

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук



На правах рукописи

УДК 550.388.2

Ясюкевич Юрий Владимирович

**Развитие диагностических возможностей приемников сигналов
глобальных навигационных спутниковых систем для мониторинга
состояния ионосферы и коррекции ионосферной ошибки
в радиотехнических системах**

1.3.4. Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Научный консультант:

Перевалова Наталья Петровна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Крашенинников Игорь Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, лаборатория моделирования волновых полей в ионосфере, зав. лабораторией

Крюковский Андрей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Российский новый университет (РосНОУ), кафедра Информационных технологий и естественнонаучных дисциплин, зав. кафедрой

Мальцева Ольга Алексеевна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Южный федеральный университет, отдел радиофизики и космических исследований, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

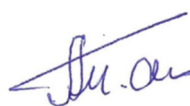
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Защита диссертации состоится «15» июня 2023 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.1.197.01, созданном при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://ru.iszf.irk.ru> и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан _____ 2023 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



А.В. Тащилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ионосфера Земли оказывает ключевое воздействие на распространение радиоволн, поэтому изучение состояния ионосферы является важной научно-практической задачей. При этом ионосфера является сложной динамической системой, на которую влияют солнечный ветер, процессы в нейтральной атмосфере, магнитосфере и на Солнце.

Информацию о состоянии ионосферы, как правило, получают, используя специальные измерительные средства, например, радары некогерентного рассеяния, ионозонды и другие. С середины 1990-х годов для этой цели стали использовать данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Требования по качеству навигации, предъявляемые к ГНСС, привели к необходимости учета ионосферной поправки. В результате каждый из приемников ГНСС стал предоставлять «побочный параметр» — интегральное полное электронное содержание (ПЭС), который исключался из решения навигационной задачи. С учетом того, что на данный момент функционируют четыре полноценных глобальных навигационных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), а также ряд региональных систем и дифференциальных дополнений ГНСС, появилась огромная база данных таких побочных параметров, которая в последние два десятилетия дала новый импульс развитию ионосферных исследований и ионосферному моделированию [Афраймович и Перевалова, 2006].

В большинстве таких исследований использовались относительные измерения ПЭС, основанные, как правило, на высокоточных измерениях фазы несущей сигнала ГНСС. Такие измерения позволили провести детальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Значительное внимание уделено вопросу генерации ПИВ во время геомагнитных возмущений.

Большой набор исследований посвящен отклику абсолютных ионосферных характеристик на геомагнитные бури [Mendillo, 2006]. Значительное развитие такие исследования получили с появлением глобальных ионосферных карт абсолютного ПЭС [Hernández-Pajares et al., 2009]. Следует отметить и успехи отечественной школы в использовании сферического гармонического анализа для получения абсолютного ПЭС [Шагимуратов и др. 1996].

При этом часто возникает необходимость, во-первых, получать абсолютные измерения ПЭС в каком-то отдельном регионе, а во-вторых, получать их в реальном или близком к нему времени. Первое требуется, например, для корректировки систем связи, радиолокации или радионавигации. Второе связано с требованием иметь возможность работы независимо от

наличия глобальных ионосферных карт, большая часть которых выходит с запаздыванием в несколько дней. **Это обуславливает актуальность настоящего диссертационного исследования** и требует изменения подходов, применяемых для классических исследовательских задач, связанных с анализом вариаций ПЭС, и перехода к новым технологиям, позволяющим получать абсолютные значения ПЭС и его пространственных и временных производных по данным отдельных приемных станций.

С другой стороны, крайне актуальной является задача получения профилей электронной концентрации или параметров радиоканала f_oF2 и МПЧ на основе данных ГНСС. Для этой цели можно использовать томографический подход [Kunitsyn et al., 2013], но его применение затруднительно в регионах с малым числом станций, а в режиме времени, близкого к реальному, в настоящее время возможно, по-видимому, только в США и Европе. Для такой задачи могут использоваться методы коррекции ионосферных моделей [Maltseva, 2018], но требуется выявить ограничения подобных подходов. В работах ИРЭ РАН предложен подход, основанный на решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода [Смирнов, 2007; Смирнов и Смирнова, 2017], но накладывающий ограничения на точность исходных измерений ПЭС.

Для территории Российской Федерации, где объем данных ГНСС, находящихся в открытом доступе, крайне невелик, важной научной задачей является возможность геофизического (ионосферного) обеспечения радиотехнических средств с использованием одного приемника ГНСС или малого числа удаленных друг от друга приемников.

Ключевые фундаментальные задачи настоящей диссертации состоят в разработке новых методов получения абсолютного полного электронного содержания на основе данных отдельного навигационного приемника и оценке возможностей получения параметров радиоканала на основе таких данных.

Целью работы является разработка новых методов дистанционного мониторинга ионосферы в интересах коррекции ионосферной ошибки радиотехнических средств на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем, таких как ГЛОНАСС и GPS, с использованием локальных измерений на отдельном приемнике.

Основные решаемые задачи:

1. Разработка метода получения абсолютных ионосферных параметров (наклонное/вертикальное ПЭС, производные ПЭС по времени и пространству) на основе данных отдельных приемников ГЛОНАСС/GPS.

2. Реализация получения физически корректных оценок абсолютного ПЭС, не допускающих появления отрицательных значений.

3. Разработка методологии использования одночастотной аппаратуры ГЛОНАСС/GPS для получения абсолютных ионосферных параметров.

4. Анализ особенностей использования приемников ГНСС для получения абсолютных ионосферных параметров, в том числе для задач мониторинга радиоканала.

5. Проведение экспериментов по использованию данных абсолютного ПЭС для коррекции различных ионосферных моделей.

6. Анализ устойчивости работы ГНСС в интересах оценки ПЭС и текущих трендов развития ГЛОНАСС и GPS.

Используемые методы научного исследования:

В качестве основных методов использовалась методология ГНСС-зондирования, разработанная в ИСЗФ СО РАН под руководством проф. Э.Л. Афраймовича. Основным измеряемым параметром в ГНСС является *относительное наклонное ПЭС* — измерения полного электронного содержания вдоль луча спутник – приемник: в двухчастотном случае — на основе комбинации фазовых или групповых измерений на двух частотах, а в одночастотном случае — на основе фазово-групповой комбинации. *Абсолютное наклонное ПЭС* – это наклонное ПЭС с устраненными неоднозначностями измерений. *Вертикальное ПЭС* — оценка ПЭС вдоль луча приемник – спутник для спутника, находящегося в зените (угол места 90°), полученная в том или ином приближении. В настоящей работе рассматривается только абсолютное вертикальное ПЭС, так как все неоднозначности устраняются одновременно с оценкой значений.

Для получения абсолютных оценок использовалось разложение в ряд Тейлора поля ПЭС в регионе станции с учетом модели измерений с оценкой параметров на основе метода наименьших квадратов, а также его модифицированной версии, позволяющей получать неотрицательное решение. Для моделирования использовалась, в основном, международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere). В разделе развития методов оперативного прогноза использованы технологии машинного обучения, в том числе градиентный бустинг, случайный лес, метод опорных векторов. Для анализа качества работы навигационных приемников использован классический статистический анализ.

Научная новизна заключается в разработке новых методов определения абсолютного ионосферного полного электронного содержания. В диссертации:

1. Разработан метод, позволяющий по данным одного приемника ГНСС получить абсолютное ПЭС. Новизна заключается в возможности получения неотрицательных (физически корректных) значений вертикального ПЭС как в двухчастотном, так и в одночастотном режимах измерений, а также получение производных ПЭС по времени и пространству. В режиме двухчастотных измерений неотрицательное абсолютное ПЭС может быть получено не только для вертикальных лучей, но также и для всех наклонных лучей приемник – спутник.

2. Впервые для оперативного прогноза регионального абсолютного ПЭС использованы методы машинного обучения (градиентный бустинг, случайный лес и метод опорных векторов).

3. Создана новая система для дистанционного мониторинга ионосферного абсолютного ПЭС и его производных по времени и пространству, который базируется на основе разработанного в диссертации метода.

4. Впервые сформулированы методологические достоинства и недостатки использования отдельных приемников ГНСС для задач коррекции ионосферной ошибки радиотехнических систем.

5. Выявлено повышение в условиях экстремальных явлений в околоземном космическом пространстве стабильности измерений ГНСС и модернизации спутниковой группировки.

Практическая ценность работы состоит в создании нового метода и системы мониторинга, которые могут быть использованы как для проведения фундаментальных научных исследований в интересах отечественных и международных организаций и ведомств, так и для решения практических задач повышения точности и надежности работы систем навигации, радиолокации и связи. Результаты внедрялись в рамках работы оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН, и использовались при выполнении базового задания Института и следующих грантов и НИР, в которых автор являлся руководителем:

1. Грант для аспирантов и молодых сотрудников Иркутского государственного университета 2008 г. Проект «Адаптивная радиоастрономия». 2008 г.

2. Грант Президента РФ МК-2194.2011.5. «Сравнительное исследование особенностей функционирования систем ГЛОНАСС и GPS в условиях ионосферной возмущенности». 2011–2012 гг.

3. Проект №8699 «Исследование ионосферных возмущений на основе данных наземных приемников GPS и ГЛОНАСС». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. 2012–2013 гг.

4. Грант РФФИ № 12-05-33032_мол_а_вед «Исследование особенностей динамического режима ионосферы над территорией Сибири с использованием навигационных систем GPS и ГЛОНАСС». 2012–2013 гг.

5. Грант президента РФ МК-3771.2013.5. «Исследования регулярной и нерегулярной структуры ионосферы в Сибирском регионе с использованием данных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS». 2013–2014 гг.

6. Грант РФФИ 15-05-03946. «Исследование статистических и динамических характеристик мелкомасштабных неоднородностей ионосферы по данным экспериментального комплекса ИСЗФ СО РАН». 2015–2017 гг.

7. Грант Российского научного фонда №17-77-20005. «Создание системы сбора, обработки и машинного анализа больших объемов данных глобальных навигационных спутниковых систем для задач исследования околоземного космического пространства». 2017–2020 гг.

8. Грант Российского фонда фундаментальных исследований №18-35-20038, конкурса 2018 года на лучшие научные проекты, выполняемые ведущими молодежными коллективами («Стабильность»), «Разработка глобальных эмпирических моделей регулярной динамики и возмущенности ионосферы и плазмосферы». 2018–2020 гг.

или исполнителем:

1. Опытнo-конструкторская работа «Разработка технических предложений на создание аппаратно-программного комплекса и технологии для идентификации ионосферных возмущений с использованием сигналов GPS и ГЛОНАСС». 2008–2010 гг.

2. Проект 2010-1.1-123-085 «Диагностика естественных неоднородных сред акустическими и радиофизическими методами на базе комплекса уникальных инструментов ИСЗФ СО РАН и ИрГУ». ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (мероприятие 1.1 — XIII очередь). 2010–2012 гг.

3. Грант президента РФ МК-3094.2010.5. «Исследование среднеширотных ионосферно-магнитосферных возмущений, влияющих на функционирование спутниковых радионавигационных систем». 2010–2011 гг.

4. Проект № 8388 «Развитие новых методов диагностики околоземного космического пространства и создание кластера учебно-методических стендов

на базе комплекса уникальных инструментов ИСЗФ СО РАН и ИГУ». Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы. 2012–2013 гг.

5. Грант РФФИ 14-37-00027 «Разработка научно-технических основ мониторинга атмосферно-ионосферно-магнитосферного взаимодействия в Арктической зоне с территории Российской Федерации». 2014–2016 гг.

Достоверность полученных результатов определяется использованием физически и математически обоснованных предположений, современных методов анализа, проверкой экспериментальных данных, согласием с результатами, полученными ранее другими авторами.

Личный вклад автора

Задачи, поставленные и выполненные в диссертации, решены автором лично или при его определяющем участии. Автором разработан метод оценки абсолютных ионосферных параметров по одночастотным и двухчастотным измерениям глобальных навигационных спутниковых систем. Программные средства и алгоритмы для оценки абсолютного ПЭС реализованы А.А. Мыльниковой и А.М. Весниным под руководством автора и при его участии. Автор принимал непосредственное участие в работах по использованию данных абсолютного ПЭС для коррекции моделей ионосферы в тесном сотрудничестве с коллегами из ИЗМИРАН, НИИДАР, ПГТУ и ИСЗФ СО РАН с определяющим участием автора в части получения абсолютных измерений ПЭС. Работы по ионосферной коррекции радиотехнических систем на основе данных ГНСС и влиянию ионосферы на параметры радиосигналов были начаты совместно с проф. Э.Л. Афраймовичем (и под его руководством) в 2006–2009 гг., и развиты после его безвременного ухода автором. Методологическая проработка вопросов использования приемников ГНСС, представленная в диссертации, выполнена автором лично. Реализация модели машинного обучения для прогноза ПЭС осуществлена А.В. Жуковым под непосредственным руководством автора и его участии в работе и постановке задачи. В части представленных в диссертации результатов по анализу сбоев навигационных параметров во время гелиогеофизических возмущений автором проводились обработка экспериментальных данных и анализ результатов, а интерпретация в большинстве работ выполнялась совместно с В.В. Демьяновым, Э.И. Астафьевой и В.И. Захаровым.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: семинары ИСЗФ СО РАН, а также кафедры физики атмосферы МГУ; Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике (2007, 2011, 2013, 2017); Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2007, 2013, 2017); EGU General Assembly (2007, 2008, 2017); Chinese-Russian Workshop on Space Weather (2007, 2009, 2012, 2013); Международная конференция «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений» (2007, 2016, 2020); International Beacon Satellite Symposium (2007, 2019); IRI/COST 296 Workshop (2007); CESRA Workshop on “Solar Radio Physics and the Flare-CME Relationship” (2007); Всероссийская астрономическая конференция (2007); Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 40-летию запуска на орбиту навигационного КА «Космос-192» и 25-летию запуска первого КА «ГЛОНАСС» (2007); Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2010, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020); Всероссийская конференция «Распространение радиоволн» (2008, 2014, 2016, 2019); XXIX URSI General Assembly (2008); Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика», посвященная 50-летию создания ИСЗФ СО РАН (2010); COSPAR Scientific Assembly (2012); Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (2012, 2018); Конференция молодых ученых посвященная дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2012, 2013); 2-я Международная научно-техническая конференция, посвященная 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «ГЛОНАСС» (2012); The 20th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics (2013); International Living With a Star Workshop (2013); The Tenth European Space Weather Week. (2013); The 2nd Asia-Oceania Space Weather Alliance Workshop (2013); AOGS Annual Meeting (2014, 2016); URSI Atlantic Radio Science Meeting (2015, 2018); Progress in Electromagnetics Research Symposium (2015, 2017); Annual Seminar “Physics of auroral phenomena” (2015, 2017); International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY. (2016, 2018); IAG/CPGPS International Conference on GNSS+: Advances, Opportunities and Challenges (2016); Международная молодежная научно-практическая конференция «Россия – Монголия» (2016); The Second VarSITI General Symposium (2017); V Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО-2017» (2017); Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (2018); 10th China Satellite Navigation Conference (2019).

Положения выносимые на защиту:

1. Разработан метод получения абсолютного наклонного и вертикального полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, а также пространственных и временных производных вертикального ПЭС на основе данных одного приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Отличительными особенностями метода являются: обеспечение заведомо неотрицательных (физически корректных) величин ПЭС (в двухчастотном режиме для наклонного и вертикального абсолютного ПЭС, а в одночастотном режиме – вертикального абсолютного ПЭС), возможность работы как в одночастотном, так и в двухчастотном режимах, получение наряду с самим значением абсолютного вертикального ПЭС информации о его производных по времени и пространству.

2. Предложено использование машинного обучения для оперативного прогноза регионального абсолютного вертикального ПЭС на основе параметров, получаемых с помощью разработанного в диссертации метода, а также индексов солнечной и геомагнитной активности. Для Сибирского региона показано, что для четырех часового горизонта прогноза возможно достижение среднеквадратичного отклонения ~ 3.5 TECU в условиях умеренной солнечной активности.

3. На основе разработанного метода создана система дистанционного мониторинга ионосферного абсолютного полного электронного содержания с применением приемников ГНСС сети SibNet ИСЗФ СО РАН.

4. На основе экспериментальных наблюдений и численных расчетов показано, что с использованием данных абсолютного ПЭС может быть скорректирована ионосферная ошибка в радиотехнических системах, в особенности использующих ультракоротковолновые сигналы. В частности, может быть скорректировано значительное искажение профиля линейно поляризованного радиосигнала при распространении сигнала в ионосфере.

5. Экспериментально доказано повышение стабильности измерений ГНСС в неблагоприятных гелиогеофизических условиях, вследствие совершенствования оборудования ГНСС, что позволяет использовать эти измерения для регулярной диагностики среды и коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах, использующих ионосферный радиоканал. Показано, что на современном этапе развития, сбои измерения фазы и псевдозадержки навигационного сигнала не превышают нескольких процентов, в том числе и в возмущенных условиях, и значительно сокращаются по мере модернизации оборудования спутниковой группировки.

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 38 работах, включая 2 монографии, 1 главу в коллективной монографии, 27 статей, включенных в список ВАК или в международные реферативные базы Scopus и Web of Science (в том числе 6 статей в журналах, входящих в первый квартиль Q1 по одной из баз WoS или Scopus по состоянию на 11.11.2022); получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из 300 страниц, включая Введение, 5 глав основного текста, Заключение, 83 рисунка и 9 таблиц, список литературы из 331 наименования.

Краткое содержание диссертации

Во Введении кратко сформулирована актуальность проблемы оценки абсолютного полного электронного содержания, указаны цель и задачи научного исследования, его новизна и практическая значимость, методы, позволяющие решить поставленные задачи, а также краткое содержание диссертации. Представлены также основные защищаемые положения, сведения об апробации работы и публикациях по теме исследования.

В Главе 1 даны общие сведения о влиянии ионосферы на радиотехнические системы и параметры радиосигнала. В частности, рассматривается влияние состояния ионосферы на системы радиолокации, радионавигации и радиосвязи, а также на астрономические наблюдения. **Раздел 1.2** посвящен современному состоянию вопроса использования ГНСС для оценки полного электронного содержания и устойчивости функционирования навигационных систем, которая определяет возможность мониторинга в возмущенных условиях. В разделе представлены сведения о расчете неабсолютного ПЭС на основе двухчастотных и одночастотных измерений и проблематика получения абсолютного ПЭС.

Расчет неабсолютного ПЭС на основе двухчастотных и одночастотных измерений в ГНСС-зондировании осуществляется на основе фазовых и групповых измерений:

$$I_P = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + c\Delta t + \sigma P] \quad (1)$$

$$I_\varphi = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + \sigma L] \quad (2)$$

$$I_{P\varphi} = \frac{1}{2 \cdot 40.308} \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_1 - L_1 \lambda_1) + PK + \sigma LP] \quad (3)$$

где f_1, f_2 — рабочие частоты ГНСС, Гц; P_1, P_2 — измерения псевдодальности на первой и второй частоте, м; $L_1\lambda_1, L_2\lambda_2$ — измерения фазового пути на первой и второй частоте, м; L_1, L_2 — число оборотов фазы на рабочих частотах; λ_1, λ_2 — длины волн, м; K, PK — постоянные величины, определяемые неоднозначностью измерения фазы и задержки сигнала в аппаратуре, м; $\sigma P, \sigma L, \sigma LP$ — шумовые погрешности, обусловленные шумами измерений группового и фазового пути, м; Δt — дифференциальная кодовая задержка (ДКЗ), обусловленная различным временем распространения сигнала различных частот в радиотрактах спутника и приемника, с; c — скорость света в вакууме, м/с.

На рис. 1, *a* показана динамика ПЭС полученного с использованием выражений (1)–(3). Можно видеть высокий уровень шумов групповых измерений P1P2, полученных с использованием закрытого кода P(Y) на второй частоте GPS, а также появление нефизичных отрицательных значений ПЭС. Панель б демонстрирует отличие динамики ПЭС от типичной: при уменьшении угла места не происходит увеличения ПЭС.

В разделе 1.2.2 рассматривается проблема оценки абсолютного ПЭС и ДКЗ. Отмечается, что альтернативная методика IONOLAB [Arıkan et al., 2007] отбрасывает 14–30% измерений в связи с появлением отрицательных значений ПЭС, (на основе данных пяти станций ALRT, IRKJ, LPAL, NTUS, THU2), а методика SEEMALA-TEC [Seemala, 2012] требует на вход данные о ДКЗ и характеризуется артефактами обработки (вариациями ПЭС вследствие геометрии спутников).

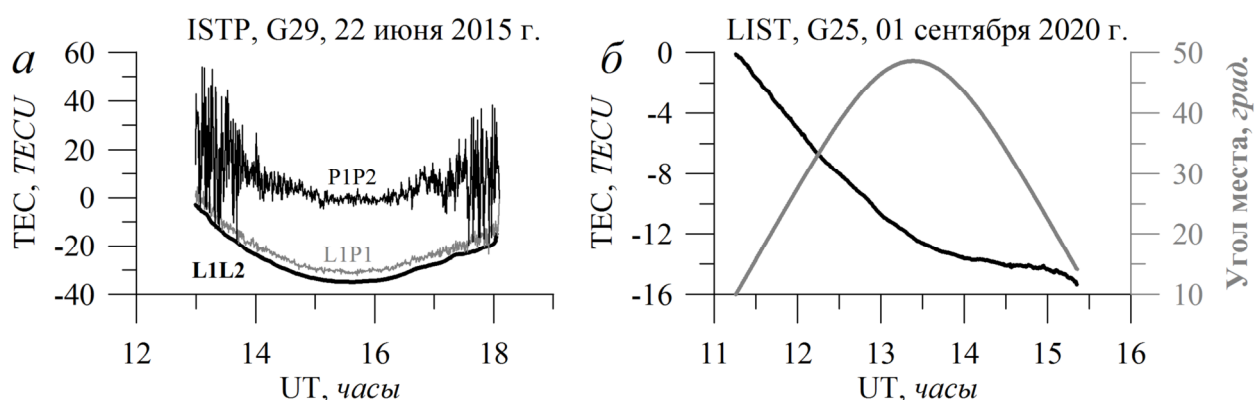


Рисунок 1. Динамика наклонного ПЭС. *a* – ПЭС за 22 июня 2015 г. на станции ISTR, полученное по двухчастотной комбинации L1L2 (нижняя черная кривая), одночастотной комбинации L1P1 (средняя серая кривая) и двухчастотной комбинации P1P2 (верхняя черная кривая); *б* – ПЭС за 1 сентября 2020 г. на станции LIST по двухчастотной комбинации L1L2 (черная кривая) и угол места спутника (серая кривая). Станции входят в сеть SibNet ИСЗФ СО РАН.

Глава 2 является основным разделом диссертации. В ней описывается метод оценки абсолютного ПЭС, который в дальнейшем может использоваться для решения практических задач (рис. 2). В настоящем диссертационном исследовании разработан метод получения абсолютного ПЭС по двухчастотным и одночастотным измерениям на отдельном приемнике сигналов ГНСС.

В основе разработанного метода лежат следующие предположения:

1. Существует возможность выполнения преобразования наклонного ПЭС в вертикальное.

2. Дифференциальные кодовые задержки не меняются в течение некоторого достаточно длительного времени, а неоднозначность измерения фазы достаточно долго не меняется при наблюдении спутника.

3. Характер вариаций ДКЗ значительно отличается от характера изменения ПЭС.

В **разделе 2.1** описан разработанный метод оценки абсолютных ионосферных параметров на основе двухчастотных и одночастотных данных (схема дана на рис. 3).

Указанные приближения позволяют записать модель измерений наклонного ПЭС в виде:

$$I_M = S_j^i I_V(\phi, l, t) + I_{B,j} + b \cdot UT \quad (4)$$

где I_V — это пространственно-временное поле распределения вертикального полного электронного содержания, S_j^i — функция преобразования вертикального ПЭС в наклонное, $I_{B,j}$ — ошибка ПЭС, определяемая неоднозначностями измерений (задержками/ДКЗ и/или неоднозначностью фазы), b — коэффициент, связанный с уходом часов приемника, UT — время в часах. Индексы i и j соответствуют моменту времени и номеру ряда исходного наклонного ПЭС, на котором $I_{B,j}$ не меняется.

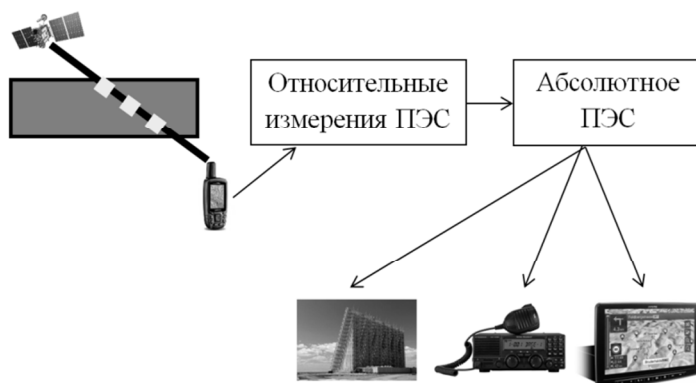


Рисунок 2. Блок-схема использования измерений ГНСС для прикладных задач.

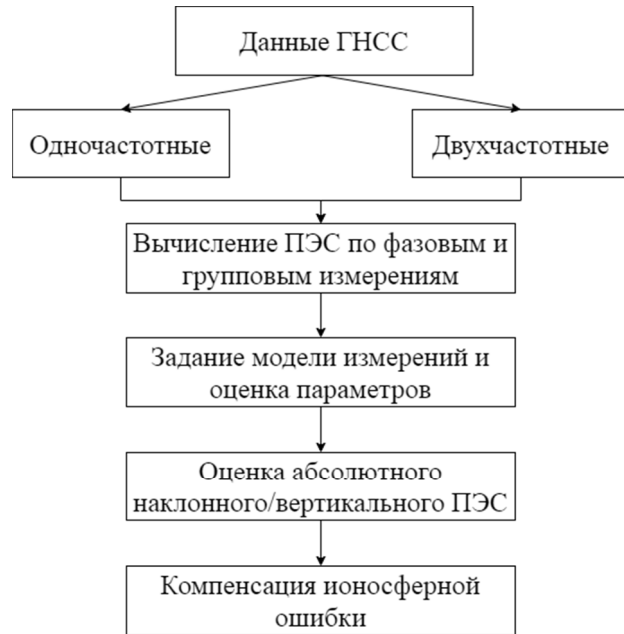


Рисунок 3. Схема оценки ионосферных параметров.

Если используются приемники геодезического класса, имеющие стабильные часы, последним слагаемым в (4) можно пренебречь, что было сделано в настоящем диссертационном исследовании.

Для преобразования вертикального ПЭС в наклонное в настоящей работе использовались формула тонкого сферического слоя и ее модификация MSLM (modified single layer model) [Schaer, 1999] для расчета глобальных ионосферных карт CODE:

$$S_j^i = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin[\alpha(90 - \theta_j^i)] \right) \right\} \right]^{-1} \quad (5)$$

где R_E — радиус Земли; h_{\max} — эффективный параметр, эквивалентный высоте тонкого сферического слоя; α — корректирующий фактор; θ_j^i — угол возвышения спутника. В MSLM h_{\max} и α могут выбираться различным образом. Как показывает моделирование, параметры $\alpha=0.97$, $h_{\max}=450$ км или $\alpha=0.9782$, $h_{\max}=506.7$ км, $R_E=6371$ км дают хорошие результаты [Schaer, 1999].

Следующий необходимый шаг — разложение поля ПЭС по некоторому базису. В диссертационном исследовании для этого был выбран Тейлоровский базис, так как именно такое разложение должно лучше описывать локальные измерения. Используя разложение в ряд Тейлора в точке расположения станции (ϕ_0, l_0, t_0) , можно записать:

$$I_V(\phi, l, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} D_{mnk} \frac{\partial^{m+n+k} I_V}{\partial \phi^m \partial l^n \partial t^k} \Big|_{\phi_0, l_0, t_0},$$

$$D_{mnk} = \frac{1}{m!n!k!} (\Delta\phi)^m (\Delta l)^n (\Delta t)^k. \quad (6)$$

Для получения адекватных оценок вертикального ПЭС и его первых производных по времени и пространству достаточно ограничиться вторым порядком разложения без учета смешанных производных:

$$I_M = S_j^i \left[I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta \phi_j^i + G_{\phi\phi} (\Delta \phi_j^i)^2 + G_l \Delta l_j^i + G_{ll} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{tt} (\Delta t_j^i)^2 \right] + I_{B,j} + b \cdot UT, \quad (7)$$

$$\text{где } G_\phi = \left. \frac{\partial I_V}{\partial \phi} \right|_{\phi_0, l_0, t_0}, \quad G_l = \left. \frac{\partial I_V}{\partial l} \right|_{\phi_0, l_0, t_0}, \quad G_t = \left. \frac{\partial I_V}{\partial t} \right|_{\phi_0, l_0, t_0}, \quad G_{\phi\phi} = \left. \frac{\partial^2 I_V}{\partial \phi^2} \right|_{\phi_0, l_0, t_0}, \\ G_{ll} = \left. \frac{\partial^2 I_V}{\partial l^2} \right|_{\phi_0, l_0, t_0}, \quad G_{tt} = \left. \frac{\partial^2 I_V}{\partial t^2} \right|_{\phi_0, l_0, t_0}.$$

Имея набор экспериментальных измерений ПЭС, полученных в некоторые i -е моменты времени для j -го ряда на котором $I_{B,j}$ не меняется, $I_{Exp i}^j$ для любых k произвольных интересующих нас моментов времени t^k можно записать следующий функционал:

$$U^k = \sum_{j=1}^{N^k} \sum_{i=1}^{N_j^k} \omega_i^{k,j} (I_{M i}^j - I_{Exp i}^j)^2 \quad (8)$$

где I_{Exp} — экспериментальные измерения наклонного ПЭС; j — номер ряда исходного наклонного ПЭС, на котором $I_{B,j}$ не меняется, $\omega_i^{k,j}$ — статистические веса для каждого измерения.

$$\omega_i^{k,j} \equiv \omega^k(t_j^i) = \theta(t^k - t_j^i + \Delta t) \theta(t_j^i + \Delta t - t^k) \frac{1}{S_j^i} \left[1 + \left(\frac{\Delta t_j^{i,k}}{\Delta t} \right)^2 \right]^{-1} \quad (9)$$

где $\Delta t_j^{i,k}$ — разница по времени между текущим измерением и временем, для которого производится расчет t^k ; t_j^i — i -ый момент времени измерения ПЭС на j -м исходном ряду наклонного ПЭС в котором $I_{B,j}$ не меняется; $\Delta t=1$ ч (максимальная разница по времени, при которой данные еще используются для оценки текущих ионосферных параметров); θ — функция Хэвисайда.

Особенности минимизации функционала (8) и получения неотрицательного ПЭС на лучах спутник—приемник приведены в **разделе 2.1.1**. Большинство результатов в работе получено на основе классического метода наименьших квадратов (МНК).

Классический МНК обладает рядом недостатков, основной из которых — возможность получения физически некорректных решений (появление отрицательных значений вертикального или наклонного ПЭС). В диссертации предложено использовать метод наименьших квадратов с ограничениями на параметры [Start and Parker, 1995].

Для получения ограничений на параметры в диссертации использовались следующие соображения: а) оценки вертикального ПЭС I_V должны быть заведомо неотрицательные, б) при низких шумах измерений оценки всех наклонных измерений должны быть неотрицательные. В диссертационной работе предложено поднять этот порог выше нуля и получать значения не выше нуля, а выше заданного наперед значения a (в работе использовано 0.5 TECU). Для вертикального ПЭС это позволило записать следующее условие:

$$I_V(t^k) > a, \forall t^k \quad (10)$$

Для обеспечения неотрицательности наклонного абсолютного ПЭС после коррекции на константы неоднозначности ограничение записано следующим образом:

$$I_{B,j} < \min(I_{Exp_i}^j) - a \quad (11)$$

Ограничение (11) имеет смысл использовать только в условиях низких шумов измерений, так как высокий уровень шума даже на одном луче спутник—приемник может значительно сместить все решение в силу жесткого ограничения.

Для расчетов, использующих МНК с ограничениями, использовалась реализация алгоритма [Start and Parker, 1995]. Общая схема с использованием классического МНК была названа TayAbsTEC (Taylor-based absolute TEC), с использованием МНК с ограничениями – TuRBOTEC (Taylor-series and Bounded-variable-least-squares based iOnosphere TEC).

Разделы 2.1.2 и 2.1.3 содержат алгоритм и экспериментальные результаты вычисления абсолютного ПЭС для двухчастотных и одночастотных данных.

Для двухчастотных измерений алгоритм имеет следующий вид:

1. Вычисление ПЭС по групповым I_p и фазовым I_ϕ измерениям по формулам (1), (2).

2. Разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы.

3. Коррекция непрерывных рядов с целью устранения срывов сопровождения фазы и сбоев (выбросов) измерения псевдозадержки [Blewitt, 1990].

4. Устранение фазовой неоднозначности на основе групповых измерений (leveling) с целью снижения количества констант неоднозначности. С учетом увеличения шумов измерений на низких углах места определение константы K для j -го непрерывного интервала в (2) ведется по формуле:

$$K^j = \frac{\sum_{i=1}^{N^j} \frac{1}{S_i^j} (I_p^j - I_\phi^j)_i}{\sum_{i=1}^{N^j} \frac{1}{S_i^j}}, \text{ где } N^j \text{ — число измерений для } j\text{-го непрерывного интервала.}$$

После проведения вычислений индекс j можно поставить в соответствие номеру спутника, а оставшаяся систематическая ошибка расче-

та ПЭС определяется исключительно дифференциальными кодовыми задержками этого спутника (2).

5. Определение ошибки, связанной с ДКЗ, а также остальных параметров модели в соответствии с выбранным порядком разложения с использованием выбранного метода МНК.

6. Корректировка наклонных рядов ПЭС, полученных после процедуры устранения фазовой неоднозначности (“leveling”) с учетом полученных ДКЗ:
 $I_{\varphi} \rightarrow I_{\varphi} - K^j$.

Пример рассчитанного вертикального ПЭС и его производных по времени и по долготе на основе МНК с ограничениями в сравнении с данными глобальных ионосферных карт GIM CODG и JPLG представлен на рис. 4. Красные линии — результаты, полученные по двухчастотным GPS/ГЛОНАСС-измерениям на станции IRKJ, синие линии — по данным JPLG, черные линии — по данным CODG. Результаты, полученные на основе данных сети станций, и полученные на основе данных отдельной станции показывают хорошее согласие.

Качество оценки наклонного ПЭС можно видеть на рис. 5, где приведены ряды наклонного абсолютного ПЭС, полученного по данным ГЛОНАСС. Для расчетов использовались данные GPS/ГЛОНАСС-измерений на станции IRKJ 11 апреля 2012 г. Оценка ПЭС получена при использовании ДКЗ, определенных на основе разработанного метода (панель а), и ДКЗ CODE (панель б). Серые кривые — исходные ряды, черные — скорректированные, жирная серая линия — вертикальное ПЭС.

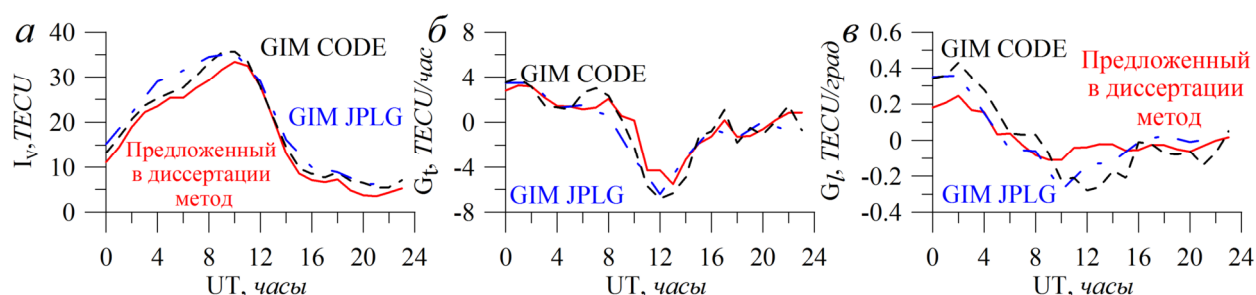


Рисунок 4. Абсолютное вертикальное ПЭС (а), производные ПЭС по времени (б) и по долготе (в) полученные по данным GPS/ГЛОНАСС на станции IRKJ (красные линии) на основе разработанного в диссертации метода в сравнении с данными JPLG (синие кривые) и CODE (черные кривые) 17 марта 2015 г. ($K_{Pmax} = 7.7$).

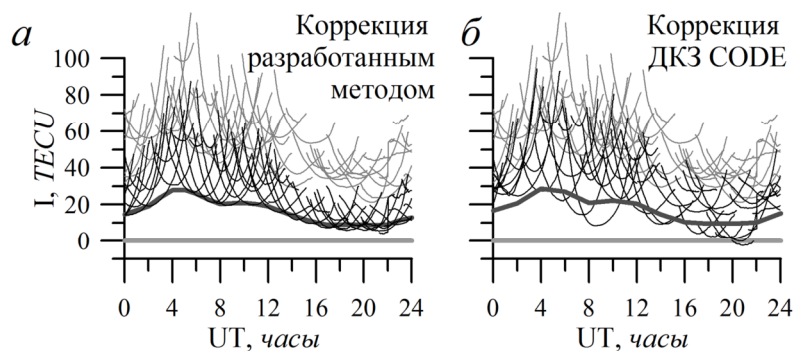


Рисунок 5. Наклонное ПЭС для спутников ГЛОНАСС без корректировки на ДКЗ (серые кривые) и с корректировкой на ДКЗ (черные кривые): *а* — ДКЗ по данным представленного алгоритма, *б* — ДКЗ по данным CODE. Жирная кривая — абсолютное вертикальное ПЭС, полученное по соответствующим методикам. Данные на основе измерений IRKJ 11 апреля 2012 г.

При корректной оценке наклонного абсолютного ПЭС минимумы отдельных рядов ПЭС должны находиться в области значений вертикального ПЭС. Кроме того, должны отсутствовать отрицательные значения. Для рассматриваемого примера результаты, полученные на основе разработанного метода, удовлетворяют означенному условию и демонстрируют лучшее согласие, чем при использовании ДКЗ CODE.

Чтобы сравнить, насколько сильно будут различаться результаты классического МНК и МНК с ограничениями были проведены расчеты для полного 2014 года. Экспериментальные данные получены на основе измерений приемника IRKJ. Дополнительно проводилось сравнение с альтернативными методами: SEEMALA-TEC [Seemala, 2012], Madrigal-TEC [Rideout, Coster, 2006], IONOLAB-TEC [Arikan et al., 2007] и глобальные ионосферные карты CODG и JPLG.

Рисунок 6 показывает гистограммы распределений разностей абсолютных вертикальных ПЭС: *а* — GIM CODE (CODG) vs. TuRBOTEC; *б* — Madrigal-TEC vs TuRBOTEC; *в* — IONOLAB-TEC vs TuRBOTEC; *г* — SEEMALA-TEC vs TuRBOTEC; *д* — карт GIM JPL vs CODE. Можно видеть, что распределение, показывающее разность для глобальных ионосферных карт GIM двух типов, имеет вид схожий с распределением CODE-TuRBOTEC или IONOLAB-TuRBOTEC. Среднеквадратическое отклонение составляет 1.5, 1.7, 2.1 TECU, соответственно. В то же время, имеет место значительное среднеквадратическое отклонение (СКО) в данных SEEMALA-TEC и Madrigal по отношению к результатам TuRBOTEC. В этом случае СКО составляет 10-12 TECU. Панель *е* показывает влияние ограничений (10),

(11) на оценку вертикального ПЭС: $\sim 9\%$ значений ПЭС при использовании ограничений более чем на 1 TECU превышают аналогичную оценку без использования ограничений.

Для одночастотных данных схема расчетов аналогичная.

1. Вычисление ПЭС по одночастотной комбинации $I_{P\phi}$ (3).
2. Коррекция рядов с целью устранения срывов сопровождения фазы и сбоев (выбросов) измерения псевдозадержки [Blewitt, 1990].
3. Разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы, на которых $I_{B,j}$ не меняется.

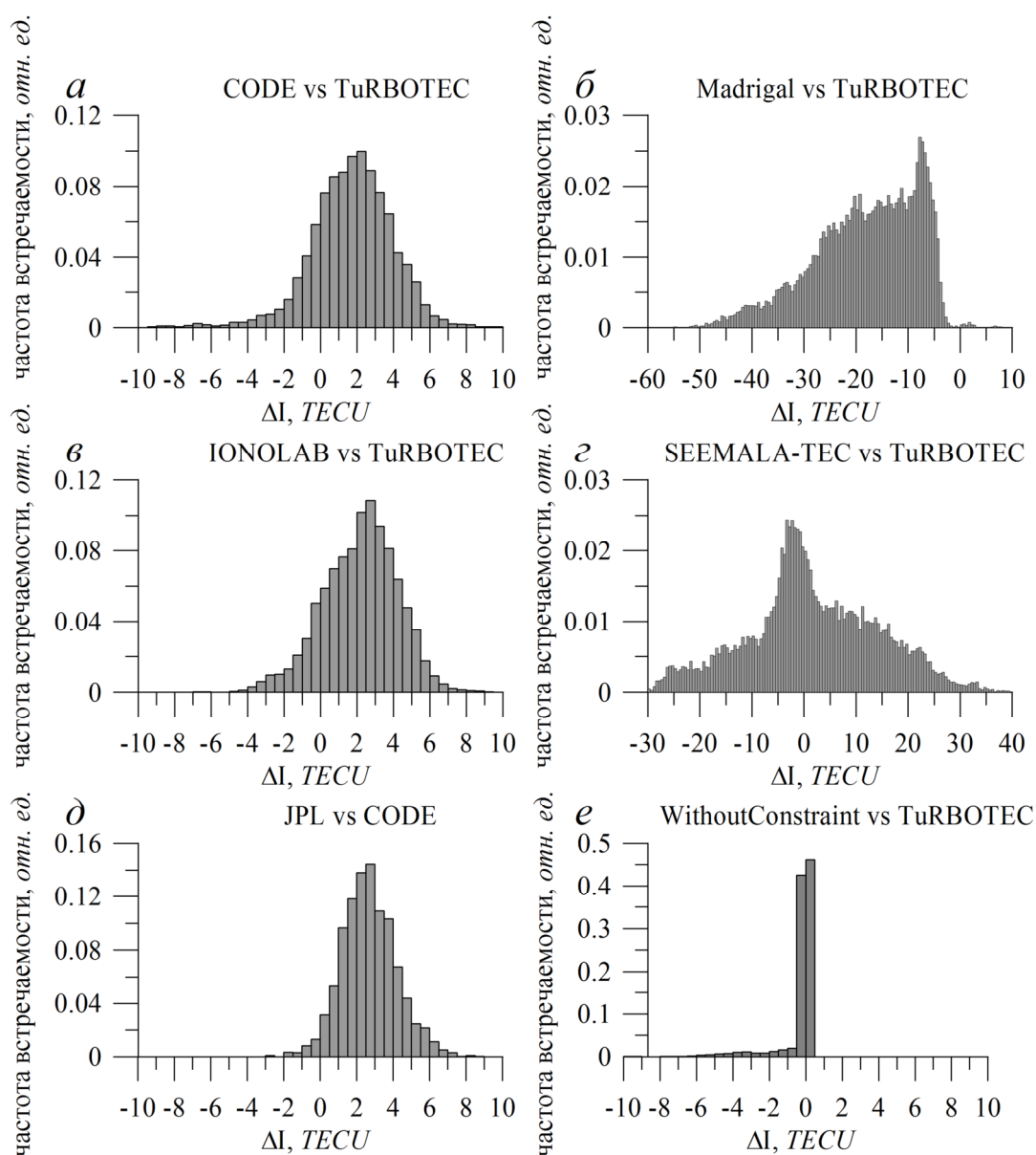


Рисунок 6. Сравнение вертикального ПЭС: полученного на основе разработанного автором метода с данными CODE (а), Madrigal-TEC (б), IONOLAB-TEC (в), SEEMALA-TEC (г); глобальных ионосферных карт JPL и CODE между собой (д); решений, получаемых без ограничения и с ограничением (е).

4. Определение неизвестных составляющих $I_{B,j}$ и b (при необходимости учета ухода часов), а также коэффициентов модели измерений в соответствии с выбранным порядком разложения.

5. Корректировка наклонных рядов ПЭС, получаемых после п. (2): $I_{P\phi} \rightarrow I_{P\phi} - I_{B,j} - b \cdot UT$. Последнее слагаемое учитывается в случае низкой стабильности опорного генератора.

На рис. 7 показаны результаты работы в двух режимах (одночастотном и двухчастотном) в сравнении с данными ПЭС из глобальных ионосферных карт GIM лаборатории CODE. Разрешение по времени составляет 1 ч для данных, полученных для одной станции, и 2 ч — для данных GIM. Имеет место хорошая согласованность динамики вертикального ПЭС, полученного различными методами. При этом наблюдается как качественное, так и количественное совпадение. Данные за 20 мая 2014 г. (рис. 7, б) на станции NRC1 (45.5° N, 104.4° W) показывают более значительное расхождение (более 2 TECU) чем за 20 мая 2009 г (рис. 7, а).

Для оценки возможных ошибок был проведен анализ распределения отклонений абсолютного ПЭС, получаемых по двухчастотным и одночастотным измерениям. Для этой цели на основе данных IRKJ (52.2° N, 104.3° E) и NRC1 для 2009 г. (минимум солнечной активности) и 2014 г. (максимум солнечной активности) были рассчитаны ряды абсолютного вертикального ПЭС с временным разрешением 1 ч. Расчет осуществлялся в одночастотном и двухчастотном режимах. Гистограммы распределений разности ПЭС в одночастотном и двухчастотном режимах показаны на рис. 8: а — NRC1, б — IRKJ. Гистограммы нормированы на общее число измерений N_{total} .

Для станции NRC1 распределение имеет систематическую составляющую ~ 0.5 TECU и разброс с СКО ~ 1.5 TECU для низкой солнечной активности, и ~ -0.5 TECU и ~ 3.5 TECU — для высокой.

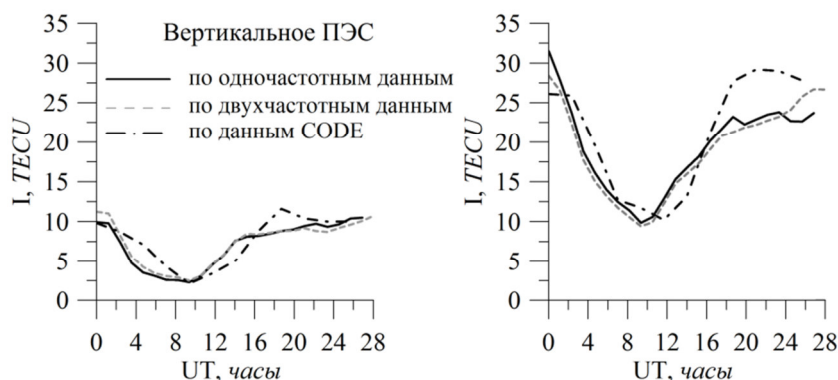


Рисунок 7. Суточная динамика абсолютного ПЭС над станцией NRC1 (45.5° N, 104.4° W) 20 мая 2009 г. (а) и 20 мая 2014 г. (б).

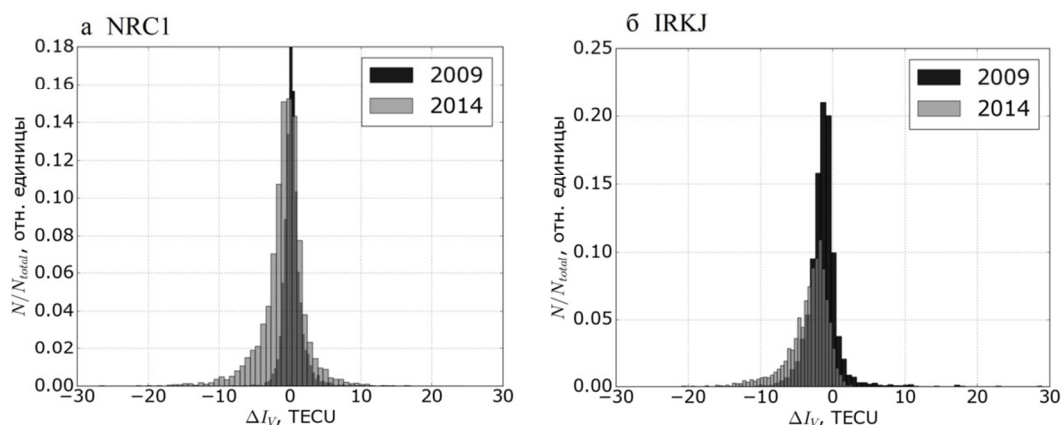


Рисунок 8. Гистограммы распределений разности значений вертикального абсолютного ПЭС, полученных по одночастотным и двухчастотным измерениям, на станциях NRC1 (а) и IRKJ (б) для 2009 г. и 2014 г.

Для станции IRKJ эти значения выше: систематическая составляющая ~ 1.5 TECU и СКО $\sim 2.5\text{--}3$ TECU. Эти ошибки (отклонения) по порядку величины соответствуют систематическим и случайным отклонениям между данными карт GIM разных лабораторий. В связи с этим полученные отклонения могут считаться приемлемыми.

Работоспособность разработанного в диссертационном исследовании метода была проверена в условиях нерегулярных интенсивных возмущений: при геомагнитной возмущенности и в высокоширотном регионе. Если для средних широт общая динамика ПЭС восстанавливается хорошо, то для высокоширотного региона качество работы метода при использовании одночастотных данных несколько хуже. Тем не менее, она дает приемлемые результаты.

Раздел 2.2 содержит результаты независимого применения разработанного метода другими авторами. Результаты подтверждают применимость получаемого абсолютного ПЭС для геофизических исследований и работоспособность метода при использовании сторонними пользователями.

Раздел 2.3 посвящен возможностям использования машинного обучения для оперативного прогноза ПЭС на основе данных получаемых в результате разработанного метода, а также индексов солнечной и геомагнитной активности. В качестве входных данных модели с четырехчасовым горизонтом прогноза использовались данные абсолютного вертикального ПЭС, а также первой и второй производных по времени G_t , G_{tt} . Данные получены на основе разработанного метода с использованием двухчастотных фазовых измерений на среднеширотной станции IRKJ, за 2014 г. В качестве входных параметров использовался индекс солнечной активности F10.7 и индексы геомагнитной активности AE и SYM/H. В качестве апрок-

симаторов рассматривались метод случайного леса (СЛ), градиентный бустинг над деревьями решений (ГБДР), метод опорных векторов (МОВ). В табл. 1 приведены значения среднеквадратичного отклонения (СКО) и средней абсолютной ошибки (САО). Также указаны ошибки для двух простейших моделей: N1 — ПЭС со временем не изменяется, N2 — ПЭС изменяется линейно в соответствии с производной G_t . Методы машинного обучения показывают высокий потенциал для создания моделей оперативного прогноза абсолютного вертикального ПЭС.

В **Главе 3** представлена система дистанционного мониторинга ионосферного абсолютного ПЭС (MITIGATOR). Система основана на оборудовании сети SibNet ИСЗФ СО РАН. Глава содержит информацию об аппаратной и информационной схемах комплекса, геометрии зондирования. Комплекс реализован с использованием приемника Javad Delta-G3T (протокол обмена данными – GREIS), антенны Javad GrAnt-G3T и компьютера LENOVO ThinkCentre Tiny M630e с процессором Intel® Core™ i5 и оперативной памятью 8 Гб DDR4. Схема созданного в рамках диссертационного исследования комплекса показана на рис. 9.

Важные характеристики работоспособности комплекса – время выхода на решение и время сохранения рабочего режима (рис. 10). Проведенная оценка этих параметров составляет 8 ч. для используемого оборудования.

Глава 4 посвящена возможностям применения абсолютного ПЭС, получаемого на основе методов, рассмотренных в Главе 2, для коррекции ионосферной ошибки.

Раздел 4.1 содержит методологическое рассмотрение вопроса о проблемах и перспективах использования ГНСС для мониторинга радиоканала. Среди особенностей инструмента обсуждаются: большое число измерений; стабильность измерений; пассивность измерений; малая потребляемая мощность; отсутствие влияния поглощения; проблемы оценки абсолютных значений; интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала, таких как влияние формы профиля, градиентов и плазмосферы; невозможность учета слоев E, Es, D.

Таблица 1. СКО и средняя абсолютная ошибка различных моделей для горизонта прогноза 4 ч. Значения даны в единицах TECU.

	СЛ	ГБДР	МОВ	N1	N2	ЛР
СКО	3.49	3.30	4.49	9.14	16.51	4.61
САО	2.49	2.35	3.50	6.74	12.23	3.66

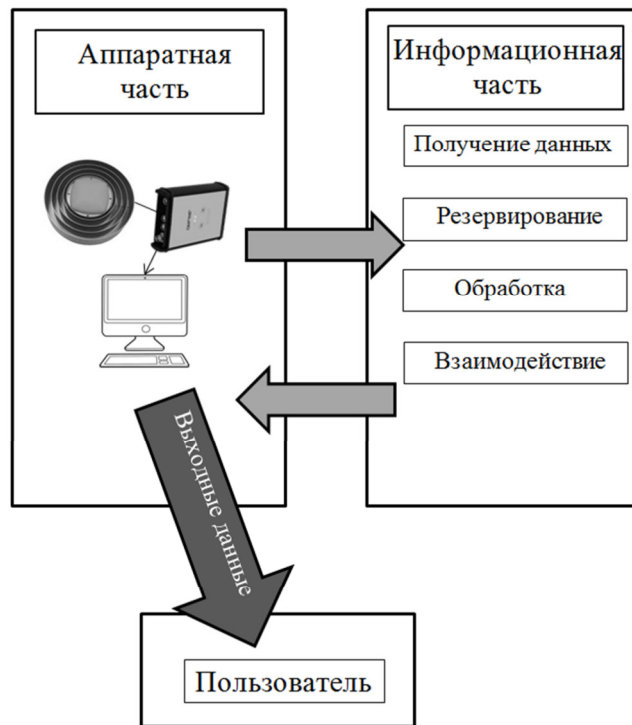


Рисунок 9. Схема комплекса мониторинга ионосферного полного электронного содержания MITIGATOR.

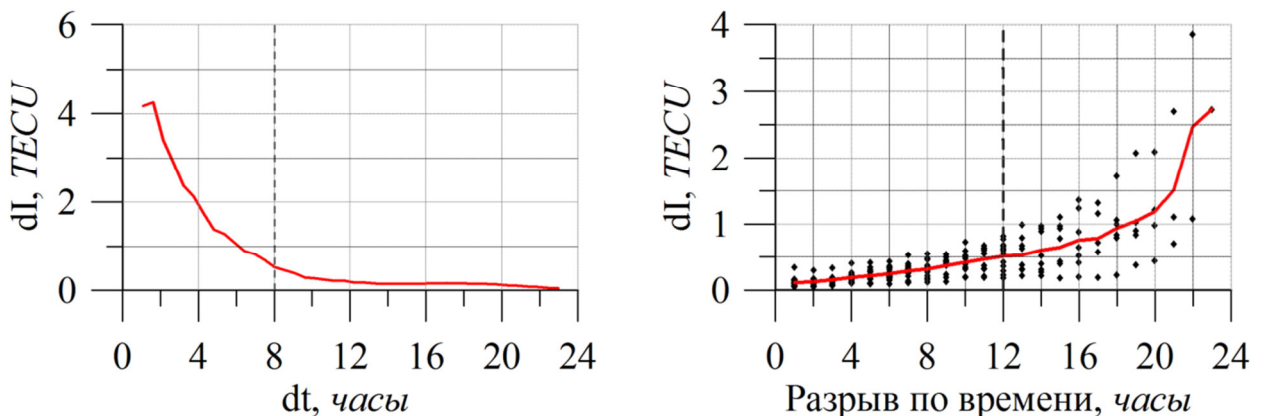


Рисунок 10. Ошибка определения ПЭС при различном времени относительно первого старта приемника (слева) и ошибка определения ПЭС при различном времени пропадания данных (справа).

Рисунок 11 демонстрирует возможную проблему при экстраполяции данных из области наблюдения спутниками ГНСС (слева, высокие значения электронной концентрации) в удаленную область (определяющий вклад вносит область отражения радиосигнала, траектория которого показана серой линией). Можно видеть, что область зондирования и область определяющая распространение сигнала (область отражения), принципиально различаются по уровню электронной концентрации и наличию неоднородностей.

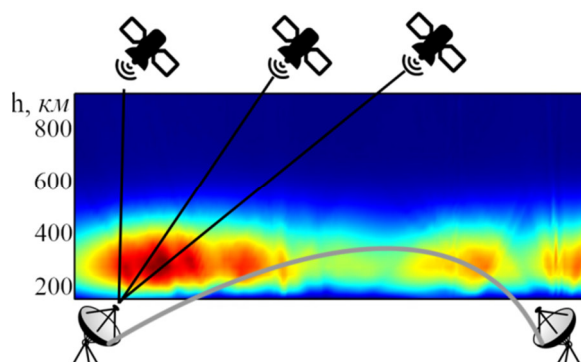


Рисунок 11. Геометрия зондирования ионосферы приемником ГНСС при наличии ионосферных градиентов и неоднородностей. В качестве подложки использована 2D-реконструкция ионосферы из работы [Kunitsyn et al., 2013]. Серая линия — условная траектория распространения сигнала.

Раздел 4.2 посвящен методическому обобщению подходов к коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах.

В разделах 4.3 и 4.4 представлены примеры использования абсолютного ПЭС для оценки критической частоты f_oF2 и МПЧ. На рисунке 12 показана динамика максимально применимой частоты для трех трасс наклонного зондирования (НЗ). Черными точками отмечены данные ручной обработки ионограмм НЗ, серыми — оценки МПЧ, полученные на основе измерений ГНСС. Рисунок показывает высокий уровень корреляции результатов ручной обработки и оценки МПЧ для всех трех трасс. Отсутствие измерений на трассах наклонного зондирования связано с поглощением на трассах. Оценка МПЧ на основе сигналов ГНСС, которые не испытывают поглощения, может не передать реальной картины, так как КВ-сигнал будет полностью поглощаться.

Раздел 4.5 посвящен анализу возможностей использования абсолютного ПЭС для коррекции радиоастрономических наблюдений. Воздействие ионосферы на сигналы линейной поляризации вследствие фарадеевского вращения может приводить к существенному искажению профиля регистрируемого сигнала. Рисунок 13 показывает результаты коррекции искажений профиля радиоизлучения Солнца, обусловленных фарадеевским. Коррекция осуществлялась для европейской станции Ithomi (антенна линейной поляризации) на основе данных абсолютного ПЭС. Черная жирная линия — данные Artemis-IV (антенна круговой поляризации), тонкие линии — аппроксимированный профиль, серые толстая и пунктирная линии — данные Ithomi до и после коррекции. В результате коррекции максимум амплитуды профиля для станции Ithomi приближается к истинному профилю, регистрируемому антенной круговой поляризации на станции Artemis-IV.

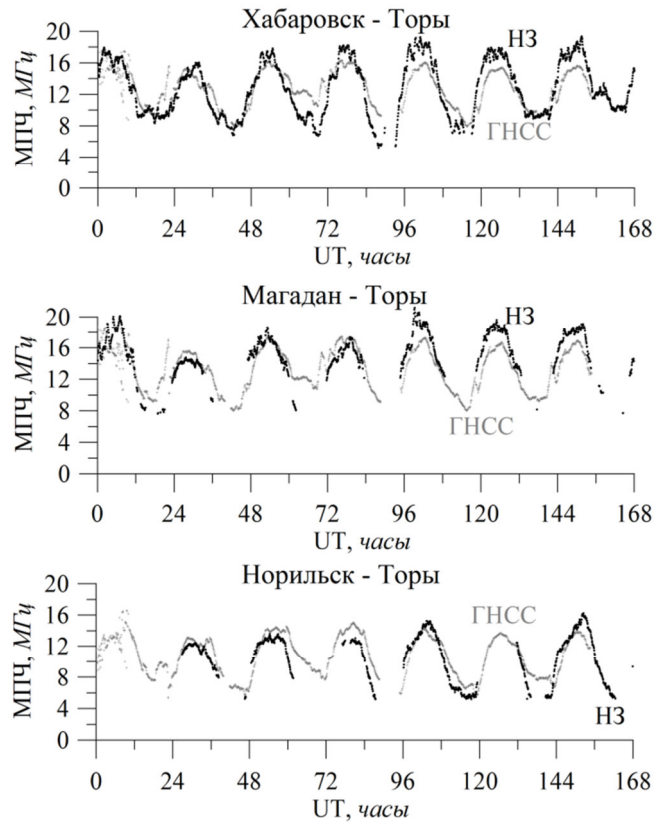


Рисунок 12. Максимально применимая частота на трассах Хабаровск — Торы, Магадан — Торы, Норильск — Торы. Черные точки — данные ионограмм наклонного зондирования (ручная обработка), серые точки — оценки МПЧ, полученные на основе ПЭС по данным ГНСС.

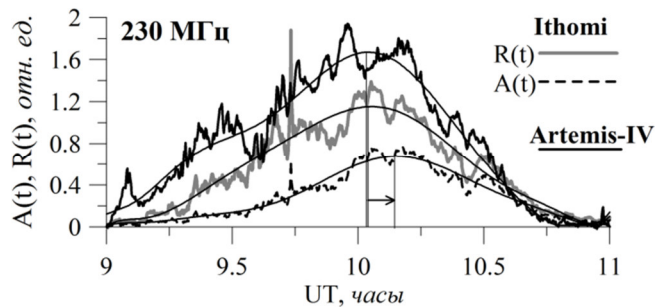


Рисунок 13. Коррекция профиля солнечного радиоизлучения, зарегистрированного на станции Ithomi (черная штриховая линия — до коррекции, серая линия — после коррекции по данным ПЭС), в сравнении с данными специализированного солнечного спектрографа Artemis-IV (черная толстая линия). Черными тонкими линиями показаны аппроксимирующие профили.

Заключительная **Глава 5** посвящена исследованию стабильности работы ГНСС как инструмента зондирования ионосферы в различных условиях. Проводится анализ срывов фазы и сбоев ПЭС в 23-м и 24-м циклах солнечной активности (5.1) и отдельное рассмотрение высокоширотного региона (5.2).

Для анализа устойчивости навигационных систем в 24-м цикле солнечной активности, в диссертационном исследовании были рассчитаны срывы сопровождения фазы на частотах L1, L2, L5(L3), а также пропуски в данных приемников ГНСС для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, SBAS для магнитных бурь 17 марта 2015 г. и 22 июня 2015 г. (рис. 14).

Коррелированного с динамикой бури увеличения числа сбоев сопровождения фазы относительно фонового уровня не отмечается. Это противоречит более ранним работам, проводившимся для бурь 23-го цикла солнечной активности. Таким образом, стабильность системы в 24-м цикле становится выше, что позволяет использовать разработанный в диссертационном исследовании метод для регулярного мониторинга.

Основной акцент в главе 5 сделан на анализ повышения стабильности работы вследствие модернизации навигационных систем (5.3). Для этого в работе проведен анализ изменения мощности сигнала и устойчивости GPS в условиях воздействия солнечных вспышек. Анализировались данные мощности принимаемого сигнала S для двух вспышек на отдельной станции: радиовспышки 24 сентября 2011 г. (экстремальный класс) и 6 сентября 2017 г. (опасный класс).

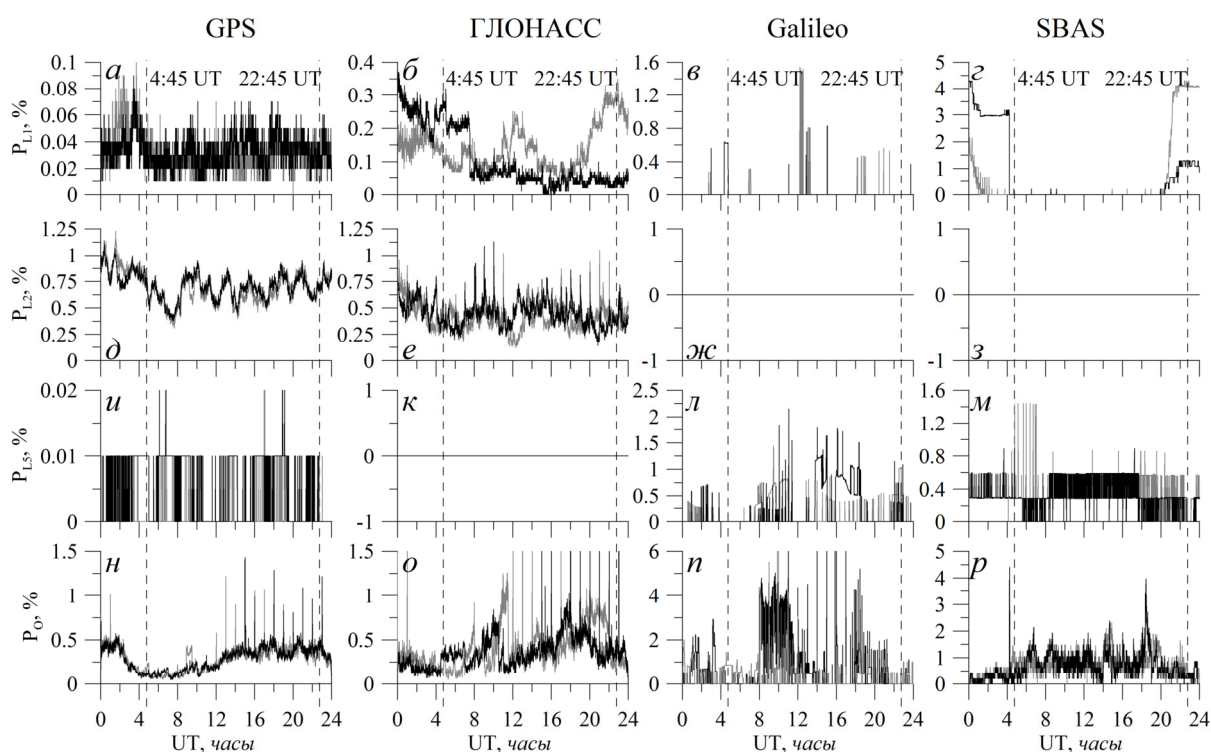


Рисунок 14. Сбои сопровождения фазы сигнала GPS (a, δ, u, n), ГЛОНАСС ($б, e, к, o$), Galileo ($в, ж, л, п$), SBAS ($г, з, м, р$) во время магнитной бури 17 марта 2015 г. (черная кривая) и контрольного дня 16 марта 2015 г. (серая кривая). Панели $a-g$ — сбои фазы L1, $\delta-z$ — сбои фазы L2, $u-m$ — сбои фазы L5, $n-p$ — отсутствие приема любых сигналов.

Использовались измерения сигнал/шум S1C (по открытому коду C/A на частоте L1) и S2W (при полуководной обработке закрытого сигнала P(Y) на частоте L2), которые могут быть получены как для «старых» (IIA/IIР-A), так и для «новых» (IIР-M/IIF) спутников GPS, а также S2X (новый открытый код L2C) и S5X (открытый код на частоте L5). Радиовспышка 24 сентября 2011 г. сопровождалась понижением мощности принимаемого сигнала как на частоте L1, так и на частоте L2 (рис. 15). На частоте L1 принимаемая мощность для обоих спутников практически совпадает, а на частоте L2 мощность сигнала для блока IIA существенно меньше. В максимуме вспышки мощность принимаемого сигнала L2 блока IIA падает ниже 20 дБ-Гц, в то время как для модернизированного блока IIР-M минимальные значения на ~ 5 дБ-Гц выше.

В ходе диссертационного исследования показано, что при смене блоков GPS на более современные, в приемном оборудовании регистрируется повышение мощности сигнала на вспомогательной частоте GPS L2 на 3–4.5 дБ-Гц. Еще большее повышение мощности принимаемого сигнала на частоте L2 (до 20 дБ-Гц) достигается при использовании нового открытого кода L2C (S2X) по сравнению с закрытым кодом P(Y) (S2W).

Анализ плотности сбоев сопровождения фазы сигнала (рис. 16) подтверждает увеличения стабильности GPS во время солнечных радиовспышек. Для исследования плотности сбоев использовались данные мировой сети приемников, а в расчет включались только те измерения, для которых зенитный угол Солнца был меньше 60°, угол места спутников превышал 10°.

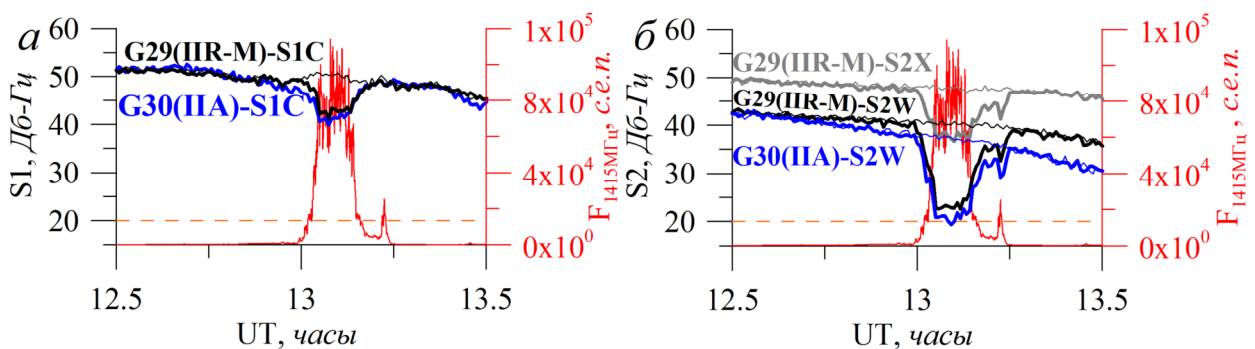


Рисунок 15. Динамика солнечного радиоизлучения на частоте 1415 МГц по данным радиоспектрографа Sagamore Hill (красная кривая) во время радиовспышки 24 сентября 2011 г. и мощности принимаемого сигнала GPS (жирные линии) на частотах L1 (а) и L2 (б) станцией ZIM2: синяя кривая — S1C и S2W для спутника PRN30 (IIA); черная кривая — S1C и S2W, серая кривая — S2X для PRN29 (IIР-M). Тонкие линии — мощности соответствующих сигналов в предыдущий день (23 сентября). Пунктир — 20 дБ-Гц.

На рис. 16 показана динамика плотности сбоев сопровождения фазы сигнала на частотах L1 (черный цвет) и L2 (синий цвет) для радиовспышек 24 сентября 2011 г. (слева) и 6 сентября 2017 г. (справа). Верхние панели — динамика сбоев для модернизированных спутников (ИР-М, ИФ), нижние — для «старых» спутников (ИА, ИР-А, ИР-В). Серые кривые — соответствующие распределения плотности сбоев за предыдущие (спокойные) дни.

Для спутников всех типов во время вспышек плотность сбоев на частоте L2 значительно выше, чем на частоте L1. В обоих случаях в динамике сбоев регистрируются резкие пики по сравнению с уровнем сбоев в спокойные дни. Эти пики совпадают по времени с максимумами радиовспышек (вертикальные штриховые линии). Можно констатировать ухудшение качества работы системы во время экстремальной радиовспышки, однако увеличение мощности сигналов на модернизированных спутниках привело к повышению устойчивости сервиса относительно подобных угроз космической погоды.

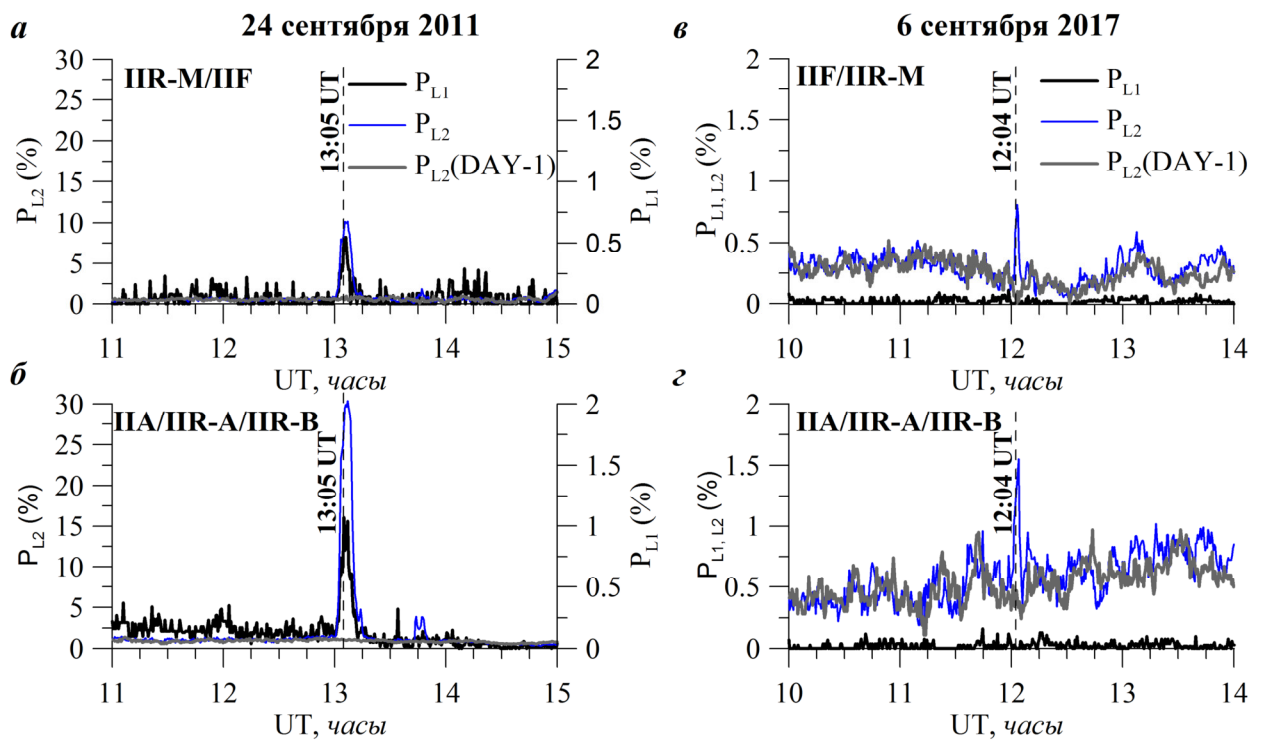


Рисунок 16. Динамика средней плотности сбоев сопровождения фазы на частотах $L1$ (черная кривая) и $L2$ (синяя кривая) в подсолнечной области во время солнечных радиовспышек 24 сентября 2011 г. (слева) и 6 сентября 2017 г. (справа) для модернизированных (вверху) и старых (внизу) спутников. Серые линии — плотность сбоев L2 в контрольные дни. Вертикальные штриховые линии — моменты максимума радиовспышек.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Разработан новый метод получения абсолютного наклонного и вертикального полного электронного содержания ионосферы на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS и ГЛОНАСС, по измерениям на одной приемной станции. Отличительной особенностью метода является возможность получения заведомо неотрицательного абсолютного ПЭС в двухчастотном и одночастотном режимах: в двухчастотном режиме — наклонного и вертикального ПЭС, в одночастотном режиме — вертикального ПЭС. Получено, что при оценке вертикального ПЭС использование ограничений на неотрицательность ПЭС приводит к коррекции более чем на 1 TECU ~9 % измерений.

2. Анализ распределений отклонений ПЭС, получаемого по данным глобальных ионосферных карт, альтернативного метода IONOLAB, и разработанного в диссертационном исследовании метода на годовом объеме данных для средних широт в Сибирском регионе показал, что разработанный метод характеризуется малым СКО относительно данных глобальных карт. СКО соответствует величине СКО распределения отклонений ПЭС между данными глобальных карт различных лабораторий: СКО карт CODE и JPLG составило 1.5 TECU, карт CODE и разработанного в настоящей работе метода — 1.7 TECU, метода IONOLAB и метода, разработанного в настоящей работе — 2.1 TECU. Анализ выявил существенные недостатки метода Seemala, а также широко используемой технологии ионосферных карт Madrigal (MIT) в регионах с малым числом станций (например, Сибири).

3. Создана система мониторинга ионосферы на основе оборудования сети SibNet ИСЗФ СО РАН. Система характеризуется возможностью работы с данными GPS/ГЛОНАСС/Galileo и может в настоящее время быть развернута на любых двухчастотных приемниках JAVAD, использующих интерфейсный протокол GREIS. Комплекс характеризуется хорошей геометрией, охватывающей практически все азимутальные направления. Проведенная оценка времени выхода на решения и времени сохранения рабочего режима дает величину 8 ч для используемого оборудования.

4. Проведена работа по систематизации методов коррекции ионосферной ошибки радиотехнических систем на основе глобальных навигационных спутниковых систем, а также особенностей и перспектив использования ГНСС для таких задач. Выделены следующие три основных метода коррекции: использование измерений на отдельных лучах спутник — приемник; корректировка глобальной/региональной ионосферной модели по обобщенному параметру с использованием отдельных лучей спутник — приемник; корректировка гло-

бальной ионосферной модели по локальным параметрам на основе полученных с использованием ГНСС вертикального ПЭС и его пространственных градиентов. Указаны недостатки и преимущества данных методов. Среди принципиальных положительных сторон использования ГНСС для задач коррекции ионосферных ошибок отмечены большое число и стабильность измерений ГНСС (в том числе работоспособность в возмущенных условиях), а также в некоторых случаях пассивность измерений и малая потребляемая мощность; среди отрицательных сторон – отсутствие влияния поглощения, проблемы оценки абсолютных значений, интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала (влияние формы профиля, градиентов, плазмосферы), невозможность учета E, Es, D.

5. Предложена схема оперативного прогноза вертикального ПЭС на основе методов интеллектуального анализа данных. Для средних широт Сибирского региона на основе тестирующей выборки за 2017 г., полученной на основе разработанного в диссертационном исследовании метода, показано, что методы интеллектуального анализа данных позволяют достичь СКО на уровне ~ 3.5 TECU на 4-х часовом горизонте, линейная регрессия на оптимальные параметры — ~ 4.5 TECU, простая модель неизменной ионосферы или линейного изменения ПЭС — ~ 9 – 17 TECU.

6. Проведен ряд экспериментальных работ по использованию абсолютно полного электронного содержания для решения задач распространения радиоволн в ионосфере Земли. Данные экспериментальных наблюдений и моделирования показали, что на основе данных абсолютного ПЭС можно скорректировать значительное искажение профиля линейно поляризованного. При адаптации ионосферных моделей абсолютное ПЭС позволяет улучшить корреляцию оцениваемой критической частоты по сравнению с данными долгосрочного прогноза, а оценки МПЧ возможны как на среднеширотных, так и на высокоширотных наклонных трассах.

7. Проведен анализ сбоев измерения радиофизических параметров навигационного сигнала в 23-м и 24-м циклах солнечной активности. Анализ показал, что сбои не превышают нескольких процентов, в том числе и в возмущенных условиях, а уровень сбоев значительно сократился по мере модернизации приемного и передающего оборудования. Уровень срывов сопровождения фазы на вспомогательной частоте L2 GPS непосредственно в подсолнечной области во время опасных и экстремальных солнечных радиовспышек значительно (в 1.5–3 раза) сократился после увеличения мощности излучаемого сигнала на новых спутниках. Таким образом, использование ГНСС для ионосферной коррекции возможно как в спокойных, так и в возмущенных условиях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов:

Статьи в журналах Q1 по Web of Science или Scopus (по состоянию на 11.11.2022):

1. Yasyukevich, Y.V. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts / Yu.V. Yasyukevich, A.S. Yasyukevich, E.I. Astafyeva // GPS Solutions. – 2021. V. 25. – 46.

2. Yasyukevich, Y. 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 / Y. Yasyukevich, A. Mylnikova, A. Vesnin // Sensors. – 2020. – V. 20, N 19. – 5702.

3. Kotova, D. S. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes / D. S. Kotova, V. B. Ovodenko, Y. V. Yasyukevich, M. V. Klimenko, K. G. Ratovsky, A. A. Mylnikova et al. // GPS Solutions. – 2020. – V. 24. – 25.

4. Yasyukevich, Y. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation / Y. Yasyukevich, E. Astafyeva, A. Padokhin, V. Ivanova, S. Syrovatskii, A. Podlesnyi // Space Weather. – 2018. – V. 16. – P. 1013–1027.

5. Zhukov, A. Machine learning methodology for ionosphere total electron content nowcasting / A. Zhukov, D. Sidorov, A. Mylnikova, Y. Yasyukevich // International Journal of Artificial Intelligence. – 2018a. – V. 16, N 1. – P. 144–157.

6. Astafyeva, E. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems / E. Astafyeva, Y. Yasyukevich, A. Maksikov, I. Zhivetiev // Space Weather. – 2014. – V. 12, N 7. – P. 508–525.

Статьи в журналах из списка ВАК или иные работы, индексируемые системами Web of Science или Scopus:

7. Yasyukevich, Y.V. MITIGATOR: GNSS-based system for remote sensing of ionospheric absolute total electron content / Y. V. Yasyukevich, A. M. Vesnin, A. V. Kiselev, A. A. Mylnikova, A. V. Oinats, V. A. Ivanova, V. V. Demyanov // Universe. – 2022. – V. 8, N 2. – 98.

8. Ясюкевич, Ю. В. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство коррекции ионосферной ошибки радиотехнических средств: проблемы и перспективы / Ю. В. Ясюкевич, А. М. Веснин, В. И. Куркин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 195-209.

9. Oinats, A. Updating Ionosphere Models Using Ionosonde and GNSS Data for HF Propagation Simulation / A. Oinats, Yu. Yasyukevich, A. Vesnin, A.

Mylnikova, O. Berngardt, A. Taschilin. // IEEE Xplore: 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia. – 2019. – P. 59–62.

10. Zhukov, A. Random Forest, Support Vector Regression and Gradient Boosting Methods for Ionosphere Total Electron Content Nowcasting Problem at Mid-Latitudes / A. Zhukov, D. Sidorov, A. Mylnikova, Y. Yasyukevich // 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC), Gran Canaria, Spain. – 2018. – P. 1–3.

11. Жуков, А. В. Поиск ключевых управляющих параметров для оперативного прогноза полного электронного содержания ионосферы / А. В. Жуков, Д. Н. Сидоров, А. А. Мыльникова, Ю. В. Ясюкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 263–272.

12. Котова, Д. С. Коррекция эмпирических ионосферных моделей IRI-Plas и NeQuick в высокоширотном регионе с использованием данных отдаленных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / Д. С. Котова, В. Б. Оводенко, Ю. В. Ясюкевич, М. В. Клименко, А. А. Мыльникова, А. Е. Козловский, А. А. Гусаков // Химическая физика. – 2018. – Т. 37, № 7. – С. 87–92. – DOI:10.1134/S0207401X18070129.

13. Mylnikova, A. A. Determining the absolute total electron content from the single-frequency GPS/GLONASS data / A. A. Mylnikova, Yu. V. Yasyukevich, V. B. Ivanov // Proc. SPIE. – 2017. – V. 10466. – 104667I.

14. Mylnikova, A. A. Estimating the absolute total electron content from the single-frequency GPS/GLONASS data / A. A. Mylnikova, Y. V. Yasyukevich, V. B. Ivanov, A. S. Yasyukevich // Proceeding of Progress in Electromagnetics Research Symposium. – 2017. – P. 3036–3040.

15. Ясюкевич, Ю. В. Определение абсолютного полного электронного содержания по одночастотным спутниковым радионавигационным данным GPS/ГЛОНАСС / Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В. Б. Иванов // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т. 3, № 1. – С. 97–103. – DOI:10.12737/23509.

16. Ясюкевич, Ю. В. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ясюкевич, И. В. Живетьев, А. С. Ясюкевич, С. В. Воейков, В. И. Захаров, Н. П. Перевалова, Н. Н. Титков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 1. – С. 88–98.

17. Захаров, В. И. Влияние магнитных бурь и суббурь на сбои навигационной системы GPS в высоких широтах / В. И. Захаров, Ю. В. Ясюкевич, М. А. Титова // Космические исследования. – 2016. – Т. 54, № 1. – С. 23–33.

18. Mylnikova, A. A. Variability of GPS/GLONASS differential code biases / A. A. Mylnikova, Yu. V. Yasyukevich, V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin // Results in Physics. – 2015. – V. 5. – P. 9–10.

19. Yasyukevich, Yu. V. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data / Yu. V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, A. S. Polyakova // Results in Physics. – 2015. – V. 5. – P. 32-33.

20. Yasyukevich, Yu. V. Estimating the absolute total electron content, spatial gradients and time derivative from the GNSS data / Yu. V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, A. S. Polyakova // Proceedings of AT-RASC URSI – 2015. – G12-4.

21. Yasyukevich, Yu. V. Systematic changing and variations of GPS/GLONASS differential code biases / Yu. V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin // Proceedings of AT-RASC URSI – 2015. – G12-5.

22. Yasyukevich, Yu. V. Estimation of GPS/GLONASS Differential Code Biases and Their Long-time Variations / Yu. V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, V. E. Kunitsyn, A. M. Padokhin // PIERS Proceedings, July 6-9, Prague. – 2015. – P. 2548–2552.

23. Ясюкевич, Ю. В. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы / Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В. Е. Куницын, А. М. Падохин // Геомагнетизм и аэрномия. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 790–796.

24. Afraimovich, E. L. New field of application of the IRI modeling – Determination of ionosphere transfer characteristic for radio astronomical signals / E. L. Afraimovich, Yu. V. Yasukevich // Advances in Space Research. – 2009. – V. 43. – P. 1652–1659.

25. Afraimovich, E. L. Using GPS-GLONASS-GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers / E. L. Afraimovich, Yu. V. Yasukevich // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2008. – V. 70, N 15. – P. 1949–1962.

26. Афраймович, Э. Л. Адаптивная радиоастрономия / Э. Л. Афраймович, Г. Я. Смольков, Ю. В. Ясюкевич // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419, № 5. – С. 618–623.

27. Афраймович, Э. Л. Фарадеевская амплитудная модуляция радиоастрономических сигналов в ионосфере. I - радиоизлучение Солнца / Э. Л. Афраймович, Ю. Я. Ружин, К. Номикос, Ю. В. Ясюкевич // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50, № 12. – С. 1029–1042.

Монографии и главы в коллективных монографиях:

28. Demyanov, V. Space Weather Impact on GNSS Performance / V. Demyanov, Yu. Yasyukevich, M. Sergeeva, A. Vesnin. – 1st ed. – Springer International Publishing. – ISBN-13: 9783031158735. – 2022. – 368p.

29. Демьянов, В. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных си-

стем: монография / В. В. Демьянов, Ю. В. Ясюкевич. – Иркутск: Изд-во ИГУ. (Солнечно-земная физика). ISBN 978-5-9624-1098-2. – 2014. – 349 с.

30. Demyanov, V. V. Effects of solar radio emission and ionospheric irregularities on GPS/GLONASS performance / V. V. Demyanov, Yu.V. Yasyukevich, S. Jin // Chapter in Book “Geodetic Sciences: Observations, Modeling and Applications”, InTech – Publisher, Rijeka, Croatia. – 2012. – ISBN: 980-953-307-595-7.

Иные публикации:

31. Веснин, А. М. Возможности приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем для оперативного мониторинга радиоканала: проблемы и перспективы / А. М. Веснин, С. В. Воейков, А. В. Киселёв, Г. В. Котович, В. И. Куркин, А. А. Мыльникова, А. В. Ойнац, Л. В. Чистякова, Ю. В. Ясюкевич // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. – 2018. – Вып. 662. – С. 63–67.

32. Ясюкевич, Ю. В. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС / Ю. В. Ясюкевич, В. Б. Оводенко, А. А. Мыльникова, И. В. Живетьев, А. М. Веснин, И. К. Едемский, Д. С. Котова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2017. – Т. 34, № 2. – С. 19–31.

33. Ясюкевич, Ю. В. Глобальное распределение срывов сопровождения фазы GPS и сбоев измерения полного электронного содержания во время магнитных бурь 15 мая 2005 г. и 20 ноября 2003 г. / Ю. В. Ясюкевич, Э. И. Астафьева, И. В. Живетьев, А. П. Максиков // Солнечно-земная физика. – 2015. – Т. 1, № 4. – С. 58–64. – DOI:10.12737/13459.

34. Мыльникова, А. А. Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания в ионосфере по данным ГЛОНАСС/GPS / А. А. Мыльникова, Ю. В. Ясюкевич, В. В. Демьянов // Солнечно-земная физика. – 2014. – Вып. 24. – С. 70–77.

35. Ясюкевич, Ю. В. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 / Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В. В. Демьянов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Кислицын // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – Т. 19, № 3.

36. Ясюкевич, Ю. В. Исследование околоземного космического пространства с использованием глобальных навигационных спутниковых систем /

Ю. В. Ясюкевич, Н. П. Перевалова, В. В. Демьянов, И. К. Едемский, А. А. Маркидонова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – Т. 52, вып. 6. – С. 93–100.

37. Лебедев, В. П. Проблема коррекции ионосферной ошибки определения радиолокационной дальности с использованием информации о полном электронном содержании / В. П. Лебедев, К. Г. Ратовский, Ю. В. Ясюкевич // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: труды II Всероссийской научной конференции. – Санкт-Петербург. – 2012. – Т. 2. – С. 231–236.

38. Афраймович, Э. Л. Адаптивная радиоастрономия. I – коррекция фазового запаздывания и поворота плоскости поляризации в ионосфере по данным GPS зондирования и ионосферного моделирования / Э. Л. Афраймович, Ю. В. Ясюкевич // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 7, № 4. – С. 357–374.

Программы ЭВМ:

39. Ясюкевич, Ю.В. Программа для расчета числа сбоев сопровождения фазы навигационного сигнала ГНСС» / Ю.В. Ясюкевич, А.С. Ясюкевич // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667757. Дата регистрации: 29.12.2020. Правообладатель: Ордена трудового красного знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. – 2020.

40. Мыльникова, А. А. Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания, его пространственных и временных производных, а также дифференциальных кодовых задержек с использованием данных ГНСС / А. А. Мыльникова, Ю. В. Ясюкевич // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661849. Правообладатель: ФГБУ науки Институт солнечно-земной физики СО РАН. – 2016.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Афраймович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова // Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – 480 с.

2. Смирнов, В. М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем: диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Смирнов Владимир Михайлович. – Москва. – 2007 – 300 с.

3. Смирнов, В. М. Метод радиопросвечивания ионосферы Земли и его практическая реализация / В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова // Мат. Всеросс. науч. конф. «VII всероссийские Армандовские чтения. Сов.пробл. дист. зонд., радиолок., распротр. и дифр. волн». – 2017. – С. 129–139.
4. Шагимуратов, И. И. Абсолютные ионосферные измерения на основе GPS / И. И. Шагимуратов, Л. В. Баран, И. И. Ефишов // Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. Сборник трудов МФТИ. – 1996. – С. 111–120.
5. Arikan, F. Regularized estimation of TEC from GPS data for certain mid-latitude stations and comparison with the IRI model / F. Arikan, O. Arikan, C. B. Erol // *Advances in Space Research*. – 2007. – V. 39, N 5. – P. 867–874.
6. Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data / G. Blewitt // *Geophys. Res. Lett.* – 1990. – V. 17. – P. 483–492.
7. Hernández-Pajares, M. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. Special IGS Issue / M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orus, A. Garcia-Rigo, et al. // *J. Geod.* – 2009. – V. 83. – P. 263–275.
8. Kunitsyn, V. Ionospheric Sounding and Tomography by GNSS / V. Kunitsyn, E. Andreeva, I. Nesterov, A. Padokhin // In book *Geodetic Sciences - Observations, Modeling and Applications*, by ed. S. Jin, IntechOpen. – 2013.
9. Maltseva, O. Use of TEC to determine foF2: differences and similarities at high and low latitudes / O. Maltseva // *ICTRS '18* – 2018. – P. 65-72. DOI: 10.1145/3278161.3278172.
10. Mendillo, M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content / M. Mendillo // *Rev. Geophys.* – 2006. – V. 44. – RG4001.
11. Rideout, W. Automated GPS processing for global total electron content data / W. Rideout, A. Coster // *GPS Solutions*. – 2006. – V. 10, N 3. – P. 219–228.
12. Seemala, G. GPS-TEC analysis software / G. Seemala. – 2012. <http://seemala.blogspot.com/>.
13. Schaer, S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system: Doctoral dissertation / S. Schaer; Univ. Bern, Switzerland. – 1999.
14. Start, P. B. Bounded-Variable Least-Squares: an Algorithm and Applications / P. B. Start, R. L. Parker // *Computational Statistics*. – 1995. – V. 10. – P. 129–141.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № 712 от 07 марта 2023 г.

Объем 36 с. Тираж 250 экз.