в синке, что в линейной зависимости, пропорциональны постоянному магнитному полю, что и позволяет восстанавливать его в предположении неизменности вдоль луча наблюдения. В рамках доклада мы показываем способ обхода этого предположения, который позволяет реконструировать не только постоянные, то есть «средние» вдоль луча наблюдения, магнитные поля, но и их профили, а следовательно, например, и токи. Профили и токи, в свою очередь, могут позволить более качественно судить о глобальной структуре магнитного поля галактик, а следовательно, о механизмах и способах их формирования, а также могут пригодиться для проверки корректности существующих моделей галактического динамо [3].

В докладе мы демонстрируем, что при симметричной, относительно нейтральной плоскости галактики, структуре магнитного поля зависимость угла поляризации от квадрата длины радиоизлучения остается линейной. Однако наклон этой линейной зависимости определяется не постоянным полем, а так называемой фарадеевской глубиной  $\phi(z)$  – интегралом магнитного поля вдоль луча зрения, в частности, для галактики только с азимутальным полем  $B_\varphi(z)$  наклон зависимости равен  $\phi(l)$ , то есть фарадеевской глубине  $\phi(z) = Kn \operatorname{tg}(\theta) \sin(\varphi) \int_0^z B_\varphi(z) dz$ , взятой в точке полутолщины галактики  $z = l$ , здесь константа  $Kn$  зависит от массы, заряда и плотности тепловых электронов, а углы  $\varphi$  и  $\theta$  – это азимутальный угол в точке падения луча наблюдения и угол наклона луча наблюдения к плоскости галактики соответственно (см., например, [4]). Таким образом, данные радиотелескопа по углу поляризации позволяют сначала вычислить  $\phi(l)$  и использовать в дальнейшем фарадеевскую глубину  $\phi(z)$  как новую переменную вместо  $z$  – это идея так называемого фарадеевского синтеза [5]. Затем асимптотическое представление профиля магнитного поля как функции фарадеевской глубины  $B_\varphi(\phi)$  в виде ряда Фурье позволяют использовать данные по степени поляризации на определенных длинах волн для восстановления коэффициентов ряда, а следовательно, для реконструкции сначала профиля  $B_\varphi(\phi)$ , а затем, наконец, и профиля  $B_\varphi(z)$ .

Пример такой реконструкции по модельным данным показан на рисунке, где на левой панели изображены линейные (на самом деле пилообразные, об этом подробнее говорится в докладе) зависимости угла поляризации от квадрата длины волны, на средней панели – зависимости степени поляризации от квадрата длины волны, а на правой – поперечные профили магнитного поля галактики. Модельные данные, по которым рассчитывались углы и степени поляризации, обозначены линиями, а восстановленные данные – черными кругами-маркерами. Для реконструкции профилей из угла поляризации брался только наклон пилообразных зависимостей, а из степени поляризации – только значения на длинах волн, обозначенных на средней панели метками. Легко заметить, что в рамках модельных данных метод реконструкции работает отлично, более же сложные и интересные случаи, а также практические проблемы, связанные, например, с применением предложенного алгоритма к реальным экспериментальным данным, требуют отдельного обсуждения.



Зависимость углов поляризации (левая панель) и степеней поляризации (средняя панель) от квадрата длины волны синхротронного излучения для постоянного (красные линии) и растущего (синие линии) профилей азимутального магнитного поля (правая панель)

### Список литературы

1. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Космическое магнитотормозное (синхротронное) излучение // Успехи физических наук. – 1965.
2. Burn V.F. On the depolarization of discrete radio sources by Faraday dispersion // Mon. Not R. Astr. Soc. – 1966.
3. Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. Магнитные поля в астрофизике. – Москва: Институт космических исследований РАН. – 2006. – 384 с.
4. Depolarization and Faraday effects in galaxies / D.D. Sokoloff, A.A. Bykov, A. Shukurov, E.M. Berkhuijsen, R. Beck, A.D. Poezd // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1998.
5. Faraday rotation measure synthesis for magnetic fields of galaxies / P. Frick, D. Sokoloff, R. Stepanov, R. Beck // Mon. Not R. astr. Soc. – 2011.

УДК 534.23 + 537.874.6

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ НА ПРОНИЦАЕМОМ ТЕЛЕ, ЧАСТИЧНО ПОКРЫТОМ ТОНКИМ ЭКРАНОМ

Д. В. Крысанов, С. А. Маненков

*Московский технический университет связи и информатики,  
Москва, ул. Авиамоторная, 8а, 111024 Российская Федерация  
E-mail: mail44471@mail.ru*

**Аннотация.** На основе метода продолженных граничных условий разработан численный алгоритм решения трехмерной задачи дифракции плоской волны на пронцаемом теле вращения, частично покрытом абсолютно мягким экраном. В случае дифракции на сфере Януса результаты расчета интенсивности рассеянного поля, полученные с использованием предложенного метода, сравнивались с результатами, полученными методом Т-матриц. Представлены угловые зависимости диаграммы рассеяния для вытянутого сфероида, частично покрытого абсолютно мягким экраном для разного угла раскрытия экрана.

**Ключевые слова:** дифракция на телах, частично покрытых экранами; сфера Януса; метод продолженных граничных условий; метод интегральных уравнений

## SOLUTION OF THE PROBLEM OF DIFFRACTION ON A PERMEABLE BODY PARTIALLY COVERED WITH A THIN SCREEN

D. V. Krysanov, S. A. Manenkov

**Abstract.** Based on the method of continued boundary conditions, the numerical algorithm for solving three-dimensional problem of plane wave diffraction on a permeable body of revolution partially covered with an absolutely soft screen have been developed. In the case of diffraction on the Janus sphere, the results of calculating the intensity of the scattered field obtained using the proposed methods were compared with the results obtained by the T-matrix method. The angular dependences of the scattering pattern for elongated spheroid partially covered with an absolutely soft screen with different aperture angles are presented.

**Keywords:** diffraction by bodies partially covered with screens; Janus sphere; method of continued boundary conditions; method of integral equations

### Введение

Частицы, покрытые тонкими экранами (в частности, частицы Януса), представляют большой интерес в антенной технике, медицине и биологии. В литературе имеется большое количество публикаций, посвященных дифракции как акустических, так и электромагнитных волн на сфере Януса [1-3], однако рассеяние на телах произвольного сечения, покрытых тонкими экранами, изучено довольно слабо (см., например, [2]). Для решения указанных задач применялись различные методики, среди которых отметим метод интегральных уравнений и метод Т-матриц.

В настоящей работе исследуется трехмерная скалярная задача дифракции плоской волны на пронцаемом теле вращения с гладкой границей произвольной формы, частично покрытом абсолютно мягким экраном. Отметим, что данная задача является обобщением задачи дифракции на сфере Януса на случай произвольной геометрии тела [3]. Для решения задачи дифракции на частично покрытом теле разработан подход, основанный на методе продолженных граничных условий (МПГУ) [4].

Существенным отличием данной работы от [3] является, во-первых, распространение МПГУ на задачу дифракции на трехмерном произвольном несферическом теле, покрытом экраном. Во-вторых, разработан комбинированный метод, основанный на использовании МПГУ и обычного метода интегральных уравнений, а именно: исходная краевая задача дифракции сведена к системе интегральных уравнений относительно неизвестных функций, распределенных как на экране, так и на остальной части границы тела. При этом граничные условия на экране переносятся на две вспомогательные поверхности, расположенные вблизи поверхности экрана, а на оставшейся части границы тела применяли стандартные интегральные уравнения 2-го рода относительно поля и его нормальной производной. В результате краевая задача сводилась к решению смешанной системы интегральных уравнений 1-го и 2-го рода. Для решения системы интегральных уравнений использовался подход Крылова-Боголюбова.

**Постановка задачи дифракции**

Рассмотрим математическую постановку задачи дифракции. Пусть компактное тело вращения частично покрыто бесконечно тонким экраном  $S$  с углом полуоткрытия  $\gamma_0$ . Геометрия задачи представлена на рисунке 1. Введем декартову систему координат, причем ось  $z$  направим вдоль оси тела. Предположим, что волновые числа и плотности сред вне и внутри области  $D$ , занимаемой телом, равны  $k_1, \mu_1$  и  $k_2, \mu_2$  соответственно. Таким образом, волновое поле снаружи и внутри  $D$  удовлетворяет однородным уравнениям Гельмгольца:

$$\begin{aligned} \Delta U + k_1^2 U &= 0, & M(\mathbf{r}) \in \mathbb{R}^3 \setminus D, \\ \Delta U + k_2^2 U &= 0, & M(\mathbf{r}) \in D. \end{aligned} \tag{1}$$

Граничное условие на поверхности экрана имеет вид

$$U|_S = 0, \tag{2}$$

Здесь  $U = U^0 + U^1$  – это полное поле вне тела, причем  $U^0$  – падающее и  $U^1$  – рассеянное (вторичное) поле. На остальной части поверхности тела  $\tilde{S}$  выполнены условия сопряжения

$$\begin{cases} [U] = 0, \\ \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial U}{\partial r} \right] = 0. \end{cases} \tag{3}$$

Здесь  $\mu$  – плотность ( $\mu = \mu_1$  или  $\mu = \mu_2$ ), а квадратные скобки обозначают скачок соответствующей величины. Будем считать, что тело облучается плоской волной, имеющей вид

$$U^0 = \exp(-ik_1 r (\sin \theta \sin \theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \cos \theta \cos \theta_0)), \tag{4}$$

где  $\varphi_0, \theta_0$  – углы падения;  $(r, \theta, \varphi)$  – сферические координаты.

На бесконечности выполнено стандартное условие излучения.

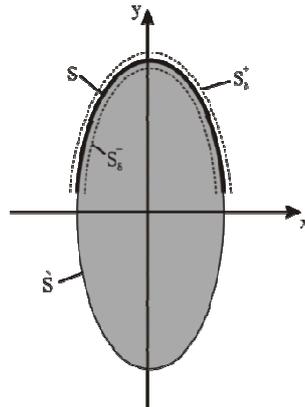


Рис. 1. Геометрия задачи

**Решение задачи дифракции комбинированным методом на основе МПГУ**

Будем решать задачу дифракции с помощью комбинированного метода, основанного на МПГУ. Для этого введем вспомогательные поверхности  $S_s^\pm$ , на которых поставим граничное условие (2), заданное на тонком экране (см. рис.1). На остальной части поверхности рассеивателя

будем использовать стандартные интегральные уравнения второго рода [2]. В результате преобразований мы получим следующую смешанную систему интегральных уравнений

$$\int_S J_1(\mathbf{r}') G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' + \int_{\tilde{S}} \left( J_3(\mathbf{r}') G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - J_4(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} \right) ds' = -U^0(\mathbf{r}), \quad M(\mathbf{r}) \in S_8^+, \quad (5)$$

$$\int_S J_2(\mathbf{r}') G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' + \int_{\tilde{S}} \left( \mu_{21} J_3(\mathbf{r}') G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - J_4(\mathbf{r}') \frac{\partial G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} \right) ds' = 0, \quad M(\mathbf{r}) \in S_8^-, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}(1 + \mu_{21}) J_3(\mathbf{r}) - \int_S J_1(\mathbf{r}') \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n} ds' + \int_S J_2(\mathbf{r}') \frac{\partial G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n} ds' + \\ & - \int_{\tilde{S}} J_3(\mathbf{r}') \left( \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n} - \mu_{21} \frac{\partial G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n} \right) ds' + \end{aligned} \quad (7)$$

$$+ \int_{\tilde{S}} J_4(\mathbf{r}') \left( \frac{\partial^2 G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n \partial n'} - \frac{\partial^2 G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n \partial n'} \right) ds' = \frac{\partial U^0(\mathbf{r})}{\partial n}, \quad M(\mathbf{r}) \in \tilde{S},$$

$$\begin{aligned} & J_4(\mathbf{r}) - \int_S J_1(\mathbf{r}') G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' + \int_S J_2(\mathbf{r}') G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' - \\ & - \int_{\tilde{S}} J_3(\mathbf{r}') (G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - \mu_{21} G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}')) ds' + \int_{\tilde{S}} J_4(\mathbf{r}') \left( \frac{\partial G_1(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} - \frac{\partial G_2(\mathbf{r}, \mathbf{r}')}{\partial n'} \right) ds' = \\ & = U^0(\mathbf{r}), \quad M(\mathbf{r}) \in \tilde{S}. \end{aligned} \quad (8)$$

В этих формулах  $J_1 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{S_8^+}$ ,  $J_2 = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{S_8^-}$ ,  $J_3 = \frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{\tilde{S}}$ ,  $J_4 = U \Big|_{\tilde{S}}$ ,  $\mu_{21} = \mu_2 / \mu_1$ , функции Грина [5]

$$G_l(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\frac{\exp(-ik_l R)}{4\pi R}, \quad R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, \quad l = 1, 2. \quad (9)$$

Как указано во введении, СИУ (5)-(8) решали с помощью метода Крылова-Боголюбова.

### Численные результаты

Для проверки предлагаемого метода мы рассмотрели задачу дифракции на сфере Януса радиуса  $a$ . Параметры задачи были выбраны следующими:  $k_1 = \mu_1 = 1$ ,  $k_2 = \mu_2 = 1.5$ ,  $a = 6$ ,  $\theta_0 = 0$ . На рисунке 2 представлены угловые зависимости дифференциального поперечника рассеяния, полученные методом Т-матриц [1] (сплошная кривая), методом на основе МПГУ с использованием функции Грина пронизаемого шара [3] (штриховая кривая) и методом на основе смешанной системы интегральных уравнений, рассмотренной в данной работе (короткая штриховая кривая). Дифференциальный поперечник рассеяния определен в работе [1]. Как видно из рисунка, все три кривые различаются незначительно лишь в небольшой окрестности угла  $\theta = 180^\circ$ .

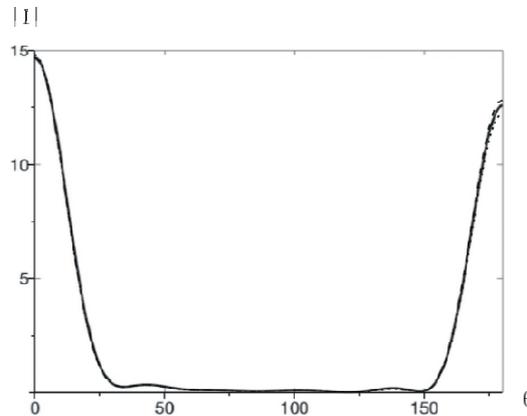


Рис.2. Сравнение угловых зависимостей дифференциального поперечника рассеяния, полученных тремя методами

На рисунке 3 представлены угловые зависимости модуля диаграммы рассеяния для вытянутого сфероида, частично покрытого абсолютно мягким экраном. Волновые числа и плотности сред тела вращения были те же, что и для рисунке 2, а размеры тел следующие: полуоси сфероида  $a=1$ ,  $c=5$  ( $c$  – полуось вдоль оси  $z$ ). Кривые 1 на рисунках соответствуют параметру  $\gamma_0 = \pi/2$  (т. е. экран покрывает половину поверхности тела), кривые 2 – малому размеру экрана при  $\gamma_0 = \pi/1800$ , а кривые 3 иллюстрируют случай  $\gamma_0 = \pi - \pi/1800$ , т. е. когда экран почти полностью покрывает рассеиватель. Отметим, что, как показывают расчеты, кривые 2 и 3 практически совпадают с кривыми, соответствующими случаю пронизываемого тела в отсутствие экрана (кривые 2), или с кривыми, соответствующими дифракции на абсолютно мягком рассеивателе (кривые 3).

Зависимости диаграммы рассеяния для тела, не покрытого экраном, и абсолютно мягкого рассеивателя, получали при помощи модифицированного метода дискретных источников [5]. Мы не приводим эти кривые на рисунках. Как видно из рисунка, при осевом падении плоской волны и  $\gamma_0 = \pi/2$  имеют место максимум угловой зависимости модуля диаграммы рассеяния в направлении обратного рассеяния, отсутствующий при дифракции на теле без экрана и при рассеянии на теле, полностью покрытом экраном. Этот факт соответствует физической картине рассматриваемого явления.

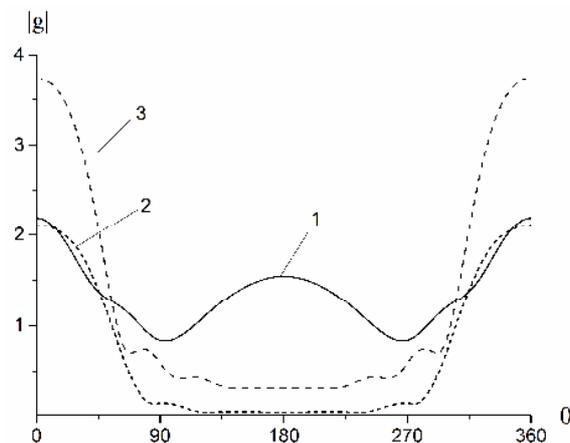


Рис.3. Угловые зависимости модуля диаграммы рассеяния для тела, покрытого экраном, с различным углом раскрытия. Дифракция на вытянутом сфероиде.  $\theta_0 = 0$

### Заключение

На основе МПГУ разработан подход для решения трехмерной задачи дифракции плоской волны на пронизываемом теле, частично покрытом абсолютно отражающим экраном. Проведено сравнение результатов расчета дифференциального поперечника рассеяния, полученных комбинированным методом, с результатами, полученными методом Т-матриц и МПГУ на основе функции Грина пронизываемого шара. Показано хорошее совпадение результатов расчета, полученных всеми тремя методами. Представлены угловые зависимости модуля диаграммы рассеяния для вытянутого сфероида, покрытого экраном. Показано, что при осевом падении плоской волны и при условии, что экран покрывает половину границы тела, наблюдается максимум диаграммы рассеяния в направлении обратного рассеяния, который отсутствует как для тела, не покрытого экраном, так и для полностью отражающего рассеивателя.

### Список литературы

1. Hawkins S.C., Rother T., Wauer J. A numerical study of acoustic scattering by Janus spheres // J. Acoust. Soc. Am. – 2020. – Vol. 147, no. 6. – P. 4097–4105.
2. Gillman A. An integral equation technique for scattering problems with mixed boundary conditions // Advances Comput. Math. – 2017. – Vol.43. – P. 351–364.
3. Крысанов Д.В., Кюркчан А.Г., Маненков С.А. Два подхода к решению задачи дифракции на сфере Януса. // Акустический журнал. – 2021. – Т. 67, № 2. – С. 126–137.

4. Кюркчан А.Г., Смирнова Н.И. Математическое моделирование в теории дифракции с использованием априорной информации об аналитических свойствах решения. – Москва: Медиа Паблицер, 2014. – 226 с.
5. Маненков С.А. Новая версия модифицированного метода дискретных источников применительно к задаче дифракции на теле вращения // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 2. – С. 129-136.

УДК 550.388.2

## ВЛИЯНИЕ КОРРЕКЦИИ МОДЕЛИ IRI ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ОДНОПОЗИЦИОННОГО МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

М. А. Михайлов, В. Д. Черных, Г. Г. Вертоградов

*Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

*Email: mmih@sfnedu.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты однопозиционного определения положения источников радиоизлучения для трасс Лампертхайм–Ростов-на-Дону и Аржантон-Сюр-Крез–Ростов-на-Дону с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера. Использована прогностическая модель IRI-2021, которая корректировалась по данным станций вертикального зондирования (VЗ), располагающихся на различных расстояниях от радиотрасс. Показано, что использование адаптации модели IRI-2021 по VЗ приводит к уменьшению среднеквадратичной погрешности по азимуту. Снижение относительной однопозиционной погрешности оценки дальности для всех мод распространения составляет ~ 1 %. Коррекция по данным станции VЗ, располагающейся на расстоянии свыше 450 км до радиотрассы, не оказывает эффекта или приводит к ухудшению точности однопозиционной оценки координат.

**Ключевые слова:** разделение лучей; радиопеленгация; вертикальное зондирование; декаметровые волны; модель IRI.

## THE EFFECT OF IRI MODEL CORRECTION ON THE ACCURACY OF SINGLE-POSITION LOCATION OF RADIO EMISSION SOURCES IN THE DECAMETER WAVELENGTH RANGE

M.A. Mikhailov, V. D. Chernykh, G. G. Vertogradov

**Abstract.** The results of single-position determination of the position of radio emission sources for the Lampertheim–Rostov-on-Don and Argenton-sur-Creuse–Rostov-on-Don routes using a wide-aperture direction finder-range finder are presented. The IRI-2021 forecast model was used, which was adjusted according to data from vertical sounding stations (VS) located at various distances from radio routes. It has been shown that the use of the IRI-2021 model adaptation for air pollution leads to a decrease in the root-mean-square error in azimuth. The reduction in the relative single-position range estimation error for all propagation modes is ~1%. Correction according to VZ station data located at a distance of more than 450 km from the radio path has no effect or leads to deterioration of the signal station location.

**Keywords:** beam separation; radio direction finding; vertical sounding; decameter waves; IRI model.

### Введение

Задача измерения двухмерных угловых координат источника радиоизлучения (ИРИ) в КВ-диапазоне имеет важный практический аспект, при ее решении появляется возможность однопозиционным способом [1] определять координаты ИРИ. При определении местонахождения ИРИ необходимо определить углы прихода одного луча и знать пространственное распределение электронной концентрации. С учетом того, что для КВ-диапазона свойственны многолучевая структура в зоне приема и пространственная неравномерность [2-3], в условиях изменяющейся ионосферы во времени возникают существенные трудности при решении текущей задачи. Погрешности однопозиционного местопределения ИРИ при использовании прогностической модели IRI исследованы

экспериментально многими авторами, в том числе и в работах [4–5]. Представленные в специальной литературе исследования посвящены изучению нижних частей ионосферы преимущественно в дневное время суток.

Результаты показывают, что при коррекции увеличивается погрешность определения дальности для E-слоя. В большинстве задач определения расстояния до ИРИ основной вклад в погрешности вносит F-слой, в связи с этим *цель данной работы* заключалась в анализе данных однопозиционного местоопределения ИРИ, полученных с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера, с учетом адаптации ионосферы по данным ВЗ и без такой коррекции.

### Условия измерения углов прихода

В экспериментах использован многоканальный широкоапертурный комплекс измерения углов ДКМВ. Антенная решетка, установленная на площадке 40x40 м и состоящая из восьми пассивных антенных элементов (АЭ) с произвольной конфигурацией и высотой 9 м, размещена вблизи Ростова-на-Дону. Прием сигналов происходил в различное время суток на протяжении недели на различных трассах с разным расстоянием между передатчиком и приемником. Трассы расположены в среднеширотной полосе северного полушария.

Процесс обработки осуществлялся с помощью 8-канального когерентного радиоприемного устройства прямого усиления. Оцифровывался сигнал с использованием 16-разрядного АЦП. Фазовая неидентичность каналов не превышает 3°, а амплитудная – 2%. Инструментальная среднеквадратичная погрешность (СКО) – не более 0.3°. Для разделения в зоне приема КВ-сигналов использовался метод, в основу которого заложен принцип спектральной обработки во временной и пространственной областях с предварительной частотно-временной обработкой [4], который основывается на методе MUSIC.

Экспериментальные исследования проводились круглосуточно в декабре 2023 года. В качестве контролируемых ИРИ были выбраны вещательные станции, располагающиеся в городах Лампертхайм и Аржантон-Сюр-Крëз.

Передатчик, расположенный в Лампертхайме, работал непрерывно на частотах 12040, 13600 и 15690 кГц (длина трассы 2320 км, азимут 276.18°). При обработке результаты пеленгования разбивались на два временных интервала. Утренний сеанс – в промежутке времени от 05:30 (UT) до 10:30 (UT) и дневной – в диапазоне от 10:30 (UT) до 15:30 (UT) для частоты 13600 кГц. Аналогично на частоте 15690 кГц анализ сигналов выполнялся на двух временных интервалах: один – от 07:00 (UT) до 11:00 (UT), а второй – от 11:00 (UT) до 15:00 (UT). Для частоты 12040 кГц анализ выполнен во временном отрезке от 16:30 (UT) до 19:00 (UT).

Станция, располагающаяся в городе Аржантон-Сюр-Крëз, работала непрерывно на частотах 11995 и 21580 кГц (длина трассы 2886 км, азимут 282.82°). При обработке результатов временные интервалы были разбиты также на два сеанса. Утренний сеанс – в промежутке времени от 08:00 (UT) до 11:00 (UT) и дневной – в диапазоне от 11:00 (UT) до 14:00 (UT) для частоты 21580 кГц. На частоте 11995 кГц анализ сигналов проводился во временном интервале от 18:00 (UT) до 22:00 (UT).

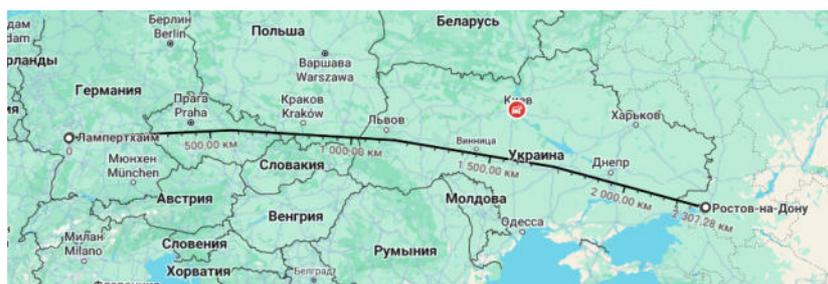
Результаты измерений не считались случайным промахом из-за помех, если они удовлетворяли следующим условиям: однопозиционная оценка дальности до ИРИ попадала в интервал  $\pm 20\%$  от истинного значения, а пеленг ИРИ отличался не более чем на  $\pm 6^\circ$  от истинного азимута на источник.

Коррекция модели IRI проводилась при различных расстояниях от станции ВЗ до радиотрассы. Для трассы Ростов-на-Дону–Лампертхайм станции ВЗ в городах стран Европы имеют следующие значения: Прага – 42 км, Шопрон – 248 км, Юлиусрух – 474 км. Для радиотрассы Ростов-на-Дону–Аржантон-Сюр-Крëз соответственно: Прага – 254 км, Шопрон – 63 км, Юлиусрух – 682 км. Модель корректировалась по узловым параметрам из источника. Измерения проводились в спокойных ионосферных условиях.

### Результаты измерений и моделирование

Для селекции результатов измерений по модам распространения по измеренным углам прихода каждого парциального луча решалась обратная задача оценки координат ИРИ. При этом коррекция модели IRI-2021 осуществлялась по высотам и критическим частотам для  $E$ - и  $F$ -слоев по данным станций ВЗ с шагом по времени 15 минут. По углам прихода отдельных мод распространения рассчитывались многоскачковые лучевые траектории на основе решения характеристических уравнений, записанных для магнитоактивной, трехмерно-неоднородной модельной ионосферы [4, 5]. Координаты точки пересечения соответствующего скачка лучевой траектории с поверхностью Земли (азимут –  $\alpha$ , расстояние до ИРИ –  $S$ ) принимались за оценочное место расположения ИРИ.

Для демонстрации результатов измерений в качестве примера приведены данные, полученные на радиотрассе Ростов-на-Дону–Лампертхайм, расположенной на средних широтах на частоте 15690 кГц для  $F$ -моды. Географическое расположение трассы представлено на рисунке.



Радиотрасса Лампертхайм–Ростов-на-Дону на географической карте (карта до 2022 г.)

В дальнейшем усреднение азимута и дальности ИРИ выполнено по двум временным интервалам на частотах 11995 кГц, 12040 кГц, 13600 кГц, 15690 кГц, 21560 кГц.

Для различных частот  $E$ - и  $F$ -мод распространения находились среднее квадратичное отклонение  $\sigma_\alpha$  оценочного азимута трассы  $\alpha$  от истинного значения  $\alpha_0$ , относительное среднее квадратичное отклонение расстояния до ИРИ  $\sigma_S/S_0$  от истинного значения  $S_0$ .

Результаты, полученные для нескольких часовых интервалов, приведены в таблице. Здесь указаны также объемы выборок  $N$ , по которым получены результаты, помещенные в таблицу. Эта колонка иллюстрирует вероятность оценки координат ИРИ однопозиционным методом после адаптации ионосферной модели по данным ВЗ. Видно, что коррекция по данным ВЗ существенно увеличивает вероятность оценки координат ИРИ для распространения сигналов  $F$ -модой для станций, располагающихся на расстояниях 42 км и 248 км до радиотрассы. Также практически во всех временных интервалах наблюдается снижение среднее квадратичного отклонения по азимуту и в некоторых случаях уменьшение относительного среднее квадратичного отклонения по расстоянию. При расстоянии до трассы от корректирующей станции 474 км Ростов-на-Дону–Лампертхайм без адаптации модели IRI удалось получить лучшие оценки координат при отражении от слоя  $F$ -ионосферы.

Сводка данных, полученных для частоты 15690 кГц

Восход (07:00-11:00 UT), $f = 15690$ кГц							
Коррекция	Мода	$\sigma_S$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_S/S_0$	N
Отсутствует	2F	181,6	2,79	3,29	21	7,83	200
	3F	173,2	3,9	3,8	28	7,46	159
Полдень (11:00-15:00 UT), $f = 15690$ кГц							
Коррекция	Мода	$\sigma_S$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_S/S_0$	N
Отсутствует	2F	215,9	2,47	4,35	21	9,35	257
	3F	161	4,35	5,07	29	6,94	91
Восход (07:00-11:00 UT), $f = 15690$ кГц, Прага							
Коррекция	Мода	$\sigma_S$	$\sigma_\alpha$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_S/S_0$	N
По узловым параметрам	1F	200	2,54	2,35	17	8,87	23
	2F	207,9	1,25	3,29	19	9,21	755
	3F	237,1	1,9	5,32	20	10,3	1619

Окончание таблицы

Полдень (11:00-15:00 UT), f = 15690 кГц, Прага							
Коррекция	Мода	$\sigma_f$	$\sigma_a$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_f/S_0$	N
По узловым параметрам	2F	251,84	1,77	3,98	16	11,16	1942
	3F	264,21	1,73	3,84	18	11,71	5564
Восход (07:00-11:00 UT), f = 15690 кГц, Шопрон							
Коррекция	Мода	$\sigma_f$	$\sigma_a$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_f/S_0$	N
По узловым параметрам	2F	189,27	2,86	4,7	13	6,56	20
	3F	255,3	1,71	5,63	19	8,85	907
Полдень (11:00-15:00 UT), f = 15690 кГц, Шопрон							
Коррекция	Мода	$\sigma_f$	$\sigma_a$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_f/S_0$	N
По узловым параметрам	2F	146,91	1,08	3,66	16	5,09	603
	3F	319,9	1,51	3,59	16	11,08	2127
Полдень (11:00-15:00 UT), f = 15690 кГц, Юлиусрух							
Коррекция	Мода	$\sigma_f$	$\sigma_a$	$\sigma_\Delta$	$\langle \Delta \rangle$	$\sigma_f/S_0$	N
По узловым параметрам	3F	271,78	1,16	7,12	21	11,71	17

### Заключение

Коррекция ионосферной модели IRI по узловым параметрам ионосферных слоев приводит к идентификации части результатов пеленгования на частотах 11995 кГц и 12040 кГц с E-модой распространения, что обеспечивает значительное уменьшение ошибок однопозиционного местоопределения.

Применение коррекции модели IRI по данным станции ВЗ, располагающейся на расстоянии свыше 450 км, приводит к ухудшениям или не оказывает эффекта на качество однопозиционного местоопределения ИРИ.

По результатам однопозиционного местоопределения в процессе непрерывных круглосуточных измерений в декабре 2023 года на двух трассах протяженностью около 2600 км в условиях выделения парциальных мод распространения установлено, что коррекция прогностической модели ионосферы IRI-2021 по данным ВЗ снижает относительную среднеквадратичную погрешность по расстоянию на величину около 1 % и приводит к уменьшению среднеквадратичного отклонения по азимуту.

### Список литературы

1. Gething P. J. D. Radio direction finding and superresolution. – London: Peter Peregrinus Ltd, 1990. – 365 p.
2. Kravcov Y.A., Orlov Y.I. Geometrical Optics of Inhomogeneous Media. – Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1990. – 312 p.
3. Lay K. A real-time HF Single-Station Location system development// Radar, 2008: International Conference, Adelaide, Australia, 2008. – Pp.309-310.
4. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Е. Г. Чайка, В. А. Валов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин, А. С. Стародубровский // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 1072-1092.
5. Вертоградов Г. Г., Чайка Е. Г. Оценка точности однопозиционного местоопределения на среднеширотных трассах при различных способах задания ионосферной обстановки // Радиотехника. – 2016. – № 11. – С. 217-224.

УДК 621.396.967

## ОЦЕНКА КООРДИНАТ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ И УГЛОВ ПРИХОДА РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**В. Ю. Нестеров, Г. Г. Вертоградов**

*Южный федеральный университет, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5  
E-mail: ggvertogradov@sfnedu.ru, vadsterov@sfnedu.ru*

**Аннотация.** Представлен сравнительный анализ двух способов радиолокационного обнаружения и оценки координат объектов, движущихся в атмосфере Земли. Оба способа основаны на минимизации невязки между измеренными и моделируемыми значениями характеристик рассеянного излучения. Приведено краткое описание использованных программно-аппаратных комплексов.

**Ключевые слова:** пассивная когерентная радиолокация; КВ-диапазон; имитационное моделирование; распространение радиоволн; рассеянное излучение

## ESTIMATION OF MOVING OBJECTS COORDINATES BASED ON SIMULTANEOUS MEASUREMENTS OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT AND SCATTERED RADIATION DIRECTION OF ARRIVAL

**V. Y. Nesterov, G. G. Vertogradov**

**Abstract.** A comparative analysis of two methods of moving in the Earth's atmosphere objects detection and coordinate estimation is presented. Both methods are based on minimizing the discrepancy between the measured and modeled values of scattered radiation characteristics. A brief description of the software and hardware used is given.

**Keywords:** passive coherent location; SW-band; simulation model; radiowave propagation; scattered radiation

### Введение

В КВ-диапазоне применение систем пассивной когерентной радиолокации представляется особенно перспективным ввиду особенностей распространения коротких волн в ионосферном канале, благодаря которым реализованы образцы станций загоризонтного обзора [1,2]. Кроме того, в КВ-диапазоне имеется широкое разнообразие вещательных станций с неподавленной несущей частотой, излучение которых может быть использовано в сравнительно простых программно-аппаратных комплексах, а в точке приёма становится возможным регистрировать рассеянные сигналы сразу нескольких станций. В этом случае задачу обнаружения и оценки координат объектов наблюдения можно решить при помощи простейшей имитационной модели распространения радиоволн, располагая лишь данными о доплеровском сдвиге частоты и амплитуде рассеянных сигналов двух различных станций [3]. Путём дополнительного измерения углов прихода рассеянного излучения достигается возможность определения местоположения объекта наблюдения по сигналу подсвета единственной станции [4]. Ранее предполагалось, что оценки координат движущихся объектов, получаемые двумя вышеописанными способами, должны приближённо совпадать, однако до сих пор экспериментов по синхронному измерению и обработке данных проведено не было.

*Целью работы* являлся сравнительный анализ данных, получаемых двумя различными способами оценки координат объекта, движущегося в атмосфере Земли, при синхронных измерениях характеристик рассеиваемого им излучения.

Для достижения цели решались следующие *задачи*: измерение характеристик рассеянного излучения двумя различными программно-аппаратными комплексами; построение простейших имитационных моделей для оценки координат объекта по характеристикам рассеянного излучения; сравнительный анализ полученных оценок.

### Описание программно-аппаратной части

В ходе экспериментов использовались два различных программно-аппаратных комплекса, позволяющих измерять параметры рассеянного излучения.

Одноканальный многочастотный доплеровский стенд КВ-диапазона [3] был применён для измерения амплитуды и частоты сигналов, рассеиваемых движущимися в атмосфере Земли объектами. В его состав входили V-образная антенна с длиной плеча 100 м и углом раскрытия 40°, цифровой приёмник с возможностью выделения до 32 частотных каналов шириной полосы 10 кГц, 14-разрядный АЦП, высокостабильный опорный генератор и ЭВМ для контроля работы стенда и записи квадратурных компонент сигналов.

Радиопеленгатор КВ-диапазона [5] в ходе эксперимента использовался для измерения углов прихода, амплитуды и частоты рассеянных сигналов и состоял из следующих функциональных узлов: антенная решётка из 16 активных антенн высотой 2.5 м, 16-канальное цифровое радиоприёмное устройство (РПУ) и ЭВМ. При обработке данных радиопеленгатора выполнялись следующие действия. На первом шаге формировалась состоятельная оценка спектральной плотности мощности в полосе РПУ, далее выполнялось объединение сигналов, коррелированных в частотной и затем в пространственной области. Далее с помощью алгоритма MUSIC [6] выполнялась оценка углов прихода принятых сигналов.

В результате синхронных измерений на внешних запоминающих устройствах сохранялись два типа данных – результаты измерений одноканального многочастотного доплеровского стенда и результаты измерений посредством радиопеленгатора.

В качестве станций подсвета в экспериментах использовались широкоэмиттерная станция «Radio Exterior De Espana», расположенная в точке с координатами 39.959°С, -3.433°В с частотой излучения 21610 МГц, и станция точного времени РВМ, находившаяся в точке с координатами 47.239° С, 39.642° В и работавшая на частоте 9996 МГц. Измерения проводились в декабре 2019 года, при этом доплеровским стендом регистрировались сигналы на частотах  $f_1 = 9996$  МГц и  $f_2 = 21610$  МГц, а пеленгатором – на частоте  $f_2$ .

### Результаты имитационного моделирования

Алгоритм обработки данных измерений был основан на автоматическом выделении временных треков из характеристик рассеянных сигналов движущихся объектов [4], а также минимизации невязки  $L$  между измеренными и моделируемыми значениями при помощи метода наименьших квадратов:

$$L = w_1 \sum_{t=0}^T ((\hat{\alpha}^t)^2 - (\alpha^t)^2) + w_2 \sum_{t=0}^T ((\hat{\varepsilon}^t)^2 - (\varepsilon^t)^2) + w_3 \sum_{t=0}^T ((\hat{E}^t)^2 - (E^t)^2) + w_4 \sum_{t=0}^T ((\hat{\delta f}^t)^2 - (\delta f^t)^2), \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\varepsilon$ ,  $E$ ,  $\delta f$  – измеренные значения азимута, угла места, амплитуды и доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) в моменты дискретного времени  $t$ ;  $T$  – длительность временного интервала, в течение которого объект был доступен для наблюдения хотя бы одним из программно-аппаратных комплексов,  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\varepsilon}$ ,  $\hat{E}$ ,  $\hat{\delta f}$  – моделируемые значения соответствующих величин;  $w_1, w_2, w_3$  и  $w_4$  – весовые коэффициенты для согласования масштабов слагаемых.

При обработке данных измерений доплеровского стенда первые два весовых коэффициента полагались равными нулю:  $w_1 = 0, w_2 = 0$ . В качестве модели лучевой траектории была принята многоскачковая мода ионосферной волны, причём предполагаемое число скачков вычислялось на основе модели IRI. На каждой итерации для пробных значений начальных географических координат, вектора скорости, ускорения и величины эффективной площади рассеяния (ЭПР) вычислялись моделируемые временные зависимости азимута, угла места, амплитуды и ДСЧ. Результатом применения алгоритма являлась модель траектории движущегося объекта.

На рисунке 1а и б приведены результаты измерений и моделирования зависимостей ДСЧ от времени. На рисунке 1в, г и д представлены зависимости от времени измеренной и моделированной амплитуды принимаемых сигналов соответственно для радиопеленгатора, доплеровского стенда на частоте  $f_1$  и доплеровского стенда на частоте  $f_2$ .

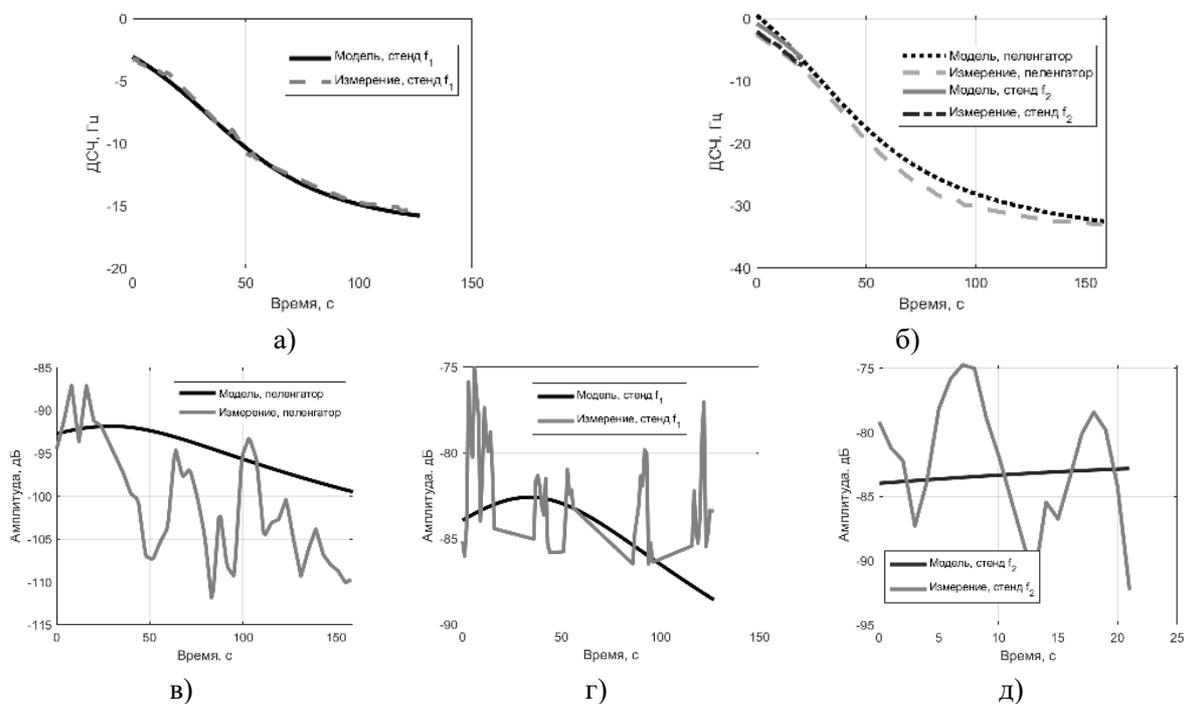


Рис. 1. Оценки доплеровского сдвига частоты и мощности рассеянных сигналов

Как видно на рисунке выше, измеренные и смоделированные зависимости ДСЧ демонстрируют хорошее совпадение. Также можно заметить, что на частоте  $f_2$  длительность наблюдения объекта доплеровским стендом (около 22 секунд) значительно меньше, чем длительность наблюдения на частоте  $f_1$  (около 130 секунд). Предположительно, этот эффект можно объяснить помехами радиоприему на частоте  $f_2$ , в то время как многоканальный радиопеленгатор успешно справляется с обнаружением и оценкой параметров рассеянного сигнала на этой частоте. На рисунке 2 показаны временные зависимости азимута (а), радиальной дальности (б) и угла места (в).

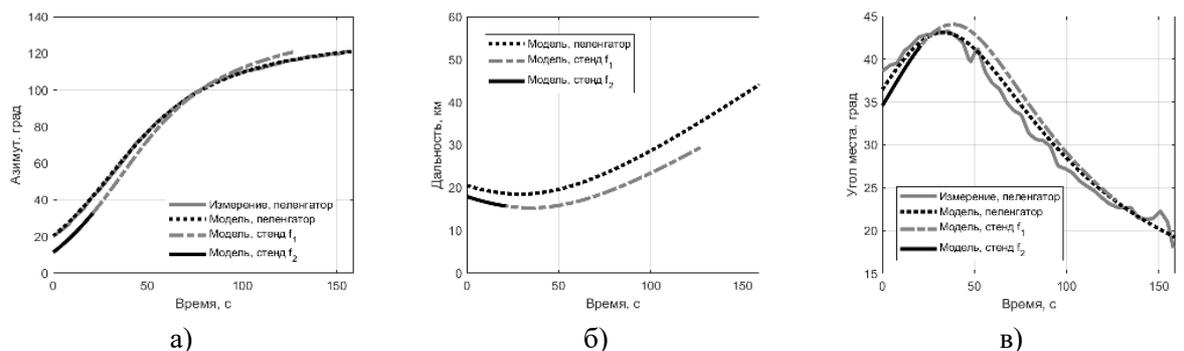


Рис. 2. Оценки азимута, дальности угла места движущегося объекта

Из рисунка 2а видно, что моделируемая (черная штриховая линия) и измеряемая (серая сплошная линия) зависимости азимута от времени, соответствующие измерениям радиопеленгатором, полностью совпадают. Оценки зависимости азимута от времени, соответствующие измерениям доплеровским стендом, отличаются не более чем на  $5^\circ$ . Аналогичные рассуждения, согласно рисунку 2в, справедливы и для зависимости угла места от времени. Оценки дальности, полученные двумя способами, отличаются на 2.5 – 6 км.

Для наглядности на рисунке 3 показаны траектории объекта, полученные двумя различными способами, красной штриховой и синей сплошной линиями обозначены соответственно результаты измерения и обработки данных доплеровского стенда и радиопеленгатора. Белым кругом с синей границей обозначено место, где расположены программно-аппаратные комплексы, посредством которых проводились измерения.

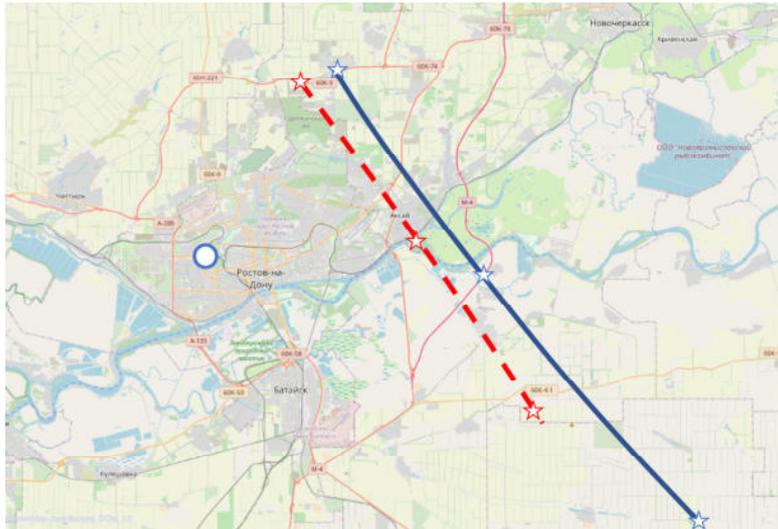


Рис. 3. Оценки траекторий движущегося объекта, нанесённых на карту Ростовской области

### Заключение

Проведенные синхронные измерения с применением одноканального многочастотного доплеровского стенда и коротковолнового радиопеленгатора позволили выполнить обнаружение и независимые оценки траектории объекта, движущегося на юго-восток, на удалении до 45 км от пункта приёма. Сравнительный анализ полученных результатов для двух различных способов показывает разницу до  $5^\circ$  по угловым координатам и до 6 км по дальности. Результаты измерений и моделирования доказывают возможность оценки пространственной траектории движущегося объекта на основе измерения ДСЧ на нескольких частотах с использованием одного многоканального РПУ.

### Список литературы

1. Пассивная когерентная радиолокация / А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов, Д. А. Ковалев, В. М. Кутузов, В. Н. Михайлов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. – 163 с.
2. Ткачев Г. Н., Готовчиц И. В., Крылов Б. Н. Результаты исследований по проблеме полуактивной радиолокации в диапазоне коротких волн // Радиолокация и радиосвязь : доклады IV Всероссийской конференции (Москва, 29 ноября – 3 декабря 2010 г.). – Москва: ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2010. – С. 264-268.
3. Вертоградов Г.Г., Нестеров В.Ю. Решение задачи пассивной когерентной радиолокации по результатам одноканальных измерений характеристик рассеянного КВ-излучения// Техника радиосвязи. – 2022. – № 4 (55). – С. 7-15.
4. Вертоградов Г.Г., Нестеров В.Ю. Оценка параметров движущихся объектов по результатам пеленгования рассеянного излучения широкоэмиттерных радиостанций в КВ диапазоне // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ: В 5 т., Воронеж, 18–20 апреля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 202-208.
5. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ЛЧМ-ионозонда-радиопеленгатора / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Е. Г. Чайка, В. А. Валов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин, А. С. Стародубровский // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2017. – Т. 60, № 12. – С. 1072-1092.
6. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – Москва: Мир, 1990. – 584 с.

УДК 539.23 + 537.874

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

С. В. Никитин, Э. М. Трачук, Д. Е. Шашин

*Поволжский государственный технологический университет, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3*

*E-mail: serzh-nikitin-02@mail.ru*

*E-mail: temyola@mail.ru*

*E-mail: ShashinDE@volgatech.net*

**Аннотация.** Выполнено исследование тонких пленок меди. Методом магнетронного распыления были получены образцы пленок на термочувствительной подложке. Методом оптической спектроскопии исследован спектр пропускания полученных пленок. Результатом работы является реализация теплоотражающих оптически прозрачных пленок на термочувствительных подложках с требуемыми параметрами.

**Ключевые слова:** тонкие пленки; спектроскопия; магнетронное распыление; инфракрасное излучение; электромагнитные волны

## INVESTIGATION OF A THIN-FILM COATING FOR REFLECTING ELECTROMAGNETIC RADIATION OF VARIOUS RANGES

S. V. Nikitin, E. M. Trachuk, D. E. Shashin

**Abstract.** The study of thin copper films was carried out in the work. Magnetron sputtering was used to obtain film samples on a thermosensitive substrate. The transmission spectrum of the obtained films has been studied by optical spectroscopy. The result of the work is the realization of heat-reflecting optically transparent films on thermosensitive substrates with the required parameters.

**Keywords:** thin films; spectroscopy; magnetron sputtering; infrared radiation; electromagnetic waves

### Введение

Тонкопленочные технологии применяются для защиты от различных внешних факторов. Одним из них является тепловое излучение, для защиты от которого требуется специальное покрытие. Оно используется в информационно-измерительных приборах, работающих в условиях высоких температур [1, 2]. Также применяется в металлургической области, в частности, в металлургических очках и щитах.

Защититься от инфракрасного излучения можно при помощи плотных материалов, металлических экранов, но в некоторых случаях требуется его прозрачность. Для этого используют силикатное или кварцевое стекло, полимеры, которые легки, просты в обработке, безопасны.

На подложки наносят металлические пленки для увеличения области спектра электромагнитных волн, в том числе и от радиоволн, от которого будет происходить защита. Распространенными материалами нанесения являются серебро, алюминий и соединения ртути. В редких случаях используют золото и платину.

Таким образом, *актуальность исследования* заключается в необходимости создания дешевых теплопоглощающих оптически прозрачных пленок на термочувствительных подложках.

*Целью данной работы* является получение теплопоглощающих оптически прозрачных пленок меди на термочувствительных подложках.

### Основные идеи исследования

Примером термочувствительной подложки является используемая в работе полимерная линза из поликарбоната Mascon PC-010U M148BR, температура плавления которой 125°C. Она достаточно устойчива к воздействию ультрафиолетового излучения и излучений высокой энергии. Кроме того, обладает низкой гигроскопичностью, высокой атмосферостойкостью и влагостойкостью. Оптическая прозрачность до 90 % [3].

В таблице 1 приведены значения процентов отражения для различных металлов при воздействии электромагнитного излучения с длиной волны в 0,5 мкм (видимый диапазон) и 5,0 мкм (инфракрасный диапазон) [4].

Таблица 1. Проценты отражения для различных металлов, %

Материал	$l = 0,5 \text{ мкм}$	$l = 5,0 \text{ мкм}$
Au	68,80	98,95
Pt	65,70	93,70
Ag	95,50	99,20
Al	91,40	98,20
Cu	63,20	98,90

Медь по своим оптическим свойствам хорошо подходит для данной работы, потому что слабо отражает видимый свет при значительном снижении воздействия инфракрасного излучения. На рисунке 1 представлены графики зависимости коэффициентов отражения (сплошные линии) и пропускания (пунктирные линии) пленок меди различной толщины от длины волны излучения [5].

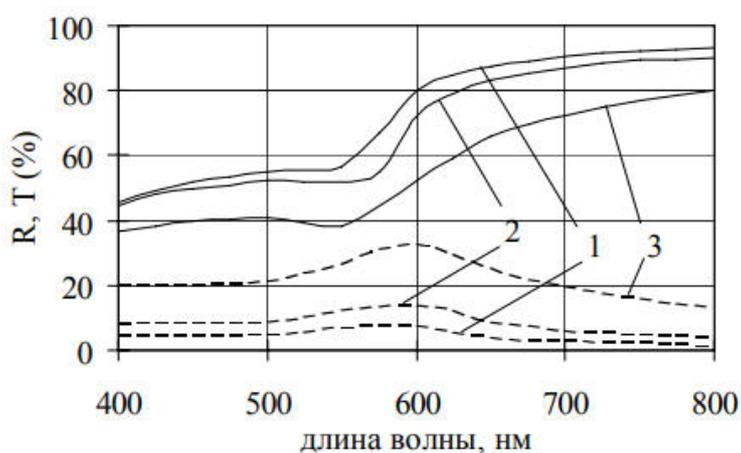


Рис. 1. График зависимости процента пропускания (пунктирные линии) и коэффициента отражения (сплошные линии) от длины волны излучения для пленок меди различной толщины

Формирование тонких пленок меди проводилось методом импульсного магнетронного распыления с использованием модернизированной вакуумной установки УМР-71 с частотной-регулируемой системой вращения подложкодержателя. Использованные технологические параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технологические параметры формирования пленок меди

Газ	Аргон – 100 %
Давление в вакуумной камере, Па	1
Напряжение, В	466
Ток, А	0,5
Время напыления, с	100
Толщина пленки, нм	82 нм

На рисунке 2 изображен график зависимости коэффициента пропускания от длины волны излучения. По полученной графической зависимости можно заметить, что коэффициент пропускания электромагнитного излучения видимого диапазона около 5 %. Кроме того, можно заметить, что спектр пропускания в области ультрафиолетового диапазона снижается, что связано с использованием полимерной подложки. Также можно наблюдать, что с увеличением длины волны в инфракрасную область спектра происходит снижение электромагнитного излучения, что связано с толщиной пленки меди.

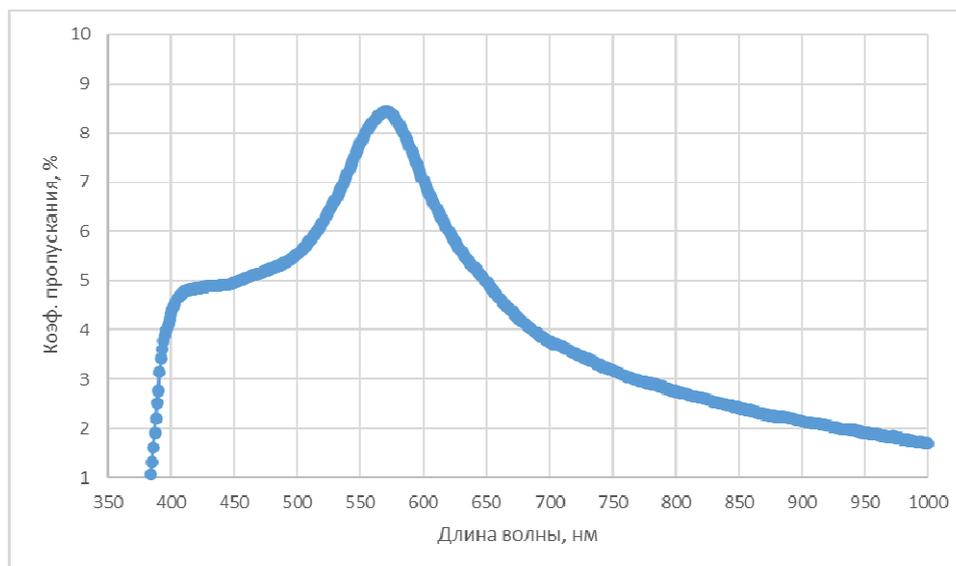


Рис. 2. График зависимости коэффициента пропускания от длины волны излучения для термочувствительной подложки

### Заключение

Методом импульсного магнетронного распыления сформированы образцы тонкопленочных покрытий на основе тонких пленок меди. Средняя толщина полученных пленок составляет 82 нм.

По полученной графической зависимости спектра пропускания мы можем заметить, что до 380 нм происходит отражение электромагнитного излучения, что связано с выбором полимерной подложки, которая не пропускает ультрафиолетовую часть спектра. Следует отметить, что оптимально подобранная толщина пленки оказывает влияние на пропускание в инфракрасной области. Так, электромагнитное излучение в области от 780 нм отражается, при этом пропускание пленки в видимом диапазоне длин волн составляет около 5 %.

### Список литературы

1. Шашин Д. Е. Разработка математической модели формирования тонких плёнок оксида цинка с заданными значениями комплексной диэлектрической проницаемости // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2018. – № 4(40). – С. 74-81. – DOI 10.15350/2306-2819.2018.4.74. – EDN YPSPYA.
2. Влияние термической обработки на строение и характеристики автоэмиссионных катодов на слоистых структурах нитрида титана и углеродных наностенок / А. Ф. Белянин, В. В. Борисов, Н. И. Сушенцов [и др.] // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 4-11. – EDN ZCJBAH.
3. Ковтун В. А. Полимерные материалы и наполнители: свойства, технологические режимы обработки давлением. – Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2010. – 27 с.
4. Вологодская областная универсальная научная библиотека: Металлооптика : [сайт]. – Вологда, 2024. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/075/863.htm> (дата обращения: 12.10.2024).
5. Андреев С. В., Губанова Л. А., Путилин Э. С. Оптические покрытия: методические указания к лабораторному практикуму по курсу. – СПб.: ИТМО, 2006. – 86 с.

УДК 550.388.2

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ДЧХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРЯМЫМ ВАРИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

И. А. Носиков<sup>1</sup>, М. В. Клименко<sup>1</sup>, А. М. Падохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал ИЗМИРАН, 236016, г. Калининград, ул. Пионерская, 61

E-mail: [ianosikov@wdizmiran.ru](mailto:ianosikov@wdizmiran.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

E-mail: [padokhin@physics.msu.ru](mailto:padokhin@physics.msu.ru)

**Аннотация.** Прямой вариационный метод, реализованный в виде программной модели, апробирован и применен для решения задач наклонного зондирования в условиях неоднородной ионосферы, заданной с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13. Результаты расчетов дистанционно-частотных характеристик показали принципиальную применимость метода для решения вычислительных задач, а также продемонстрировали потенциал в решении задач коррекции параметров среды.

**Ключевые слова:** радиоволны; ионосфера; геомагнитное поле; численная модель; принцип Ферма

## FEATURES OF OBLIQUE SOUNDING SIMULATION BY DIRECT VARIATIONAL METHOD

I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, A. M. Padokhin

**Abstract.** The direct variational method, implemented as a software model, was tested and applied to solve problems of oblique sounding in an anisotropic ionosphere, using the NeQuick2 and IGRF13 models. The oblique sounding simulation showed the fundamental applicability of the method for solving computational problems, and also demonstrated the potential in assimilation problems.

**Keywords:** radio waves; ionosphere; geomagnetic field; numerical model; Fermat's principle

### Введение

Моделирование распространения радиоволн – область исследований, направленная на расчет характеристик радиоволн при их распространении через атмосферу. Процесс моделирования включает использование математических и вычислительных методов для описания поведения радиоволн в различных геофизических средах. Современные программные комплексы, основанные на геометрооптическом приближении, позволяют осуществлять краткосрочные и среднесрочные прогнозы оптимальных характеристик высокочастотного радиоканала в различных геомагнитных условиях [3, 7].

При решении прикладных задач радиосвязи отдельный интерес представляет расчет лучей между двумя заданными положениями передатчика и приемника. Математически данная задача формулируется как краевая, и стандартным подходом к ее решению является метод пристрелки. Другим подходом для решения двухточечной задачи является прямой вариационный метод, позволяющий определять искомые траектории в соответствии с принципом Ферма. Весомый вклад в развитие вариационного подхода в задачах расчета радиотрасс представлен в работе [2]. Дальнейшее развитие прямого вариационного метода было основано на методе обобщенной силы [5], позволяющем последовательно определять все радиолучи в неоднородной изотропной среде. В данной работе метод обобщенной силы дополнен и усовершенствован для расчета радиолучей в анизотропной ионосфере.

### Метод

Запишем принцип Ферма для фазового пути луча в анизотропной ионосфере:

$$\delta S[\gamma] = \delta \int_A^B n(\vec{r}, \vec{u}) \vec{u} d\vec{l} = \delta \int_A^B n(\vec{r}, \vec{u}) \cos \alpha dl = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{r}$  – вектор, задающий положение луча в пространстве;  $\vec{u}$  – единичный вектор импульса, задающий направление волнового фронта радиоволны;  $d\vec{l}$  – лучевой вектор, задающий направление луча в пространстве;  $n(\vec{r})$  – показатель преломления в точке  $\vec{r}$ ;  $\alpha$  – угол между единичным вектором импульса и лучевым вектором, так что  $\vec{u} d\vec{l} = \cos \alpha dl$ .

Используя метод прямоугольников, запишем выражение для функционала (1):

$$S[\gamma] \approx \sum_{i=0}^P n_i \vec{u}_i \cdot (\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i), \quad (2)$$

где  $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$  задает положение каждого  $i$ -го узла траектории;  $\vec{u}_i$  – единичный вектор импульса, заданный на интервале между  $i$  и  $i + 1$  узлами;  $n_i = n(\vec{r}_i)$ ,  $\vec{r}_0 = \vec{r}_A$ ,  $\vec{r}_{P+1} = \vec{r}_B$ . Здесь кривая  $\gamma$  аппроксимируется кусочно-линейной кривой с числом узлов  $P + 2$ , где граничные точки зафиксированы в соответствии с граничными условиями, а  $P$  промежуточных узлов требуется привести к оптимальному положению в соответствии с принципом Ферма.

Верхние лучи могут быть получены прямой минимизацией функционала (2) на основе первой производной функционала:

$$\frac{dS}{d\vec{r}_i} = \frac{\partial S}{\partial \vec{r}_i} + \sum_{k=1}^P \frac{d\vec{\xi}_k}{d\vec{r}_i} \frac{\partial S}{\partial \vec{\xi}_k}, \quad (3)$$

где  $\vec{\xi}_k$  – единичный вектор, перпендикулярный к вектору  $\vec{u}_k$ ;  $\frac{\partial}{\partial \vec{\xi}_k}$  – оператор вращения на сфере единичного радиуса:  $\frac{\partial}{\partial \vec{\xi}_k} \equiv \frac{\partial}{\partial \vec{u}_k} \Big|_{\perp} = \frac{\partial}{\partial \vec{u}_k} - \vec{u}_k \left( \vec{u}_k \frac{\partial}{\partial \vec{u}_k} \right)$ .

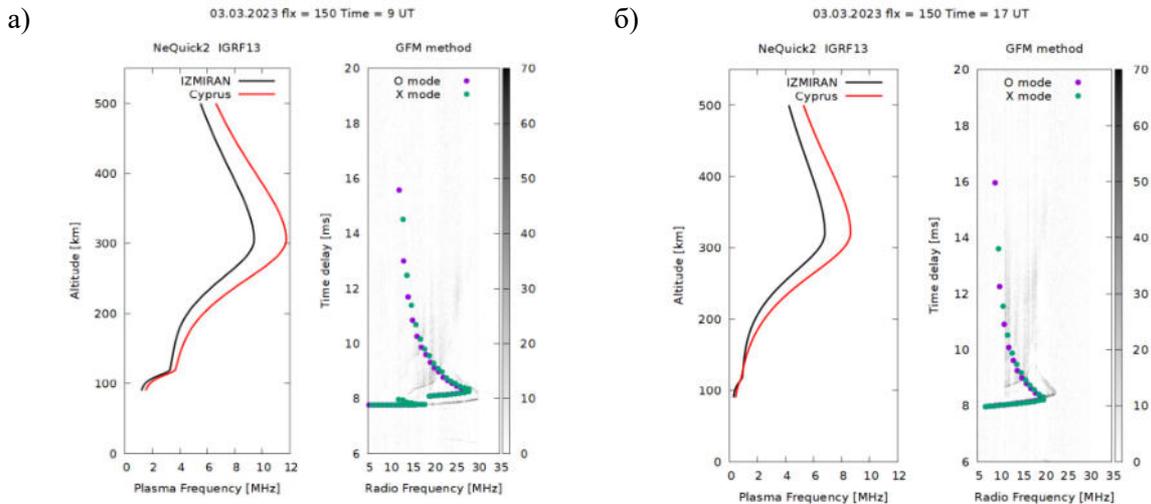
Поиск нижних лучей связан с особенностью определения седловых точек функционала. Как было ранее показано, определение седла возможно на основе сведения задачи к поиску минимума методом минимальной моды [5]. Для реализации метода необходимо рассчитать гессиан функционала в анизотропной ионосфере:

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 S}{\partial \vec{r}_i \partial \vec{r}_j} + \sum_{k=1}^P \left[ \frac{d\vec{\xi}_k}{d\vec{r}_j} \frac{\partial^2 S}{\partial \vec{\xi}_k \partial \vec{r}_i} \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что особенность расчета гессиана в анизотропной ионосфере заключается в наличии дополнительного слагаемого, отражающего взаимосвязь координат и импульсов лучевой траектории.

## Результаты

В данном исследовании метод обобщенной силы применяется для расчета лучевых траекторий радиоволн в анизотропной плазме с использованием моделей ионосферы NeQuick2 [4] и магнитного поля IGRF13 [1]. Расчеты выполняются в трехмерной анизотропной среде с учетом горизонтального и вертикального градиента электронной плазмы. Рассмотрим среднеширотную радиотрассу Кипр (34.96 с. ш., 34.08 в. д.) – ИЗМИРАН (55.38 с. ш., 37.32 в. д.). Результаты расчетов лучевых траекторий в диапазоне рабочих частот 3 – 30 МГц для 03.03.2023 и величины потока радиоизлучения  $F10.7 = 260$  представлены на рисунке.



ДЧХ на трассе Кипр – ИЗМИРАН для 3.03.2023. Данные наблюдений показаны черными точками. Результаты расчетов, полученные методом обобщенной силы с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13, представлены цветными обозначениями

Для рассматриваемой радиотрассы в результате последовательного определения всех лучей от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимально применимой частоты (МПЧ) построена характеристика времени группового запаздывания от рабочей частоты (см. рисунок). Расчет выполнялся для обыкновенной и необыкновенной мод соответственно. Верификация полученных результатов осуществлялась с использованием традиционного метода характеристик, дополненного современным алгоритмом пристрелки [6].

### Заключение

В работе представлено дальнейшее развитие прямого вариационного метода для расчета лучевых траекторий радиоволн в реалистичной модели ионосферы. Программная реализация метода позволяет засчитывать все лучи с заданными граничными условиями для обыкновенной и необыкновенной мод. Серии модельных расчетов, выполненных с использованием трехмерных моделей NeQuick2 и IGRF13, продемонстрировали полное согласие с традиционным методом пристрелки.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-77-10004).

### Список литературы

1. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation / P. Alken et al. // Earth, Planets and Space. – 2021. – Т. 73, №. 1. – С. 1-25.
2. Coleman C. J. Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method // Radio Science. – 2011. – Vol. 46(05). – P. 1-7.
3. Krashennnikov I. V., Shubin V. N. Features of Forecasting the Operation of Ionospheric Radio Lines in Upper Rays Modes // Geomagnetism and Aeronomy. – 2023. – Vol. 63(4). – P. 426-433.
4. Nava B., Coisson P., Radicella S. M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics. – 2008. – Vol. 70(15). – P. 1856-1862.
5. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere / I. A. Nosikov, M. V. Klimenko, P. F. Bessarab, G. A. Zhabankov // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 60(2). – P. 491-497.
6. Modeling the HF ray trajectories and vertical and oblique ionograms in the artificially disturbed ionosphere based on radiotomographic data / A. M. Padokhin, E. S. Andreeva, M. O. Nazarenko, M. A. Annenkov, N. A. Tereshin // Moscow University Physics Bulletin. – 2019. – No. 74. – P. 282-290.
7. An Updating of the IONORT Tool to Perform a High-Frequency Ionospheric Ray Tracing / M. Pietrella, M. Pezzopane, A. Pignatelli, A. Pignalberi, A. Settini // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15(21). – P. 5111.

УДК 651.375

## МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ СИММЕТРИЧНОЙ УКОРОЧЕННОЙ АНТЕННЫ КВ-ДИАПАЗОНА

**А. И. Пигалин, Р. Р. Бельгибаев**

*Поволжский государственный технологический университет, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3*

*E-mail: alex.pigalin2014@yandex.ru*

*E-mail: ra4sbt@mail.ru*

**Аннотация.** Современные радиолокационные системы, включающие антенное полотно с большим количеством антенных излучателей, системы автокомпенсации активных помех, антенны передачи информации и усилителей, должны обеспечивать заданный уровень развязки между различными каналами передачи информации и управления.

**Ключевые слова:** КВ-диапазон; антропогенные помехи; укороченная антенна; спектральная плотность мощности; малошумящий усилитель

## LOW NOISE AMPLIFIER FOR SYMMETRIAL SHORTENED HF BAND ANTENNA

A. I. Pigalin, R. R. Belgibaev

**Abstract.** Modern radar systems, including an antenna array with a large number of antenna emitters, automatic active interference compensation systems, information transmission antennas and amplifiers, must ensure a given level of isolation between various information transmission and control channels.

**Keywords:** HF band; anthropogenic interference; shortened antenna; power spectral density; low-noise amplifier

### Введение

Исследования в области разработки усилителей обусловлены потребностью в сокращении их размеров для использования в передовых системах связи, геодезии и радиолокации. С учетом того, что приемо-передающие аппараты как для авиационных, так и для наземных коммуникационных систем становятся всё более компактными, задача уменьшения антенных систем выдвигается на передний план. Основные сложности связаны с необходимостью уменьшить размер антенн, ограниченный длиной волны, на которой они функционируют. Отмечается, что электрически малые антенны характеризуются такими особенностями, как низкое излучающее сопротивление, высокое реактивное сопротивление, низкий КПД, узкая полоса рабочих частот и значительные активные потери в цепях согласования.

Измерение характеристик необходимо для того, чтобы минимизировать проблему шума в приёмных системах. К принципиальным особенностям сигнально-помеховой обстановки, в которой приходится функционировать широкополосному усилителю КВ-диапазона, следует отнести существенный уровень помех во всей полосе частот в связи с резким ростом числа радиосредств не только военного, но и гражданского назначения, а также зачастую малый уровень полезного сигнала.

Полоса КВ-диапазона включает частоты от 3 до 30 МГц, что соответствует длинам декаметровых волн 100-10 м.

КВ-диапазоны обладают рядом преимуществ, включая универсальность, экономические и технические преимущества, большую зону покрытия даже в труднодоступных местах, таких как горы и моря, а также возможность передачи данных с минимальными затратами на спутниковую связь.

К одному из недостатков КВ-связи относят антропогенные помехи и подверженность помех и характеристик радиоканалов вариациям из-за изменчивости ионосферы (рис. 1). Поскольку эффективность систем связи определяется отношением энергии сигнала к спектральной плотности мощности помех, то, не вторгаясь в энергетику системы связи (в саму систему), можно утверждать, что фактором, влияющим на качество связи, остается спектральная плотность мощности помех в каналах на выделенных рабочих частотах.

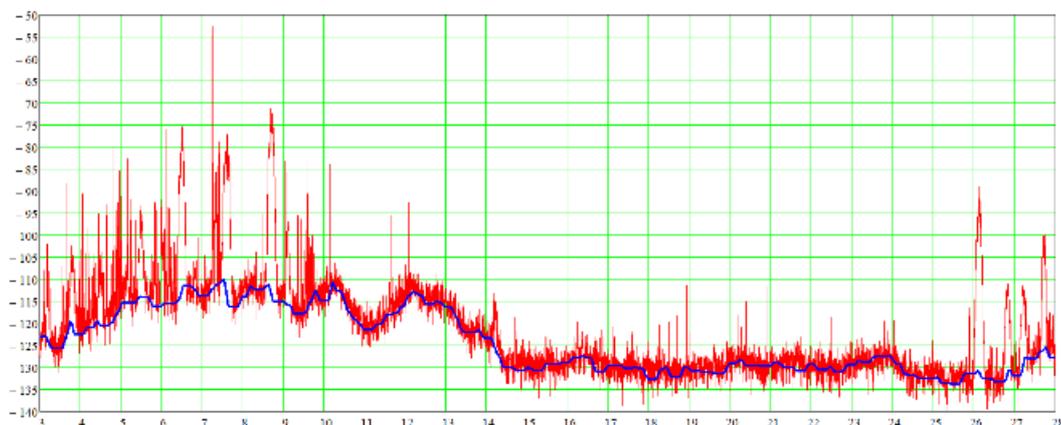


Рис. 1. Спектральная плотность мощности в диапазоне 3-28 МГц с разрешением 3 кГц и усреднением за 1 с (красный цвет), тренд (синий цвет)

Более перспективным является подход, когда для связи выбираются наименее загруженные каналы. Актуальность такого подхода увеличивается в задаче существенного расширения полосы частот каналов.

На дифференциальном усилителе AD8129 собран антенный усилитель для симметричной укороченной антенны (рис. 2). Вся конструкция собрана на двустороннем фольгированном стеклотекстолите размерами 150x45 мм. Ниже 4 МГц AD8129 имеет коэффициент ослабления синфазной составляющей (КОСС, или по-английски CMRR – от Common-Mode Rejection Ratio) выше 80 дБ и два дифференциальных входа с равным и очень высоким (> 4 МОм) импедансом. Для уменьшения помех был использован трансформатор с объемным витком.

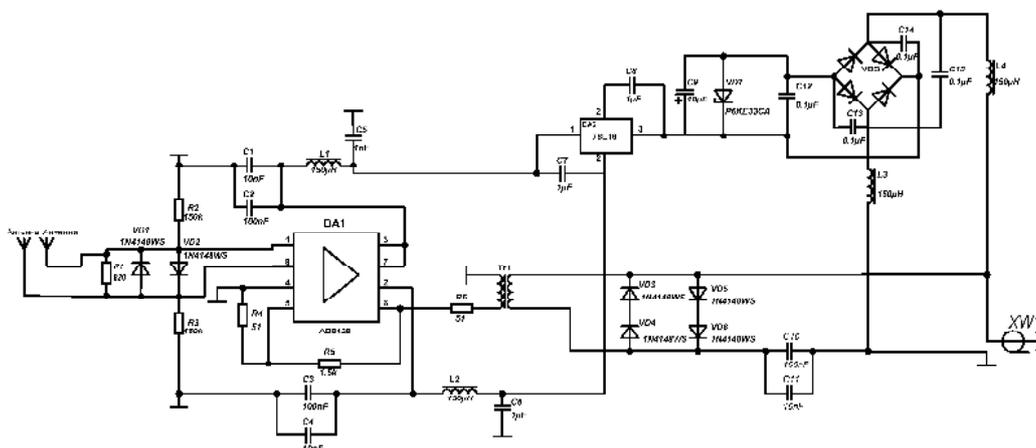


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная

Собрав усилитель для КВ-диапазона, определили параметры коэффициента усиления (30 дБ), АЧХ и ФЧХ (рис. 3)

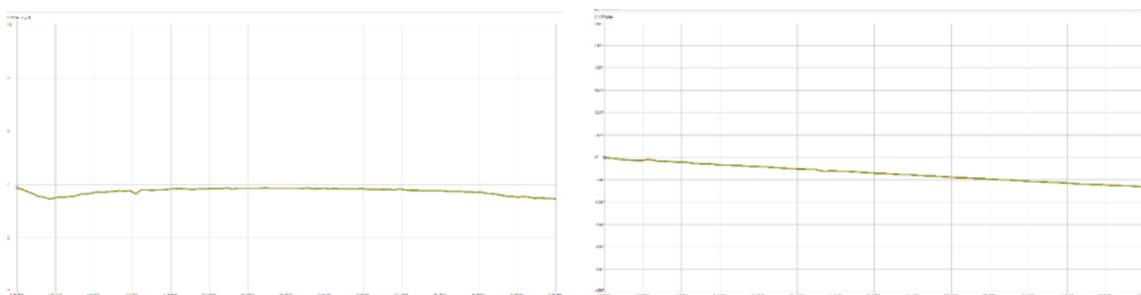


Рис. 3. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

### Заключение

Данная разработка позволит в дальнейшем проводить миниатюризацию антенных систем для перспективных систем связи и навигации. Использование в приемных укороченных антенных системах широкополосных усилителей с равномерной АЧХ и развязывающим трансформатором с объемным витком позволяет увеличить развязку между антенным полотном и радиоприемным устройством и уменьшить габариты антенного полотна. Такие активные антенны могут быть использованы и для снижения заметности, например, БПЛА (беспилотных летательных аппаратов), поскольку не только уменьшаются габариты антенн, но и снижается их эффективная площадь рассеяния.

### Список литературы

1. Гончаренко И. Усилитель приемной антенны // Дифференциальный усилитель для приемных рамочных и ферритовых антенн. – Режим доступа: <http://dl12kq.de/ant/3-96.htm>.
2. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ. – Москва: РадиоСофт, 2016. – 320 с.
3. Гейер Д. Беспроводные сети. Первый шаг: пер. с англ. – Москва: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 192 с.

УДК 550.388.2

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗЫ КОМПЛЕКСНОЙ АМПЛИТУДЫ КОРОТКИХ ВОЛН ВДОЛЬ ЛУЧЕВЫХ ТРАЕКТОРИЙ В ИОНОСФЕРЕ

**К. В. Раубо, В. Е. Захаров**

*Балтийский федеральный университет имени И. Канта,  
236041, Калининград, ул. А. Невского, 14*

*E-mail: Tatarinova180@bk.ru; VEZakharov@kantiana.ru*

**Аннотация.** Данное исследование посвящено численному моделированию изменения фазы комплексной амплитуды коротких волн вдоль лучевых траекторий в ионосфере. Выполнены численные расчеты по исследованию изменения фазы амплитуды в неоднородной структуре коротких волн при распространении в ионосфере с учетом трехмерной неоднородности, анизотропии и дисперсии среды распространения.

**Ключевые слова:** ионосфера; короткие волны; фаза комплексной амплитуды; полевые характеристики; неоднородная структура волн

## NUMERICAL MODELING OF THE PHASE CHANGE OF THE COMPLEX AMPLITUDE OF SHORT WAVES ALONG RAY TRAJECTORIES IN THE IONOSPHERE

**K.V. Raubo, V.E. Zakharov**

**Abstract.** This study is dedicated to the numerical modeling of the phase change of the complex amplitude of short waves along ray trajectories in the ionosphere. Numerical calculations were performed to investigate the phase change of the amplitude in the inhomogeneous structure of short waves during propagation in the ionosphere, taking into account the three-dimensional inhomogeneity, anisotropy, and dispersion of the propagation medium.

**Keywords:** ionosphere; short waves; phase of complex amplitude; field characteristics; inhomogeneous wave structure

### Введение

Ионосфера представляет собой сложную и динамичную среду, где ионизация газов под воздействием солнечного излучения приводит к разнообразным эффектам, влияющим на распространение радиоволн. Короткие волны, обладая высокой чувствительностью к изменению условий в ионосфере, становятся важным объектом для изучения. Данная статья посвящена численному моделированию изменения фазы комплексной амплитуды коротких волн вдоль их траекторий в ионосфере.

Одной из важных задач современной волновой физики является изучение распространения волн в неоднородных анизотропных средах с учетом дисперсионных свойств. [1].

Для исследования распространения волн в слабонеоднородных средах были разработаны приближенные методы решения волнового уравнения. К ключевым из них относятся метод геометрической оптики, применяемый в электродинамике, и аналогичный ему метод ВКБ (Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна), используемый в квантовой механике. Традиционные подходы к решению волнового уравнения основаны на разложении решения в асимптотический ряд, где малый параметр задачи определяется как отношение длины волны к характерному масштабу неоднородности среды.

Метод геометрической оптики широко применяется в теории и моделировании распространения коротких волн в ионосфере [2]. В [3] представлен метод расширенной би-характеристической системы, применяемый к моделированию распространения радиоволн в ионосфере. Трехмерные модели ионосферы и нейтральной атмосферы (экспериментальные IRI2012 [4] и MSIS86 [5]), а также теоретические, например, ГСМ ТИП [6]) не содержат данных измерений или уравнений для производных параметров среды по пространственным координатам.

### Постановка задачи

*Целью* данной работы является численное исследование изменения фазы комплексной амплитуды коротких волн вдоль лучевых траекторий в неоднородной анизотропной плазме ионосферы.

*Задача* заключается в моделировании взаимодействия коротковолновых сигналов с ионосферой с учетом дисперсионных искажений, магнитного поля Земли и других факторов, влияющих на фазовые характеристики радиоволн.

Основные задачи:

- 1) построение лучевых траекторий коротких волн в трёхмерной неоднородной анизотропной ионосфере;
- 2) определение изменения фазы комплексной амплитуды радиосигналов при распространении вдоль этих траекторий;
- 3) расчёт ослабления амплитуды за счет поглощения и расходимости лучей в ионосфере;
- 4) численный анализ зависимостей фазовых сдвигов от параметров среды, таких как концентрация плазмы, высота над поверхностью Земли и величина магнитного поля.

Для расчётов используются следующие уравнения:

Система лучевых уравнений для нормальных волн:

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = \vec{p} - n \frac{\partial n}{\partial \vec{p}} = \vec{d}(\vec{r}, \vec{p}), \quad \frac{d\vec{p}}{d\tau} = n \frac{\partial n}{\partial \vec{r}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – параметр интегрирования вдоль каждой лучевой траектории;

$\vec{p}$  и  $\vec{d}$  – векторы импульса и луча соответственно.

Эти уравнения описывают распространение лучей в неоднородной среде.

Уравнение для фазы комплексной амплитуды вдоль лучевой траектории:

$$\Phi = |\Phi| \exp(ju). \quad (2)$$

Расчет ослабления амплитуды:

$$V_3 = 20 \lg \left( \frac{|\Phi|}{|\Phi_0|} \right). \quad (3)$$

где  $|\Phi_0|$  – значение амплитуды волны при входе луча в ионосферу на высоте  $h = 60$  км.

Формула для фазовых сдвигов:

$$(\vec{\sigma} \vec{\nabla}) u = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \operatorname{Im}(\vec{f}^* \operatorname{rot}(\vec{p} \times \vec{f}) + \vec{p} \times \vec{f} \operatorname{rot} \vec{f}^*). \quad (4)$$

В слабонеоднородной среде на характерных масштабах изменения модуля и фазы комплексной амплитуды волны укладывается большое число длин волн.

Расчёты выполняются методом численного интегрирования указанных уравнений с использованием экспериментальных моделей ионосферы, таких как IRI2012. Результаты позволяют получить информацию о фазовых изменениях в зависимости от параметров ионосферы, что важно для задач радиосвязи и радиолокации.

### Результаты численных расчетов и выводы

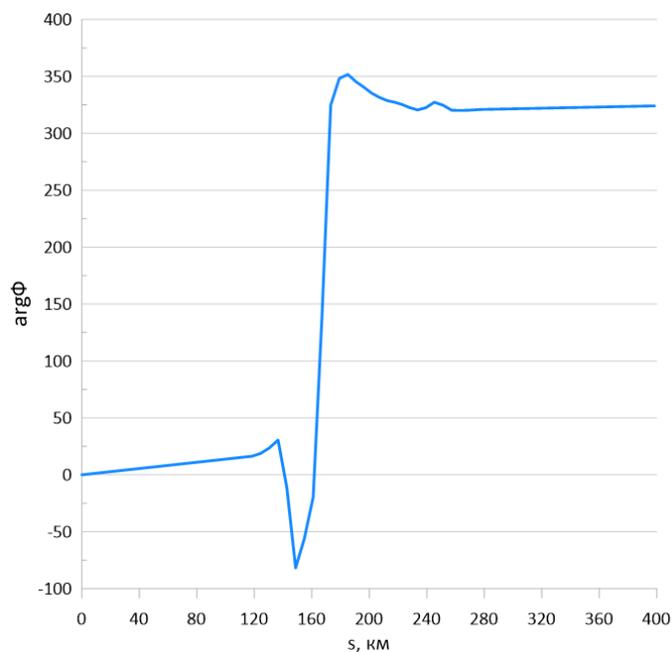
Расчеты проведены для условий солнцестояния при средней солнечной активности (F10,7=80). Номер дня в году задан N=356. Момент мирового времени UT = 1,665 час. Географические координаты передатчика на поверхности Земли – широта  $\varphi=75$  и долгота  $\lambda=110$ .

На рисунке *a* представлены результаты зависимости фазы комплексной амплитуды волны от координат длины вдоль траектории для обыкновенной волны на частоте 5 МГц. Координатная сетка:  $h$  – высота над поверхностью Земли,  $s$  – длина вдоль луча. Заданы угол места  $\beta=300$ , и азимут  $\gamma = 600$  излучения для опорного луча передатчика. Рассматривается излучение передатчика в пучке с узким угловым раствором ( $\Delta\beta=20$ ,  $\Delta\gamma=20$ ) в окрестности опорного луча. На рисунке *б* приведены те же результаты, за исключением частоты 10 МГц.

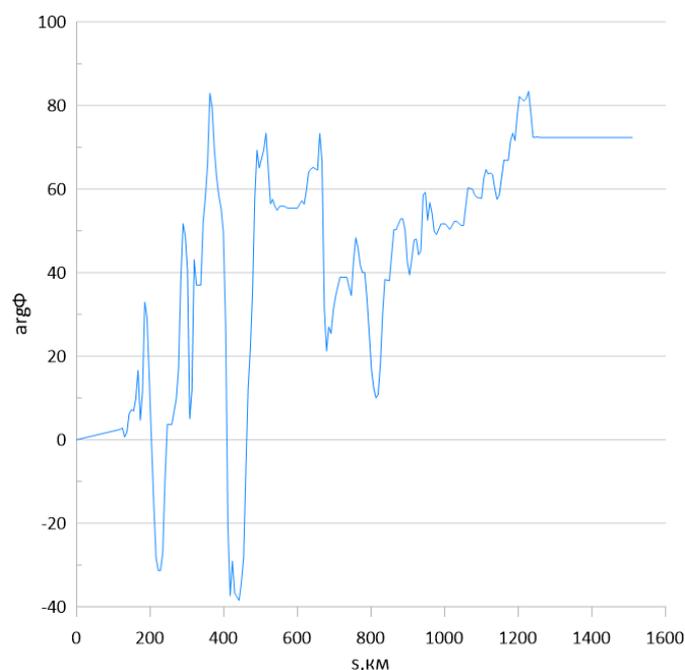
Подбор значений  $\Delta\beta$  и  $\Delta\gamma$  был выполнен на основе численных экспериментов. Снижение этих параметров ведет к улучшению точности расчетов, однако их уменьшение ограничивается разрешающей способностью применяемых моделей ионосферы и нейтральной атмосферы.

На графике *a* (для частоты 5 МГц) видно, что фаза комплексной амплитуды меняется более плавно вдоль траектории по сравнению с графиком на частоте 10 МГц (см. рис. *б*). Это связано с более низкой частотой и, соответственно, меньшими дисперсионными искажениями.

На частоте 10 МГц (см. рис. *б*) изменение фазы становится более выраженным и резко меняется на определённых участках траектории. Это связано с тем, что более высокие частоты сильнее подвержены искажениям в неоднородной анизотропной ионосфере.



а) Зависимость фазы комплексной амплитуды волны от координат длины вдоль траектории



б) Зависимость фазы комплексной амплитуды волны от координат длины вдоль траектории

Для частоты 5 МГц наблюдаются относительно плавные изменения фазы вдоль траектории, что может указывать на меньшее влияние дисперсионных искажений.

На частоте 10 МГц наблюдается большая степень изменения фазы, что связано с более высокой чувствительностью к дисперсии и неоднородностям среды.

Для более низкой частоты (5 МГц) волна испытывает меньшее влияние ионосферы, и фаза меняется относительно плавно.

Для частоты 10 МГц фаза изменяется более резко, что указывает на значительное влияние дисперсии, особенно в условиях неоднородной анизотропной ионосферы.

Расчеты показывают, что изменение фазы амплитуды вдоль лучевой траектории может стать больше по модулю, когда условия распространения ближе к продольному. Скорость изменения фазы вдоль лучевой траектории возрастает при переходе от квазипоперечного к квазипродольному режиму распространения волны.

Таким образом, фаза комплексной амплитуды волны значительно зависит от частоты сигнала, и для более высоких частот влияние ионосферы на фазовые характеристики становится более выраженным.

### Список литературы

1. Развитие математического моделирования распространения радиоволн в ионосфере Земли на основе волновой теории катастроф и канонического оператора Маслова / Д. С. Лукин, Е. А. Палкин, Е. Б. Ипатов, А. С. Крюковский, Д. В. Растягаев // Распространение радиоволн: сборник докладов XXV Всероссийской открытой научной конференции (Томск, 4–9 июля 2016 г.). – Томск, 2016. – Т. 1. – С. 40–50.
2. Крюковский А. С., Лукин Д. С., Кирьянова К. С. Метод расширенной би-характеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 9. – С. 1028–1034.
3. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang et al. // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2014. – V. 4. – A07.
4. Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. – 1991. – Vol. 96. – A1. – P. 1159–1172.
5. Захаров В. Е. Формирование амплитудных и поляризационных характеристик коротких волн при распространении в ионосфере // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 6. – С. 525–534.

УДК 621.371 + 537.86

## ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕТЕОРНЫХ РАДИООТРАЖЕНИЙ

А. О. Савастьянов, А. И. Сулимов

*Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16А  
E-mail: arosavastyanov@kpfu.ru*

**Аннотация.** Уникальные свойства метеорного распространения радиоволн позволяют порождать идентичные случайные последовательности в пространственно-разнесенных пунктах связи. Важной проблемой обоснования безопасности метеорных систем генерации случайных последовательностей является оценка радиуса корреляции фазовых измерений. В данной работе был проведен цикл имитационных экспериментов по моделированию пространственно-разнесенного радиоприема метеорных радиоотражений. Установлены формы азимутальных зависимостей пространственной корреляции. Впервые получены оценки радиуса корреляции фазы метеорных радиоотражений.

**Ключевые слова:** метеорная связь; разнесенный радиоприем; корреляция; рассеяние радиоволн; дифракция

## ANALYSIS OF SPATIAL CORRELATION OF METEOR RADIO REFLECTIONS

A. O. Savastyanov, A. I. Sulimov

**Abstract.** The unique properties of meteor radio wave propagation make it possible to generate identical random sequences at spatially separated communication points. An important problem in justifying the security of meteor systems for generating random sequences is estimating the radius of correlation of phase measurements. In this work, a series of simulation experiments was carried out to model spatially distributed radio reception of meteor radio reflections. The curves for azimuthal dependences of spatial correlation and the estimates of the phase correlation radius of meteor radio reflections have been obtained for the first time.

**Keywords:** meteor burst communication; space-diversity radio reception; correlation; radio waves scattering; radio propagation

### Введение

Системы метеорной радиосвязи основаны на отражении радиоволн метрового диапазона от ионизированных следов, образованных в результате пролета метеорных частиц в нижних слоях

ионосферы. Уникальные свойства метеорного радиоканала можно использовать для синхронного порождения в двух разнесенных пунктах связи идентичных случайных последовательностей, что создает новые возможности для построения систем защищенной связи [1]. Важной проблемой обоснования безопасности подобных систем генерации случайных последовательностей является оценка размаха области потенциальной утечки информации в метеорном радиоканале. К сожалению, на данный момент в открытой литературе данный вопрос освещен крайне слабо, а оценки радиуса корреляции по фазе регистрируемого радиосигнала отсутствуют. Таким образом, актуальной научно-исследовательской задачей является изучение пространственной корреляции метеорных радиоотражений вблизи абонента с учетом электродинамических особенностей взаимодействия радиоволн со средой распространения.

Целью данного исследования является оценка радиуса корреляции метеорных радиоотражений в окрестности наземного приемника. Для достижения поставленной цели проведено имитационное моделирование пространственно-разнесенного приема метеорных радиоотражений; исследованы азимутальная и дистанционная зависимости уровня корреляции сигнала, рассеянного на метеорном следе; сопоставлены методы оценки фазы абонента посторонним наблюдателем; изучено влияние частоты радиосигналов.

Решение перечисленных задач позволяет получить ряд новых научных результатов, не опубликованных в предыдущих исследованиях.

### Методика исследования

В качестве исследовательского инструмента использовалась уникальная имитационная модель «КАМЕТ», вычисляющая фазовые характеристики метеорных радиоотражений [2]. Модель основана на строгом решении задачи дифракции на метеорном следе, учитывает эффект Фарадея, ветровой снос метеорного следа турбулентными ветрами ионосферы, а также явления формирования на метеорном следе дополнительных рассеивающих центров.

В качестве тестовой радиолинии была выбрана радиолиния Москва–Казань, обладающая типичными для метеорной связи параметрами: мощность передатчика – 2000 Вт, частота сигнала – 50 МГц, протяженность радиолинии – 720 км.

В рамках исследования расположение легальных абонентов  $A$  и  $B$  (рис. 1) оставалось неизменным. Посторонний пункт  $C$  помещался в различные точки в окрестности абонента  $B$ . Исследовалась зависимость корреляции сигнала от углового размещения пункта  $C$  и от его удаленности от абонента  $B$ . Азимут постороннего приемника относительно легальных пунктов связи изменялся с шагом  $10^\circ$ . Удаленность пункта  $C$  от абонента  $B$  изменялась от 1 см до 500 км по логарифмической шкале.

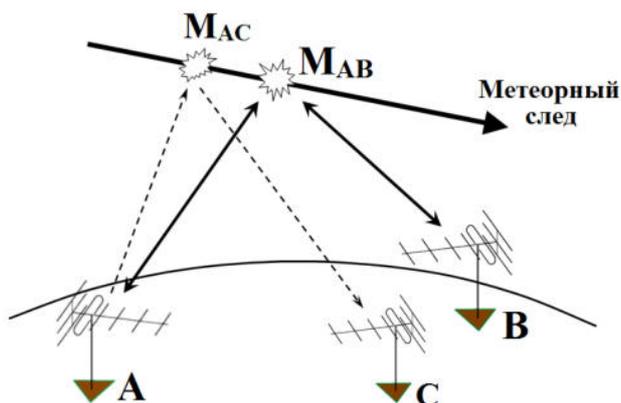


Рис. 1. Траектория радиосигнала в метеорном канале

Моделирование разнесенного приема радиоотражений проводилось в соответствии с методикой, описанной в работе [3].

### Результаты

В результате моделирования получена зависимость уровня корреляции фаз  $\varphi_B$  и  $\varphi_C$ , регистрируемых абонентом  $B$  и посторонним наблюдателем  $C$ , от углового размещения

постороннего приемника (рис. 2а). Максимальная корреляция наблюдалась вдоль азимутальных направлений  $130^\circ$  и  $310^\circ$ , минимальная – в поперечных к ним направлениях  $40^\circ$  и  $220^\circ$  независимо от разнесения точек приема. В указанных направлениях максимальной и минимальной азимутальной корреляции далее исследовалась дистанционная зависимость.

Установлено, что определяющим фактором корреляции является среднее расстояние между отражающими точками  $M_{AB}$  и  $M_{AC}$  на метеорном следе для абонента В и постороннего наблюдателя С. Среднее расстояние (рис. 2б) максимально при углах  $20^\circ$  и  $200^\circ$ :  $d_{BC\ max} = 0,53r$ , где  $r$  – разнесение точек приема В и С. Минимальное расстояние наблюдается при углах  $110^\circ$  и  $290^\circ$ :  $d_{BC\ min} = 0,22r$ .

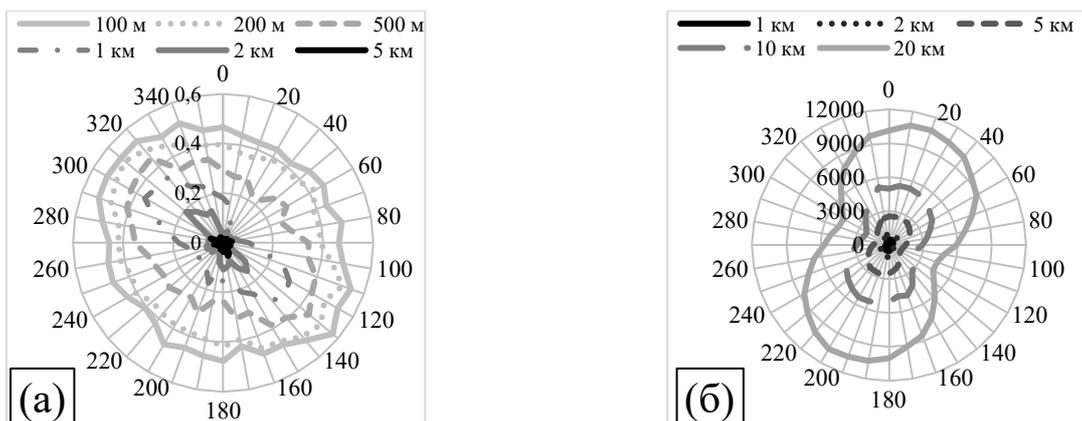


Рис. 2. Азимутальная зависимость: а – корреляции фазы с коррекцией на геометрический набег; б – среднего расстояния между отражающими точками  $M_{AB}$  и  $M_{AC}$

В результате сравнения рисунков 2а и 2б было установлено, что форма азимутальных зависимостей определяется геометрическим фактором – разнесением  $d_{BC}$  отражающих точек абонента  $M_{AB}$  и постороннего наблюдателя  $M_{AC}$  на метеорном следе.

На рисунке 3а представлена полученная в результате моделирования дистанционная зависимость уровня корреляции  $\rho$  фазы абонента  $\varphi_B$  и фазы постороннего наблюдателя без коррекции  $\varphi_C$ . Непосредственное измерение фазы несущей имеет крайне малый радиус корреляции  $\sim 50$  м. Помимо геометрического набега фаза сигнала содержит поляризационную компоненту, обусловленную электродинамическим взаимодействием радиоволны со средой распространения и плазмой метеорного следа. Однако, в связи с большой протяженностью первой зоны Френеля на метеорном следе, электродинамические характеристики рассеянной волны остаются когерентными в пределах до 200 км, что значительно превышает радиус корреляции фазы (рис. 3б). Таким образом, радиус корреляции фазы определяется в основном геометрией распространения сигнала.

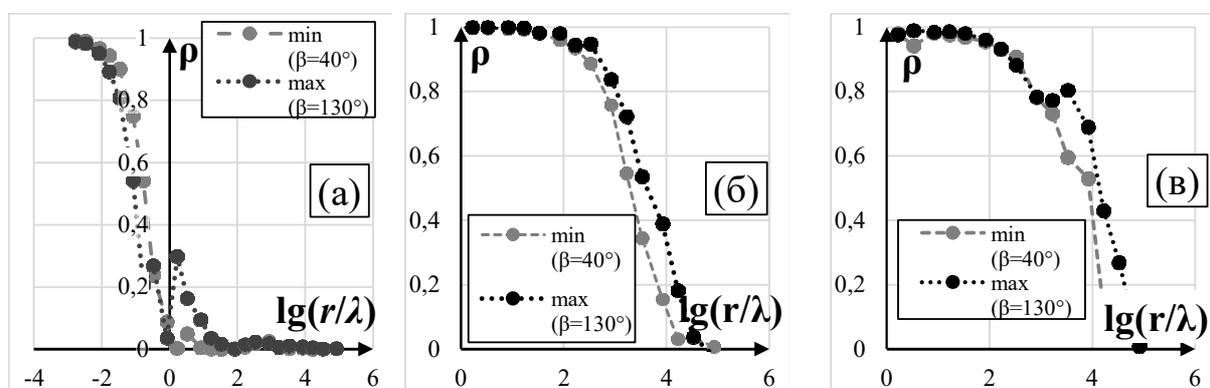


Рис. 3. Дистанционная зависимость корреляции: а – полной фазы без коррекции; б – поляризационной компоненты фазы; в – амплитуды

Область корреляции амплитуды простирается до 500 км (рис. 3в), что говорит о нецелесообразности использования измерений амплитуды для генерации случайного кода.

Чтобы выявить предельные способности наблюдения сигнала в точке С, были сопоставлены различные методы коррекции фазы, применяемые посторонним пунктом связи. Соответствующие результаты представлены на рисунке 4.

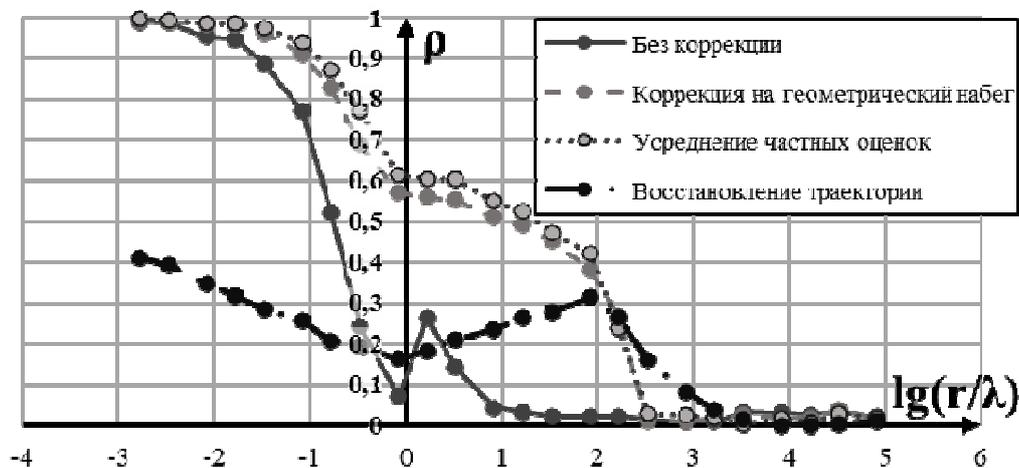


Рис. 4. Сопоставление методов коррекции фазы

При коррекции фазовых наблюдений на геометрический набег в приближении плоского фронта радиоволны радиус корреляции увеличивается до 500 м. Оценка траектории сигнала позволяет расширить область корреляции до 5 км, но эффективна только при больших разнесениях.

Таким образом, можно считать, что область потенциальной утечки случайной последовательности, генерируемой абонентом, имеет размах до 5 км.

Выявлена частотная зависимость радиуса корреляции метеорных радиоотражений. В частности, при переходе с частоты радиосигналов 50 МГц на 75 МГц область корреляции фазы сжимается в 2,5 раза (рис. 5).

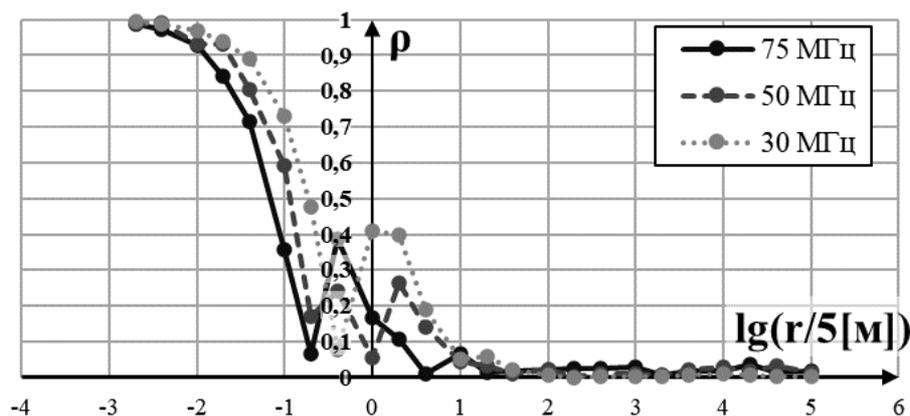


Рис. 5. Дистанционная зависимость корреляции фазы при различных частотах радиоволны

### Заключение

В результате исследования впервые установлено, что область потенциальной утечки фазовых измерений в метеорном радиоканале не превосходит 5 км, что позволяет эффективно детектировать присутствие посторонних абонентов в непосредственной близости от легального приемника. В рамках последующих исследований необходимо проанализировать влияние основных параметров метеорной радиолинии на характер пространственной корреляции, а также сравнить радиусы корреляции на сторонах обоих легальных абонентов системы.

### Список литературы

1. Sulimov A.I. Secure key distribution based on meteor-burst communications // Proc. 11th Int. Conf. on Security and Cryptography (SECRYPT-2014). – 2014. – Pp. 445-450.
2. Analysis and simulation of channel nonreciprocity in meteor burst commhnications / A.I. Sulimov, A.V. Karpov, I.R. Lapshina, R.G. Khuzyashev // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2017. – Vol. 65, iss. 4. – Pp. 2009-2019.
3. Analysis of Joint Channel Coexistence Time at Space-Diversity Radio Reception of Meteor Reflections / A.I. Sulimov, A.V. Karpov, S.A. Kalabanov, O.N. Sherstyukov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, iss. 2. – Pp. 1161-1169. DOI: 10.1109/TAP.2018.2882591.

УДК 621.3.091.22

## УПРАВЛЕНИЕ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ ГЕОРАДАРА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБНАРУЖЕНИЮ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Д. А. Смирнов, Д. С. Горкин, В. В. Варенков, В. И. Сахтеров,

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе 4.*

*E-mail: sahterov@izmiran.ru*

**Аннотация.** В настоящее время для инженерных и геофизических исследований широко используются приборы подповерхностного зондирования. В основном это классические малоглубинные георадары, использующие технологию стробоскопического осциллографа. Также довольно широко в своем сегменте применяются глубинные импульсные георадары со сверхширокополосными сигналами повышенной амплитуды. Все данные приборы имеют фиксированную диаграмму направленности антенно-фидерных устройств. Разработчики приборов ранее исследовали способы управления диаграммой направленности передающей антенны и схмотехникой передатчика. В данной работе предложен способ управления диаграммой направленности приемной антенны георадара. Использование всех предложенных способов в комплексе позволяет применить для обработки принимаемых сигналов более точные фазовые способы обработки сигналов, по сравнению с обычно используемыми амплитудными способами, что повысит качество обнаружения слабоконтрастных объектов.

**Ключевые слова:** георадиолокация; управление диаграммой направленности; слабоконтрастные объекты, георадар, резистивно-нагруженная дипольная антенна.

## CONTROL OF THE RECEIVING ANTENNA RADIATION PATTERN OF GEORADAR AS APPLIED TO THE DETECTION OF LOW-CONTRAST OBJECTS

D. A. Smirnov, D. S. Gorkin, V. V. Varenkov, V. I. Sakhterov

**Abstract.** Currently, subsurface sounding devices are widely used for engineering and geophysical research. These are mainly classic shallow-depth ground penetrating radars using stroboscopic oscilloscope technology. Deep pulse ground penetrating radars with ultra-wideband signals of increased amplitude are also quite widely used in their segment. All these devices have a fixed directional pattern of antenna-feeder devices. The developers of the devices have previously studied methods for controlling the directional pattern of the transmitting antenna and the circuitry of the transmitter. In this paper, a method for controlling the directional pattern of the receiving antenna of the ground penetrating radar is proposed. The use of all the proposed methods in combination allows for the application of more accurate phase signal processing methods for processing received signals, compared to the commonly used amplitude methods. This method improves the quality of detection of low-contrast objects.

**Keywords:** ground penetrating radar; beam control; low contrast objects, ground penetrating radar, resistive loaded dipole antenna.

### Введение

В настоящее время для инженерных и геофизических исследований широко используются приборы подповерхностного зондирования. В основном это классические малоглубинные георадары, использующие технологию стробоскопического осциллографа с высоким пространственным разрешением изучаемых технических объектов и геологических слоев [1, 2]. Также довольно широко в своем сегменте используются глубинные импульсные георадары со сверхширокополосными сигналами повышенной амплитуды [3, 4]. Известна направленная антенна для подземного излучения, применяемая для каротажа [5, 6]. Все данные приборы имеют фиксированную диаграмму направленности антенно-фидерных устройств. При этом известен способ обнаружения слабоконтрастных объектов с помощью смены направления профилирования со сменой положения передатчика и приемника на  $180^\circ$ . Для сокращения времени профилирования предложен способ с применением двух передатчиков для облучения искомого объекта электромагнитной волной под разными углами [7]. Предложенный способ изменения диаграммы направленности передающей антенны позволяет произвести облучение объекта с одной точки несколько раз. Это дает возможность увеличить получаемое количество информации, не изменяя точки измерения [8]. В данной работе рассматривается способ изменения диаграммы направленности приемной антенны, что также позволяет повысить количество получаемой информации и для классических малоглубинных георадаров с твердотельными передатчиками и антенно-фидерными устройствами с постоянными характеристиками излучаемого сверхширокополосного (СШП) импульса.

*Целью работы* являются разработка аппаратуры подповерхностного радиозондирования для обнаружения слабоконтрастных объектов, а также модернизация и развитие как хорошо известных, так и новых способов обработки сигналов применительно к слабоконтрастным объектам с малым коэффициентом поверхностного отражения. Например, когда диэлектрическая проницаемость вмещающей среды и объекта близки.

В настоящее время данные полученных радарограмм обрабатываются в основном в амплитудном виде. При использовании многовибраторных приемных антенн появляется возможность применения более сложных способов обработки, включая построение 3D-моделей [9].

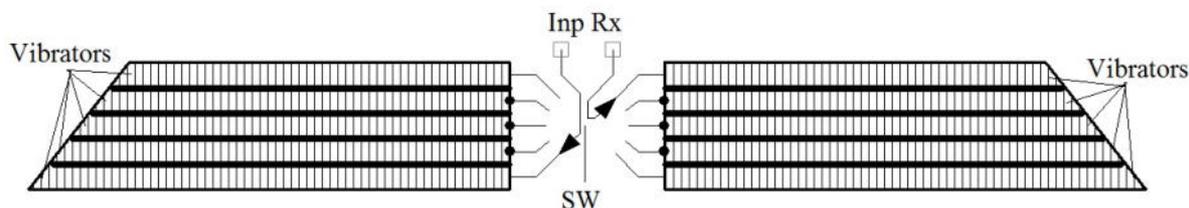


Рис. 1. Антенна с изменяемой диаграммой направленности  
Fig. 1. Variable Pattern Antenna

**Техника эксперимента.** В качестве приемных антенн в подповерхностной радиолокации используются резистивно-нагруженные дипольные антенны. При излучении СШП-сигналов повышенной мощности 500 кВт (напряжением 5 кВ и выше) использование несимметричных вибраторов в одном диполе разной длины вызывает возникновение паразитных колебаний.

При использовании в качестве приемной антенны многовибраторной дипольной антенны с вибраторами разной длины получаем эффект изменения положения главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Примерный вид многовибраторной антенны приведен на рисунке 1.

При проведении измерения производим последовательное подсоединение к приемнику (контакты Inp Rx) через переключатель SW-вибраторов разной длины. Главный лепесток ДН такой дипольной антенны смещен в сторону вибратора большей площади или длины. При одинаковой длине направлен перпендикулярно диполу, отклонение главного лепестка составляет  $\pm 7^\circ$ .

На рисунке 2 приведена осциллограмма изменения сигнала при коммутации диполей приемной антенны с вибраторами разных длин. Слева (а) общий вид сигналов, справа увеличенный участок (б) отраженного сигнала с изменением амплитуды и фазы.

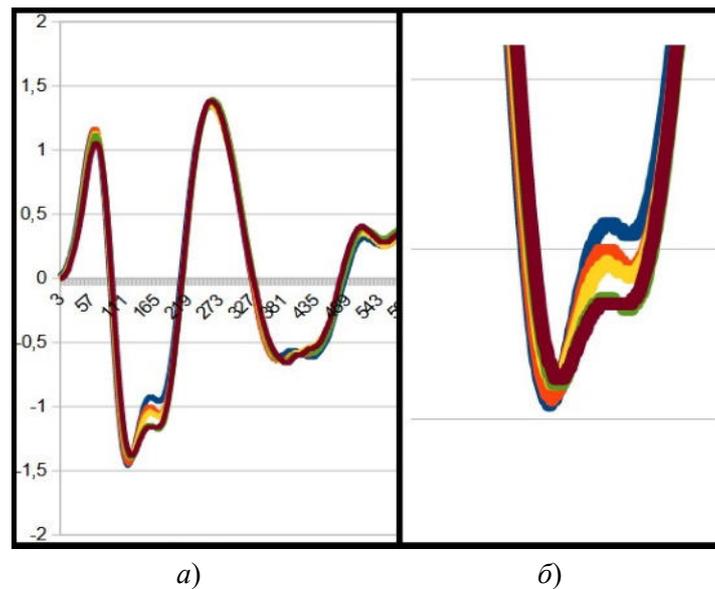


Рис. 2. Изменение сигналов с пяти диполей приемной антенны с вибраторами разных длин  
 Fig. 2. Changing signals from five dipoles of a receiving antenna with vibrators of different lengths

На рисунке 3 также показана осциллограмма принимаемого сигнала при изменении положения главного лепестка ДН передающей антенны. Во время проведения эксперимента угол диаграммы передатчика менялся дискретно и имел два положения.

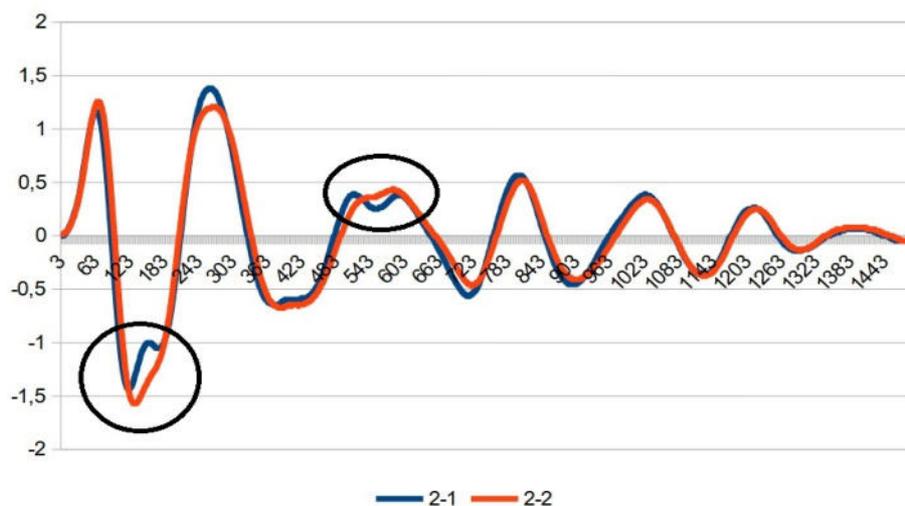


Рис. 3. Изменение принимаемого сигнала при изменении ДН передающей антенны  
 Fig. 3. Change in the received signal when changing the DD of the transmitting antenna

Как видим на рисунке 3, в выделенных местах сигнал, нарисованный синим цветом, имеет более ярко выраженные изгибы, указывающие на слабые границы перехода в каждой полуфазе сигнала.

Проведенные эксперименты показали лучший результат при использовании отдельного канала синхронизации, постоянно подсоединенного к одной паре вибраторов желательного одной длины.

### Заключение

Результаты проведенных экспериментов показали возможность применения данного способа управления диаграммы направленности с целью использования для подповерхностного радиозондирования при проведении инженерных и других исследований с повышением пространственного разрешения. При разработке соответствующих способов обработки принимаемых сигналов вполне возможно использование для обнаружения слабоконтрастных объектов.

### Финансирование

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00083.

### Список литературы

1. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «Око-3». Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации / ООО «Логические системы» Россия, Московская область, 2018. – URL: <https://www.geotech.ru/>
2. GEOSCANNERS. – URL: <http://www.geoscanners.com>
3. Глубинный георадар: принципы и применение / А.В. Попов, И.В. Прокопович, Д.Е. Едемский, П.А. Морозов, А.И. Беркут, С.В. Меркулов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 28-36.
4. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга / Л.Б. Волкомирская, О.А. Гулевич, В.В. Варенков, А.Е. Резников, В.И. Сахтеров // Экологические системы и приборы. – 2012. – №5. – С. 3-5.
5. Сахтеров В.И. Направленная антенна для подземного излучения: патент на изобретение № RU 2753250C1, зарегистрирован в Госреестре 15.08.2021.
6. Сахтеров В.И., Прокопович И.В., Попов А.В. Экранированная дипольная антенна для задач радиолокационного картожа // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 8. – С. 103-112.
7. Горкин Д.С., Сахтеров В.И. Трехантенный георадар для обнаружения слабоконтрастных объектов: патент на полезную модель № RU 227004U1, зарегистрирован в Госреестре 01.07.2024.
8. Сахтеров В.И. Способ управления диаграммой направленности антенны подземного излучения // Антенны. – 2024. – № 3. – С. 40–48.
9. Сахтеров В.И. Способы управления диаграммой направленности антенн георадара // Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности: тезисы XV научно-технической конференции: научное электронное издание / под ред. В.И. Сахтерова. – Москва: ИЗМИРАН, 2024. – С.46-49.

УДК 087.2 + 537.87

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЫШЦ НА СВЧ-ОТОГРЕВ ОБМОРОЖЕНИЙ

П. П. Смыгалина

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,*

*634050, г. Томск, пр-т Ленина, 36*

*E-mail: polina.smygalina@stud.tsu.ru*

**Аннотация.** В данной работе исследуется влияние изменения электропроводности мышечной ткани при нагревании маломощным микроволновым излучением на частотах 433 МГц и 2450 МГц на температурный профиль в слое, имитирующем конечность человека. Актуальность исследования обусловлена применением СВЧ-терапии для лечения глубоких обморожений конечностей, при котором значительное изменение температуры тканей может существенно влиять на эффективность прогрева. Методом одномерного математического моделирования показано, что учет температурной зависимости электропроводности мышечной ткани приводит к более быстрому нагреву приповерхностных слоев и более выраженному перепаду температуры между внешними и внутренними областями конечности. Полученные результаты важны для оптимизации процедур СВЧ-терапии обморожений и позволяют более точно прогнозировать динамику прогрева тканей конечности.

**Ключевые слова:** биологические ткани; электропроводность; СВЧ-нагрев; температурный профиль; математическое моделирование; температурно-зависимые параметры

## EFFECT OF TEMPERATURE-DEPENDENT MUSCLE CONDUCTIVITY ON MICROWAVE FROSTBITE TREATMENT

P. P. Smygalina

**Abstract.** This study investigates the influence of changes in muscle tissue electrical conductivity during heating by low-power microwave radiation at frequencies of 433 MHz and 2450 MHz on the temperature profile within a layer simulating a human limb. The relevance of this research stems from the application of microwave therapy for treating severe frostbite of extremities, where significant temperature changes in tissues can substantially affect the effectiveness of the warming process. One-dimensional mathematical modeling demonstrated that

considering the temperature dependence of muscle tissue electrical conductivity leads to faster heating of superficial layers and a more pronounced temperature gradient between the outer and inner regions of the limb. These findings are crucial for optimizing microwave therapy procedures for frostbite and enable more accurate predictions of the dynamics of limb tissue warming.

**Keywords:** biological tissues; microwave therapy; electrical conductivity; temperature profile; mathematical modeling; temperature depend parameters

### Введение

Глубокие обморожения конечностей остаются серьезной проблемой во многих регионах России. Одним из возможных подходов к терапии обмороженных конечностей является использование маломощного микроволнового излучения (СВЧ-терапия). Этот метод заключается в использовании металлической микроволновой камеры, в которой пораженную конечность подвергают медленному глубокому прогреванию электромагнитным излучением, проникающим в отморозенные ткани и достигающим глубоких кровеносных сосудов. Согревание на всю глубину тканей вызывает одновременную активацию обменных процессов, кровотока и лимфообращения как снаружи, так и внутри тканей конечности и, как следствие, предотвращает указанные негативные последствия [1–3].

Поскольку поверхностная температура конечности в некоторых случаях обморожения может составлять от 5 до 10 °С, изменение температуры конечности во время СВЧ-терапии является значительным. При этом изменение температуры любого объекта неизбежно ведет к изменению его электрофизических свойств.

Знание того, как изменяются характеристики биологических тканей конечностей человека с изменением температуры, позволяет более точно рассматривать динамику процессов их нагревания или охлаждения. Температурно-зависимые параметры в таком случае используются в моделировании для более точного прогнозирования динамики процесса.

### Цель работы

Электрофизические характеристики тканей могут значительно изменяться с температурой, влияя на скорость и характер изменения температурного профиля в процессе теплообмена. Цель данной работы – провести оценку влияния изменения электропроводности мышечной ткани во время нагрева маломощным микроволновым полем на частотах 433 и 2450 МГц на температурный профиль в слое, имитирующем конечность человека.

### Математическое моделирование

Проведено одномерное моделирование с целью пронаблюдать, как влияет на температурное распределение учет изменения электропроводности. Для проведения моделирования использовались следующие выражения для электропроводности на частотах 433 МГц и 2450 МГц соответственно:

$$\begin{aligned}\sigma_{433} &= \sigma_{0,433} (1 + \Delta\sigma_{\%} (T - 37^{\circ}\text{C})), \\ \sigma_{2450} &= \sigma_{0,2450} (1 + \Delta\sigma_{\%} (37^{\circ}\text{C} - T)),\end{aligned}$$

где  $T$  – значение температуры в текущий момент времени моделирования;  $\Delta\sigma_{\%}$  – процентное изменение электропроводности соответственно при изменении температуры на 1°С;  $\sigma_{0,433} = 0,98$  См/м,  $\sigma_{0,2450} = 2,33$  См/м. Данные значения соответствуют мышечной ткани при температуре 37 °С. Стоит отметить, что значение электропроводности для частоты 2450 МГц с ростом температуры уменьшается, в то время как для частоты 433 МГц увеличивается. Такая зависимость была выбрана для соответствия экспериментальным зависимостям, представленным в обзорных работах [4–7].

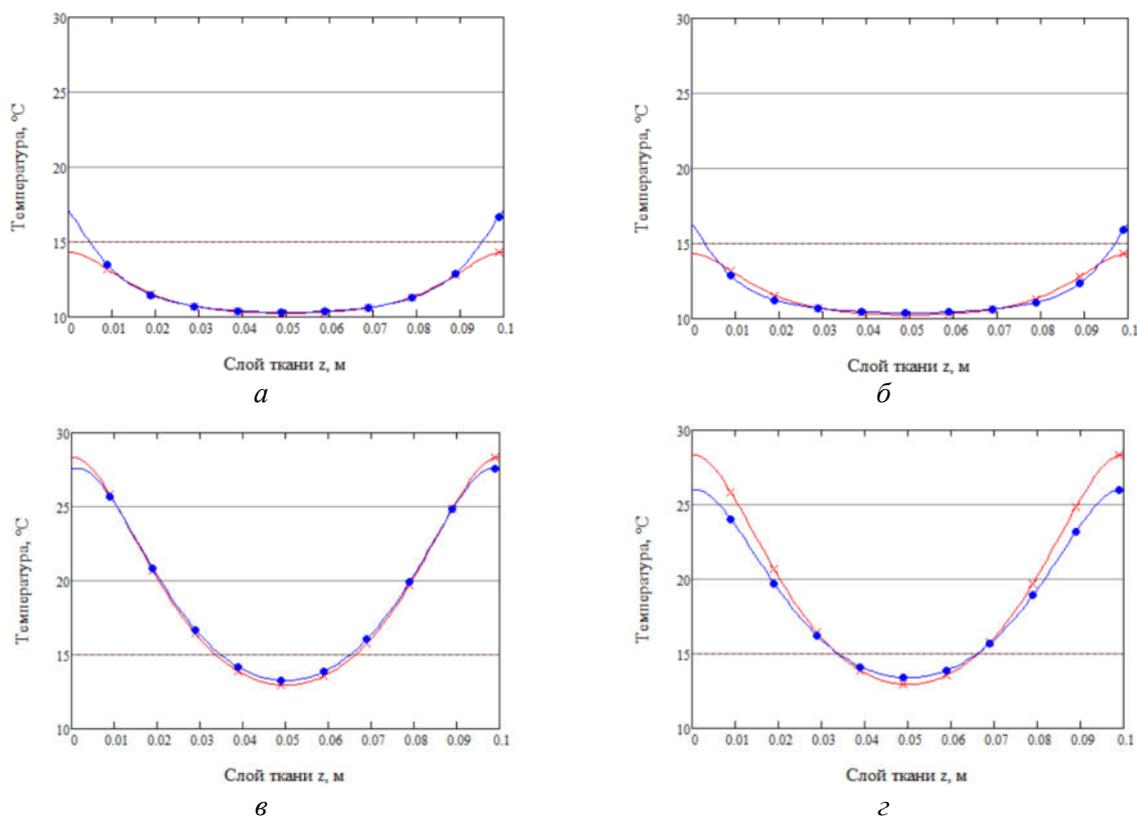
В моделировании рассмотрены наибольшие изменения параметров  $\Delta\sigma_{\%}$ , указанные в литературе, – на 1 %/°С и на 2 %/°С. Для моделирования использовался слой мышечной ткани толщиной 10 см. Начальная температура слоя 10 °С, температура окружающей среды 25 °С. На границе слоя учитывался теплообмен с воздухом.

В таблице приведено сравнение результатов моделирования при учете изменения  $\sigma$  и без него в течение 5 и 30 минут. Прочерки в таблице означают, что температурное изменение параметра не учитывалось.

**Максимальная разница температур в ситуациях без учета изменения параметров ткани и при учете изменения параметров с ростом температуры**

Граничные условия	$\Delta\epsilon, \%/^{\circ}\text{C}$	Максимальная разница температур за 5 минут $\Delta T_5, ^{\circ}\text{C}$	Максимальная разница температур за 30 минут $\Delta T_{30}, ^{\circ}\text{C}$
Теплообмен с воздухом	Без воздействия СВЧ-поля		
	—	0,12	0,28
	—	0,37	0,74
	Частота воздействия 433 МГц		
	1	2,83	0,83
	2	2,04	2,37
	Частота воздействия 2450 МГц		
	1	3,82	1,61
2	4,29	2,05	

На рисунках 1 и 2 представлены картины температурного распределения в слое мышечной ткани толщиной 10 см при различном времени воздействия и различном изменении  $\sigma$  для частот воздействия 433 и 2450 МГц соответственно. Красными крестами обозначено распределение для ситуации без учета температурного изменения параметров. Синими кружками обозначено температурное распределение при учете изменения электропроводности.



$a$  – 5 минут,  $\Delta\sigma_{\%} = 1\%$ ;  $б$  – 5 минут,  $\Delta\sigma_{\%} = 2\%$ ;

$в$  – 30 минут,  $\Delta\sigma_{\%} = 1\%$ ;  $г$  – 30 минут,  $\Delta\sigma_{\%} = 2\%$

Рисунок 1. Температурное распределение при учете изменения  $\sigma$ , частота воздействия 433 МГц

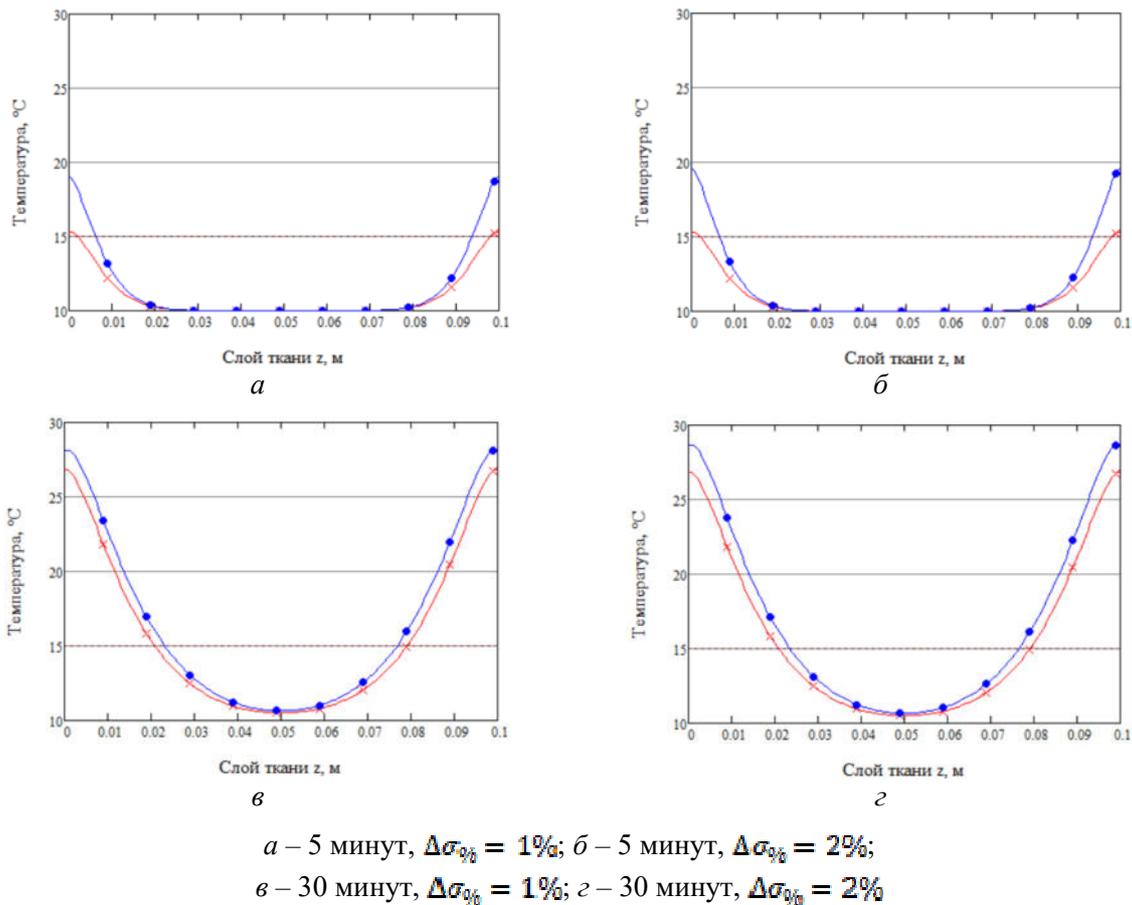


Рисунок 2. Температурное распределение при учете изменения  $\sigma$ , частота воздействия 2450 МГц

Картины температурного распределения позволяют сделать следующие выводы. Для ситуаций с учетом изменения  $\sigma$  наблюдаются похожие тенденции: в начале воздействия внешняя температура конечности растет значительно быстрее внутренней. Для частоты воздействия 433 МГц максимальная разница между внутренней температурой и внешней составила около 7 °С, а для частоты 2450 МГц – около 9 °С. Это указывает на необходимость теплоизоляции конечности во время проведения процедуры отогрева. Причем значительный перепад температуры наблюдается в первые минуты воздействия. В дальнейшем температурное распределение выравнивается.

### Заключение

Результаты моделирования позволяют утверждать, что при теплообмене с окружающим воздухом наблюдается быстрое возрастание температуры на границе конечности (до 4 °С в сравнении с ситуацией без учета температурного изменения электропроводности), в то время как внутренние температуры ниже, чем для ситуации без учета изменения параметров (разница в этом случае, однако, незначительна, не более 1 °С).

Таким образом, учет температурного изменения электропроводности ткани необходим при рассмотрении нагрева приповерхностных слоев, изменение температуры которых происходит быстрее, чем для внутренних слоев. При этом изменение  $\sigma$  в процессе отогрева внутренних слоев практически не вносит изменения в температурное распределение, поэтому для глубоко лежащих тканей им можно пренебречь.

### Список литературы

1. СВЧ-отогрев глубоких отморожений: новые результаты и новые задачи / Г. Е. Дунаевский, В. Б. Антипов, Е. В. Гаврилин, И. О. Дорофеев, А. Н. Нечаев, И. А. Первеев, П. П. Смыгалина // Актуальные проблемы радиофизики : IX Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 20-22 октября 2021 г.: сборник трудов. – Томск : Издательский дом ТГУ, 2021. – 317 с.

2. Reduction of amputations of frostbitten limbs by treatment using microwave rewarming / G. Dunaevskiy, E. Gavrilin, A. Pomytkin, V. Antipov, A. Nechaev // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13(1). – Pp. 1362.
3. Устройство для лечения отморожений конечностей / В. Б. Антипов, Г. Е. Дунаевский, Е. В. Гаврилин: патент РФ № 188862 по заявке № 2018146900 от 27.12.2018. Оpubл. 25.04.2019, Бюл. № 12.
4. Rossmann C, Haemmerich D. Review of temperature dependence of thermal properties, dielectric properties, and perfusion of biological tissues at hyperthermic and ablation temperatures // *Crit. Rev. Biomed Eng.* – 2014. – Vol. 42(6). – Pp. 467-92. – doi: 10.1615/critrevbiomedeng.2015012486.
5. Fu F., Xin S. X., Chen W. Temperature- and frequency dependent dielectric properties of biological tissues within the temperature and frequency ranges typically used for magnetic resonance imaging-guided focused ultrasound surgery // *Int J Hyperthermia*. – 2014 Feb. – Vol. 30(1). – Pp. 56-65
6. Trujillo M., Berjano E. Review of the mathematical functions used to model the temperature dependence of electrical and thermal conductivities of biological tissue in radiofrequency ablation // *Int J Hyperthermia*. – 2013 Sep. – Vol. 29(6). – Pp. 590-7. – doi: 10.3109/02656736.2013.807438.
7. Schwan Herman P., Kenneth R. Foster. RF-field interactions with biological systems: Electrical properties and biophysical mechanisms // *Proceedings of the IEEE* 68. – 1980. – Pp. 104-113. – doi:10.1109/PROC.1980.11589

### Секция 3

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ И РАДИОСВЯЗИ

---

УДК 621.396.6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦИФРОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ QUASI-QAM-СИГНАЛОВ

**А. Ф. Гильфанова, Г. А. Давыденко**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
E-mail: GilfanovaAF@stud.kai.ru  
E-mail: galyadavydenko@yandex.ru*

**Аннотация.** Обоснована актуальность исследования работы цифрового канала связи. Представлены различные пути повышения помехозащищенности канала связи. Описаны критерии оценки методов повышения помехозащищенности, а также приведены результаты сравнения quasi-QAM-сигналов со стандартным QAM-16 и QAM-16 с мощностью в два раза больше стандартной. В заключение приведены выводы по представленной работе, а также список используемой литературы.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; модуляция; QAM-16; сигнальное созвездие; помехозащищенность

### THE STUDY OF DIGITAL COMMUNICATION CHANNEL OPERATION USING QUASI-QAM SIGNALS

**A. F. Gilfanova, G. A. Davydenko**

**Abstract.** The relevance of the presented study of digital communication channel operation is given. Various ways to improve the noise immunity of the communication channel are presented. Also described are the evaluation criteria for the presented methods to improve the noise immunity. Comparison of quasi-QAM signals with standard QAM-16 and QAM-16 with twice the power of standard is shown. The conclusions of the presented work, and also list of the used literature are given in the end of the paper.

**Keywords:** mathematical modeling; modulation; QAM-16; signal constellation; noise immunity

#### Введение

В настоящее время всё большее применение находят системы цифровой связи. Для этих систем крайне важным критерием корректной работы является качество принимаемого сигнала, ввиду того что на сигнал, сформированный в передатчике, во время прохождения через линию связи могут накладываться различного рода помехи и шумы, что, в свою очередь, может привести к ошибкам при приеме сигнала или даже к полной потере передаваемой информации [1].

Для решения указанной выше проблемы интересующиеся этим вопросом авторы предлагали различные решения. Среди таких решений можно выделить:

- 1) применение таких форматов модуляции, которые являются более помехоустойчивыми;
- 2) увеличение мощности передаваемого сигнала, ввиду чего сигнал становится менее подверженным различным шумам;
- 3) изменение сигнальных созвездий таким образом, чтобы увеличить помехоустойчивость сигнала к помехам.

*Целью данной работы* является моделирование цифровой системы связи для оценки эффективности метода использования quasi-QAM-сигналов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

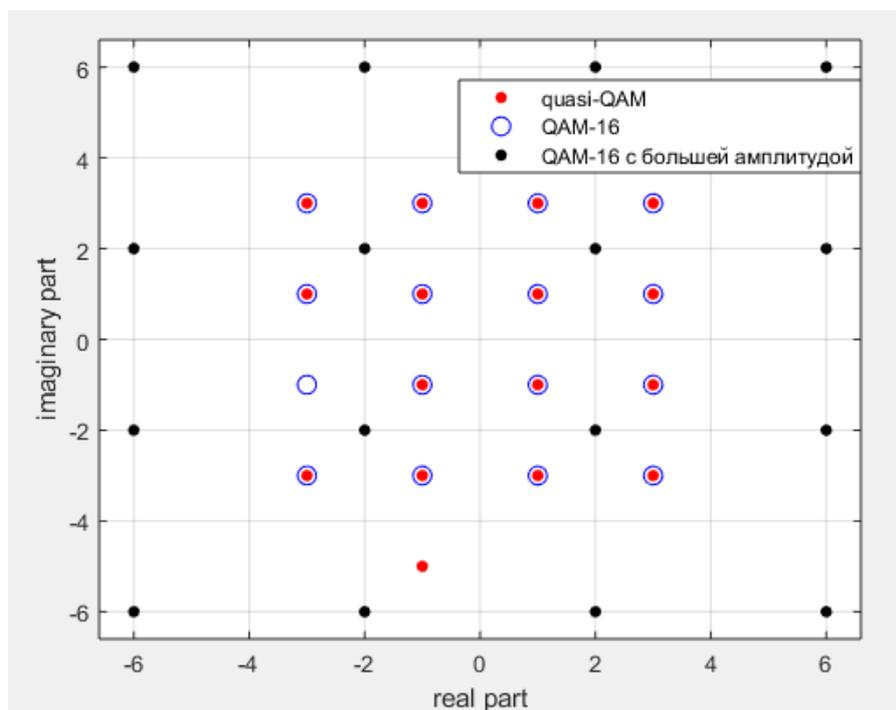
- 1) анализ литературы в области принципов обеспечения помехозащищенности;
- 2) сравнение основных форматов модуляции;
- 3) моделирование цифровой системы передачи данных с quasi-QAM-модуляцией.

### Моделирование цифровой системы

Рассмотрим цифровую систему связи, которая использует метод quasi-QAM для обеспечения помехозащищенности системы. Согласно этому методу, сигнал QAM-16 обрабатывается на приемной стороне. Если возникает ошибка какой-либо точки сигнального созвездия, то эта точка в последующий момент связи будет передаваться с другой амплитудой и фазой, так, чтобы приемник мог ее различить. Таким образом изменяется сигнальное созвездие, что приводит к улучшению помехозащищенности системы связи [2–4].

Сравним работу представленной цифровой системы связи с системой, работающей с QAM-16-модуляцией, которая является эффективной по энергетике, а также обеспечивает меньшую вероятность ошибки на бит передаваемой информации в сравнении с другими форматами модуляции. Также предложенные системы сравним с цифровой системой, работающей с QAM-16-модуляцией большей мощности (рисунок).

Для анализа данных систем важно учесть такие параметры, как энергоэффективность, скорость передачи данных и степень помехозащищенности.



Сигнальные созвездия QAM-16, quasi-QAM и QAM-16 с удвоенной амплитудой

Получаем следующие результаты:

- 1) относительная энергия сигнала QAM-16: 1368;
- 2) относительная энергия сигнала quasi-QAM-16: 1544;
- 3) относительная энергия сигнала QAM-16, мощность которого больше стандартного в два раза: 2736.

### Заключение

Сравнительный анализ показал, что quasi-QAM имеет меньшую относительную энергию сигнала, таким образом, выигрывает по энергоэффективности у QAM-16 с большей амплитудой, а также имеет меньшее количество ошибок по сравнению с QAM-16, а значит, quasi-QAM выигрывает по степени помехозащищенности у QAM-16.

Поставленная цель работы – моделирование цифровой системы связи для оценки эффективности метода использования quasi-QAM-сигналов – достигнута.

Для достижения цели решены следующие частные задачи:

1. Проанализированы различные литературные источники в виде статей из научных журналов;
  2. Приведены основные методы повышения помехозащищенности канала связи.
- Рассмотрены различные методы цифровых модуляций;

3. Произведено моделирование цифровой системы передачи с квадратурной амплитудной модуляцией для стандартного сигнального созвездия QAM-16 и измененного сигнального созвездия (quasi-QAM-модуляция), которое является более помехозащищенным.

#### Список литературы

1. Веденькин Д.А., Макарова Д.Г., Филареева И.Д. Анализ влияния поворота сигнального созвездия на уровень символьных и битовых ошибок в фазовых форматах модуляции // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3 (50). – С. 46.
2. Гильфанова А.Ф., Веденькин Д.А. Один из вариантов повышения помехозащищенности цифровых каналов связи с quasi-QAM // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 41-48.
3. Гильфанова А.Ф. Один из методов повышения помехоустойчивости системы связи // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2023: материалы X Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 13–15 апреля 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 100-101.
4. Веденькин Д.А., Гильфанова А.Ф. Повышение помехозащищенности канала связи с сигналом QAM-16 // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 84-85.

УДК 621.396.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

**А. Ф. Гильфанова, Д. Ю. Звонкова**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
E-mail: GilfanovaAF@stud.kai.ru  
E-mail: darya\_zvonkova00@mail.ru*

**Аннотация.** Обоснована актуальность исследования методов повышения помехозащищенности радиотехнических систем. Дано определение помехозащищенности. Описаны методы повышения помехозащищенности канала связи, такие как увеличение избыточности полезного сигнала, дублирование сигнала, изменение характеристик приемного устройства, применение различных форматов модуляции и изменение формы сигнального созвездия. Также приведено сравнение всех представленных методов. В заключение изложены выводы по работе, а также представлен список используемой литературы.

**Ключевые слова:** система связи; модуляция; QAM-16; сигнальное созвездие; помехозащищенность

## THE STUDY OF METHODS TO IMPROVE THE NOISE IMMUNITY OF THE COMMUNICATION SYSTEM

**A. F. Gilfanova, D. Yu. Zvonkova**

**Abstract.** The relevance of the presented study of methods to improve the noise immunity of radio engineering systems is given. The definition of noise immunity is also given. Various methods of increasing the noise immunity of the communication channel are described, such as: increasing the redundancy of the information signal, duplication of the signal, changing the characteristics of the receiving device, the use of different modulation formats and changing the format of the signal constellation. A comparison of all presented methods is also given. The conclusion of the presented work, and the list of used literature is given in the end of the paper.

**Keywords:** communication system; modulation; QAM-16; signal constellation; noise immunity

### Введение

Помехозащищенность радиоэлектронных средств является одним из важнейших параметров качества системы связи и показывает способность системы правильно принимать информацию, несмотря на наличие помех в канале связи. Таким образом, чем выше помехозащищенность устройства, тем более сильное воздействие помехи оно может выдержать, оставаясь при этом в работоспособном состоянии. Следовательно, при разработке любой радиоэлектронной системы

актуальной задачей является повышение ее помехозащищенности, однако следует учесть техническое решение такого улучшения, чтобы не было чрезмерного усложнения системы [1].

Для решения указанной выше проблемы исследователями предложено множество решений.

Целью данной работы является обзор и сравнение различных методов повышения помехозащищенности радиотехнических систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

- 1) анализ литературы в области принципов обеспечения помехозащищенности;
- 2) сравнение основных форматов модуляции;
- 3) оценка различных методов повышения помехозащищенности.

### Методы повышения помехозащищенности

Рассмотрим некоторые существующие решения по повышению помехозащищенности цифровой системы связи:

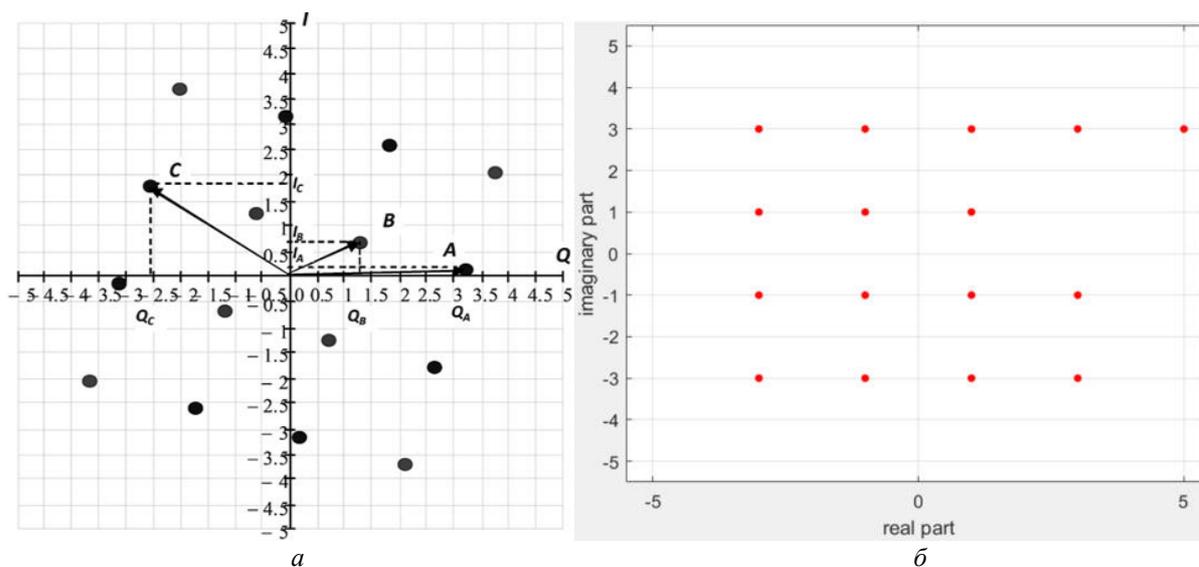
1. *Увеличение избыточности информационного сигнала.* Это достигается путем добавления контрольных сумм к потоку пакетов с нулями и единицами. При этом на приемной стороне с помощью интерполяции вычисляются и восстанавливаются утерянные биты.

2. *Дублирование передачи сигнала.* Данный метод использует обратную связь между приемником и передатчиком, задействует несколько каналов передачи, а также работает за счет запоминания сообщений на участках прогнозируемых сбоев с последующей их передачей при восстановлении связи. Таким образом, согласно данному методу, повреждённые пакеты запрашиваются повторно.

3. *Повышение чувствительности и избирательности приемников.* Данный метод возможно реализовать с помощью добавления усилительных каскадов в приемное устройство.

4. *Применение различных форматов модуляции.* В существующей литературе выделяют несколько типов цифровой модуляции: амплитудную (АМн или ASK), фазовую (ФМн или PSK), частотную (ЧМн или FSK) манипуляции, квадратурную амплитудную модуляцию (КАМ или QAM).

5. *Изменение формы констелляционных диаграмм.* Существует несколько подходов к изменению сигнальных созвездий. Один из таких методов применяется в телевизионном стандарте DVB-T2, согласно которому сигнальное созвездие поворачивается на заданный угол  $16,8^\circ$  (рис. а). Второй метод реализуется при помощи поворота отдельных квадрантов сигнального созвездия на угол  $17,1^\circ$  независимо друг от друга. Также существует другой подход к преобразованию сигнального созвездия, не прибегая к вращению точек констелляционной диаграммы. Согласно этому методу, в системе связи используется quasi-QAM-сигнал, в котором точка сигнального созвездия с наибольшим количеством ошибок переносится за пределы сигнального созвездия (рис. б) [2–4].



Констелляционная диаграмма сигнала КАМ-16: а – трансформированная по стандарту DVB-T2; б – quasi-QAM

### Заключение

Сравнительный анализ показал следующее. При увеличении избыточности информационного сигнала становится возможным исправлять ошибки, возникающие при приеме сигнала, однако в то же время уменьшается скорость передачи по системе связи. При дублировании информации увеличивается время передачи сигнала и возникают временные задержки. При повышении чувствительности приемника возникает риск чрезмерного усиления, что может привести к возбуждению усилителя и, следовательно, некорректной работе приемника. При использовании различных форматов модуляции выделяют M-QAM, так как она более помехоустойчивая в сравнении с другими, однако применение модулированных сигналов иногда недостаточно. Изменение констелляционной диаграммы является наиболее перспективным на сегодняшний день.

Поставленная цель работы – обзор и сравнение различных методов повышения помехозащищенности радиотехнических систем – достигнута.

Для достижения цели решены следующие частные задачи:

- 1) проанализированы различные литературные источники в виде статей из научных журналов;
- 2) рассмотрены различные цифровые форматы модуляции;
- 3) приведено сравнение существующих методов повышения помехозащищенности.

### Список литературы

1. Веденькин Д.А., Макарова Д.Г., Филареева И.Д. Анализ влияния поворота сигнального созвездия на уровень символьных и битовых ошибок в фазовых форматах модуляции // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3 (50). – С. 46.
2. Гильфанова А.Ф., Веденькин Д.А. Один из вариантов повышения помехозащищенности цифровых каналов связи с quasi-QAM // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 41-48.
3. Гильфанова А.Ф. Один из методов повышения помехоустойчивости системы связи // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2023: материалы X Международной молодежной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Казань, 13–15 апреля 2023 года. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 100-101.
4. Веденькин Д.А., Гильфанова А.Ф. Повышение помехозащищенности канала связи с сигналом QAM-16 // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 84-85.

УДК 621.396

## МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА ШИРОКОПОЛОСНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА

А. А. Кислицын, М. А. Кислицына

*Поволжский государственный технологический университет,  
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3  
E-mail: KislitsinAA@volgatech.net*

**Аннотация.** Работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи – адаптивному регулированию частотного ресурса спутниковой системы связи по результатам экспериментального оценивания времени жизни (деградации) широкополосного ионосферного радиоканала для повышения эффективности функционирования современных спутниковых коммуникаций. Разработаны метод и реализующие его алгоритмы для определения времени деградации канала с использованием диагностирующих сигналов пассивных сенсоров спутниковых систем. На основе экспериментальных результатов оценки скорости изменения полного электронного содержания установлено рекомендуемое время для обновления настроек системы связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов ионосферы для эталонной частоты 1 ГГц, которое составило не более 0,5 часа в переходное время суток и не более 1,5 часа в дневные часы.

**Ключевые слова:** транссионосферный радиоканал; широкополосный, полное электронное содержание; время деградации; система спутниковой связи, частотный ресурс

## METHOD FOR AUTOMATIC CONTROL OF FREQUENCY RESOURCE OF WIDEBAND SATELLITE COMMUNICATIONS UNDER CONDITIONS OF DEGRADATION OF THE PARAMETERS OF THE TRANSIONOSPHERIC RADIO CHANNEL

A. A. Kislitsin, M. A. Kislitsina

**Abstract.** This article examines the critical scientific and technical challenge of adaptively managing the frequency resources of satellite communication systems. The method leverages experimental assessments of wideband ionospheric radio channel degradation to enhance the performance of modern satellite communications. The study introduces a method and accompanying algorithms to determine channel degradation periods using diagnostic signals from passive sensors within satellite systems. Based on experimental evaluations of total electron content variability, we recommend optimal intervals for updating communication system settings in response to ionospheric disturbances at a reference frequency of 1 GHz: adjustments should be made at intervals of no more than 0.5 hours during transitional periods and no more than 1.5 hours during daytime operations.

**Keywords:** transionospheric radio channel; total electron content; degradation time; satellite communication systems; broadband radio communication

### Введение

В настоящее время транссионосферная радиосвязь связь играет ведущую роль при организации инфокоммуникационной структуры страны и относится к одному из основных видов радиосвязи, способной обеспечить передачу больших объемов информации на дальние расстояния с применением спутниковых систем связи (ССС) [1]. При этом основная задача нацелена на обеспечение требуемой надежности и качества приёма сигналов в радиоканалах при постоянно изменяющихся воздействиях ионосферы. С одной стороны, это требует создания и совершенствования инвариантных СССР, в которых при переходе к новым условиям ионосферы энергетические показатели сигнала, пропускная способность канала, помехоустойчивость, восприимчивость и широкополосность останутся неизменными. С другой стороны, ионосфера меняется динамически с течением времени, следовательно, и характеристики канала прогрессивно дестабилизируются за короткий промежуток времени [2]. Это приводит к нарушению функционирования радиоканала, т. е. к его деградации.

Решение данной проблемы является актуальной, поскольку исследование времени жизни радиоканала позволит оптимизировать работу СССР, радионавигации и радиолокации, что, в свою очередь, повысит эффективность использования частотных ресурсов широкополосной связи в условиях изменчивого транссионосферного радиоканала. Требуется тщательный анализ изменения интегральной концентрации электронов ионосферы, который позволит оценить время действия различных искажений на передачу сигналов СССР и в целом определить время деградации транссионосферных радиоканалов при изменяющихся ионосферных эффектах на основе оценок суточных ходов полного электронного содержания ионосферы [2].

Таким образом, для обеспечения заданного уровня качественных показателей СССР под воздействием негативных факторов среды распространения существует необходимость в создании адаптивных средств, управляющих функционированием радиоканала по мере его деградации с сохранением инвариантности системы.

*Целью исследования* является развитие адаптированного метода автоматического регулирования частотных ресурсов широкополосной связи в условиях дестабилизирующих факторов ионосферы с фиксированным временем рассогласованности радиоканала на основе данных пассивных радиосенсоров ГНСС.

### Метод для автоматического регулирования частотных ресурсов транссионосферного радиоканала по истечению времени деградирования

В работах [1, 3] было установлено, что для определения времени функционирования транссионосферного радиоканала необходимо проводить исследование интегрального параметра – ПЭС ионосферы. Из-за ряда преимуществ, таких как высокое пространственно-временное разрешение, точность и достоверность качества измерений, основным методом вычисления интегральных параметров транссионосферных радиоканалов является мониторинг

сигналами ГНСС [4]. Метод позволяет осуществлять диагностику параметров радиоканала в различных гелиогеофизических условиях, и для получения ПЭС по данным измерений фазы и псевдодальности ГНСС требуется специфическая первичная обработка данных. Для обеспечения непрерывности наблюдений и технологичности обработки используется пассивный радиосенсор ГНСС, представляющий единый объект в совокупности с тремя основными структурными компонентами: сетью приёмников референционной сети Smartnet, сервером базы данных, программным продуктом AbsTecStat\_graph. На рисунке 1 представлена общая структура программно-аппаратного комплекса.

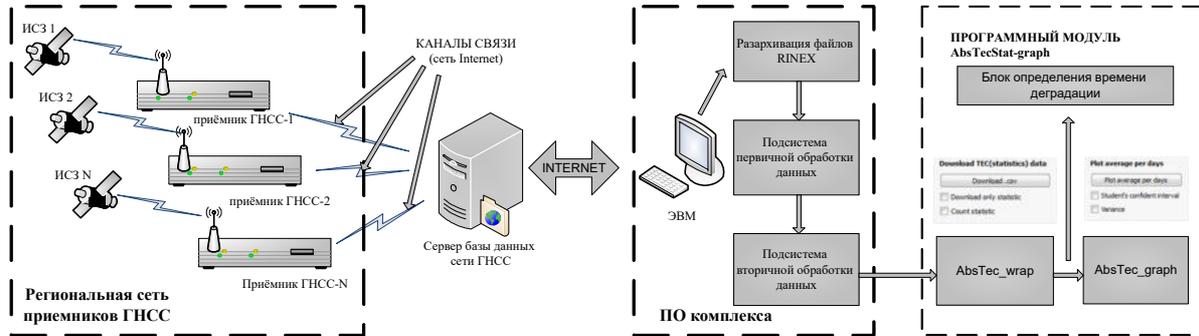


Рис. 1. Общая структура программно-аппаратного комплекса

С учётом специфики трансионосферной радиосвязи математическая модель распространения сигнала на линии связи «ИСЗ – наземная станция» при постоянной амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) определяется фазочастотной характеристикой (ФЧХ) [3]. В зависимости от дисперсии ФЧХ делится на линейную  $\varphi_l(\omega, t)$  и нелинейную  $\varphi_n(\omega, t)$  составляющие:

$$\varphi(\omega, t) = \varphi_l(\omega, t) + \varphi_n(\omega, t), \quad (1)$$

где  $t$  – медленное (геофизическое) время;  $\Omega = \omega - \bar{\omega}$  – разностная частота;  $\varphi_l(\omega, t) = \varphi(\omega, t) + \tau_g(\ddot{\omega}, t) \cdot \Omega$ ;  $\varphi_n(\omega, t) = \frac{1}{2} GDD(\ddot{\omega}, t) \cdot \Omega^2$ .

Тогда из выражения (1) можно определить групповую задержку (быстрое время), характеризующую параметр дисперсии первого порядка:

$$\tau_g(\omega, t) = \tau_g(\ddot{\omega}, t) + GDD \cdot \Omega, \quad (2)$$

где  $GDD = d\tau_g(\omega, t)/d\omega$  – дисперсия групповой задержки.

Принято, что в задачах радиосвязи вместо  $GDD$  использовать наклон функции групповой задержки (дисперсионная характеристика) от частоты, именуемый как параметр дисперсии второго порядка, который определяется следующим образом:  $s(f, t) = d\tau_g(f, t)/df = 2\pi \cdot GDD$ . Именно наличие данного параметра характеризует нелинейную частотную дисперсию в радиоканале. Соответственно, для оценки времени деградации радиоканала необходимы текущие данные о нелинейной составляющей фазовой дисперсии  $\varphi_{n0}$ , которые находятся в результате зондирования сенсорами ГНСС. Так, в идеальном случае на момент времени  $t = t_0$  ФЧХ требует выполнения условия  $\varphi_n(\bar{f}, t) = \varphi_{n0}(\bar{f}, t_0)$ . Однако, учитывая изменчивость ионосферы, в момент времени  $t > t_0$  равенство для идеального случая будет нарушаться, что приведет к деградации ФЧХ канала. Это значит, что в определенный момент времени для приращения  $\Delta t = t - t_0 = T_t$  различия фаз  $\varphi_n(\bar{f}, t)$  и  $\varphi_{n0}(\bar{f}, t_0)$  станут недопустимыми, а значит, канал станет рассогласованным.

Для нахождения приращения нелинейной ФЧХ за время  $T_t$  необходимо выполнить следующее преобразования:

$$\Delta\varphi_n(\bar{f}, t) = \varphi_n(\bar{f}, t) - \varphi_{n0}(\bar{f}, t_0) \approx \frac{d\varphi_n}{dt}(t - t_0) = \pi \cdot F^2 \frac{ds(\bar{f}, t)}{dt} \cdot (t - t_0) = \pi \cdot F^2 \Delta s. \quad (3)$$

При этом величина приращения наклона ионограммы  $\Delta s \leq s_k$  не должна превышать критического значения  $\Delta s \leq s_k$ . С учётом того что для трансионосферного радиоканала наклон определяется через ПЭС ионосферы  $s(\bar{f}) = (-80,5 / c \cdot \bar{f}^3) \cdot N_t$ , время деградации радиоканала можно определить по следующей формуле:

$$T_t = s_k / |s'_t| = \frac{4}{\pi \cdot B_{ch}^2 \left| \frac{ds(\bar{f}, t)}{dt} \right|} = \frac{c \cdot \bar{f}^3}{63 \cdot (B_{ch})^2 \cdot \left| \frac{dN_t}{dt} \right|} \quad (4)$$

где  $f_0$  – опорная частота для эталонных расчётов;  $N'_t = dN_t / dt$  – скорость изменения ПЭС.

Анализируя выражение (4), можно отметить возможное увеличение времени деградации радиоканала с ростом рабочей частоты канала. Однако, учитывая геофизический фактор, время жизни будет уменьшаться при возрастании скорости изменения ПЭС ионосферы и с расширением полосы частот канала.

### Экспериментальное исследование времени деградации радиоканала для дальнейшего автоматического регулирования частотно-энергетических ресурсов широкополосной связи

База экспериментальных данных содержит результаты, полученные на развёрнутой в Российской Федерации сети референчных базовых станций *SmartNet*, которая включает более 350 станций. Массив экспериментальных данных включал измерения ПЭС в течение полного цикла 2021 года. Геомагнитная обстановка в течение года оценивалась как стабильная за исключением пяти дней, когда  $Kp=5$  (по данным лаборатории солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ СО РАН). На первом этапе рассчитывались суточные значения ПЭС для каждого сезона за 2021 год для станции YOSH, расположенной в Поволжском государственном технологическом университете, значения которых в различные сезоны года варьировались в зимний период: 1,74...11,89 TECU; весенний период: 2,27...13,26 TECU; летний период: 2,77...15,25 TECU; осенний период: 2,54...15,59 TECU.

Далее для опорной частоты 1 ГГц, максимальной полосы частот канала 500 МГц, при которой величина критического значения параметра дисперсии второго порядка равна  $0,5 \cdot 10^{-6}$  мкс/МГц, были проведены суточные измерения времени деградации радиоканала с учётом изменения ПЭС. Результаты суточных измерений времени деградации для различных сезонов представлены на рисунке 2.

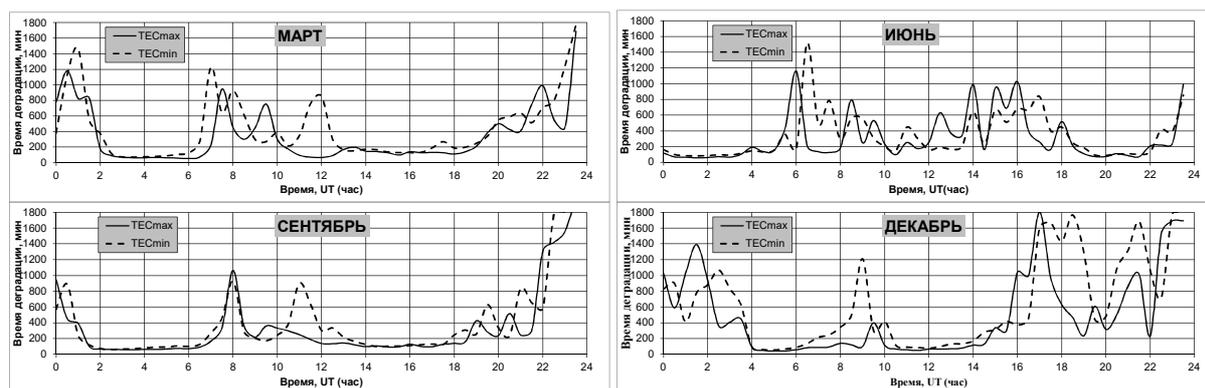


Рис. 2. Суточные измерения времени деградации

Согласно данному рис. 2, из-за различной скорости изменения ПЭС и наклона наблюдаются характерные всплески увеличения значений времени в периоды с 6 до 8 часов и с 12 до 14 часов, а также в ночное время суток. Данная закономерность связана с интенсивными изменениями ПЭС за короткий промежуток времени, что не позволяет быстро скорректировать время деградации. Наименьшее время деградации наблюдалось в переходные часы (от ночи к утру, от дня к ночи) и имело следующие значения: декабрь – 42...54 мин.; январь – 30...51 мин.; февраль – 57...67 мин.; март – 55...72 мин.; апрель – 73 мин.; май – 79 мин.; июнь – 56...81 мин.; июль – 50...68 мин.; август – 63...69 мин.; сентябрь – 57...60 мин.; октябрь – 40...49 мин.; ноябрь – 40...50 мин.

### Заключение

Усовершенствован адаптивный метод автоматического регулирования частотным ресурсом широкополосной спутниковой связи в условиях дестабилизирующих факторов ионосферы при фиксированном времени рассогласования трансionoсферного радиоканала. Апробация метода проведена на основе экспериментальных результатов кодовых и фазовых измерений ПЭС ионосферы, полученных на сети пассивных радиосенсоров ГНСС SmartNet.

Развиты аппаратно-программные средства для реализации полученных методов, включающие навигационный терминал Leica GR10, программные модули первичной и вторичной обработки (AbsTecStat\_graph). На основе экспериментальных исследований параметров трансionoсферного радиоканала было установлено рекомендуемое время для регулирования системных настроек ССС с целью повышения эффективности функционирования трансionoсферного радиоканала при воздействии дестабилизирующих факторов. Установлено, что для опорной частоты 1 ГГц временной интервал должен быть не более 0,5 часа в переходное время и не более 1,5 часа в дневное время.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 22-19-00073

### Список литературы

11. Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии трансionoсферных радиоканалов / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Кислицын // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 6. – С. 571-578.
12. Degradation Period of Anomalous Dispersion Parameter of Transionoсpheric Wideband Radio Communication Channel / N. V. Ryabova, D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, A. A. Kislitsin // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2022. – Vol. 5, No. 1. – P. 292-296. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840973..
13. Адаптивное управление предельной полосой частот систем спутниковой связи в трансionoсферных радиоканалах в условиях частотной дисперсии среды / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, А. А. Кислицын, М. И. Рябова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2021. – № 3(51). – С. 14-30.
14. Y. Yasyukevich, A. Mylnikova, A. Vesnin. GNSS-based non-negative absolute ionosphere total electron content, its spatial gradients, time derivatives and differential code biases: Bounded-variable least-squares and Taylor series // Sensors. – 2020. – Vol. 20, no. 19. – Pp. 1-20.

УДК 621.383

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ГЕНЕРАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК

**О. Г. Морозов, И. И. Нуреев, А. Ж. Сахабутдинов, А. А. Кузнецов,  
А. Аль-Муфти, Д. С. Грабовецкий, Д. Н. Матвеев, Т. Р. Шагвалиев**

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ,  
420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10  
E-mail: OGMorozov@kai.ru*

**Аннотация.** Применение одинарных частотных гребенок является фундаментальным методом в метрологии мобильных, сенсорных волоконно-оптических и открытых крупномасштабных оптических и радиофизических систем. Двойные частотные гребенки становятся мощным инструментом, который используется для одновременных точных и быстрых двухпараметрических измерений с достижением как высокого частотного, так и фазового разрешения. Используя две когерентные частотные гребенки, системы на их основе позволяют также быстро измерять временные и фазовые отклики. Они позволяют преодолевать ограничения, связанные с чувствительностью, шириной полосы пропускания, неоднозначностью и динамическими характеристиками измерений метрологических инструментов на одинарных частотных гребенках. Однако формирование двух частотных гребенок представляет собой сложный интерферометрический процесс, не лишенный таких недостатков, как фазовые и частотные

шумы, временной джиттер. Интуитивно процесс развития аппарата частотных гребенок может быть основан как на увеличении числа ее компонент, так и на упрощении методов и средств их генерации. В этой работе представлена концепция построения простой в реализации многокомпонентной частотной гребенки, основанной на использовании комплексного подхода, объединяющего принципы синтеза широкополосного пакета дискретных частот (ШПДЧ) – одинарной частотной гребенки, каждая из составляющих которой организована на основе принципов синтеза сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ). Реализация этого подхода основана на простом каскадном включении тандемных амплитудно-фазовых электрооптических модуляторов. Формирование ШПДЧ различного частотно-временного характера и СПДЧ различной симметричной, асимметричной и случайной многокомпонентной структуры с подавлением, частичным подавлением или сохранением компонент ШПДЧ показывает, по оценкам, приведенным в работе, перспективность и разнообразие применений многокомпонентной частотной гребенки для различных метрологических приложений.

**Ключевые слова:** метрология систем связи и сенсорики; одинарная частотная гребенка; двойная частотная гребенка; многокомпонентная частотная гребенка; широкополосный пакет дискретных частот; сверхузкополосный пакет дискретных частот; тандемная амплитудно-фазовая модуляция; электрооптический модулятор

## INTEGRATED APPROACH TO MULTICOMPONENT FREQUENCY COMBS GENERATION

**O. G. Morozov, I. I. Nureev, A. Zh. Sakhabutdinov, A. A. Kuznetsov,  
A. Al-Mufti, D. S. Grabovetsky, D. N. Matveev, T. R. Shagvaliev**

**Abstract.** The use of single frequency combs is a fundamental method in the metrology of mobile, sensor fiber-optic and open large-scale optical and radio-physical systems. Dual frequency combs are becoming a powerful tool used for simultaneous accurate and fast two-parameter measurements with both high frequency and phase resolution. Using two coherent frequency combs, systems based on them also allow fast measurement of time and phase responses. They allow overcoming limitations related to sensitivity, bandwidth, ambiguity and dynamic characteristics of measurements of metrology instruments on single frequency combs. However, the formation of dual frequency combs is a complex interferometric process, not without such disadvantages as phase and frequency noise, time jitter, etc. Intuitively, the process of developing the frequency comb apparatus can be based both on increasing the number of its components (more, than two), and on simplifying the methods and means of their generation. This paper presents a concept for constructing a simple-to-implement multicomponent frequency comb based on the use of an integrated approach combining the principles of synthesis of a wideband discrete frequency package (WBDFP) — a single basic comb, each component of which is synthesized based on the principles of synthesis of an ultra-narrowband discrete frequency package (UNDFP). The implementation of this approach is based on a simple cascade connection of tandem amplitude-phase electro-optical modulators. The formation of WBDFPs of various frequency-time nature and UNDFPs of various symmetric, asymmetric and random multicomponent structures with suppression, partial suppression or preservation of WBDFP components shows, according to the estimates given in the report, the promise and diversity of applications of a multicomponent frequency comb for various metrology applications.

**Keywords:** metrology of communication and sensor systems; single frequency comb; double frequency comb; multicomponent frequency comb; wideband discrete frequency package; ultra-narrowband discrete frequency packet; tandem amplitude-phase modulation; electro-optical modulator

### Введение

Появление одинарной частотной гребенки (ОЧГ) в качестве источника зондирующего излучения привело к революционному прогрессу в области оптической метрологии и волоконно-оптических многосенсорных систем [1]. Стабильная ОЧГ обеспечивает узкие спектральные линии, которые являются копиями излучения непрерывного лазера, равномерно распределенными в частотной области. Кроме того, стабильная ОЧГ может потенциально выполнять быстрые измерения благодаря своей частоте повторения в сотни мегагерц или выше.

Было предложено множество систем измерений, использующих преимущества ОЧГ. Они реализуют абсолютные измерения различных физических величин с определенной точностью и относительно простой настройкой. Однако в них не полностью задействованы все составляющие гребенки, поскольку часто бывает трудно различить соседние линии гребенки, расположенные в интервале от мегагерца до гигагерца. Поэтому системы на ОЧГ не реализуют всех преимуществ их применения, которые включают высокое спектральное разрешение, высокую частоту импульсов и широкий диапазон однозначных измерений.

Развитие частотных гребенок до уровня двойной частотной гребенки (ДЧГ) [2] позволило устранить недостатки систем с ОЧГ, существенно расширило спектр и эффективность их применения. Известно применение данных систем в измерении расстояний, спектроскопии, дисперсионном анализе в магистральных волокнах, эллипсометрии, характеристике материалов, гиперспектральной визуализации, микроскопии, виброметрии и датчиках деформации. Эти приложения подчеркивают универсальность систем с ДЧГ; они имеют одинаковую базовую архитектуру и сталкиваются с аналогичными техническими проблемами.

Однако формирование двухчастотных гребенок представляет собой сложный интерферометрический процесс, не лишенный таких недостатков, как фазовые и частотные шумы, временной джиттер. При этом ДЧГ формируются на основе [2] метода времени пролета, реализуемого на оптической кросс-корреляционной технике; интерферометрии с синтетической длиной волны, которая использует различные оптические моды или несколько длин волн, привязанных к полностью стабилизированной гребенке; дисперсионной интерферометрии, которая включает в себя расчет наклона «фаза–частота» спектра интерференции.

Интуитивно процесс развития инструментария частотных гребенок может быть основан как на увеличении числа ее компонент, так и на упрощении методов и средств их генерации. В данной работе представлена концепция построения простой в реализации многокомпонентной частотной гребенки (МКЧГ), основанной на использовании комплексного подхода, объединяющего принципы синтеза широкополосного пакета дискретных частот (ШПДЧ) – одинарной частотной гребенки [3], каждая из составляющих которой синтезирована на основе принципов синтеза сверхузкополосного пакета дискретных частот (СПДЧ) [4]. Реализация этого подхода основана на простом каскадном включении тандемных амплитудно-фазовых электрооптических модуляторов [5]. Формирование ШПДЧ различного частотно-временного характера и СПДЧ различной симметричной, ассиметричной и случайной многокомпонентной структуры с подавлением, частичным подавлением или сохранением компонент ШПДЧ показывает, по оценкам, приведенным в докладе, перспективность и разнообразие применений многокомпонентной частотной гребенки для различных метрологических приложений.

### **Основные идеи исследования**

Универсальные возможности тандемной амплитудно-фазовой модуляции оптической несущей радиочастотными сигналами представлены в [5].

Для формирования ШПДЧ [3] предложено использовать три каскада электрооптических модуляторов, реализующих амплитудно-фазовую модуляцию. Этапы формирования ШПДЧ реализованы на двух каскадах модуляции интенсивности на модуляторах Маха-Цендера ММЦ1 и ММЦ2 со смещенной рабочей точкой. Радиочастоты с генераторов формирования разностных частот ОЧГ поступают на модуляторы интенсивности и на третий каскад – каскад фазовой модуляции. При этом выполнены точная синхронизация частот всех генераторов, согласование их амплитуд с помощью аттенуаторов и фазовращателей. Экспериментально получен спектр ШПДЧ-ОЧГ с плоской огибающей, состоящий из 40 линий, разнесенных на 16,5 ГГц.

Как указывалось, ОЧГ при всех своих преимуществах не обеспечивает высоких метрологических характеристик. Переход к ДЧГ невозможен без значительного усложнения схемы и также не позволяет в полной мере раскрыть потенциал систем, использующих зондирующее излучение в виде частотных гребенок. Таким образом, актуальной является задача разработки методов построения генераторов частотных гребенок с новым типом зондирующего излучения, лишенного описанных недостатков.

В связи с этим предложен новый тип зондирующих излучений МКЧГ, в котором каждая компонента ШПДЧ заменена на СПДЧ. Определим СПДЧ [4] как излучение, содержащее две и более частотных компонент с фиксированными разностными частотами, максимальная из которых подобрана таким образом, что при прохождении такого излучения через измеряемую среду изменение амплитуд всех гармоник происходит пропорционально одной и той же величине, а минимальная превышает спектральную ширину лазера, при этом начальные фазы каждой из компонент строго детерминированы, а их разность известна.

Сформулированное определение СПДЧ позволяет описать его некоторые свойства. Во-первых, разрешающая способность зондирования не будет превышать максимальной разностной частоты

СПДЧ, а минимальная будет определяться исходя из обеспечения минимума собственных шумов фотоприемника. Во-вторых, зондирование в одной точке может быть сведено к решению задачи определения коэффициента пропорциональности изменения амплитуд. В-третьих, СПДЧ могут быть как симметричными по амплитуде и/или частоте, так и асимметричными. В-четвертых, такое излучение позволяет реализовать параллельный опрос многоканальной или многосенсорной системы с адресным подходом, если реализовать для первой компоненты ШПДЧ  $i$ -ю структуру СПДЧ, а для  $n$ -й компоненты ШПДЧ –  $(i+n)$ -ю.

По априорной оценке, асимметричные СПДЧ обладают большей информационной емкостью сигнала, чем симметричные. В общем случае симметричные по частоте СПДЧ с равномерным шагом формируют  $N-1$  уравнение (где  $N$  – количество гармоник СПДЧ) выражений, используемых для расчета коэффициента пропорциональности изменения амплитуд. Асимметричный по частоте СПДЧ, состоящий из  $N$  частот, позволяет сформировать систему уже из  $(N-1)!$  линейно независимых уравнений, получаемых по результатам фильтрации на разностных частотах.

Формирователь СПДЧ произвольной формы может быть реализован, как показано в [4], на одном или двух каскадах амплитудно-фазового модулятора интенсивности с высоким коэффициентом экстинкции, подключаемых к выходу генератора ШПДЧ.

При этом экспериментально полученный спектр МКЧГ с плоской огибающей состоит из 40 предварительно полученных линий ОЧГ с разносом в 16,5 ГГц, вокруг каждой из которых могут быть сформированы две компоненты, разнесенные от 0,05 до 8,5 ГГц. При увеличении числа компонент верхняя граница разноса будет уменьшаться. С точки зрения СПДЧ МКЧГ будет наиболее эффективной при использовании нижней границы разноса.

Одним из примеров применения МКЧГ является параллельная инициализация восходящих каналов транспортного домена систем мобильной связи 5G.

### Заключение

В работе впервые представлена концепция построения простой в реализации МКЧГ, применение которой в метрологических системах должно обладать преимуществами по сравнению с применением в них ОЧГ и ДЧГ. Объединение преимуществ ШПДЧ и СПДЧ с одновременным устранением имеющихся недостатков приводит к тому, что для формирования эффективных МКЧГ и принципов их применения в метрологии мобильных, сенсорных волоконно-оптических и открытых крупномасштабных оптических и радиофизических систем необходимо решить множество задач, к основным из которых следует отнести следующие задачи: анализ сигнала отклика на зондирующее излучение на выходе фотоприемника, преимущественно узкополосного, на фиксированных и заранее известных разностных частотах; исключение необходимости сканирования спектрального контура исследуемой среды или сенсора; снятие ограничений на минимальный шаг перестройки; исключение необходимости дополнительного анализа фазы сигнала на выходе фотоприемника; анализ как широкополосных, так сверхузкополосных структур с наперед заданной разрешающей способностью; упрощение способа формирования МКЧГ; формирование универсального подхода к вычислению амплитуд отклика вне зависимости от количества компонент зондирующего излучения с реализацией адресного подхода к каждой из них.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения программ ПСАЛ-2030 и ПИШ КНИТУ-КАИ.

### Список литературы

1. Eliason T., Parker P. A., Reber M. A. R. Electro-optic frequency comb generation via cascaded modulators driven at lower frequency harmonics // Optics Express. – 2024. – Vol. 32, no. 21. – P. 36394-36404.
2. Zhu Z., Wua G. Dual-Comb Ranging // Engineering. – 2018. – Vol. 4, no. 6. – P. 772-778.
3. Al-Mufti A., Morozov O.G. Tunable and ultraflat optical frequency comb generator using a single-drive multi-RF Mach-Zehnder modulator in a cascaded intensity modulators and phase modulator // T-Comm. – 2024. – Vol. 18, no. 4. – P. 48-54.

4. Информационная структура сверхузкополосного пакета дискретных частот как зондирующего излучения нового типа для радифотонных векторных анализаторов / А.А. Кузнецов, А. Лиц, Е.В. Мочалова, С.Р. Галиев, И.И. Шайгарданов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2021. – Т. 1, № 2. – С. 40-44.
5. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 6-42.
6. Анализ метода двухчастотной инициализации каналов связи транспортного домена сетей 5G/6G / У.А. Айметдинова, Д.А. Веденькин, А. Аль-Муфти, Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Кузнецов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 9. – С. 140-143.
7. Метод четырехчастотной инициализации каналов связи транспортного домена сетей 5G / А.Ал. Василец, А.Ан. Василец, А. Аль-Муфти, Р.Ш. Мисбахов, О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Кузнецов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 11. – С. 339-342.

УДК 621.396

## ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО ДАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНВЕРСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С КОРРЕКЦИЕЙ

**О. А. Хамарицкая, А. С. Мертвищев**

*Поволжский государственный технологический университет, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3*

*E-mail: HamaritskayaOA@volgatech.net*

*E-mail: AMS2605@ya.ru*

**Аннотация.** Предложен подход к повышению разрешающей способности по дальности за счет применения инверсной фильтрации сигналов. Рассмотрена эффективность инверсной фильтрации по отношению к согласованной. Предложено использование метода коррекции базиса для повышения эффективности инверсной фильтрации. Показано, что применение метода коррекции базиса позволяет увеличить эффективность инверсной фильтрации на 3 дБ, что расширяет его возможность применения при решении задачи разрешения по дальности.

**Ключевые слова:** разрешение сигналов; инверсная фильтрация; коэффициент шума; коррекция базиса; эффективность фильтрации

## INCREASING THE RANGE RESOLUTION BASED ON THE USE OF INVERSE FILTERING WITH CORRECTION

**O. A. Hamaritskaya, A. S. Mertvishchev**

**Abstract.** An approach to increasing the range resolution through the use of inverse signal filtering is proposed. The efficiency of inverse filtration in relation to the consistent one is considered. The use of the basis correction method is proposed to increase the efficiency of inverse filtration. It is shown that the application of the basis correction method makes it possible to increase the efficiency of inverse filtering by 3 dB, which expands its possibility of application in solving the problem of range resolution.

**Keywords:** signal resolution; inverse filtering; noise factor; basis correction; filtration efficiency

Основным достоинством инверсной фильтрации является возможность сжатия даже простого сигнала во временной области, что обуславливает его возможность применения для решения задачи разрешения по дальности. При этом коэффициент шума инверсного фильтра в  $D = \|s\|^2 / \|v\|^2$  раз хуже, чем согласованного фильтра, где  $s$  и  $v$  — нормы исходного и сопряжённого сигналов [1]. Величина  $D$  характеризует степень равномерности спектра сигнала. Для сигнала с равномерным спектром величина  $D$  равна единице и эффективность согласованного и инверсного фильтров одинакова. С увеличением разницы между компонентами спектра сигнала параметр  $D$  возрастает.

Импульсная характеристика  $\mathbf{H}_{иф}$  (ИХ) инверсного фильтра (ИФ) находится как обратная к матрице  $\mathbf{H}_{сф}$  импульсной характеристики согласованного фильтра, т.е.  $\mathbf{H}_{иф} = \mathbf{H}_{сф}^{-1}$ . Каждый столбец обратной матрицы представляет собой ИХ стационарного ИФ на каждом из этапов фильтрации [2].

Процесс коррекции представляет собой добавление на каждом этапе фильтрации компоненты  $\beta_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, k_{кор}$ , где  $k_{кор}$  - количество корректируемых компонент [3]. ИХ инверсного фильтра при коррекции находится как обратная к матрице  $\mathbf{H}_{иф,к} = \mathbf{H}_{сф,к}^{-1}$ . Каждый столбец матрицы  $\mathbf{H}_{иф,к}$  также представляет собой ИХ инверсного фильтра на каждом из этапов фильтрации. При этом циклический характер связи между импульсными характеристиками инверсного фильтра на каждом из этапов также нарушается. Таким образом, инверсный фильтр приобретает свойство нестационарности.

Инверсную фильтрацию в матричном виде можно представить как

$$\mathbf{Y}_{иф} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{H}_{иф,к} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{H}_{сф,к}^{-1} = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{H}_{сф,к}|} \tilde{\mathbf{H}}_{сф,к} \quad (1)$$

На основании свойств определителей матриц получаем

$$\mathbf{Y}_{иф} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{H}_{иф,к} = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{H}_{сф,к}|} \tilde{\mathbf{H}}_{сф,к} = \frac{1}{|\mathbf{H}_{сф,к}|} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & |\mathbf{H}_{сф,к}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

На рис. 1,а представлен пример циклической инверсной фильтрации без коррекции и с коррекцией группового сигнала, образованного суммированием двух одиночных сигналов треугольной формы со смещением на 2 отсчета. При этом отношение сигнал/шум на входе по мощности  $q_{вх} = 20$  дБ, а параметры коррекции  $\beta_1 = -8$ ,  $\beta_2 = 2$ .

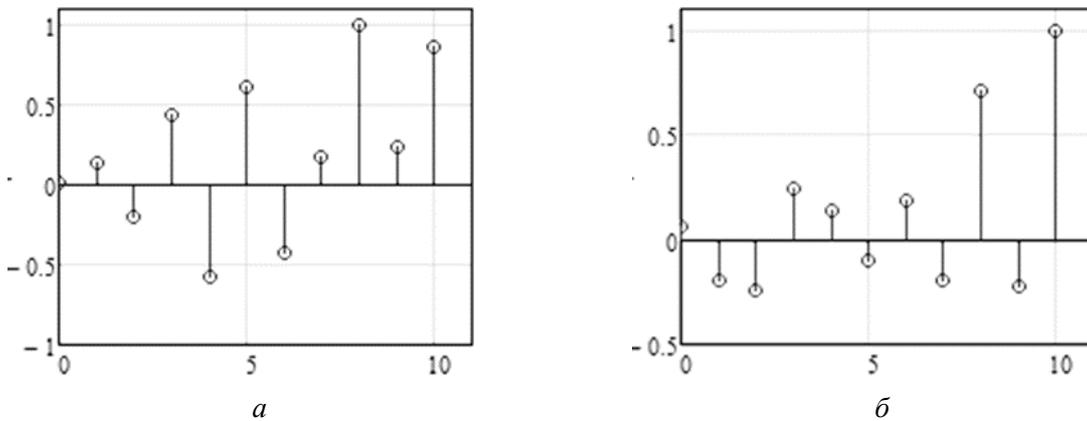


Рис. 1. Циклическая инверсная фильтрация без коррекции (а) и с коррекцией (б) группового сигнала

Отношение сигнал/шум на выходе ИФ определяется как отношение мощности  $P_s$  сигнала к мощности шума  $P_w$  на выходе фильтра:

$$q_{вых} = 10 \lg \left( \frac{1}{\sigma_{вх}^2 \|\mathbf{H}_{иф}\|^2} \right). \quad (3)$$

Для случая нестационарной фильтрации, когда ИХ  $\mathbf{H}_{иф,к}$  фильтра на каждом из этапов циклической фильтрации принимают разные значения, мощность выходного шума рассчитывается как среднее по этапам фильтрации. С учетом того что мощность выходного шума определяется нормой импульсной характеристики фильтра, для случая нестационарной фильтрации целесообразно ввести понятие среднего квадрата нормы ИХ фильтра:

$$\overline{\|\mathbf{H}_{иф,к}\|^2} = \frac{1}{N} \sum_{W=0}^{N-1} \|\mathbf{H}_{иф,к}\|_W^2, \quad (4)$$

где  $\|\mathbf{H}_{иф,к}\|_W^2$  – квадрат нормы ИХ фильтра на  $W$ -м этапе фильтрации.

Исследовано, как процесс коррекции повлияет на отношение сигнал/шум на выходе инверсного фильтра. На рис. 2 представлена зависимость отношения сигнал/шум по мощности на выходе ИФ от величины коррекции  $\beta_2$  при  $\beta_1 = -2$ .

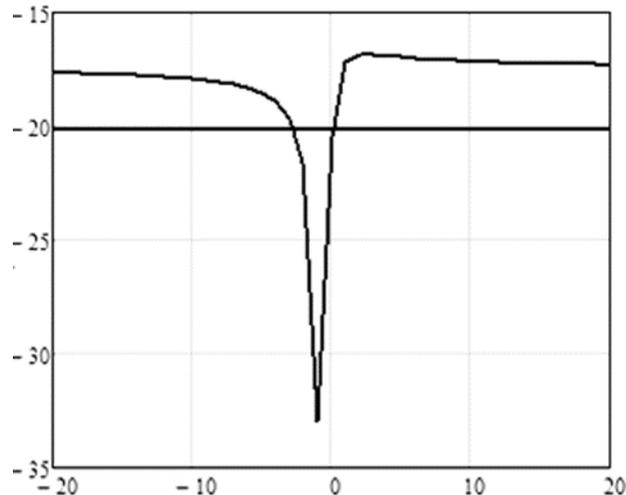


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе ИФ от величины коррекции  $\beta_2$

Представленная на рис. 2 зависимость получена при отношении сигнал/шум на входе  $q_{вх} = -3,5$  дБ. Отношение сигнал/шум на выходе инверсного фильтра без коррекции составляет  $-20,201$  дБ. Применение коррекции позволяет увеличить отношение сигнал/шум на выходе инверсного фильтра на 3 дБ и тем самым расширить возможности применения инверсной фильтрации для повышения разрешающей способности по дальности.

#### Список литературы

1. Кревецкий А.В., Мельников А.Д. Разрешение-обнаружение сигналов на базе сопряженных согласованных фильтров // Радиотехника. – 2007. – № 4. – С. 3-8.
2. Хафизов Р.Г. Оценка параметров боковых лепестков сжатого сигнала на выходе инверсного фильтра в условиях неопределенности // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2021. – №8. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.10>.
3. Применение метода коррекции базиса для устранения неопределенности при синтезе инверсного фильтра / Р.Г. Хафизов, Е.А. Григорьевых, Е.С. Пахмутова, М.С. Соколова, А.М. Масликов // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2022. – №12. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.6>.

## Секция 4

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН И ИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

---

УДК 621.396.6

## РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОЖДЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Д. А. Веденькин, А. Кадим

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ,*

*420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10*

*E-mail: denis\_ved@mail.ru*

*E-mail: ansar.kadim@mail.ru*

**Аннотация.** В данной работе исследуется вопрос обеспечения объективного контроля в задаче оценки качества вождения автомобиля при помощи радиотехнических средств. Рассматриваются существующие подходы, предназначенные для осуществления объективного контроля в задаче оценки качества стиля вождения, а также выводится перечень необходимых радиотехнических средств, необходимых для создания подобного рода системы.

**Ключевые слова:** качество вождения; транспортное средство; радиотехническая система

## RADIOTECHNICAL MEANS FOR OBJECTIVE CONTROL OF VEHICLES DRIVING QUALITY

D. A. Vedenkin, A. Kadim

**Abstract.** This paper examines the issue of providing objective control in the task of assessing the quality of driving a car using radio engineering means. Existing approaches designed to implement objective control in the task of assessing the quality of driving style are considered, and a list of the necessary radio engineering means required to create such a system is derived.

**Keywords:** driving quality; vehicle; radio engineering system

### Введение

Безопасность дорожного движения является важным вопросом для всех водителей и общества в целом. Качественное вождение – неотъемлемая часть обеспечения безопасности и снижения аварийности на дорогах. Обучение водителей, использование технологий, оценка рисков, меры предосторожности, внимание к окружающей среде – все это вместе способствует созданию культуры безопасного вождения. Контроль качества вождения – это процесс оценки и совершенствования навыков вождения транспортного средства. Он включает в себя различные методы и техники, используемые для измерения и анализа навыков вождения, предоставления рекомендаций по их улучшению. Устранение причин аварийности выступает сегодня одним из главных государственных приоритетов в защите человека, его здоровья и имущественных интересов.

В настоящее время наряду с вопросами исключения человеческого фактора реализуются мероприятия по оборудованию проезжей части и прилегающей территории различными элементами повышения безопасности дорожного движения. Особое внимание обращено на повышение уровня технического состояния транспортных средств, их активной и пассивной безопасности. Одним из очевидных путей повышения безопасности движения автомобильной техники является её оснащение бортовыми автоматизированными системами управления движением вообще, в частности системами предупреждения столкновений автомобилей.

### Существующие подходы к реализации объективного контроля

Первое исследование ученых по разработке систем мониторинга окружающей обстановки и оповещения водителей автомобилей об опасности было отмечено в 1992 году. Мониторинг опасного поведения за рулем может помочь водителям обратить внимание на свой стиль вождения и связанные с ним риски, тем самым снижая уровень неосторожного вождения и совершенствуя навыки безопасного поведения на дороге.

В зависимости от формы представления и принципа работы все системы мониторинга состояния водителя и дорожной обстановки можно разделить на 4 категории:

- системы предупреждения аварийных ситуаций, существующие в виде аппаратно-программных комплексов и устанавливаемые автопроизводителями [1];
- мобильные системы генерации рекомендаций, существующие в виде мобильных приложений для смартфонов;
- видеокамеры, устанавливаемые водителем в кабине транспортного средства (ТС), представленные автомобильными видеорежистраторами и отдельными устройствами видеонаблюдения, направленными на водителя, или на дорогу;
- устройства носимой электроники, надеваемые и носимые водителем перед совершением каждой поездки на автомобиле.

Современные автомобили являются высокотехнологичными комплексами с большим количеством датчиков и различными системами управления, в том числе использующими внешние информационные данные, такие как координаты от спутниковой навигации с последующей привязкой к карте местности, системы считывания дорожных знаков, разметки, оценки бокового интервала, дистанции до других объектов, скоростей сближения с другими участниками дорожного движения и объектами инфраструктуры. Эти подсистемы могут быть реализованы с использованием оптических, СВЧ-технологий с учетом требований ЭМС.

В задаче оценки качества вождения можно выделить следующие критические данные, необходимые для сбора:

- скорость движения и разница в скорости движения автомобиля и разрешенной скорости движения на данном участке;
- обороты двигателя, массовый расход воздуха, передача;
- интенсивность ускорения и торможения;
- диапазон и частота отклонения рулевого колеса в зависимости от скорости движения;
- расстояние до препятствий и боковые интервалы;
- навигационные данные, погодные условия и состояние дорожного покрытия и пр.

### Устройства, необходимые для реализации объективного контроля

*Автомобильные радары.* Целесообразность применения автомобильных радаров для предупреждения аварийных ситуаций неоспорима. Первыми странами, что начали использовать подобного рода устройства, стали США и Германия ввиду крайне развитой автомобильной промышленности.

В условиях плотного тумана, интенсивных осадков, задымления и непосредственного ослепления водителя солнцем, бликами или лучами фар радар имеет огромное значение. В этих случаях визуальное наблюдение обстановки, а следовательно, её контроль, затруднен, а в некоторых случаях (ливень, снег) и вовсе практически исключен. Радар совместно с системой круиз-контроля позволяет вычислять расстояние до впереди идущего автомобиля и поддерживать скорость, сохраняющую безопасное расстояние до транспортного средства впереди.

*Системы дистанционного контроля.* По итогам 2023 года аварийность на российских дорогах увеличилась на 4,5%, а в базе данных ГИБДД по стране зарегистрировано 132 466 ДТП. Самый распространенный вид ДТП – столкновение двух автомобилей.

Одним из очевидных способов повышения безопасности автомобиля является оснащение установленной на транспортном средстве автоматической системой управления дорожным движением в целом, особенно системой предотвращения столкновений. Пассивный круиз-контроль поддерживает постоянную скорость автомобиля, заданную водителем. Установленная скорость не изменится до тех пор, пока водитель не нажмет на педаль тормоза или газа и не изменит ее самостоятельно. В этом случае круиз-контроль будет отключен. Как только водитель отпустит педаль тормоза или газа, можно установить заданную скорость, повторить и

снова изменить скорость. Он будет работать до следующего проявления инициативы со стороны водителя. Настройки круиз-контроля можно изменять во время движения. Адаптивный круиз-контроль (АКК) – это усовершенствованная версия пассивного круиз-контроля. АКК не позволяет вам приблизиться к предыдущему автомобилю на указанное расстояние. Когда впереди идущий автомобиль замедляет ход, система АКК активирует тормозную систему. Системы АКК являются системами переднего обзора.

*Системы бокового обзора и мониторинга слепых зон.* Автомобильный радар для контроля боковых интервалов и «мертвых» зон позволяет избежать аварии при обгонах, перестроениях и движении задним ходом. Несколько радарных датчиков устанавливаются по бокам спереди и на заднем бампере автомобиля, они регистрируют, где расположены другие транспортные средства, которые водитель не видит в зеркалах заднего вида. При обнаружении таких машин и излишнем сближении с ними подается тревожный сигнал.

Рассмотрим работу данной системы на примере Audi Side Assist. Система автомобиля работает на скорости более 60 км/ч, включаясь и выключаясь нажатием кнопки. Система уведомляет водителя о том, что автомобиль находится на соседней полосе (в «мертвой» зоне или приближается к ней), что может представлять опасность при перестроении. В этом случае на зеркале заднего вида с соответствующей стороны загорается сигнальная лампа и будет гореть до тех пор, пока другой автомобиль не удалится на достаточное расстояние. Если водитель Audi включит сигнал поворота с намерением перестроиться в другую полосу движения с установленной скоростью, расстояние до объекта будет указано стрелками на шкале вместе со схематическим изображением автомобиля.

*Парковочные радары.* Данные устройства предназначены для контроля приближения к препятствиям при движении как назад, так и вперед. Они различаются по количеству используемых датчиков: четыре, шесть, восемь и двенадцать, а также скорости работы.

*Датчики и системы мониторинга для сбора данных о поведении водителя.* Данная система предназначена для мониторинга и анализа различных аспектов поведения водителя, таких как скорость, ускорение, торможение, смена полосы движения и соблюдение правил дорожного движения. К числу основных преимуществ системы контроля относятся повышение безопасности, снижение расхода топлива и износа автомобиля. Она также помогает выявлять и устранять опасное поведение водителя до того, как оно приведет к аварии или другим проблемам. В 2023 году появление автономных транспортных средств и необходимость обеспечения безопасности и надежности этих транспортных средств делают этот подход все более актуальным. Он основан на использовании передовых датчиков и систем мониторинга для сбора данных о поведении водителей, а также алгоритмов машинного обучения для анализа и выявления областей, которые нуждаются в улучшении.

### **Заключение**

К настоящему времени количество транспортных средств на дорогах общего пользования неуклонно увеличивается, а значит, для обеспечения безопасности дорожного движения и осуществления объективного контроля за качеством вождения необходимо реализовать систему, комплексную информацию от различных (зачастую уже имеющихся в автомобиле) систем, выполняющих оценку. Некоторые дополнительные сведения изложены в работах [1, 2].

### **Список литературы**

1. Лифарева Д. Д., Курьянова Е. А., Веденькин Д. А. Один из алгоритмов оценки стиля управления транспортным средством // BIG DATA и анализ высокого уровня : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции, Минск, 13 марта 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024. – С. 413-417. – EDN CLFYHC.
2. Оценка стиля вождения автомобиля. Часть 1: Сбор данных / Д. А. Веденькин, Е. А. Курьянова, Д. Д. Лифарева, А. Ф. Гильфанова // VI научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2023 : материалы XX Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, 2023. – С. 235-236. – EDN HEKXKM.

УДК 621.396.6

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОЖДЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Д. А. Веденькин, В. В. Фархутдинов

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ,  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
E-mail: denis\_ved@mail.ru  
E-mail: farkhutdinov.vladislav@mail.ru*

**Аннотация.** Задача оценки качества вождения транспортных средств в реальном времени является крайне актуальной. Предлагается подход к построению системы контроля, использующей как данные, получаемые с датчиков самого транспортного средства, так и от внешних систем.

**Ключевые слова:** качество вождения; транспортное средство; безопасность

## INTELLIGENT SYSTEMS FOR ASSESSING THE QUALITY OF DRIVING VEHICLES

D. A. Vedenkin, V. V. Farhkutdinov

**Abstract.** The task of assessing the quality of driving vehicles in real time is extremely relevant. An approach to building a control system is proposed that uses both data obtained from the sensors of the vehicle itself and from external systems.

**Keywords:** driving quality; vehicle; safety

### Введение

Стиль вождения – это типичные, устоявшиеся особенности дорожного поведения водителя, система способов и средств осуществления им деятельности, а также типичные для водителя эмоциональные переживания и взаимодействия с другими участниками дорожного движения, предопределяющие уровень безопасности (аварийности) водителя и определяемые рядом факторов. Существует множество систем оценки стиля вождения, используемых в различных отраслях, таких как логистика, страхование, автомобильная промышленность и другие. Кроме того, оценка стиля вождения может быть использована для разработки программ обучения для водителей. Введённый в 2020 году стандарт [1] устанавливает параметры и критерии оценки качества вождения с целью оценки безопасности использования транспортных средств категорий М и N.

### Виды информации, характеризующей качество вождения

Современные автомобили являются высокотехнологичными комплексами с большим количеством датчиков и различными системами управления, в том числе использующими внешние информационные данные, такие как координаты от спутниковой навигации с последующей привязкой к карте местности, системы считывания дорожных знаков, разметки, оценки бокового интервала, дистанции до других объектов, скоростей сближения с другими участниками дорожного движения и объектами инфраструктуры. Эти подсистемы могут быть реализованы с использованием оптических и микроволновых технологий. Частота опроса датчиков и сбора данных зависит от объёма памяти и требований по оценке скорости изменения параметров. Типовые значения периодичности опроса составляют около 2–5 секунд, но могут быть настроены в соответствии с конкретными потребностями и требованиями системы оценки стиля вождения.

Важно отметить, что для анализа рекомендуется использовать комплексный подход с учетом не только отдельных данных, но и их взаимосвязи, а также контекстуальных условий ситуации на дороге.

### Математическая модель системы оценки

Математическая модель была разработана в программной среде LabVIEW и включает в себя оценку трёх критических параметров, а именно:

- 1) технической скорости движения;

- 2) расстояния до объекта впереди;
- 3) своевременного переключения передач.

Также следует отметить, что на оценку влияют погодные условия и сложность трассы. Данные об этих параметрах могут поступать с навигационной системы ГЛОНАСС. Для оператора оценка стиля вождения является итоговым показателем от 1 до 10, а для водителя – индикатором, показывающим количество присваиваемых ему звёзд (от 1 до 5). Все итоговые значения оценок записываются в массив. Модель на основе алгоритма оценки стиля вождения автомобиля представлена на рисунке 1.

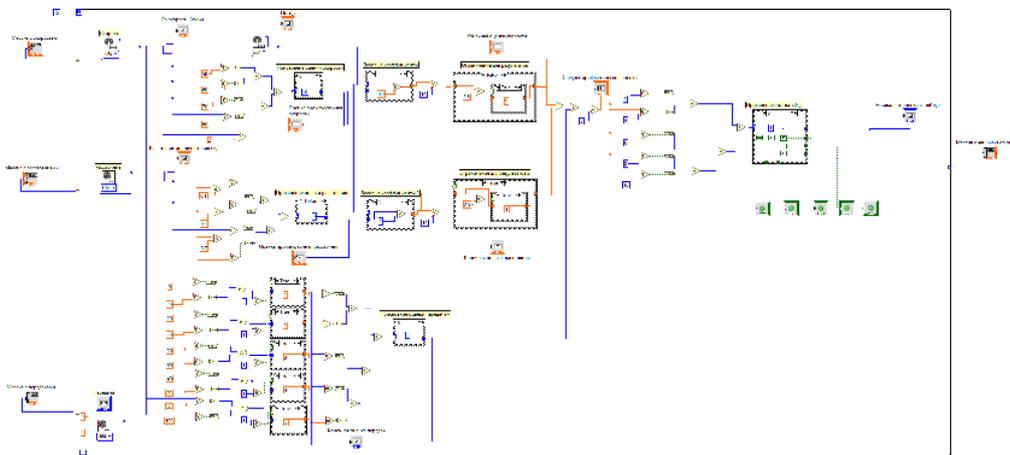


Рис. 1. Математическая модель системы оценки стиля вождения автомобиля

Результат интеллектуальной оценки может быть представлен водителю в комплексном виде, например в виде светящихся индикаторов от 1 до 5, а оператору – в виде количественных оценок каждого из параметров и комплексной оценки, выраженной также в численном виде.

### Результаты моделирования

Водитель в результате работы математической модели видит то, что представлено на рисунке 2,а. В то время как оператор, собирающий данные о стиле вождения, может увидеть более точную оценку (рис. 2,б).

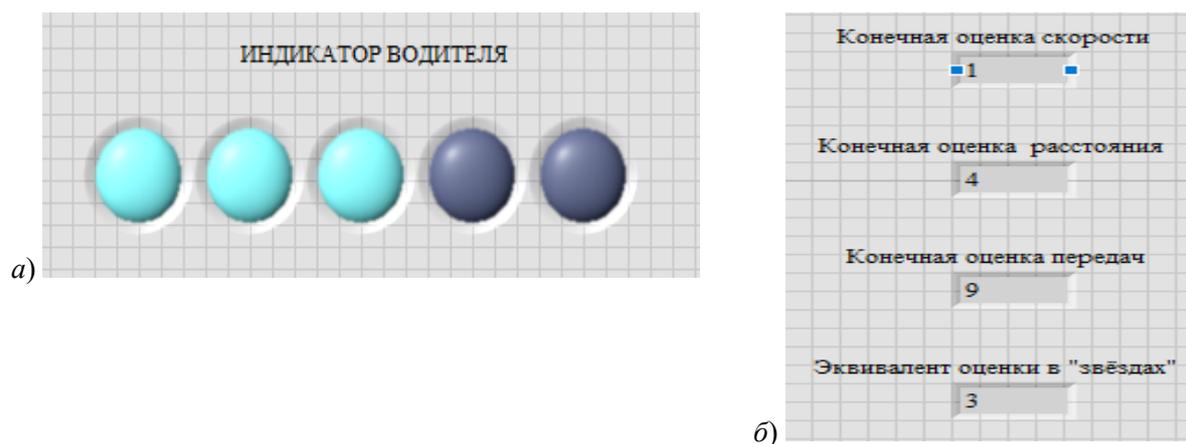


Рис. 2. Данные о качестве вождения выводимые: а – водителю; б – оператору

### Заключение

Для водителя автомобиля показатель в виде звёзд является достаточно простым для понимания, но в то же время он не слишком подробный.

Если предоставлять водителю более подробный отчёт, он может совершить попытку изменить оценку в свою пользу путём вмешательства в работу программы либо обманными манёврами за рулём. Оператору же важно видеть наиболее полные данные. Эта система

полезна для страховых компаний, компаний по грузоперевозке и компаний, перевозящих пассажиров. Исходя из динамических данных о конкретном водителе можно сделать вывод о его постоянном поведении за рулём.

В работах [2–4] представлены некоторые подходы к сбору данных и методика оценки.

#### Список литературы

1. ГОСТ Р 58782-2019. Параметры и критерии оценки качества вождения с целью оценки безопасности использования транспортных средств
2. Лифарева Д. Д., Курьянова Е. А., Веденькин Д. А. Один из алгоритмов оценки стиля управления транспортным средством // BIG DATA и анализ высокого уровня : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции, Минск, 13 марта 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024. – С. 413-417. – EDN CLFYHC.
3. Оценка стиля вождения автомобиля. Часть 1: Сбор данных / Д. А. Веденькин, Е. А. Курьянова, Д. Д. Лифарева, А. Ф. Гильфанова // VI научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2023 : материалы XX Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, 2023. – С. 235-236. – EDN HEKXKM.
4. Оценка стиля вождения автомобиля. Часть 2: Методика оценки / Д. А. Веденькин, Е. А. Курьянова, Д. Д. Лифарева, А. Ф. Гильфанова // VI научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2023 : материалы XX Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, 2023. – С. 237-238. – EDN HQDNHJ.

УДК 550.371

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ПО ДАННЫМ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОЛИГОНА ВЛГУ

С. А. Галактионов, Л. В. Грунская

*Владимирский государственный университет имени А. Г. Столетова и Н. Г. Столетова,  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87*

*E-mail: Mr.serega.33@mail.ru*

**Аннотация.** Изложены итоги анализа изменения дисперсии вариаций электрического поля приземного слоя атмосферы в инфранизкочастотном диапазоне. Дисперсия электрического поля может изменяться из-за различных факторов, таких как метеорологические условия, грозы, лесные пожары, снегопады, ветра, солнечная активность, а также антропогенная деятельность. Представлены выводы по обработке и интерпретации собранной информации.

**Ключевые слова:** электрическое поле Земли; дисперсия вариаций электрического поля; инфранизкочастотный диапазон; подсчеты дисперсии; максимальная и минимальная дисперсия.

### RESEARCH OF THE CHARACTER OF VARIATIONS OF THE EARTH'S ELECTRIC FIELD IN THE INFRANIO-LOW FREQUENCY RANGE ACCORDING TO DATA OF THE PHYSICAL EXPERIMENTAL POINT OF VSU

S. A. Galaktionov, L. V. Grunskaya

**Abstract.** The publication presents the results of the analysis of changes in the dispersion of variations in the electric field of the surface layer of the atmosphere in the infra-low frequency range. The dispersion of the electric field can change due to various factors, such as meteorological conditions, thunderstorms, forest fires, snowfalls, winds, solar activity, and anthropogenic activities. Conclusions on the processing and interpretation of the collected information are presented.

**Keywords:** the electric field of the Earth; dispersion of variations of the electric field; infra-low frequency range; calculations of dispersion; maximum and minimum dispersion.

### Введение

Электрическое поле Земли, являющееся ключевым компонентом земной электродинамической системы, постоянно подвержено влиянию как природных, так и антропогенных факторов. Вариации в инфранизкочастотном диапазоне особенно интересны исследователям, поскольку они могут отражать разнообразные процессы, происходящие в приземном слое атмосферы и на её границе с литосферой. Изучение дисперсии этих вариаций представляет собой задачу, решение которой позволяет глубже понять механизмы взаимодействия между атмосферой и земной поверхностью.

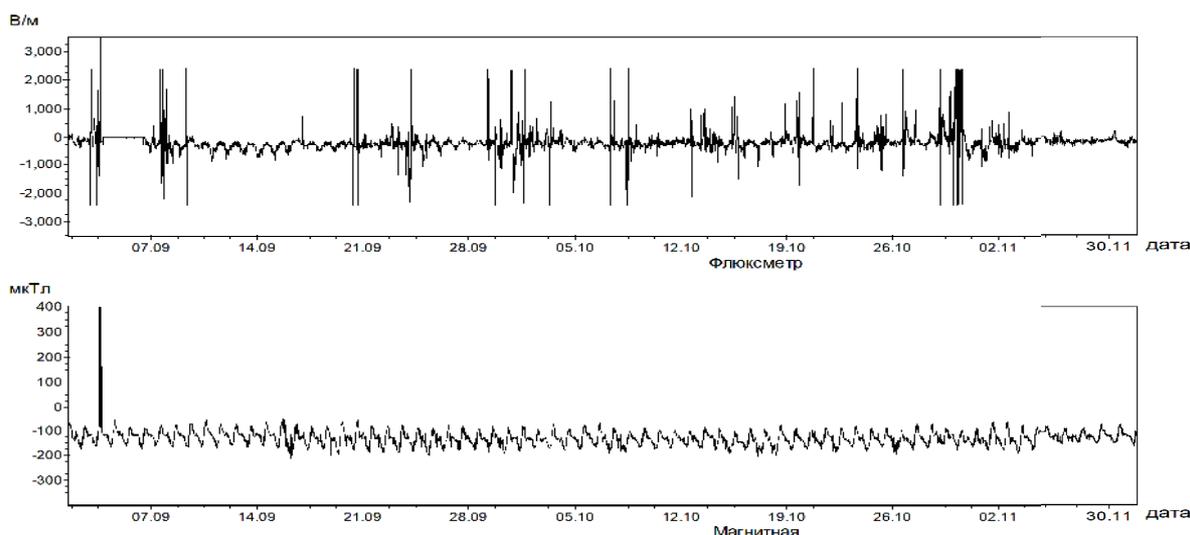
*Цель работы* – выявить изменения дисперсии электрического поля Земли в инфранизкочастотном диапазоне с использованием данных мониторинга электрического поля в приземном слое атмосферы. В исследовании используются данные мониторинга электрического и геомагнитного поля Земли и метеопараметров атмосферы, полученные на экспериментальном физическом полигоне ВлГУ в период с 2019 по 2023 год [1, 2].

### Обработка и анализ данных

Для анализа характера изменения дисперсии вариаций  $E_z$  были взяты записи электрического и геомагнитного поля по данным мониторинга на физическом полигоне ВлГУ с 2019 по 2023 год.

Базы данных были обработаны с помощью программы DataMaker. Для оценки дисперсии использовались системные формулы в программе Excel 2016.

Примеры записи вариаций напряженности вертикальной составляющей напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы и D-компоненты геомагнитного поля представлены на рисунке.



Записи вариаций электрического (верхний график) поля и геомагнитного поля (нижний график, компонента D) за сентябрь-октябрь 2019 года.

В таблицах 1–5 представлены результаты оценки ряда параметров вариаций электрического поля с 2019 по 2023 год. Расчеты осуществлялись по следующим формулам:

1. Дисперсия по генеральной совокупности показывает, насколько данные распределены относительно среднего значения генеральной совокупности;
2. Среднеквадратичное отклонение генеральное – это корень из дисперсии по генеральной совокупности. Оно показывает среднюю величину отклонения каждого значения от среднего значения в генеральной совокупности;
3. Коэффициент вариации – это отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению в генеральной совокупности;
4. Максимум – максимальное значение;
5. Минимум – минимальное значение;
6. Среднее значение по генеральной совокупности;
7. Размах вариации – это диапазон значений, которые находятся между минимальным и максимальным значениями. Размах вариации =  $\max - \min$ .

Формулы, по которым считались значения, являются системными, и они встроены в программу Excel 2016 года.

Таблица 1. Дисперсия за период 01.03.2019 – 31.05.2019

№	Данные	Показатели вариаций	Значения
1	3.89E+00	Дисперсия по генеральной совокупности	14.21865
2	3.52E+00	Среднеквадратичное отклонение генеральное	3.770762
3	5.77E+00	Коэффициент вариации	73%
4	3.23E+00	Максимум	1.59E+01
5	6.02E+00	Минимум	0.00E+00
6	5.30E+00	Среднее значение	5.15E+00
7	2.80E+00	Размах вариации	1.59E+01

Таблица 2. Дисперсия за период 01.03.2020 – 31.05.2020

№	Данные	Показатели вариаций	Значения
1	4.93E+00	Дисперсия по генеральной совокупности	13.12999
2	2.49E+00	Среднеквадратичное отклонение генеральное	3.623533
3	6.42E+00	Коэффициент вариации	71%
4	3.23E+00	Максимум	1.59E+01
5	6.72E+00	Минимум	0.00E+00
6	5.30E+00	Среднее значение	5.10E+00
7	7.16E+00	Размах вариации	1.59E+01

Таблица 3. Дисперсия за период 01.03.2021 – 31.05.2021

№	Данные	Показатели вариаций	Значения
1	3.89E+00	Дисперсия по генеральной совокупности	7.605109
2	3.52E+00	Среднеквадратичное отклонение генеральное	2.757736
3	5.77E+00	Коэффициент вариации	51%
4	3.23E+00	Максимум	1.49E+01
5	6.02E+00	Минимум	0.00E+00
6	5.30E+00	Среднее значение	5.37E+00
7	2.80E+00	Размах вариации	1.49E+01

Таблица 4. Дисперсия за период 01.03.2022 – 31.05.2022

№	Данные	Показатели вариаций	Значения
1	4.00E+00	Дисперсия по генеральной совокупности	6.899243
2	7.37E+00	Среднеквадратичное отклонение генеральное	2.626641
3	1.26E+00	Коэффициент вариации	50%
4	4.73E+00	Максимум	1.49E+01
5	4.71E+00	Минимум	0.00E+00
6	5.30E+00	Среднее значение	5.26E+00
7	3.14E+00	Размах вариации	1.49E+01

Таблица 5. Дисперсия за период 01.03.2023 – 31.05.2023

№	Данные	Показатели вариаций	Значения
1	3.26E+00	Дисперсия по генеральной совокупности	7.027081
2	3.98E+00	Среднеквадратичное отклонение генеральное	2.650864
3	4.04E+00	Коэффициент вариации	49%
4	4.24E+00	Максимум	1.48E+01
5	4.22E+00	Минимум	0.00E+00
6	4.52E+00	Среднее значение	5.44E+00
7	4.73E+00	Размах вариации	1.48E+01

В 2019 и 2020 годах было замечено наибольшее значение дисперсии электрического поля в атмосфере, в то время как в 2023 году оно оказалось минимальным. Высокие значения связаны с сильной активностью атмосферных явлений, таких как грозы, сильные ветры, которые приводят к большому количеству зарядов и значительным изменениям в электрическом поле. Напротив, когда атмосферные процессы более стабильны, дисперсия электрического поля снижается. Это указывает на то, что в 2019 и 2020 годах атмосферные процессы были более интенсивными, чем в 2023 году. Коэффициент вариации в 2019 году максимален, но отличается всего на 2 % от 2020 года. Чем больше коэффициент вариации, тем значения величин дисперсии имеют больший разброс относительно среднего значения. При большом коэффициенте вариации данные более разнообразны.

### Заключение

В 2019 (73 %) и 2020 (71 %) годах была максимальная дисперсия электрического поля Земли. Дисперсия электрического поля может изменяться из-за различных факторов, таких как метеорологические условия, грозы, лесные пожары, снегопады, ветра, солнечная активность, а также антропогенная деятельность, в том числе использование радиопередатчиков, электростанций, автомобилей и промышленных процессов, которые могут повлиять на электрическое поле в атмосфере при помощи аэрозолей и твердых частиц.

### Список литературы

1. Грунская Л.В., Ефимов В.А. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 69–74.
2. Грунская Л. В. Электромагнетизм земной атмосферы: учеб. пособие. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2019. – 209 с.
3. Грунская Л.В. Электромагнетизм приземного слоя и его взаимосвязь с геофизическими и астрофизическими процессами. – Владимир: Владимирский государственный университет 2002. – 132 с.
4. Голубев А. Н., Мареев Е. А. Электрическое поле в атмосфере Земли. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 51-60.

УДК 621.396

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ СВЕРТОЧНОЙ И РЕКУРЕНТНОЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТИПА LSTM ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЭС И ПОЛОСЫ КОГЕРЕНТНОСТИ

А. С. Елчанинова, А. А. Кислицын

*Поволжский государственный технологический университет,  
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3  
E-mail: ElchaninovaAS@volgatech.com*

**Аннотация.** В работе проведен анализ точности синтезированных моделей нейронных сетей, включая сверточные и рекуррентные сети типа LSTM, с целью прогнозирования полного электронного содержания и полосы когерентности трансионосферного радиоканала. Рассмотрены этапы подготовки и обработки данных, синтеза моделей, а также методики оценки определения их точности. На основе полученных экспериментальных данных установлено, что модели LSTM превосходят CNN по ключевым метрикам, что является приоритетом в их применении для прогнозирования параметров систем спутниковой связи.

**Ключевые слова:** ПЭС; полоса когерентности; нейронная сеть; LSTM; CNN; Keras Tuner

# ANALYSIS OF THE ACCURACY OF SYNTHESIS MODELS OF CONVOLUTIONAL AND RECURRENT NEURAL NETWORKS OF LSTM TYPE TO SOLVING THE PROBLEM OF FORECASTING TEC AND COHERENCE BANDWIDTH

A. S. Elchaninova, A. A. Kislitsin

**Abstract.** This paper examines the accuracy of synthesized neural network models, specifically convolutional networks and LSTM-type recurrent networks, in predicting total electron content and the coherence bandwidth of transionospheric radio channels. It outlines the stages of data preparation and processing, model synthesis, and methods for evaluating model accuracy. The experimental results indicate that LSTM models outperform CNNs in key metrics, making them the preferred choice for predicting parameters in satellite communication systems.

**Keywords:** TEC; coherence bandwidth; neural network; LSTM; CNN; Keras Tuner

## Введение

Развитие спутниковых систем связано с ростом спроса на приложения в реальном времени, что влечет за собой необходимость увеличения пропускной способности таких систем. В связи с этим прогнозирование полного электронного содержания (ПЭС) и полосы когерентности (ПК) становится критически важным в условиях нестабильности ионосферы и частотной дисперсии, которые осложняют расширение полосы частот для широкополосных сигналов и оказывают влияние на характеристики радиоканалов. Большинство современных методов прогнозирования не обладает высокой точностью или требует значительных вычислительных ресурсов, что влечёт необходимость поиска более эффективных подходов.

В этом контексте нейронные сети, такие как рекуррентные сети с долгосрочной и краткосрочной памятью (LSTM) и сверточные нейронные сети (CNN), представляют собой перспективные инструменты для решения задач прогнозирования в системах радиосвязи [1]. Однако их эффективное применение требует разработки методов, способных адаптироваться к сложным условиям ионосферы [2–4].

*Цель работы* – создание методики анализа точности синтезированных моделей сверточной (CNN) и рекуррентной (LSTM) нейронных сетей для решения задачи прогнозирования ПЭС и предельной полосы частот систем спутниковой связи.

## Подготовка и обработка данных

Экспериментальное исследование точности моделей CNN и LSTM нейронной сети начинается с подготовки и обработки данных. На первом этапе осуществляется импорт бинарных датасетов, полученных в результате обработки RINEX-файлов, полученных на сети приемников сигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [2]. Важно обеспечить правильную загрузку и распознавание форматов файлов, чтобы избежать возможных ошибок на последующих шагах обработки.

Следующим шагом является вычисление необходимых параметров (фазовые и кодовые измерения) для определения значений ПЭС с дальнейшим пересчетом в полосы когерентности. Далее результаты вычислений аккумулируются в соответствующих базах данных ПЭС и ПК, что позволяет эффективно организовать и сохранить информацию для последующего анализа.

На этапе обработки временных рядов производится проверка полученных данных на наличие пропусков и аномальных значений. Важно отметить, что наборы данных полосы когерентности и ПЭС часто содержат аномалии, влияющие на точность прогнозирования. Для их устранения применяется метод *Isolation Forest*, который изолирует аномальные значения. Аномалии после идентификации можно либо удалить, либо заменить значениями *NaN* (англ. Not-a-Number) или константами. Восстановление пропусков осуществляется с помощью интерполяции. Затем применяется фильтр Ходрика-Прескотта для разделения временного ряда на долгосрочные и краткосрочные компоненты, управляя степенью сглаживания с помощью соответствующего параметра сглаживания [1].

Завершается процесс формированием датафрейма с индексами формата "дата-время" для временных рядов ПЭС и ПК. С использованием инструментов библиотеки *Pandas* данный шаг упрощает доступ к данным и их дальнейший анализ, что позволяет более эффективно работать с временными рядами.

Таким образом, после завершения этапа подготовки и обработки данных для исследования был подготовлен 234-дневный набор навигационных данных наземной станции KABS, где были выделены 35-дневные наборы данных ПЭС и ПК для четырех сезонов. Обучение моделей проводилось на данных от 1 до 27 дней, валидация – 3 дня, тестирование – от 1 до 7 дней.

### Синтез моделей CNN и LSTM нейронной сети

Подготовленные наборы данных используются для синтеза моделей нейронной сети, который включает в себя процесс настройки оптимизатора, проведение итерационного поиска оптимальной структуры моделей нейронной сети и проверку качества синтезированных моделей.

На первом этапе осуществляется подготовка тренировочной и тестовой выборок для ПК и ПЭС. Далее создается пространство для поиска гиперпараметров и структуры нейронной сети. Это включает установку диапазона значений, которые помогут определить оптимальную комбинацию гиперпараметров и архитектуры нейронной сети.

Следующим шагом является работа с фреймворком Keras Tuner, который предназначен для итерационного поиска наиболее эффективной структуры нейронной сети и лучших сочетаний гиперпараметров с использованием байесовского оптимизатора (Bayesian Optimizer).

После этого проводится анализ оптимизированных моделей, в ходе которого сохраняются семь лучших моделей для каждого оптимизатора. Затем осуществляется оценка точности этих моделей на тестовой выборке. Оценка проводится по метрикам  $R^2$ , MAPE, MAE и RMSE.

Кроме того, производится аккумулирование значений точности прогноза для текущей итерации. В завершение осуществляется выявление наиболее точного оптимизатора на основе сравнительного анализа точности прогнозирования для ПК и ПЭС.

Таким образом, в работе при одинаковых начальных настройках алгоритма поиска оптимальной структуры нейронных сетей для ПК были получены структуры моделей, которые содержат от 3 до 9 LSTM-слоев, 2 полносвязных Dense слоя, 1 слой Dropout. Для ПЭС были получены модели, включающие в себя от 2 до 9 LSTM-слоев, 2 полносвязных Dense слоя, 1 слой Dropout. Диапазон нейронов в слоях варьировался от 200 до 328 для моделей анализа данных ПК и от 72 до 264 нейронов для анализа ПЭС. В целом в моделях использовались такие функции активации, как *relu*, *elu*, *gelu*.

### Экспериментальные результаты

На заключительном этапе была выполнена экспериментальная апробация моделей нейросетей. При этом точность моделей оценивалась с помощью метрик, таких как средняя абсолютная ошибка (mean absolute error – MAE), среднеквадратическая ошибка (mean square error – MSE), корень из среднеквадратической ошибки (root mean square error – RMSE), средняя процентная ошибка (mean absolute percentage error – MAPE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ). Стоит отметить, что метрика MAE хорошо интерпретируется, поскольку она измеряет абсолютные отклонения и менее чувствительна к сильным отклонениям. MSE позволяет более точно оценить разницу между прогнозными и реальными значениями за счет учета влияния больших ошибок, но в то же время более чувствительна к сильным отклонениям и не имеет размерности исследуемого ряда. RMSE позволяет сохранить высокую чувствительность к выбросам и хорошо интерпретируется, так как метрика имеет ту же размерность, что и исходные данные исследуемого ряда. Метрика MAPE является относительной и позволяет сравнивать наборы данных с разными единицами измерения, учитывая масштаб данных. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) показывает, насколько хорошо модель соответствует данным.

Результаты апробации синтезированных моделей CNN и LSTM на данных полного электронного содержания и полосы когерентности представлены на рис. 1 и 2.

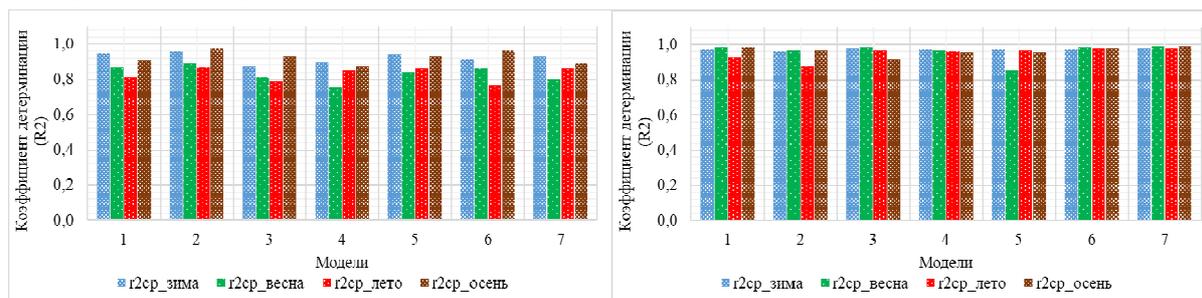


Рис.1. Усредненные результаты прогнозирования ПЭС для моделей CNN и LSTM

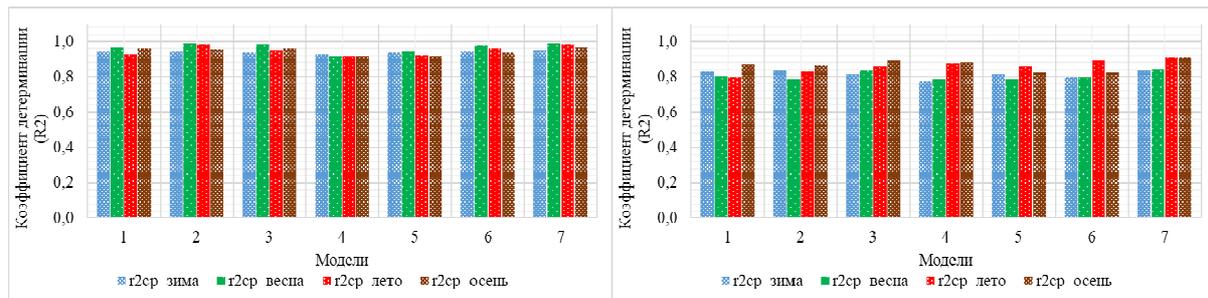


Рис. 2. Усредненные результаты прогнозирования ПК для моделей CNN и LSTM

В ходе анализа результатов, представленных на рис. 1 и 2, выявлены оптимальные конфигурации нейронных сетей для прогнозирования ПЭС и ПК. Для ПЭС оптимальная архитектура CNN состоит из 2 полносвязных слоев Dense, 3 слоев свертки Conv1D и 1 выходного слоя с числом нейронов от 84 до 180. Модель LSTM включает 2 слоя LSTM и аналогичное количество Dense слоев с нейронами от 36 до 236. Для прогнозирования ПК выявлены оптимальные конфигурации: архитектура CNN содержит 2 полносвязных слоя Dense, 3 слоя свертки и нейронов от 132 до 340, в то время как архитектура LSTM состоит из 4 слоев LSTM и от 80 до 256 нейронов.

Кроме того, при сравнении точности двух типов нейросетей было выявлено, что модели LSTM демонстрируют значительно более высокую точность по метрикам  $R^2$ , MAPE, MAE, RMSE. Это объясняется тем, что LSTM лучше справляются с временными последовательностями, эффективно учитывая долгосрочные зависимости в данных. LSTM могут обрабатывать зависимости между временными шагами гораздо лучше, чем модели CNN, которые преимущественно эффективны для пространственных данных и могут не улавливать временные зависимости так же успешно.

### Заключение

В результате проведенного исследования было разработано 60 моделей нейронных сетей, из которых для дальнейшего анализа были выбраны 28 наиболее эффективных (по 14 архитектур LSTM и CNN). Прогнозный период варьировался от 1 до 7 дней. При этом наиболее эффективные структуры для прогнозирования ПЭС в моделях CNN включали два Dense слоя, три слоя Conv1D, один слой Dropout, один слой MaxPooling1D и один выходной Dense слой, состоящий из одного нейрона. Для моделей LSTM оптимальный набор включал два слоя LSTM, два Dense слоя и два Dropout слоя, а также один выходной Dense слой с одним нейроном. В случае прогнозирования ПК с использованием нейросети типа CNN использовали аналогичную структуру с двумя Dense слоями, тремя Conv1D слоями, одним Dropout слоем, одним MaxPooling1D и одним выходным Dense слоем. Модели LSTM для этого же прогнозирования содержали два Dense слоя, четыре Dropout слоя и один выходной слой с одним нейроном.

Результаты анализа различных моделей нейросетей показали, что относительные метрики  $R^2$  для прогнозов ПЭС и ПК по четырем сезонам колебались в диапазоне от 0,606 до 0,996, что свидетельствует о высоком качестве предсказаний. По полученным результатам исследования установлено, что модели LSTM обеспечивают значительно более высокую точность при прогнозировании ПЭС и ПК по сравнению с CNN. Это связано с уникальной способностью LSTM эффективно обрабатывать временные последовательности и учитывать долгосрочные зависимости в данных.

Кроме того, полученные результаты подчеркивают важность разработки адаптивных методов, которые могут улучшить точность прогнозов в условиях механизмов, подверженных сложным изменениям ионосферы. В целом, исследования подтверждают, что нейронные сети являются перспективным инструментом для решения задач прогнозирования характеристик спутниковых систем радиосвязи, открывая новые возможности для повышения их эффективности и надежности в условиях изменчивой среды распространения сигналов – ионосферы.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145

### Список литературы

1. Hutter F., Kotthoff L., Vanschoren J. Automated Machine Learning // The Springer Series on Challenges in Machine Learning. – 2019. – P. 220.
2. Специализированная нейронная сеть для прогнозирования параметров широкополосных транссионсферных радиоканалов в составе интеллектуального сенсора / Д. В. Иванов, А. А. Кислицын, Н. А. Конкин, А. С. Елчанинова, А. А. Чернов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. – № 4(60). – С 50-63.
3. Исследование LSTM-нейросетевого подхода при моделировании временных рядов / Г. Г. Рапаков, В. А. Горбунов, С. А. Дианов, Л. В. Елизарова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2023. – № 3. – С. 47-54.
4. Vujokas, E. Single and Multi-Step Temperature Time Series Forecasting for Vilnius Using LSTM Deep Learning Model // Towards Data Science. – 2020.

УДК 621.39

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОСТУПНОСТИ РАДИОКАНАЛОВ КВ-СВЯЗИ

А. А. Казанцева

*Поволжский государственный технологический университет, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3  
E-mail: nastakazanceva760@gmail.com*

**Аннотация.** В последнее время с развитием КВ-связи остро встаёт проблема доступности КВ-радиоканалов. Современные технологии программно-конфигурируемого радио и глубокого машинного обучения открывают новые возможности для решения проблемы загруженности каналов и реализации технологии динамического доступа к спектру (DSA). Целью работы является исследование моделей глубокого машинного обучения для прогнозирования доступности КВ-радиоканалов. Эта технология поможет повысить точность выбора доступных радиоканалов, что приведет к повышению эффективности и скорости передачи данных в КВ-диапазоне.

**Ключевые слова:** КВ-радиоканал; доступность канала; нейронная сеть; глубокое машинное обучение; LSTM

## APPLICATION OF DEEP MACHINE LEARNING METHODS TO PREDICT THE AVAILABILITY OF HF RADIO CHANNELS

A. A. Kazantseva

**Abstract.** Recently, with the development of HF communications, the problem of the availability of HF radio channels has become acute. Modern technologies of software-configurable radio and deep machine learning open up new opportunities to solve the problem of channel congestion and implement dynamic spectrum access (DSA) technology. The aim of the work is to study deep machine learning models for predicting the availability of HF radio channels. This technology will help to increase the accuracy of the selection of available radio channels, which will lead to increased efficiency and speed of data transmission in the HF band.

**Keywords:** HF radio channel; channel availability; neural network; deep machine learning; LSTM architecture

**Введение.** Технологии программно-конфигурируемых радиосистем представляют огромный потенциал для создания инновационных продуктов в области связи и радиолокации путём программирования. Среди ключевых задач этой области выделяется обеспечение надежности и эффективности радиоканалов, что имеет решающее значение для развития многофункциональных устройств и систем связи. Одним из важных факторов, влияющих на качество канала, является отношение сигнал/шум (SNR), которое представляет собой отношение мощности сигнала к мощности шума в канале. Для обеспечения эффективной работы КВ-радиоканала необходимо выполнять мониторинг спектральных характеристик каналов и оценивать их загруженность. Это позволит выбрать наилучший доступный канал с наименьшими уровнями шумов и помех, реализуя технологию DSA, что повысит SNR и

качество передачи данных. Выбор доступного канала для передачи информации с максимальным SNR можно осуществить с помощью современных технологий глубокого машинного обучения и программно-определяемого радио. Для этого модель нейронной сети обучается на большом объеме данных доступности КВ-радиоканалов. Поэтому одной из главных задач обучения нейронной сети является формирование датасета.

**Описание исследуемых архитектур моделей машинного обучения.** В ходе исследований проводилось обучение моделей рекуррентной нейронной сети (RNN) с архитектурой LSTM (Long Short-Term Memory): LSTM\_Simple, содержащей один слой LSTM, а также полносвязный слой (dense), количество нейронов которого соответствует числу анализируемых частотных каналов, умноженных на количество шагов прогнозирования, и слой Reshape, который формирует выходные данные в соответствии с размерностью: количество шагов прогнозирования на число анализируемых частотных каналов; LSTM\_Drop, содержащей один слой LSTM и слой исключения (dropout), а также полносвязный слой (dense) и слой Reshape; 2LSTM\_Drop, содержащей два слоя LSTM, слой исключения (dropout), а также полносвязный слой (dense) и слой Reshape. Варьируемый гиперпараметр – число нейронов в LSTM-слое – принимался равным 50, 100, 300. Архитектура LSTM специально разработана для решения проблемы долгосрочной зависимости, что позволяет запоминать и усваивать информацию из прошлых точек данных во временном ряду, а также идеально подходит для нестационарных данных. Например, временные ряды являются нестационарными, что означает, что их статистические свойства со временем меняются. LSTM хорошо подходят для моделирования таких данных, поскольку они могут приспосабливаться к изменяющимся закономерностям и делать точные прогнозы. LSTM способны обрабатывать последовательности переменной длины, что делает их подходящими для временных рядов с неравномерным интервалом. В результате архитектура LSTM отлично подходит для нашей задачи прогнозирования доступности радиоканалов, обеспечивая надежный и более эффективный способ машинного обучения для прогнозирования.

**Экспериментальные исследования точности выбранных моделей нейронных сетей при прогнозировании доступности.** В работе для формирования датасета использовались данные доступности КВ-радиоканалов за период с 05.06.2021 по 10.06.2021, где общее количество записей в датасете составляет 8640. Датасет представлял данные доступности (0 или 1) каналов с полосой 3 кГц в диапазоне от 3-28 МГц. Процентное соотношение обучающей и тестовой выборки составляло 80 % к 20 % соответственно. Один батч вмещал 256 одиночных выборок, где каждая представляет данные доступности за 60 минут. Выборки формировались так, что смещение происходило с шагом 1 минута, что соответствует временному интервалу батча 355 минут. Прогнозирование выполнялось для 1 МГц сегмента в диапазоне 3-4 МГц. Исследования проводились для краткосрочного (1 мин.) прогнозирования при условии наличия данных за 1 час.

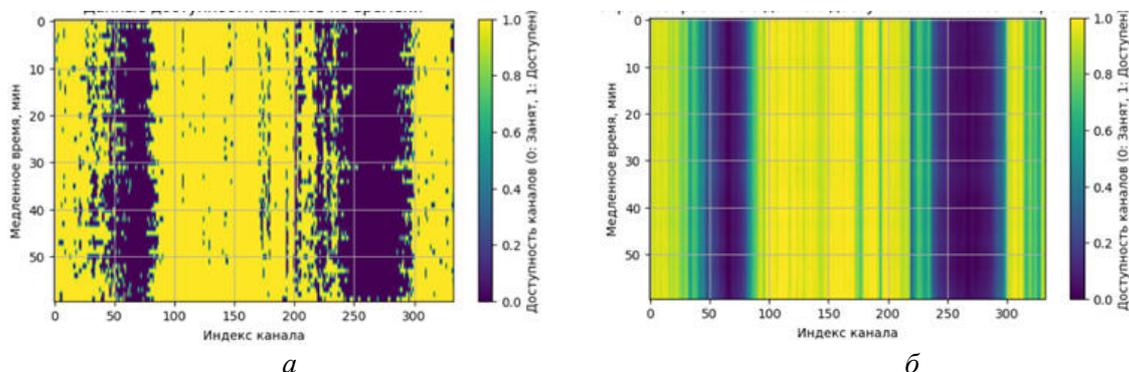
Сеть обучалась в течение 15 эпох, на каждой из которых выдавалась прогнозная оценка следующего значения. Точность моделей оценивалась с помощью метрик MSE, RMSE, MAE и Binary Accuracy. Результаты оценки точности моделей сведены таблицу.

**Сводная таблица результатов исследования**

Архитектура	LSTM_Simple			LSTM_Drop			2LSTM_Drop		
	50	100	300	50	100	300	50	100	300
Кол-во нейронов	50	100	300	50	100	300	50	100	300
MSE	0,1501	0,1187	0,1168	0,1233	0,1195	0,1173	0,1304	0,1197	0,1179
RMSE	0,3875	0,3446	0,3417	0,3511	0,3456	0,3426	0,3612	0,3459	0,3434
MAE	0,2894	0,2453	0,2404	0,2606	0,2471	0,2371	0,2737	0,2518	0,2360
Binary Accuracy	0,7596	0,8452	0,8476	0,8257	0,8451	0,8469	0,7898	0,8444	0,8439

В результате экспериментов было установлено, что наиболее точной моделью является 2LSTM\_Drop, которая показала лучшие результаты по метрике Binary Accuracy, при количестве нейронов 100. Модель обеспечивает высокий уровень точности выбора доступных радиоканалов, что непременно приводит к повышению эффективности и скорости передачи данных в КВ-диапазоне.

На рисунке представлены гистограммы данных доступности каналов (а) по времени и спрогнозированные данные доступности (б) лучшей моделью.



Данные доступности каналов по времени (а) и спрогнозированные данные доступности каналов по времени (б)

**Выводы.** Проведенные исследования подтвердили эффективность использования глубокого машинного обучения для прогнозирования доступности КВ-радиоканалов. Экспериментальные данные были получены из реальных измерений спектральной плотности мощности шумов в КВ-диапазоне и последующей оценки доступных каналов. На основе этих данных был сформирован датасет и разделен на обучающую и валидационную выборки, что позволило эффективно тренировать и оценивать модели. Были разработаны различные архитектуры нейронных сетей с использованием LSTM-слоев. Рассматривались следующие варианты: LSTM\_Simple, LSTM\_Drop, 2LSTM\_Drop. Обучение моделей проводилось на основе собранных экспериментальных данных, что позволило адаптировать модели к специфике задачи прогнозирования доступности КВ-радиоканалов. Модели были оценены по различным метрикам качества, включая Binary Accuracy, что позволило объективно сравнить их производительность. Наибольшую точность по метрике Binary Accuracy продемонстрировала модель 2LSTM\_Drop, достигнув значения 0,84 при количестве нейронов в слое 100.

Разработанный метод и алгоритм способны анализировать данные мониторинга спектральной плотности помех и могут быть использованы для автоматического принятия решений о доступности каналов в беспроводных когнитивных КВ-системах передачи информации. Это позволит повысить производительность и надежность таких систем, обеспечив выбор оптимальных каналов для передачи информации с максимальным соотношением сигнал/шум и дальнейший прогноз доступности радиоканалов КВ-связи.

#### Список литературы

1. Мониторинг спектра помех и доступности КВ-радиоканалов с полосами 3...24 кГц / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Р. Р. Бельгибаев, А. В. Чернядьев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2022. № 1 (53). С. 21-32.
2. Развитие и верификация методов автоматической обработки спектра помех в КВ-диапазоне с применением технологии программно-конфигурируемых радиосистем в задаче оценки доступности радиоканалов / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Р. Р. Бельгибаев, А. В. Чернядьев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2023. № 2 (58). С. 6-17.
3. Cander Lj.R., Leitinger R., Levy M.F. Ionospheric models including the environment // Proceeding of the ESA Work-shop on Space Weather, ESA, WPP-155, 11–13 November 1998, ESTEC. – Noordwijk, the Netherlands, 1999. – P. 135–141.
4. Иванов, В. А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными

- радиосигналами / В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 3-37.
5. Рябова, М. И. Исследование искажений сигналов с программной перестройкой рабочей частоты в ионосфере / М. И. Рябова, В. В. Овчинников // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2014: материалы XV Международной научно-технической конференции, Казань, 18-21 ноября 2014 года. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 170-172.

УДК 303.723+550.371

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ С МЕТЕОДАНЫМИ

И. Д. Нургалиев, Л. В. Грунская

*Владимирский государственный университет имени А. Г. Столетова и Н. Г. Столетова,  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87*

*E-mail: ivan.nurgaliev.2002@mail.ru*

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования электрического поля Земли в инфранизкочастотном диапазоне и его связь с различными метеопараметрами и метеоявлениями. Приведены результаты обработки и анализа данных, визуальной и расчетной корреляции между напряженностью электрического поля Земли и метеопараметрами в условиях благоприятной и неблагоприятной метеорологической обстановки. Экспериментальные базы данных получены на физическом экспериментальном полигоне ВлГУ.

**Ключевые слова:** электрическое поле Земли; метеоусловия; вариация электрического поля; визуальный анализ; корреляция

## STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE EARTH'S ELECTRIC FIELD IN THE INFRA-LOW-FREQUENCY RANGE AND WEATHER DATA

I. D. Nurgaliev, L. V. Grunskaya

**Abstract.** The article presents the results of a study of the Earth's electric field in the infra-low frequency range and its connection with various meteorological parameters and weather phenomena. The results of data processing and analysis, visual and calculated correlation between the intensity of the Earth's electric field and meteorological parameters under favorable and unfavorable meteorological conditions are presented. Experimental databases were obtained at the physical experimental site of VSU.

**Keywords:** the electric field of the Earth; weather conditions; variation of the electric field; visual analysis; correlation

### Введение

Экспериментальные данные по мониторингу электрического поля Земли используются в поиске предвестников землетрясений, изучении влияния электрического поля на здоровье человека, исследовании атмосферного электричества. Одним из важных моментов использования баз данных электрического поля Земли и метеопараметров является анализ степени воздействия метеофакторов и атмосферных явлений, таких как температура, влажность воздуха, атмосферное давление, дождь, снегопад и грозовая активность на характер вариаций электрического поля.

*Целью работы* является исследование корреляции между напряженностью электрического поля Земли и метеопараметрами в различных погодных условиях. В исследовании используются данные мониторинга электромагнитного поля Земли и параметров атмосферы, полученные на экспериментальном физическом полигоне ВлГУ в период с 2019 по 2023 год [1, 2]. Данные о погоде и атмосферных явлениях взяты из архивов погоды в районе деревне Гатиха Владимирской области (месторасположение физического полигона ВлГУ), а также из архива прогнозов Главного управления МЧС России по Владимирской области.

### Обработка и анализ данных

Используемые в исследовании данные электрического поля Земли и метеоусловий были получены на физическом полигоне ВлГУ (в 30 км от г. Владимира). С помощью программы DataMaker массивы данных были представлены в виде текстовых файлов со значениями напряженности электрического поля, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления. Расчет дисперсии напряженности электрического поля Земли и корреляции между напряженностью поля и метеопараметрами производился в табличных формах Microsoft Excel.

#### Влияние атмосферных явлений на электрическое поле Земли

На рисунке 1 представлена запись вариации электрического поля Земли за 06.08.2019, характерной для периода отсутствия влияния сильных атмосферных явлений.

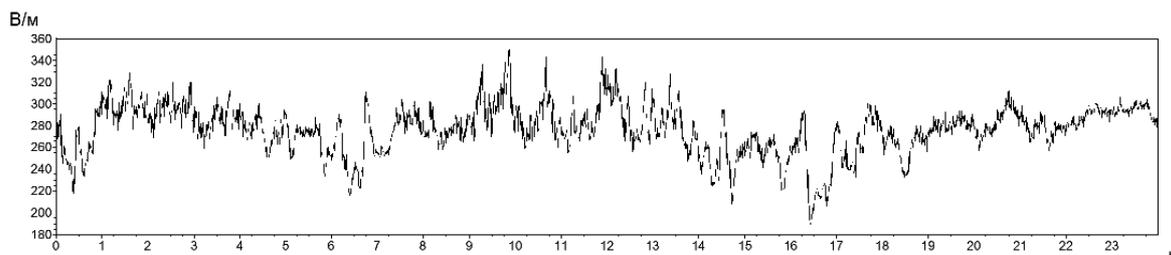


Рис. 1. Запись вариации электрического поля Земли ( $E_z$ , В/м), по данным полигона ВлГУ, 06.08.2019

Напряженность электрического поля  $E_z$  в этот день изменялась от 190 В/м до 350 В/м (рис. 1), что соответствует значениям напряженности при нормальных и «спокойных» условиях [3].

На рисунке 2 отображена запись вариации электрического поля Земли с 12.02.2019 по 13.02.2019.

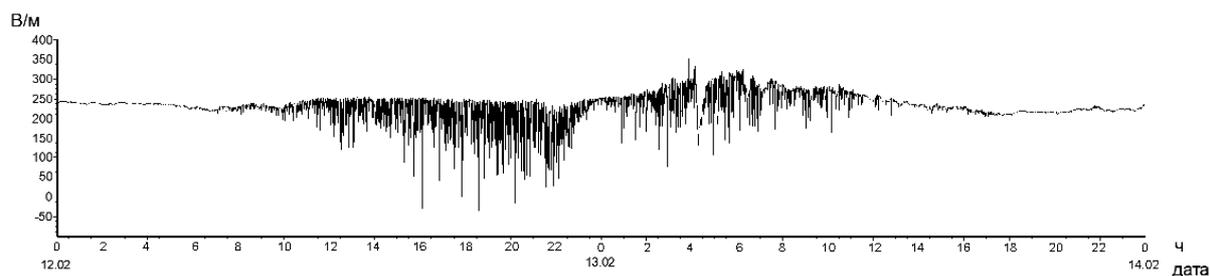


Рис. 2. Запись вариации электрического поля Земли ( $E_z$ , В/м), по данным полигона ВлГУ, с 12.02.2019 по 13.02.2019

С 7 часов утра 12 февраля до 17 часов следующего дня наблюдается частое изменение значений напряженности электрического поля от положительных до отрицательных значений (рис. 2). По данным архивов погоды, в этот период был продолжительный снегопад, что свидетельствует о влиянии на электрическое поле атмосферных осадков.

На рисунке 3 отображена запись вариации электрического поля Земли 06.06.2021.

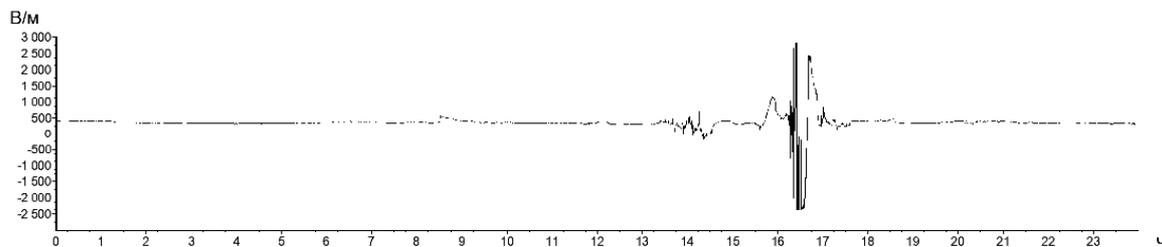


Рис. 3. Запись вариации электрического поля Земли ( $E_z$ , В/м), по данным полигона ВлГУ, 06.06.2021

В период с 16:00 до 17:00 наблюдается сильное изменение значений напряженности электрического поля, связанное с грозовой активностью (рис. 3).

### Корреляция между электрическим полем Земли и метеопараметрами при отсутствии влияния сильных метеоявлений

Визуальная и расчетная корреляция точнее всего определяется в периоды «спокойной» метеобстановки без учета влияния погодных условий на электрическое поле Земли [4]. На рисунке 4 представлена запись вариации электрического поля Земли 29.08.2019.

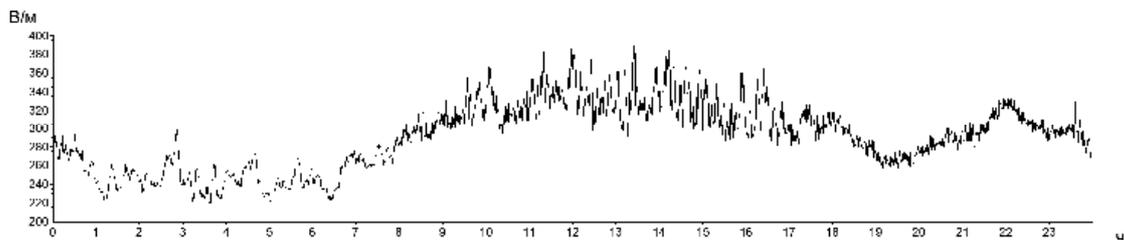


Рис. 4. Запись вариации электрического поля Земли ( $E_z$ , В/м), по данным полигона ВЛГУ, 29.08.2019

В таблице 1 представлены значения дисперсии напряженности электрического поля и коэффициентов корреляции между параметрами для некоторых дней со «спокойной» метеобстановкой.

Таблица 1. Значения дисперсии напряженности электрического поля и коэффициентов корреляции между параметрами в условиях отсутствия влияния сильных метеоявлений

Дата	Дисперсия $E_z$ , $\sigma^2$ , (В/м) <sup>2</sup>	Коэффициент корреляции R		
		Напряженность $E_z$ [В/м] и температура $t$ [°С]	Напряженность $E_z$ [В/м] и давление $P$ [мм рт. ст.]	Напряженность $E_z$ [В/м] и влажность $\varphi$ [%]
29.08.2019	1279,67	0,7010	-0,3433	-0,7298
03.10.2019	1768,84	0,5114	-0,4879	-0,5738
23.01.2020	1046,29	-0,4693	0,4592	-0,2045
13.02.2020	412,51	0,4789	0,0389	-0,7983
23.02.2020	912,02	-0,3296	0,7114	-0,8582
23.05.2020	567,52	-0,7897	0,7868	0,7324

Положительные коэффициенты корреляции соответствуют прямой зависимости, отрицательные – обратной [5]. 29.08.2019 коэффициенты корреляции имеют большое значение между напряженностью  $E_z$  и температурой  $t$  (коэффициент корреляции равен  $R=0,7010$ ), а также между напряженностью  $E_z$  и влажностью  $\varphi$  (коэффициент корреляции равен  $R=-0,7298$ ) (см. табл. 1). Вероятность ошибки  $p=0,01$ . Дисперсия напряженности электрического поля имеет малое значение  $\sigma^2=1279,67$  (В/м)<sup>2</sup>, что говорит о «спокойном» электрическом поле.

### Корреляция между электрическим полем Земли и метеопараметрами в условиях влияния сильных метеоявлений

На рисунке 5 изображена запись вариации электрического поля Земли 29.06.2019 в период сильного дождя с 0:00 до 18:00.

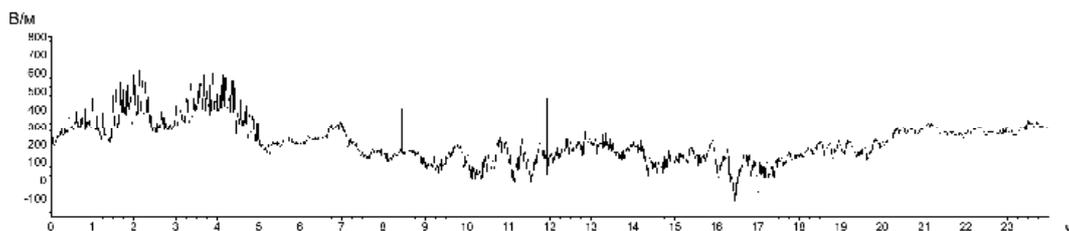


Рис. 5. Запись вариации электрического поля Земли ( $E_z$ , В/м), по данным полигона ВЛГУ, 29.06.2019

На рисунке 5 изменение значений напряженности электрического поля варьируется от 100 В/м до 700 В/м, что вызвано влиянием дождевых осадков (рис. 5).

В таблице 2 представлены значения дисперсии напряженности электрического поля и коэффициентов корреляции между параметрами в условиях влияния сильных метеоявлений.

Таблица 2. Значения дисперсии напряженности электрического поля и коэффициентов корреляции между параметрами в условиях влияния сильных метеоявлений

Дата	Дисперсия $E_z, \sigma^2,$ (В/м) <sup>2</sup>	Коэффициент корреляции R		
		Напряженность $E_z$ [В/м] и температура $t$ [°C]	Напряженность $E_z$ [В/м] и давление $P$ [мм рт. ст.]	Напряженность $E_z$ [В/м] и влажность $\varphi$ [%]
09.03.2019	19989,47	0,1626	-0,0075	-0,2954
14.03.2019	3354,92	0,6115	-0,0243	-0,6830
21.04.2019	3103,98	-0,4058	0,1390	0,4017
27.04.2019	367094,43	-0,0110	0,0441	-0,0588
30.05.2019	133115,38	0,1648	-0,1291	-0,1414
29.06.2019	12335,35	0,1698	-0,2084	-0,6653

Коэффициенты корреляции в условиях влияния сильных метеоявлений намного меньше (см. табл. 2), чем в условиях благоприятной обстановки (см. табл. 1). Высокие же значения дисперсии вариаций электрического поля вызваны влиянием сильных атмосферных явлений.

#### Выводы

В результате исследования электрического поля Земли и его связи с метеоданными обнаружено, что в периоды отсутствия сильных атмосферных явлений наблюдается более высокая корреляция между параметрами, чем в периоды с сильными метеоявлениями. Таким образом можно сказать, что сильные атмосферные явления воздействуют на электрическое поле Земли, изменяют его и меняют уровень корреляции электрического поля Земли с метеопараметрами.

#### Список литературы

1. Универсальная система удаленного сбора данных для мониторинга характеристик природной среды / Л.В. Грунская, А.Н. Золотов, А.С. Бушуев, И.А. Сныгина, В.Е. Лукьянов // Динамика сложных систем- XXI век // Радиотехника. – 2018. – № 4. – С.4–10.
2. Грунская Л.В., Ефимов В.А. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 69–74.
3. Грунская Л.В. Электромагнетизм земной атмосферы: учеб. пособие. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2019. – 209 с.
4. Грунская Л.В. Оценка параметров электрического поля приземного слоя атмосферы на основе метода корреляционного приема: монография. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2010. – 123 с.
5. Харченко М. А. Корреляционный анализ: учебное пособие. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2008. – 30 с.

УДК 087.2 + 537.87

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ХОДА ПЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Н. В. Рябова, Н. А. Конкин, М. В. Вершинин

*Поволжский государственный технологический университет  
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3  
E-mail: RyabovaNV@volgatech.net*

**Аннотация.** Восстановление данных, имеющих сезонную зависимость, является задачей, которая требует глубокого и детального изучения рассматриваемых значений. Использование стандартных и простых математических методов не сможет обеспечить качественное синтезирование пропущенных

величин. Для учёта и нахождения закономерностей в сезонных данных предпочтительным методом считается машинное обучение, которое может адаптироваться к загруженным в неё данным и с высокой точностью спрогнозировать пропущенное по не зависящим от исследователя данным значение.

**Ключевые слова:** машинное обучение; восстановление пропущенных значений; восстановление данных; сезонная зависимость; полное электронное содержание

## RECONSTRUCTING TEC VALUES USING MACHINE LEARNING METHODS

N. V. Ryabova, N. A. Konkin, M. V. Vershinin

**Abstract.** Recovering seasonally dependent data is a task that requires a deep and detailed study of the values in question. Using standard and simple mathematical methods will not be able to provide high-quality synthesis of missing values. Machine learning is considered the preferred method for accounting for and finding patterns in seasonal data, as it can adapt to the data loaded into it and predict the missing value with high accuracy for data independent of the researcher.

**Keywords:** machine learning; missing value imputation; data recovery; seasonal dependence; total electron content

### Введение

В настоящее время, когда данные играют ключевую роль в принятии решений, восстановление значений становится актуальной задачей, поскольку позволит повысить точность результата, полученного на выходе используемого решения, которое было создано и функционирует на основе этих самых данных. Простые регрессионные модели не могут учесть сезонную составляющую величин, в отличие от специализированных, например модели SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average). Данное обстоятельство приводит к искажению результатов восстановления и снижению точности прогнозов. Учесть сезонную составляющую можно при использовании методов машинного обучения, которые позволяют взять во внимание сложные зависимости и закономерность данных.

*Целью данной работы* является использование различных методов машинного обучения для восстановления пропущенных сезонных значений и сравнение точности восстановления в зависимости от используемого метода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) рассмотреть существующие методы машинного обучения и выбрать наиболее подходящие для задачи восстановления значений;
- 2) разработать алгоритм восстановления значений с использованием выбранных методов машинного обучения;
- 3) провести сравнительный анализ точности восстановления между выбранными моделями и реальными данными и оценить их эффективность с использованием следующих ключевых метрик: средней абсолютной ошибки (MAE), средней абсолютной процентной ошибки (MAPE), корня среднеквадратичной ошибки (RMSE) и коэффициента детерминации ( $R^2$ );
- 4) сделать вывод на основе сравнительного анализа о применимости методов машинного обучения в задачах восстановления значений, имеющих сезонную зависимость.

### Методы машинного обучения для прогнозирования временных рядов

При рассмотрении существующих методов машинного обучения были выбраны три известные модели: рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network, RNN) типа LSTM (Long Short-Term Memory), модель сезонного авторегрессивного интегрированного скользящего среднего (SARIMA), метод случайного леса (RandomForest, RF). Результат работы каждого метода соответствует целям данной работы, однако способ реализации каждого из них уникален. Данное обстоятельство позволяет объективно оценить выводы моделей и выбрать лучшую из них.

Основой работы рекуррентной нейронной сети типа LSTM выступает запоминание значений как на короткие, так и на длинные промежутки времени во избежание проблем долговременной зависимости [3].

SARIMA является расширением модели ARIMA (авторегрессивное интегрированное скользящее среднее), которое включает в себя сезонность в дополнение к несезонным компонентам. Модели ARIMA широко используются для анализа и прогнозирования временных рядов, а модель SARIMA специально разработана для обработки данных с сезонными закономерностями.

RandomForest представляет из себя композицию множества решающих деревьев и может быть использован не только в задачах классификации, но и для работы с регрессией. Использование ансамблевого метода позволяет избежать проблему переобучения и повысить точность в сравнении с одним деревом.

### Описание и разметка используемых данных, исследование выбранных методов машинного обучения и анализ полученных результатов

В качестве исследуемых данных были взяты значения полного электронного содержания (ПЭС), полученные со станции, находящейся в городе Кинель Самарской области за 2023 год.

Каждая модель получала на вход для обучения данные ПЭС за 2 дня и адаптировалась под них, пытаясь найти не только закономерность, но и сезонную составляющую [1]. В качестве отличительной из общего списка моделей можно выделить модель SARIMA, для обучения которой не нужна матрица признаков, а необходимы только предыдущие отсчеты временного хода ключевой станции. В дальнейшем данные ПЭС для восстановления значений во время тестирования не будут использоваться, поскольку эта модель ищет сезонную составляющую и в качестве параметров для восстановления указывается только необходимое число последующих отсчетов. Итоговый набор значений для обучения включал в себя данные ПЭС за 2 дня с 8 соседних референсных станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), полученных с шагом в полчаса, т. е. для обучения было выделено 96 отсчетов, для тестирования – 48 [2].

Ключевым моментом, на котором стоит заострить внимание, является использование минимально доступного объема обучающей выборки, в котором отсутствуют пропущенные значения, до непосредственно самих потерянных значений. Потери в данных возникают не только по причине человеческого фактора, которые могут происходить из-за неправильной обработки и конвертации полученных исходных величин, но и из-за наличия стохастических составляющих при непосредственном сборе этих самых данных. Использование двух дней для тренировки необходимо для работы некоторых моделей, в частности модели SARIMA.

Блок-схема алгоритма, представленная на рис. 1, отражает ключевые этапы выполнения исследования: подготовку тренировочной и тестовой выборок, обучение моделей, тестирование полученных моделей и сравнительный анализ с использованием абсолютных и относительных метрик. Разделение данных на обучающую и тестовую выборки необходимо для того, чтобы использовать неповторяющиеся данные на каждом из этапов и оценить способность восстановления моделей на данных вне обучающей выборки [4].



Рис. 1. Блок-схема алгоритма исследования выбранных методов машинного обучения

Для сравнения реального и прогнозного ходов ПЭС с использованием различных методов машинного обучения представлены два графика (рис. 2), отражающие способность восстановления моделей в различных годовых сезонах.

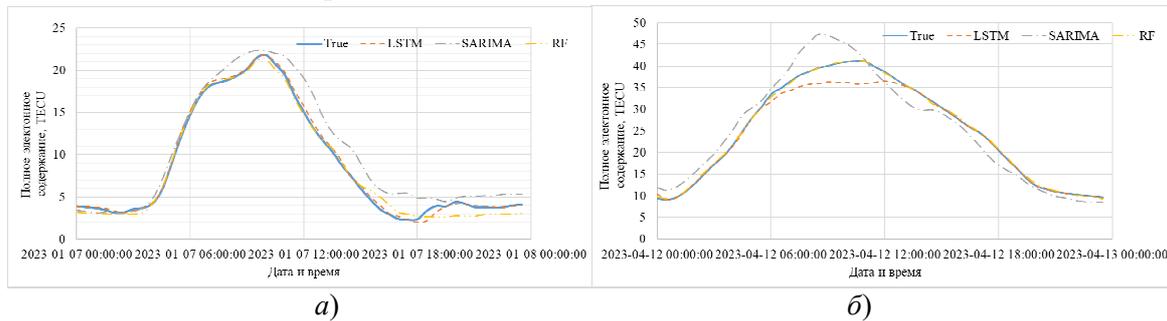


Рис. 2. Сравнение реального хода ПЭС с восстановленными при использовании моделей LSTM, SARIMA, RF для зимнего (а) и весеннего (б) сезонов

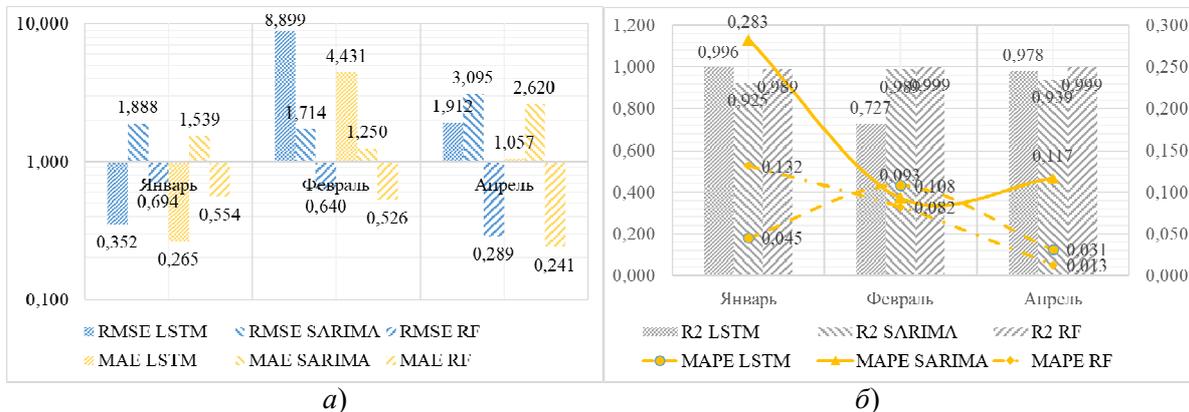


Рис. 3. Абсолютные (б) и относительные (а) метрики оценки ошибки и точности восстановления в зависимости от используемой модели машинного обучения и исследуемого месяца

На основе анализа графиков (см. рис. 2) определено, что каждая модель справилась с поставленной задачей и смогла восстановить значения временного ряда. Модель SARIMA повторила форму рассматриваемых данных, но схожесть с реальным ходом ПЭС не является достаточной для дальнейшего использования, в отличие от LSTM или RF, что подтверждают метрики (рис. 3). Анализ метрик выявил значительную разницу между показателями модели SARIMA и моделью RF, которая наилучшим образом проявила себя во всех исследуемых периодах. Взяв во внимание коэффициент детерминации и вычислив его среднее значение, получили следующие результаты: 0,951 для SARIMA и 0,995 для RF. Разница между этими значениями составляет 5 % и говорит о лучшей применимости модели RF для восстановления значений ПЭС по сравнению с моделью SARIMA. Модели LSTM и RF также справляются с поставленной задачей, однако LSTM лучше всего себя показала при рассмотрении зимнего периода, а RF – весеннего, однако стабильность коэффициента детерминации последней остается в пределах 0,99, а первой – в пределах 0,9 при исследовании различных периодов.

### Заключение

Восстановление значений полного электронного содержания является перспективным направлением развития для использования в трансионосферных радиоканалах, а внедрение методов машинного обучения позволяет получить результат восстановления с точностью выше 95 % по сравнению с традиционными методами. Использование существующих методов машинного обучения, несмотря на их количество и разнообразие внутренней логики, позволяет с высокой точностью прогнозировать данные временных рядов. Рассмотренные в работе модели LSTM, SARIMA и RF показали высокую точность восстановления отсчетов временного хода ПЭС при ограниченном объеме тренировочной выборки, о чём свидетельствуют полученные метрики, однако менее точной из них оказалась модель SARIMA, поскольку средняя разница в показателях средней абсолютной ошибки между другими двумя моделями достигает 30 %.

### Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145.

### Список литературы

1. Конкин Н. А., Пасова А. Д., Рябова Н. В. Применение технологии машинного обучения для анализа параметров транссионосферных каналов связи // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2021. – № 2. – С. 191-194.
2. Кислицын А. А., Рябова Н. В., Конкин Н. А. Метод интеллектуального анализа данных для прогнозирования значений полосы когерентности изменяющегося транссионосферного радиоканала // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике : труды XVII конференции молодых ученых, Иркутск, 05–10 сентября 2022 года. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 361-363.
3. Специализированная нейронная сеть для прогнозирования параметров широкополосных транссионосферных радиоканалов в составе интеллектуального сенсора / Д. В. Иванов, А. А. Кислицын, Н. А. Конкин [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. – № 4(60). – С. 50-63.
4. Рябова, Н. В. Синтез и анализ структур нейронных сетей для прогнозирования полного электронного содержания ионосферы Земли / Н. В. Рябова, Н. А. Конкин, М. В. Вершинин // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн : Всероссийские открытые Армандовские чтения: материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром, 25–27 июня 2024 года. – Муром: Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2024. – С. 445-457.

УДК 550.383+616.1

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОЛИГОНА ВлГУ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПО ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

С. А. Тряпкин, Л. В. Грунская

*Владимирский государственный университет имени А. Г. Столетова и Н. Г. Столетова,  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
E-mail: trjaps@yandex.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены данные мониторинга электромагнитного поля Земли и данные обращаемости людей в медицинские учреждения с заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Проведена обработка экспериментальных данных. Выявлена корреляционная зависимость между данными. Сделаны выводы о целесообразности прогнозирования заболеваний сердечно-сосудистой системы с использованием данных мониторинга электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона.

**Ключевые слова:** взаимосвязь; данные мониторинга; электромагнитное поле Земли; прогноз сердечно-сосудистых заболеваний; Владимирская область

## USE OF THE CORRELATION OF MONITORING DATA OF THE EARTH'S ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE INFRA-LOW FREQUENCY RANGE OF THE PHYSICAL EXPERIMENTAL GROUND OF VLSU IN THE PROBLEM OF PREDICTING CARDIOVASCULAR DISEASES IN THE VLADIMIR REGION

S. A. Tryapkin, L. V. Grunskaya

**Abstract.** Data from monitoring the Earth's electromagnetic field and data on the incidence of diseases of the cardiovascular systems were taken. Experimental data has been processed. A correlation between the data was

revealed. Conclusions are drawn about the feasibility of predicting diseases of the cardiovascular systems using monitoring data of the Earth's electromagnetic field in the infra-low frequency range.

**Keywords:** correlation; monitoring data; Earth's electromagnetic field; cardiovascular diseases; Vladimir region

### Введение

Ежегодно огромное число людей страдает от сердечно-сосудистых заболеваний. Предвидеть обострение заболеваний сердечно-сосудистой системы очень непросто. Чтобы частично прогнозировать их обострение, были получены корреляционные зависимости обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы и данными мониторинга электромагнитного поля Земли. Прделанная работа покажет, имеет ли смысл прогнозирование обострения подобных заболеваний с использованием данных мониторинга электромагнитного поля Земли. Данная методика позволит лучше контролировать ситуацию по заболеваниям сердечно-сосудистой системы на основе показаний экспериментального полигона ВлГУ. Проблема состоит в том, что прогнозирование заболеваний сердечно-сосудистой системы является комплексной и сложнореализуемой задачей. Исходя из этого, были использованы данные мониторинга электромагнитного поля Земли, что позволило решить поставленную задачу. В дальнейшем полученные данные могут быть использованы для предостережения людей об потенциальной опасности обострения сердечно-сосудистых заболеваний.

*Цель работы* – решить задачу прогнозирования заболеваний сердечно-сосудистой системы среди населения Владимирской области, воспользовавшись взаимосвязью данных мониторинга электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона физического экспериментального полигона ВлГУ.

*Решаемые задачи:*

- 1) сбор и анализ как данных обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения, так и данных мониторинга электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона;
- 2) выявление корреляционной зависимости между обращаемостью людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения и мониторингом электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона;
- 3) заключение о целесообразности прогнозирования среди населения заболеваний сердечно-сосудистой системы с использованием взаимосвязи мониторинга электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона.

### Компьютерное моделирование, изложение и анализ полученных результатов

Для анализа были взяты данные по обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медицинские учреждения за период с ноября 2016 по январь 2017 года по Владимирской области, которые сопоставлялись с синхронными данными магнитного поля Земли. По результатам исследований были проанализированы корреляционные связи указанных факторов. На рисунке 1 представлены графики напряжённости магнитного поля и обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 3–16 декабря 2016 года.

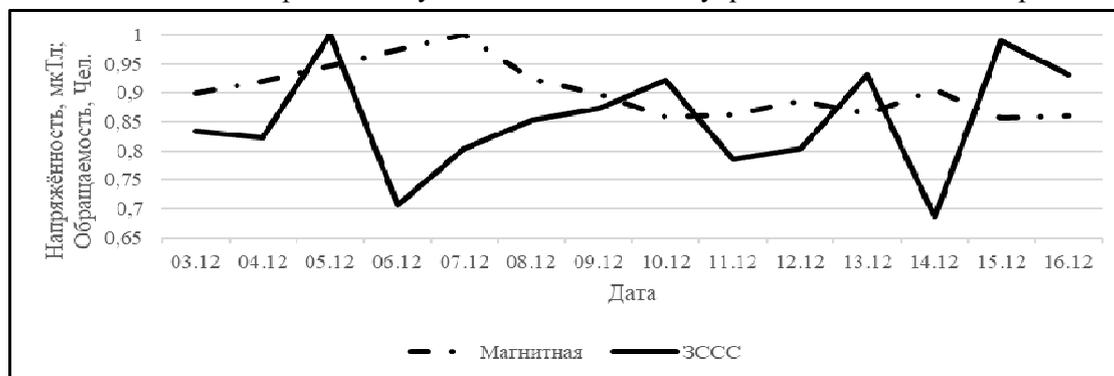


Рис. 1. Напряжённость магнитного поля и обращаемость людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 3–16 декабря 2016 год

На рисунке 1 видим среднюю отрицательную корреляцию ( $R = -0,397326312$ ).

На рисунке 2 представлены графики напряжённости магнитного поля и обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 17–30 декабря 2016 года.

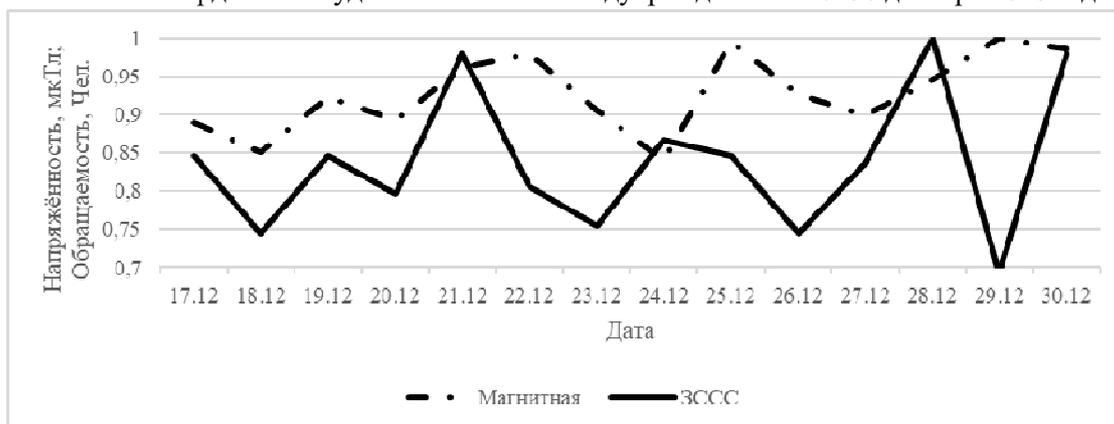


Рис. 2. Напряжённость магнитного поля и обращаемость людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 17–30 декабря 2016 год

На рисунке 2 видим слабую положительную корреляцию ( $R=0,192202073$ ).

На рисунке 3 представлены графики напряжённости магнитного поля и обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 31 декабря 2016 – 13 января 2017 года.

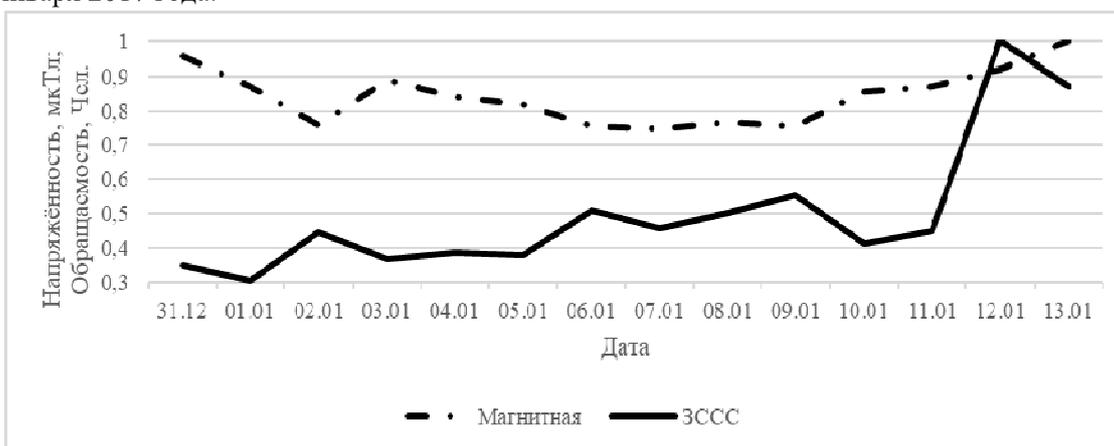


Рис. 3. Напряжённость магнитного поля и обращаемость людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 31 декабря 2016 – 13 января 2017 года

На рисунке 3 видим среднюю положительную корреляцию ( $R=0,339753567$ ).

На рисунке 4 представлены графики напряжённости магнитного поля и обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы за медицинской помощью за 14–25 января 2017 года.

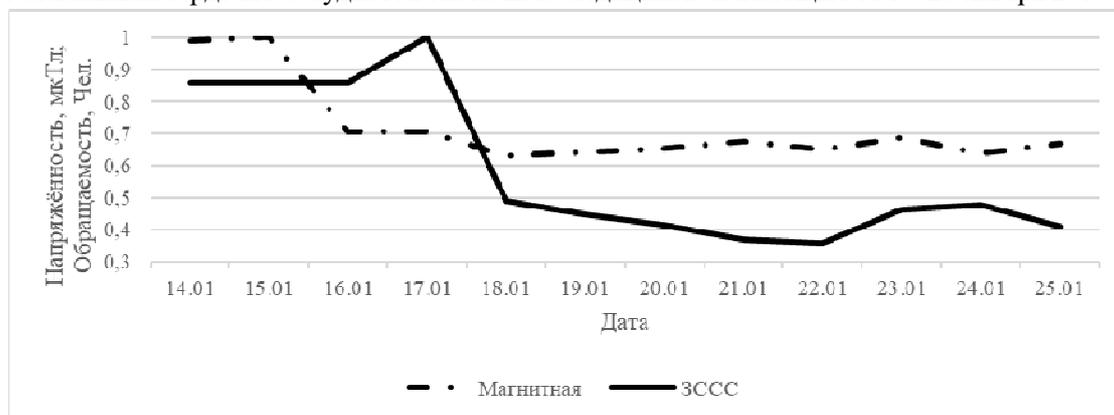


Рис. 4. Напряжённость магнитного поля и обращаемость людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы в медучреждения за 14–25 января 2017 года

На рисунке 4 видим сильную положительную корреляцию ( $R=0,647748845$ ).

Анализируя полученные данные, приходим к тому, что корреляция между показателями магнитного поля и обращаемостью людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы за медицинской помощью в большинстве случаев положительна.

Занесём полученные результаты в таблицу 1.

В таблице приведены коэффициенты корреляции для обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы за медицинской помощью и напряжённости магнитного поля по Владимирской области за 2016 – 2017 годы.

**Коэффициенты корреляции для обращаемости людей с заболеваниями сердечно-сосудистой системы за медицинской помощью и напряжённости магнитного поля по Владимирской области за 2016 – 2017 года**

Дата	Коэффициенты корреляции	p
03.12.2016-16.12.2016	-0,397326312	$\leq 0,01$
17.12.2016-30.12.2016	0,192202073	$\leq 0,01$
31.12.2016-13.01.2017	0,339753567	$\leq 0,01$
14.01.2017-25.01.2017	0,647748845	$\leq 0,01$

**Выводы**

В ходе выполнения поставленных задач мы воспользовались взаимосвязью данных мониторинга электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона физического экспериментального полигона ВлГУ в решении задачи прогнозирования заболеваний сердечно-сосудистой системы по Владимирской области и пришли к выводу о целесообразности использования данного метода. Однако полагаться исключительно на данный метод не рекомендуется ввиду как его специфичности, так и большого массива данных для эффективного и точного прогнозирования.

**Список литературы**

1. Грунская Л. В. Геофизика и биоритмы: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. – С. 117-119.
2. Грунская, Л. В., Геофизика и биоритмы: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. – №2. – С. 51-52.
3. Красногорская Н.В., Электромагнитные поля в биосфере. – Москва: Наука, 1984. – С. 77.
4. Орешина М. Н., Савенко Е. Ю., Исследования воздействия электромагнитных излучений на организм человека // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – №3. – С. 342–347.
5. Тряпицына Е. В., Щербакова И. В., Влияние электромагнитных полей на организм человека // Интерактивная наука. – 2024. – №1 (87). – С. 19–21.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
Служить науке, служить России ( <i>памяти Дмитрия Сергеевича Лукина</i> ).....	5

### СЕКЦИЯ 1. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ИОНОСФЕРЫ, КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ЗЕМНЫХ ПОКРОВОВ

***Аппалонов А. М., Масленикова Ю. С., Шерстюков О. Н.***

Анализ глобальной динамики полного электронного содержания за 23-й, 24-й циклы солнечной активности с использованием алгоритмов нейронных сетей глубокого обучения .....7

***Королёва О. А., Караваев Д. М., Ефременко А. Н.***

Статистические исследования гидростатической и влажной компонент тропосферной задержки в регионах России ..... 11

***Мингалева А. О., Благовещенская Н. Ф., Калишин А. С., Егоров И. М., Загорский Г. А.***

Сравнение характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы при воздействии мощными КВ-радиоволнами О- и Х-поляризации ..... 15

***Никитина Л. А., Козогин Д. А.***

Оценка точности прогнозирования геоцентрических координат навигационных спутников ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU ..... 19

***Титова М. А., Захаров В. И., Пулинец С. А.***

Методика обработки радиотехнической и геофизической информации об условиях распространения спутниковых радиосигналов для изучения литосферно–ионосферных проявлений..... 23

***Холодов И. Ю., Матюков М. А.***

Реализация цифрового накопления выходных сигналов СВЧ радиометрической системы.....27

### СЕКЦИЯ 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

***Анютин Н. Д.***

Сравнительные характеристики возбуждения плазмонов плоской электромагнитной волной Н-типа на кольце из карбида кремния 6Н-SiC и карбида бора В<sub>4</sub>C ..... 31

***Белоногов С. А., Колмаков А. А., Проваренко И. Е., Родионов И. Е.***

Местная облачность как причина возмущенности электромагнитного крайне низкочастотного фона в зимний период по данным измерений в Томске ..... 35

***Загорский Г. А., Калишин А. С., Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Егоров И. М.***

Спектральные характеристики узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы ..... 39

***Коновалова Д. А., Юшков Е. В., Соколов Д. Д.***

Реконструкция профилей магнитного поля плоских галактик ..... 43

***Крысанов Д. В., Маненков С. А.***

Решение задачи дифракции на проницаемом теле, частично покрытом тонким экраном..... 45

***Михайлов М. А., Черных В. Д., Вертоградов Г. Г.***

Влияние коррекции модели IRI по данным вертикального зондирования на точность однопозиционного местоопределения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне волн..... 49

**Нестеров В. Ю., Вертоградов Г. Г.**

Оценка координат движущихся объектов по результатам синхронных измерений доплеровского сдвига частоты и углов прихода рассеянного излучения.....53

**Никитин С. В., Трачук Э. М., Шашин Д. Е.**

Исследование тонкопленочного покрытия для отражения электромагнитного излучения различных диапазонов .....57

**Носиков И. А., Клименко М. В., Падохин А. М.**

Особенности расчета ДЧХ наклонного зондирования прямым вариационным методом.....60

**Пигалин А. И., Бельгибаев Р. Р.**

Малощумящий усилитель для симметричной укороченной антенны КВ-диапазона .....62

**Раубо К. В., Захаров В. Е.**

Численное моделирование изменения фазы комплексной амплитуды коротких волн вдоль лучевых траекторий в ионосфере.....65

**Савастьянов А. О., Сулимов А. И.**

Оценка пространственной корреляции метеорных радиоотражений .....68

**Смирнов Д. А., Горкин Д. С., Варенков В. В., Сахтеров В. И.**

Управление диаграммой направленности приемной антенны георадара применительно к обнаружению слабоконтрастных объектов .....72

**Смыгалина П. П.**

Влияние температурной зависимости электропроводности мышц на СВЧ-отогрев обморожений .....75

### СЕКЦИЯ 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ И РАДИОСВЯЗИ

**Гильфанова А. Ф., Давыденко Г. А.**

Исследование работы цифрового канала связи с применением QUASI-QAM-сигналов.....80

**Гильфанова А. Ф., Звонкова Д. Ю.**

Исследование методов повышения помехозащищенности системы связи .....82

**Кислицын А. А., Кислицына М. А.**

Метод автоматического регулирования частотного ресурса широкополосной спутниковой связи в условиях деградации параметров трансионосферного радиоканала .....84

**Морозов О. Г., Нуреев И. И., Сахабутдинов А. Ж., Кузнецов А. А., Аль-Муфти А., Грабовецкий Д. С., Матвеев Д. Н., Шагвалиев Т. Р.**

Комплексный подход к генерации многокомпонентных частотных гребенок .....88

**Хамарицкая О. А., Мертвицев А. С.**

Повышение разрешающей способности по дальности на основе применения инверсной фильтрации с коррекцией.....92

### СЕКЦИЯ 4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН И ИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

**Веденькин Д. А., Кадим А.**

Радиотехнические средства для объективного контроля качества вождения транспортных средств .....95

**Веденькин Д. А., Фархутдинов В. В.**

Интеллектуальные системы оценки качества вождения транспортных средств .....98

<b>Галактионов С. А., Грунская Л. В.</b>	
Исследование характера вариаций электрического поля Земли в инфранизкочастотном диапазоне по данным физического экспериментального полигона ВлГУ .....	100
<b>Елчанинова А. С., Кислицын А. А.</b>	
Анализ точности синтезированных моделей сверточной и рекуррентной нейронных сетей типа LSTM для задачи прогнозирования ПЭС и полосы когерентности .....	103
<b>Казанцева А. А.</b>	
Применение методов глубокого машинного обучения для прогнозирования доступности радиоканалов КВ-связи .....	107
<b>Нурғалиев И. Д., Грунская Л. В.</b>	
Исследование взаимосвязи электрического поля Земли в инфранизкочастотном диапазоне с метеоданными .....	110
<b>Рябова Н. В., Конкин Н. А., Вершинин М. В.</b>	
Восстановление временного хода ПЭС с использованием методов машинного обучения .....	113
<b>Тряпкин С. А., Грунская Л. В.</b>	
Использование взаимосвязи данных мониторинга электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона физического экспериментального полигона ВлГУ в задаче прогнозирования заболеваний сердечно-сосудистой системы по Владимирской области .....	117