



005060185

На правах рукописи

*Вася*

**ВАСИЛЬЕВ Алексей Евгеньевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ФОНОВОЙ И  
ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРИЕМНИКОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ  
СИСТЕМ.**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

30 МАЙ 2013

Москва 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
«Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Куницын Вячеслав Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Ружин  
Юрий Яковлевич, ИЗМИРАН

доктор физико-математических наук Гаврилов Борис  
Георгиевич,  
Институт динамики геосфер РАН

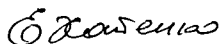
Ведущая организация: Институт физики атмосферы имени А.М.Обухова РАН

Защита состоится 26 июня 2013 г. в 11 часов на заседании Диссертационного  
совета Д 327.008.01 Института прикладной геофизики имени академика  
Е.К. Федорова по адресу: Москва, ул. Ростокинская, д. 9, зал заседаний Ученого  
совета.

Автореферат разослан «23» мая 2013 г.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Института  
прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д327.008.01  
кандидат физико-математических наук



Е.Н. Хотенко

## **Общая характеристика исследования**

**Актуальность исследования.** В настоящее время в связи с широкой технической доступностью активно развиваются глобальные навигационные спутниковые системы (Global Navigation Satellite Systems - GNSS) GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, COMPASS/Beidou и вспомогательные подсистемы. На основе приёма сигналов спутников GNSS развиваются и наземные средства для использования в разных отраслях и задачах. Помимо бытовых и промышленных навигационных устройств на основе таких приёмников развиваются и геофизические сети стационарных измерений.

Широкое распространение этих систем приводит к их использованию в новых задачах, требующих улучшения их точности и надёжности. Одним из основных источников ухудшения таких характеристик у приёмников GNSS является среда прохождения радиосигналов – атмосфера. В значительной степени на измеряемые задержки влияет её проводящая область — ионосфера. Кроме сложностей инструментального измерения состояния ионосферы, задача её описания осложняется большой изменчивостью. Ионосфера изменяется под влиянием множества внешних и внутренних факторов. При этом внутренние процессы в ней бывают связаны друг с другом взаимно, так что определить вклад в общее состояние от каждого фактора по отдельности бывает сложно. Поэтому анализ естественной фоновой активности и результатов пробных искусственных воздействий является одной из востребованных задач для совершенствования точности и надёжности работы GNSS.

Наконец, остаются актуальными задачи о распространении радиоволн как резервных каналов дальней связи, поскольку такая связь является направленной, лучше защищённой от помех по сравнению со слабыми сигналами спутников, требующих значительных средств на запуск и поддержание аппаратов в космосе, наилучших средств шифрования при адресном обмене информацией. Знание доступного диапазона частот для направленной связи за горизонтом напрямую зависит от определения актуальных на данный момент параметров ионосферы как отражающей области. Определение актуального состояния ионосферы и их прогнозирование зависит от результатов инструментального исследования фоновых изменений и знания фактической реакции на внешние факторы, подобные пробным воздействиям.

Реальные изменения электронного содержания ионосферы со временем в узких направлениях имеют сложную форму, поэтому развитие способов экспериментального измерения, последующего анализа и представления реальных данных, поиска локальных эффектов и аномалий является задачей востребованной, но зачастую сложной. Сложность связана с тем, что данные об

электронном содержании ионосферы, получаемые на базе GNSS-приёмников, могут быть зашумлены и систематически искажены по внутренним аппаратным причинам и внешним условиям радиоприёма. Кроме того, помимо исследуемых явлений в самой ионосфере обычно протекают другие процессы, вносящие свой вклад в данные измерений.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованием изменений TEC (Total electron content – интегральное электронное содержание луча на спутник) с помощью приёмников GNSS в настоящее время занимается ряд научных коллективов. В работах Е.Л. Афраймовича с коллегами на основе метода радиоинтерферометрии получен ряд новых результатов по применению GPS в исследовании естественных и техногенных возмущений в ионосфере. В работах В.Е. Куницына, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреевой разработаны методы радиотомографии ионосферы, использующие радиосигналы различных навигационных систем для восстановления двумерной и трехмерной структуры неоднородностей электронной концентрации. Вопросам адаптивного моделирования, оценке параметров ионосферы и радиотомографии на основе высокоорбитальных навигационных систем посвящены диссертации и работы И.А. Нестерова, М.А. Кожарина, А.М. Падохина.

Существенный вклад в исследование реакции ионосферы на искусственные воздействия внесли А.В. Гуревич, В.Л. Фролов, G. Milikh и другие.

Способ представления данных TEC с применением вейвлет-обработки на годовых интервалах навигационных измерений используется в работах А. Krankowski, более короткие интервалы изучены с помощью вейвлет-обработки Z. T. Katamzi, N.D. Smith, C. N. Mitchell на основе данных фарадеевского поворота плоскости поляризации радиосигналов. Самые короткие периоды изменений TEC проанализированы вейвлет-обработкой данных навигационных приемников в работах P.T. Jayachandran, K. Hosokawa, K. Shiokawa, Y. Otsuka и др. по сигналам спутников GPS. Корреляционная обработка данных навигационных приемников использована в работах А.К. Gwal, J.S. Shim и других.

Но ввод в эксплуатацию геостационарных навигационных спутников открыл дополнительные возможности для исследования ионосферы. При наличии приемного оборудования последнего поколения и соблюдении технологических условий стало возможным получать новые данные изменений TEC в высоком качестве в постоянных направлениях за время более одного сеанса типичного приема сигналов GPS.

Возможности корреляционной и вейвлет-обработки не нашли широкого применения для экспериментального исследования данных активных

ионосферных экспериментов с диагностированием GPS-приемниками. Однако, развитие современной персональной вычислительной техники сделало доступным использование таких представлений в новых ионосферных экспериментах, обеспечивая наибольшую информативность и надежность анализа.

**Цели и задачи.** Целью работы является исследование возможностей экспериментального определения изменчивости полного электронного содержания фоновой и возмущенной ионосферы с использованием приемников глобальных навигационных спутниковых систем.

Основными задачами для достижения поставленной цели являются: определение высокочастотной погрешности измерения TEC приёмниками GNSS разных производителей навигационных чипов: Javad, Leica, Ashtech, Trimble; определение амплитуды естественных фоновых изменений TEC, используя данные о задержках радиосигналов геостационарных спутников GNSS; определение амплитуды изменений TEC, вызываемых искусственными нагревами на базе стенда «Сура».

Объектом исследования является ионосфера Земли. Предметом исследования являются изменения TEC, существующие в естественных фоновых и искусственно возмущенных условиях в направлениях отдельных навигационных спутников.

**Научная новизна.** В работе впервые продемонстрированы изменения TEC по данным задержек двухчастотных и одночастотных геостационарных навигационных спутников системы SBAS (Satellite-based augmentation system – подсистема вспомогательных геостационарных навигационных спутников) с помощью стандартных GNSS-приёмников с использованием вейвлет-обработки.

В работе впервые применена вейвлет-обработка данных TEC отдельных пролётов спутников GNSS, направления которых пересекали искусственные ионосферные возмущения.

В работе выработан и проверен способ обработки таких данных специальным представлением корреляционного алгоритма с учётом неизвестной фактической инерционности изменений TEC. Показана возможность оценить время отставания изменений TEC от искусственных нагревов с точностью до целого числа периодов нагрева.

В работе впервые обнаружены изменения характеристик качества сигналов GNSS (величина кодового «отношения сигнал/шум» по стандарту RINEX) под действием искусственных ионосферных нагревов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В работе показана дополнительная аппаратная возможность стандартных двухчастотных GNSS-приёмников для использования в ионосферных исследованиях геостационарных спутников SBAS – как двухчастотных, так и одночастотных. В отличие от широко распространённого способа мониторинга ионосферы с использованием высокоорбитальных спутников GNSS, аналогичные геостационарные измерения могут быть использованы для дополнения информацией о состоянии ионосферы в постоянных направлениях. Использование геостационарных спутников для составления промежуточных карт изменений TEC в интервалы между решением основных расчётных задач может сделать мониторинг ионосферы более оперативным.

Помимо прямого анализа изменений TEC в работе используются и другие способы представления данных. Применение вейвлет- и корреляционной обработки в отдельных случаях позволяет более надёжно выделять ожидаемый эффект на фоне посторонних изменений, наводимых влиянием других процессов в ионосфере.

В работе показано, как изменяются результаты анализа данных TEC в зависимости от настроек и параметров обработки, что тоже бывает существенным для интерпретации результатов.

**Методология и методы исследования.** В работе используются экспериментальные данные, рассматриваются практические результаты измерений относительного TEC с помощью одиночных приемников высокоорбитальных навигационных систем. Используются данные задержек новых геостационарных навигационных спутников для исследования естественных изменений TEC с периодами несколько минут и меньше. К данным применяется вейвлет-обработка для анализа спектрального состава колебаний и его изменения за несколько часов.

Используются экспериментальные данные приемников высокоорбитальных навигационных систем, полученные во время активных воздействий нагревного стенда на ионосферу. К полученным данным применяется вейвлет-обработка и специальное представление корреляционной обработки. Вейвлет-обработка используется для определения периодов изменений TEC и времени появления и исчезновения колебаний, чтобы сравнить с ожидаемыми в соответствии с режимом модуляции нагрева и временем пересечения направлением спутника нагретой области. Корреляционная обработка используется для обнаружения связи работы нагревного стенда с изменениями TEC и определения времени отставания реакции ионосферы от начала каждого цикла нагрева. Время начала и

окончания эффекта на корреляционной картине сравнивается с временем пересечения направлением спутника нагретой области.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Установлено, что высокочастотная погрешность измерения TEC проанализированных современных приёмников GNSS (Javad, Leica, Trimble, Ashtech) имеет различия  $\sim 10^{-3}$  TECU на периодах менее 15 секунд.
2. Установлено в серии экспериментов 2009-2012 гг. (4 экспедиции МГУ и ИПГ при участии автора), что TEC искусственных ионосферных неоднородностей, создаваемых стендом «Сура» при коротких периодах модуляции (минута и менее) и регистрируемых по задержкам сигналов GNSS, отличался от фонового, как правило, на  $\sim 0,01$  TECU.
3. Экспериментально установлено, что нагрев стенда «Сура» способен понижать кодовое «отношение сигнал/шум» (по стандарту RINEX) сигналов спутников GPS на 5-10 дБ·Гц в возмущенной области и вблизи нее только на прецизионных кодах. Система ГЛОНАСС проявила лучшую устойчивость к нагревному воздействию. Устойчивость кода захвата GPS и всех кодов ГЛОНАСС может быть связана с их низкими тактовыми частотами.
4. Экспериментально установлено, что в спокойной геомагнитной обстановке спектр естественных изменений TEC в геостационарных направлениях содержит компоненты в основном с амплитудой  $\sim 0,4$  TECU. Спектр содержит компоненты с непрерывно меняющимся периодом от десятков секунд до 8 минут, а также компоненты с постоянными периодами и переменными амплитудами.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Результаты, полученные в работе, не обнаружили внутренних противоречий и согласуются с работами других авторов, полученных на других типах спутников (традиционные GPS) и других ионосферных нагревных стендах (HAARP) с точностью до специфики используемого экспериментального оборудования.

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях:

1. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-5799-2, 2010
2. Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Xi'an, China, March 22-26, 2010
3. Ломоносовские чтения, Секция физики. МГУ, апрель 2010

4. XIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011, Том II, стр. 247-250.
5. Международная научная конференция Таганрог-Дивноморское. Излучение и рассеяние электромагнитных волн, 2011
6. Конференция молодых ученых ИПГ, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е.К. Фёдорова. ИПГ 2009
7. XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». МГУ 2010
8. Конференция молодых ученых, посвященная 55-летию Института прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова. ИПГ 2011
9. XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». МГУ 2011
10. 11-я Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Баксанская молодёжная школа по экспериментальной и теоретической физике». КБГУ, Приэльбрусье 2010
11. Девятая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», ИКИ РАН 2011

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертации являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

Автору принадлежат:

- исследование точностных характеристик приемников GNSS по величине TEC,
- алгоритмы и программы анализа изменчивости спектрального состава данных TEC в направлении геостационарных навигационных спутников,
- алгоритмы и программы корреляционного анализа данных TEC в экспериментах искусственных нагревов.

По теме диссертации опубликовано 11 работ в российских и зарубежных изданиях, из них 2 по списку ВАК. Одна статья принята в печать в издании по списку ВАК.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Работа 116 страниц текста, 30 рисунков, 5 таблиц.

## Краткое содержание работы

Во *введении* обоснована актуальность, новизна, научная и практическая ценность решаемой задачи, сформулированы основные результаты и защищаемые положения, кратко изложено содержание диссертации.

*Первая глава* диссертации посвящена использованию глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) как средств исследования ионосферы Земли. Показываются известные способы обработки, применимые к измерениям одиночных пунктов или сетей таких пунктов.

В *первом параграфе* излагаются основы определения изменений полного электронного содержания (sTEC) ионосферы на пути радиосигналов спутников GNSS. Приводится традиционный для подобных исследований двухчастотный разностный способ определения относительного фазового наклонного TEC.

Во *втором параграфе* излагаются принципы возможного использования вспомогательных геостационарных навигационных спутников SBAS для определения изменений TEC в постоянных направлениях. Указывается возможность использования одночастотных спутников для определения относительного TEC по разности фазовой и групповой задержек на единственной частоте.

В *третьем параграфе* излагаются результаты известного эксперимента искусственного ионосферного нагрева на базе стенда HAARP. Приводятся данные изменений TEC, вызываемых стендом и регистрируемых по задержкам сигналов GNSS. При обработке данных эксперимента удаляется тренд с использованием спектральных фильтров против низких частот. Анализируются оставшиеся после такой предобработки изменения TEC. Эксперимент оказался успешным в четырёх из шести проведённых сеансов нагревов. В положительных случаях первые 4-5 минут успешно наблюдался период изменений TEC, равный 20 секундам, и соответствующий периоду нагревов, а последующее исчезновение эффекта объясняется ухудшением соответствия требований к несущей частоте нагрева для наиболее эффективного воздействия.

В *четвёртом параграфе* демонстрируются известные способы обработки данных TEC и NmF<sub>2</sub>. Приводятся известные примеры вейвлет-обработки данных с двухчастотных GNSS-приёмников. Дискретное вейвлет-преобразование данных за интервал 1996-2002 гг. позволяет наблюдать различные периоды изменений, начиная с полусуточных, суточных, и заканчивая целыми годовыми.

Приводится известный пример анализа изменений TEC, получаемых на основе данных фарадеевского поворота плоскости поляризации радиосигналов геостационарных спутников. В указанной работе построены временные тренды TEC, картины спектральной плотности энергии, а также картины вейвлет-

преобразований за интервалы времени порядка суток. Таким способом обнаружены естественные изменения TEC с периодами порядка часов и амплитудой порядка 20 TECU. Приводится пример анализа данных TEC, получаемых с GNSS-приёмника с применением частотно-временного преобразования TEC для высоких частот изменения по спутникам GPS. Такие исследования указывают на существование естественных колебаний TEC в диапазоне 1-30 миллизгерц со сложным спектральным составом. На таких картинах отчётливо видны колебания с постоянным периодом и с изменяющимся периодом.

Помимо спектральных преобразований для анализа данных TEC используются и корреляционные алгоритмы. Приводятся известные примеры корреляционной обработки данных ионосферных измерений. Показывается использование данных с пары приёмных пунктов разнесённого зондирования ионосферы с Земли, так что один из них находился в зоне подготовки сейсмического события, а другой вне её. За основу взяты данные о критической частоте за интервал 2005-2009 гг. из центра NOAA. Простой визуальный анализ самих значений  $NmF_2$  в указанной работе приведён, но не даёт заметных результатов. Изменение кросскорреляционной функции в указанном случае оказалось более информативным.

В другой работе приводится подробный анализ корреляций общей изменчивости TEC в соседние дни между разными станциями GNSS. В приводимой работе за основу изменчивости берутся данные TEC с мировой сети GNSS-измерений (более тысячи станций IGS) за четыре 30-дневных интервала 2004 года. Корреляционная обработка для обнаружения пространственных связей демонстрирует значительную связь между магнитосопряжёнными точками. Такая связь проявляется больше на низких широтах ( $r = 0,63-0,73$ ), чем на средних широтах ( $r = 0,32-0,43$ ).

Приводится и типичная длина корреляции, её зависимость от широты и сезона. Угловое расстояние меридиональной корреляции составляет около 7 градусов в средних широтах и 4 градусов в низких. Аналогичная зональная длина корреляции оценивается в 20 градусов в средних широтах и 11 градусов в низких. Длины корреляций больше в дневное время (11-13 часов местного времени), чем в ночное (23-1 час местного времени). Кроме того, авторы отмечают, что пространственная корреляция сильно зависит от сезона.

Приводятся статистические свойства изменений TEC по результатам исследований, направленных на выбор оптимальных функций плотностей распределения короткопериодных изменений TEC.

В *пятом параграфе* детально излагаются представления данных TEC, применяемые в данной работе. Обосновывается цель их применения,

возможности, которые они обеспечивают, и особенности, учитываемые при анализе данных такими способами. Описывается техника применения вейвлет-обработки к данным TEC, производится тест на пробных симулированных гармонических колебаниях и объясняется специфика подобного рода преобразования на примере таких данных. Излагаются особенности применения такого способа представления данных к искусственным нагревам ионосферы.

Приводится детальное описание корреляционной обработки экспериментов подобного рода с учётом неизвестного времени запаздывания реакции ионосферы на нагрев и возможности определять реальную величину такого запаздывания (с точностью до целого числа циклов периодического режима нагревов).

В *шестом параграфе* даётся краткое заключение о способах анализа и обработки данных изменений TEC, их области применимости, а также внимания, оказываемого авторами исследований разным масштабам процессов по времени и пространству.

Во *второй главе* приводятся результаты проведённых в работе измерений TEC по задержкам радиосигналов геостационарных навигационных спутников SBAS.

В *первом параграфе* приводится экспериментальное определение и сравнение высокочастотной аппаратной погрешности измерений TEC приемниками разных производителей навигационных чипов. Используемые в экспериментах приёмники марки Javad Alpha внесены в Государственный реестр средств измерений.

Во *втором параграфе* приводятся примеры произведённых измерений по сигналам спутников WAAS, MSAT, GAGAN, результаты визуального анализа изменений TEC. Анализ производится в сравнении с изменениями погрешности определения координат и суточными изменениями. Рассматриваются интервалы измерений за сутки.

В *третьем параграфе* приводятся картины вейвлет-обработки измерений TEC по данным задержек SBAS в разных масштабах по периодам – от 20 минут до десятков секунд.

Вейвлет-обработка двухчастотных данных задержек сигналов спутников WAAS показала наличие регулярных изменений TEC, и в разных направлениях характер периодических изменений в масштабе минут оказался разным для одного и того же пункта наблюдений. В одном направлении изменения происходили с постоянным периодом, но периодически (~1 раз в час) меняющейся амплитудой (с 0,2 до 0,5 TECU и обратно). В это же время в направлении другого спутника на том же пункте наблюдений при

незначительных следах аналогичных изменений присутствовали и колебания с постоянной амплитудой и изменяющимся периодом от десятков секунд до 8 минут.

Геомагнитная обстановка в день измерений оставалась спокойной: индекс К<sub>p</sub> в день измерений и ближайшие дни не поднимался выше 2.

Существенное отличие поведения двух недалёких друг от друга постоянных направлений может быть связано со структурированностью ионосферы вдоль направлений магнитных меридианов и отличиями процессов на каждом меридиональном направлении.

В *четвертом параграфе* приводятся заключительные положения и выводы по результатам проведённых измерений и вейвлет-обработки данных геостационарных измерений ТЕС по задержкам сигналов геостационарных спутников SBAS.

В *третьей главе* демонстрируются результаты экспериментов с использованием стенда «Сура» (ФГБНУ «НИРФИ») и обработка данных по искусственным ионосферным неоднородностям на основе измерений задержек сигналов высокоорбитальных навигационных спутников.

В *первом параграфе* приводятся условия постановки эксперимента, данные и результаты обработки сеанса искусственных нагревов с периодом 1 минута. Приводится карта траекторий подионосферных точек, демонстрируется удобство траектории для измерений в указанном случае. Проводится визуальный анализ изменений ТЕС в направлении спутника, пересекавшего нагреваемую область. Визуальный анализ даёт надёжный и однозначный результат влияния нагрева на ТЕС.

Приводятся результаты вейвлет-обработки в разных масштабах по времени. Результат подтверждает наличие колебаний ТЕС с периодом, равным периоду модуляции нагрева и именно во время, когда направление спутника пересекало нагреваемую стендом область.

Приводится результат корреляционной обработки и правильной интерпретации полученной картины. Обработка производится и для изменений ТЕС, и для их производной, а также с разной шириной скользящего окна расчёта для каждого случая. Объясняется разница в таких картинах, специфика и применимость разных представлений корреляционной обработки для разных целей. Периоды основных колебаний ТЕС совпали с периодом искусственных нагревов (1 минута), амплитуда таких колебаний ТЕС составила порядка 0,01 TECU, отставание максимума изменения от начала нагрева на 20-25 секунд, отставание реакции производной ТЕС от начала нагрева не более 5 секунд. Общая продолжительность по времени примерно совпала с временем,

когда направление спутника пересекало нагреваемую область. Нагрев производился всё время пересечения.

Во *втором параграфе* рассматривается сеанс нагревов с периодом 20 секунд. Демонстрируется карта траекторий подионосферных точек для выбранного случая, подчёркиваются особенности такого случая (не самая оптимальная траектория, зашумлённость данных и крайне короткий период нагревов), повышающие требования к способам обработки данных.

Показаны результаты визуального анализа данных изменений ТЕС, в данном случае не обеспечивающие никаких выводов. Демонстрируются результаты вейвлет-обработки, обеспечившие в данном случае более отчётливый, но также неустойчивый результат. Демонстрируются данные корреляционной обработки, показавшей в данном случае наилучший результат при указанных параметрах расчёта каждым из способов. Демонстрируется разница при обработке данных с разными значениями параметров расчёта. Амплитуда эффекта по вейвлет-обработке составила  $\sim 0,01$  TECU. Продолжительность обнаруженного эффекта составила около 1 минуты при общей продолжительности пересечения нагретой области направлением спутника более 30 минут. Нагрев производился всё время пересечения. Продолжительность эффекта, обнаруженного корреляционной обработкой, оказалась равной примерно 15 минутам.

Корреляционная обработка производной ТЕС показала изменение реакции ТЕС при изменении несущей частоты нагрева (в указанном случае переключение с 5,415 на 5,435 МГц). Реакция в указанном случае приобрела вторую компоненту с запаздыванием на 2-3 секунды больше.

В *четвёртом параграфе* приводятся результаты эксперимента нагрева с периодом 15 минут при длительности нагревов, не равной длительности пауз. В данном случае пересечение нагретой области было многократным разными спутниками. Демонстрируется карта траекторий подионосферных точек для данного случая. Изменения ТЕС в данном эксперименте не показали никаких убедительных результатов, но в ходе всестороннего анализа данных был обнаружен существенный эффект по величине кодового «отношения сигнал/шум» (по стандарту RINEX).

При неопределённости измерений порядка 1-2 дБ·Гц в некоторых сеансах характеристика «отношение сигнал/шум» уменьшается при искусственном нагреве на 5-10 дБ·Гц за одну секунду или менее, и так же быстро восстанавливается во время пауз. Эффект проявляется не на всех значениях подряд, а только в среднем за время непрерывного нагрева.

Эффект проявляется не на всех каналах, а только на прецизионных (P) кодах. Такое различие по кодам связано со спецификой данной величины.

Помимо амплитуды несущей частоты спутника, в данную величину входит частотная селективность, а также величина корреляции принимаемой псевдослучайной последовательности с эталонной для данного спутника.

В *пятом параграфе* приводится краткое заключение о полученных результатах с использованием стенда «Сура», основные выводы по итогам экспериментов и обработки каждой серии данных, о параметрах обработки, условиях экспериментов и их влиянии на качество и содержание получаемых результатов.

В *заключении* приводятся общие выводы о проделанной работе и полученных результатах. Производится общая оценка итогов измерений и обработки данных.

### **Заключение**

В работе проведены измерения естественных фоновых ионосферных неоднородностей по задержкам сигналов геостационарных навигационных систем SBAS – спутников WAAS, GAGAN, MSAT – с помощью стандартных серийных GNSS-приёмников. К данным двухчастотных изменений TEC, получаемых по задержкам таких спутников в постоянных направлениях применена вейвлет-обработка, показавшая различные спектральные особенности таких изменений. Обнаружены колебания с постоянным периодом, но изменяющейся амплитудой, а также колебания с изменяющимся периодом.

С помощью вейвлет- и корреляционной обработки данных стандартных серийных GNSS-приёмников определены амплитуды и отставания реакции TEC на воздействия мощного КВ-излучения. Проанализировано влияние расположения траекторий подионосферных точек в нагретой области и влияние параметров обработки данных на получаемые результаты. Расширение охвата данных расчётным окном увеличивает вероятность обнаружения эффекта при неоптимальных траекториях подионосферных точек, но размывает его локализованность и внутреннюю структуру.

Из прямого анализа изменений TEC видно, что связь между TEC и воздействиями стенда существует, но не во всех случаях однозначна. Вклад нагрева не всегда визуально легко отличить от шумов и естественных изменений TEC. Результаты визуального анализа иногда позволяют проверить результаты применения других способов представления данных.

После проведения вейвлет-анализа целесообразно проверять наличие обнаруженных периодов в исходном графике изменений TEC. Это исключает возможность влияния ошибок алгоритма вейвлет-анализа и других дефектов спектрального преобразования. На результаты и целесообразность вейвлет- и

корреляционной обработки может существенно влиять выбор параметров расчёта.

Помимо данных ТЕС побочным результатом явилось обнаружение изменений величины кодового «отношения сигнал/шум» (по стандарту RINEX) радиосигналов тех же спутников в явной зависимости от искусственных нагревов. Терминология, принятая для данной величины, имеет свою специфику.

Личное участие автора. Автор принимал непосредственное участие в выездных экспериментах на полигоне «Сура» четыре раза с 2009 по 2011 годы в составе экспедиций МГУ в пунктах на самом полигоне и в п. Галибиха, один сезон в 2011 году в составе экспедиции ИПГ в п. Васильсурск; измерениях по спутникам MSAT на Камчатке (ИКИР, Паратунка, 2010 г.); установке пункта высокоорбитальной томографии Росгидромета, 2011 г. в г. Мурманск и Сыктывкар.

Педагогическая практика. Лекции в научно-производственном комплексе "Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи" по вопросам исследования ионосферы с помощью радиосигналов высокоорбитальных навигационных спутников.

Производственная практика. Автор принимал участие в разработке технического решения по оснащению пунктов высокоорбитальной томографии Росгидромета на территории России для удалённых измерительных узлов; разработке центрального технического решения по сетевой инфраструктуре и автоматизации серверной обработки и хранения данных высокоорбитальной томографии над территорией России; других работах и мероприятиях, касающиеся производственных потребностей ИПГ в области высокоорбитальных навигационных спутников и исследований ионосферы с их помощью.

### Список работ автора по теме диссертации

1 Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е., Падохин А.М., Васильев А.Е., Курбатов Г.А. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда «Сура» ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 7. С. 421-444.

2 Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., Kurbatov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P. Study of GNSS-measured Ionospheric Total Electron Content variations generated by powerful HF heatings // Advances in Space Research. 2011. Vol. 47. P. 1743-1749

3 Васильев А.Е. Геостационарные навигационные измерения в ионосферных исследованиях // Тезисы XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Москва. МГУ. Апрель 2010. Секция «Физика». Подсекция «Геофизика». Т. 1. С. 103-104

4 Куницын В.Е., Падохин А.М., Курбатов Г.А., Васильев А.Е. Диагностика сигналами GPS/ГЛОНАСС воздействий мощного радионизлучения на ионосферу // Ломоносовские чтения, Секция физики. Москва. МГУ. Апрель 2010. С. 193-197

5 Васильев А.Е. Использование геостационарных спутников SBAS для определения изменений электронного содержания ионосферы // Тезисы 11-й Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Баксанская молодёжная школа по экспериментальной и теоретической физике». Приэльбрусье. КБГУ. Октябрь 2010. С. 8

6 Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., Kurbatov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P. Investigation of GPS-measured Ionospheric Total Electron Content Variations Generated by HF-heating at Mid-latitudes // Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Xi'an, China. March 22-26, 2010. P. 1130-1133

7 Padokhin A.M., Kunitsyn V.E., Vasiliev A.E., Kurbatov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P. GPS-study of Ionospheric TEC variations induced by powerful HF-heating // European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, 2010. Vol. 12. EGU2010-5799-2

8 Васильев А.Е. Влияние генераторов частоты геодезических GNSS-приёмников на ионосферные измерения // Труды Института прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова, выпуск 90. Москва. ИПГ. Февраль 2011. С. 50-55

9 Васильев А.Е. Учёт отклонений опорной частоты GNSS-приёмников в ионосферных исследованиях // Тезисы XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». Москва. МГУ. Апрель 2011. Секция «Физика». Подсекция «Геофизика». Т. 1. С. 95

10 Васильев А.Е., Куницын В.Е., Падохин А.М. Возможности исследования естественных и искусственных ионосферных неоднородностей с помощью одиночных GNSS-приёмников // Тезисы Девятой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН. 2011

11 Куницын В.Е., Падохин А.М., Васильев А.Е., Курбатов Г.А., Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. Свойства вариаций полного электронного содержания в ионосфере, возмущенной излучением нагревного стенда «Сура» // Сборник трудов XIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола. 23-26 мая 2011. Том II. С. 247-250.

12 Куницын В.Е., Васильев А.Е., Падохин А.М. Возможности исследования естественных и искусственных ионосферных неоднородностей с помощью одиночных GNSS-приёмников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013 (в печати)

Подписано в печать « 21 » мая 2013 г.  
ФГБУ «ИПГ». 129128, Москва, ул. Ростокинская, д. 9.  
Тел. 8(499) 187-81-86