

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**

специальность 1.3.4. Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Научный консультант:  
Доктор физико-математических наук  
Н.П. Перевалова

Иркутск – 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Список основных обозначений и сокращений . . . . .	5
Введение . . . . .	7
Глава 1. Ионосфера Земли и ее мониторинг на основе данных глобальных спутниковых навигационных систем: текущее состояние . . . . .	29
1.1. Ионосфера Земли . . . . .	29
1.1.1. Влияние ионосферы на функционирование радиолокационных систем . . . . .	32
1.1.2. Влияние ионосферы на функционирование радионавигационных систем . . . . .	36
1.1.3. Влияние ионосферы на функционирование систем радиосвязи	38
1.1.4. Влияние ионосферы на радиоастрономические наблюдения . . . . .	40
1.2. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство мониторинга ионосферы Земли: обзор состояния проблемы . . . . .	45
1.2.1. Вычисление полного электронного содержания по данным ГНСС . . . . .	50
1.2.2. Проблемы оценки абсолютных значений полного электронного содержания и дифференциальных кодовых задержек . . . . .	53
1.2.3. Необходимость регулярной оценки дифференциальных кодовых задержек . . . . .	68
1.2.4. Сбои измерения радионавигационных параметров во время эффективных гелиогеофизических событий . . . . .	72
1.3. Выводы по Главе 1 . . . . .	79
Глава 2. Оценка абсолютного полного электронного содержания ионосферы на основе данных одного приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем . . . . .	81
2.1. Оценка абсолютного ПЭС на основе данных отдельного приемника сигналов ГНСС . . . . .	83

2.1.1. Метод наименьших квадратов и метод наименьших квадратов с ограничениями . . . . .	89
2.1.2. Оценка абсолютного ПЭС на основе двухчастотных данных .	94
2.1.3. Оценка абсолютного ПЭС на основе одночастотных данных ..	101
2.2. Примеры независимого применения разработанного метода ..	112
2.3. Возможности машинного обучения для оперативного прогноза ПЭС . . . . .	120
2.4. Выводы по Главе 2 . . . . .	126
 Глава 3. Система дистанционного мониторинга ионосферного абсолютного полного электронного содержания. . . . .	129
3.1. Сибирская сеть приемников SibNet ИСЗФ СО РАН . . . . .	132
3.2. Аппаратная структура системы мониторинга. . . . .	132
3.3. Информационная структура системы мониторинга. . . . .	137
3.4. Оценка показателей работы системы. . . . .	145
3.4.1. Потребление ресурсов. . . . .	145
3.4.2. Геометрия зондирования ионосферы сигналами различных ГНСС. . . . .	147
3.4.3. Время выхода в рабочий режим. . . . .	154
3.4.4. Максимальное время отключения приемника ГНСС. . . . .	156
3.5. Выводы по Главе 3. . . . .	157
 Глава 4. Коррекция ионосферной ошибки в интересах радиотехнических систем . . . . .	159
4.1. ГНСС в интересах оперативного мониторинга радиоканала: проблемы и перспективы . . . . .	159
4.2. Схемы адаптации . . . . .	167
4.2.1. Использование измерений на отдельных лучах спутник – приемник . . . . .	169

4.2.2. Корректировка глобальной/региональной ионосферной модели по обобщенному параметру . . . . .	174
4.2.3. Корректировка ионосферной модели по локальным параметрам . . . . .	177
4.3. Восстановление критической частоты foF2 . . . . .	180
4.4. Восстановление МПЧ для наклонных трасс . . . . .	185
4.5. Воздействие ионосферы на радиоастрономические измерения и возможности использования абсолютного ПЭС для коррекции . . . . .	188
4.6. Выводы по Главе 4 . . . . .	201
 Глава 5. Стабильность работы ГНСС в различных гелиогеофизических условиях . . . . .	202
5.1. Сбои ПЭС и срывы сопровождения сигнала во время магнитных бурь . . . . .	202
5.1.1. Бури и супербури 23-го цикла солнечной активности . . . . .	202
5.1.2. Супербури 24-го цикла солнечной активности . . . . .	218
5.2. Срывы сопровождения фазы и сбои ПЭС в высоких широтах . . . . .	224
5.3. Повышение стабильности ГНСС-измерений . . . . .	228
5.3.1. Повышение порога устойчивости измерения фазы во время радиовспышек . . . . .	228
5.3.2. Повышение мощности принимаемого навигационного сигнала GPS . . . . .	233
5.3.3. Плотность срывов сопровождения фазы сигнала спутников разных поколений в периоды радиовспышек . . . . .	246
5.4. Выводы по Главе 5 . . . . .	251
 Заключение . . . . .	252
Благодарности . . . . .	255
Список литературы . . . . .	256

## **Список основных обозначений и сокращений**

ГНСС	Глобальные навигационные спутниковые системы
ГЛОНАСС	ГЛObальная Навигационная Спутниковая Система
ДКЗ (DCB)	Дифференциальные кодовые задержки (Differential Code Bias)
КВ	Короткие волны
МНК	Метод наименьших квадратов
МПЧ	Максимально применимая частота
НВО	Навигационно-временные определения
НИСЗ	Навигационный искусственный спутник Земли
ПИВ	Перемещающиеся ионосферные возмущения
ПЭС, <i>I</i>	Полное электронное содержание
РЛС	Радиолокационные системы
РТС	Радиотехнические системы
СКО	Среднеквадратичное отклонение
УКВ	Ультракороткие волны
CODE	The Center for Orbit Determination in Europe
GEMTEC	Global Empirical Model of Total Electron Content
GIM	Global Ionospheric Maps – глобальные карты полного электронного содержания

GPS	Global Positioning System
GREIS	Receiver External Interface Specification
JPL	Jet Propulsion Laboratory – Лаборатория реактивного движения, США
PPP	Precise Point Positioning
ROTI	Rate Of TEC Index
TECU	Total Electron Content Unit – единица измерения полного электронного содержания, $10^{16}$ эл/м <sup>-2</sup>
$f$	Частота сигнала
$\Omega$	Поворот плоскости поляризации
$Ne$	Электронная концентрация
$NmF2$	Электронная концентрация в максимуме F2-слоя

## **Введение**

Ионосфера Земли оказывает ключевое воздействие на распространение радиоволн, поэтому изучение состояния ионосферы является важной научно-практической задачей. 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; Afraimovich et al., 2013].

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). В частности проф. Э.Л. Афраймовичем разработана методология GPS-радиоинтерферометрии [Afraimovich et al., 1998]. В работах последних лет делается попытка декомпозиции сложной картины множественных ПИВ и

определения параметров каждой отдельной ПИВ [Yang et al., 2017]. Большой объем работ посвящен изучению ионосферных эффектов солнечных вспышек [Afraimovich, 2000]. Огромная статистика позволила выявить даже особенности их отклика в зависимости от сезона [Le et al., 2013]. Данные ГНСС позволили также обнаружить генерацию ПИВ на границе солнечной тени при движении солнечного терминатора [Afraimovich et al., 2009a] и солнечного затмения [Coster et al., 2017]. Следует отметить работы по идентификации отклика на запуски ракет [Calais and Minster, 1996; Lin et al., 2017], землетрясения [Calais and Minster, 1996; Astafyeva et al., 2013; Perevalova et al., 2013; Jin et al., 2015], взрывы метеоритов [Perevalova et al., 2015]. Активно ведутся работы по поискам предвестников землетрясений [Pulinets and Davidenko, 2014] и раннего отклика на цунами [Savastano et al., 2017]. Интересные работы проводились по изучению связи в системе атмосфера – ионосфера – магнитосфера. Так была выявлена область с повышенным уровнем вариаций ПЭС в области ~2000–3000 км во время действия тропических циклонов [Polyakova and Perevalova, 2011] и даже генерация кольцевого возмущения вокруг тайфуна [Chou et al., 2017]. Значительное внимание уделено вопросу генерации перемещающихся ионосферных возмущений во время геомагнитных возмущений [Perevalova et al., 2008].

Большой набор исследований посвящен отклику абсолютных ионосферных характеристик на геомагнитные бури [Mendillo, 2006; Lui et al., 2017; Blagoveshchensky et al., 2018]. Значительное развитие такие исследования получили с появлением глобальных ионосферных карт абсолютного ПЭС [Hernández-Pajares et al., 2009]. Данные глобальных ионосферных карт были использованы как для исследования локальных физических особенностей ионосферы [Edemskiy et al., 2018], так и для тестирования ионосферных моделей [Ephishov et al., 2000] или создания индексов состояния ионосферы [Afraimovich et al., 2008a; Gulyaeva and

Stanislawska, 2008; Nesterov et al., 2017]. 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  $f_0F2$  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.*

### **Цель работы**

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 устранимыми неоднозначностями измерений. *Вертикальное ПЭС* – оценка ПЭС вдоль луча приемник – спутник для спутника, находящегося в зените (угол места  $90^\circ$ ), 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\_a\_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. Опытно-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 РНФ 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:

- 1) Семинары ИСЗФ СО РАН, а также кафедры физики атмосферы МГУ;
- 2) Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике (2007, 2011, 2013, 2017);
- 3) Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2007, 2013, 2017);
- 4) EGU General Assembly (2007, 2008, 2017);
- 5) Chinese-Russian Workshop on Space Weather (2007, 2009, 2012, 2013);
- 6) Международная конференция «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений» (2007, 2016, 2020);
- 7) International Beacon Satellite Symposium (2007, 2019);
- 8) IRI/COST 296 Workshop (2007);
- 9) CESRA Workshop on "Solar Radio Physics and the Flare-CME Relationship" (2007);
- 10) Всероссийская астрономическая конференция (2007);
- 11) Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 40-летию запуска на орбиту навигационного КА «Космос-192» и 25-летию запуска первого КА «ГЛОНАСС» (2007);
- 12) Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2010, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020);
- 13) Всероссийская конференция «Распространение радиоволн» (2008, 2014, 2016, 2019);
- 14) XXIX URSI General Assembly (2008);

- 15) Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика», посвященная 50-летию создания ИСЗФ СО РАН (2010);
- 16) COSPAR Scientific Assembly (2012);
- 17) Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (2012, 2018);
- 18) Конференция молодых ученых посвященная дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2012, 2013);
- 19) 2-ая Международная научно-техническая конференция, посвященная 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «ГЛОНАСС» (2012);
- 20) The 20<sup>th</sup> Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (2013);
- 21) International Living With a Star Workshop (2013);
- 22) The Tenth European Space Weather Week (2013);
- 23) The 2nd Asia-Oceania Space Weather Alliance Workshop (2013);
- 24) AOGS Annual Meeting (2014, 2016);
- 25) URSI Atlantic Radio Science Meeting (2015, 2018);
- 26) Progress in Electromagnetics Research Symposium (2015, 2017);
- 27) Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena» (2015, 2017);
- 28) International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY. (2016, 2018);
- 29) IAG/CPGPS International Conference on GNSS+: Advances, Opportunities and Challenges (2016);
- 30) Международная молодежная научно-практическая конференция «Россия – Монголия» (2016);
- 31) The Second VarSITI General Symposium (2017);
- 32) V Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО-2017» (2017);

- 33) Ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе" (2018);
- 34) 10<sup>th</sup> China Satellite Navigation Conference (2019);

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработан метод получения абсолютного наклонного и вертикального полного электронного содержания (ПЭС) ионосфера, 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  $\sim 3.5$  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 псевдод задержки навигационного сигнала не превышают нескольких процентов, в том числе и в возмущенных условиях, и значительно сокращаются по мере модернизации оборудования спутниковой группировки.

## **Публикации**

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 37 работах, включая 1 монографию, 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 quartиль Q1 по одной из баз WoS или Scopus по состоянию на 11.11.2022); получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы ЭВМ.

## **Краткое содержание диссертационной работы:**

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

**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.

**Глава 2** является основным разделом диссертации. В ней описывается метод оценки абсолютного ПЭС, который в дальнейшем может использоваться для решения практических задач. В **разделе 2.1** описан метод получения абсолютного ПЭС по двухчастотным и одночастотным измерениям на отдельном приемнике сигналов ГНСС. Особенности получения неотрицательного ПЭС на лучах спутник – приемник приведены в **разделе 2.1.1**. Особенности алгоритмов для двухчастотных и одночастотных данных приведены в **разделах 2.1.2 и 2.1.3**. **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 Главе 3 представлена система дистанционного мониторинга ионосферного абсолютного ПЭС. Система основана на оборудовании сети SibNet ИСЗФ СО РАН. Глава содержит информацию об аппаратной и информационной схемах комплекса, геометрии зондирования, а также оценке важных для работоспособности комплекса параметров: времени выхода на решение и времени сохранения рабочего режима.

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. 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  $foF2$  и МПЧ. Раздел 4.5 посвящен анализу возможностей использования абсолютного ПЭС для коррекции радиоастрономических наблюдений.

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 (раздел 5.1) и отдельное рассмотрение высокоширотного региона (раздел 5.2). Основной акцент в данной главе сделан на анализ повышения стабильности работы вследствие модернизации навигационных систем (раздел 5.3).

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

## **Публикации по результатам исследований.**

*Статьи в журналах Q1 no Web of Science или Scopus (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. – DOI: 10.1007/s10291-021-01091-5.
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. – DOI: 10.3390/s20195702.
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. – DOI:10.1002/2014SW001072.

*Статьи в журналах из списка ВАК или 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. Ярюкевич, Ю. В. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство коррекции ионосферной ошибки радиотехнических средств: проблемы и перспективы / Ю. В. Ярюкевич, 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. – DOI: 10.1109/RWP.2019.8810327.

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. – 2018b. – 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. Ярюкевич // 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 удаленных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых

систем / Д. С. Котова, В. Б. Оводенко, Ю. В. Ярюкевич, 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. – 2017a. – V. 10466. – 104667I. – DOI:10.1117/12.2288688.

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. – 2017b. – P. 3036–3040. – DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262276.

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

16. Ярюкевич, Ю. В. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ярюкевич, И. В. Живетьев, А. С. Ярюкевич, 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. Ярюкевич, М. А. Титова // Космические исследования. – 2016. – Т. 54, № 1. – С. 23–33. – DOI:10.7868/S0023420616010143.

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. – DOI: 10.1016/j.rinp.2014.11.002.

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. – 2015a. – V. 5. – P. 32-33. –DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
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 – 2015b. 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 – 2015c. 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. – 2015d. – P. 2548–2552.
23. Ярюкевич, Ю. В. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосфера / Ю. В. Ярюкевич, А. А. Мыльникова, В. Е. Куницын, А. М. Падохин // Геомагнетизм и аэрономия. – 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. – 2008а. – 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. Демьянов, В. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем: монография / В. В. Демьянов, Ю. В. Ясюкевич. – Иркутск: Изд-во ИГУ. (Солнечно-земная физика). ISBN 978-5-9624-1098-2. – 2014. – 349 с.

29. 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:*

30. 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.

31. Ярюкевич, Ю. В. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС / Ю. В. Ярюкевич, 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.

32. Ярюкевич, 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. Ярюкевич, Э. И. Астафьев, И. В. Живетьев, А. П. Максиков // Солнечно-земная физика. – 2015. – Т. 1, № 4. – С. 58–64. – DOI:10.12737/13459.

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

34. Ярюкевич, Ю. В. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 / Ю. В. Ярюкевич, 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. – 2013а. – Т. 19, № 3.

35. Ярюкевич, Ю. В. Исследование околоземного космического пространства с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ярюкевич, Н. П. Перевалова, В. В. Демьянов, И. К. Едемский, А. А. Маркидонова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2013б. – Т. 52, вып. 6. – С. 93–100.

36. 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. Ярюкевич // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: труды II Всероссийской научной конференции. – Санкт-Петербург. – 2012. – Т. 2. – С. 231–236.

37. 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. Ярюкевич // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 7, № 4. – С. 357–374.

#### *Программы ЭВМ*

38. Ярюкевич, Ю.В. Программа для расчета числа сбоев сопровождения фазы навигационного сигнала ГНСС» / Ю.В. Ярюкевич, А.С. Ярюкевич // 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.

39. 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. Ярюкевич // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661849. Правообладатель: ФГБУ науки Институт солнечно-земной физики СО РАН. – 2016.

# **ГЛАВА 1. ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ И ЕЕ МОНИТОРИНГ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ**

Настоящая глава посвящена общим сведениям об ионосфере Земли и ее влиянии на радиотехнические системы и параметры радиосигналов, а также текущему состоянию вопроса мониторинга ионосферы на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем, включая информацию о влиянии на них состояния околоземного космического пространства.

## **1.1. Ионосфера Земли**

Ионосфера Земли представляет собой ионизированную часть атмосферы Земли, где уровень ионизации достаточен для влияния на распространение электромагнитных волн. Существуют некоторые разнотечения в определении нижней границы ионосферы, что, по всей видимости, связано с чувствительностью различных экспериментальных средств и разной постановкой задач. В монографии [Kellye, 2009] эта высота указана как ~90 км, в Большой российской энциклопедии – 50–70 км [Дёминов, 2008], а в ГОСТ 1984 г. [ГОСТ 25645.103-84] – 30 км. Несмотря на то, что под ионосферой обычно понимают заряженную компоненту, концентрация заряженных частиц в ней, по крайней мере, в десятки раз меньше, чем концентрация нейтральных частиц. Ионосфера состоит из нескольких слоев. Обычно выделяют области D, E, F (последнюю часть разделяют на F1 и F2). Максимальная концентрация, как правило, наблюдается в F2-слое.

При распространении сигнала в ионосферной плазме происходит изменение его характеристик: амплитуды, фазы, частоты, поляризации времени распространения, траектории. Выделяют регулярные и нерегулярные эффекты. Регулярные эффекты связаны с наличием регулярной структуры и изменчивостью ионосферы: ионосферные слои,

крупномасштабные ионосферные структуры. Нерегулярные эффекты связаны с ионосферными неоднородностями.

К регулярным эффектам можно отнести следующие [Дэвис, 1973]:

- 1) затухание амплитуды радиосигнала в ионосфере,
- 2) дополнительное фазовое запаздывание сигнала в ионосфере,
- 3) смещение частоты,
- 4) фарадеевское вращение плоскости поляризации,
- 5) задержка сигнала в ионосфере,
- 6) регулярная рефракция и отражение КВ-радиоволн от ионосферы,
- 7) дисперсия (для широкополосных сигналов) [РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R Р.531-8, 2005].

К нерегулярным эффектам относят, как правило:

- 1) фазовые флуктуации (мерцания),
- 2) рассеяние сигнала и амплитудные мерцания,
- 3) нерегулярная рефракция в среде с неоднородностями.

В результате указанных выше эффектов ионосфера влияет на функционирование радиотехнических средств. Рис. 1.1 из статьи [Goodman and Aarons, 1990] (см. там Fig. 1) схематично представляет ионосферное распространение сигналов в системах навигации, радиолокации, коротковолновой и спутниковой связи.

В приближении холодной плазмы показатель преломления в ионосфере описывается формулой Эпплтона (Эпплтона – Хартри, Эпплтона – Лассена – Хартри) [Дэвис, 1973]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2}}, \quad (1.1)$$

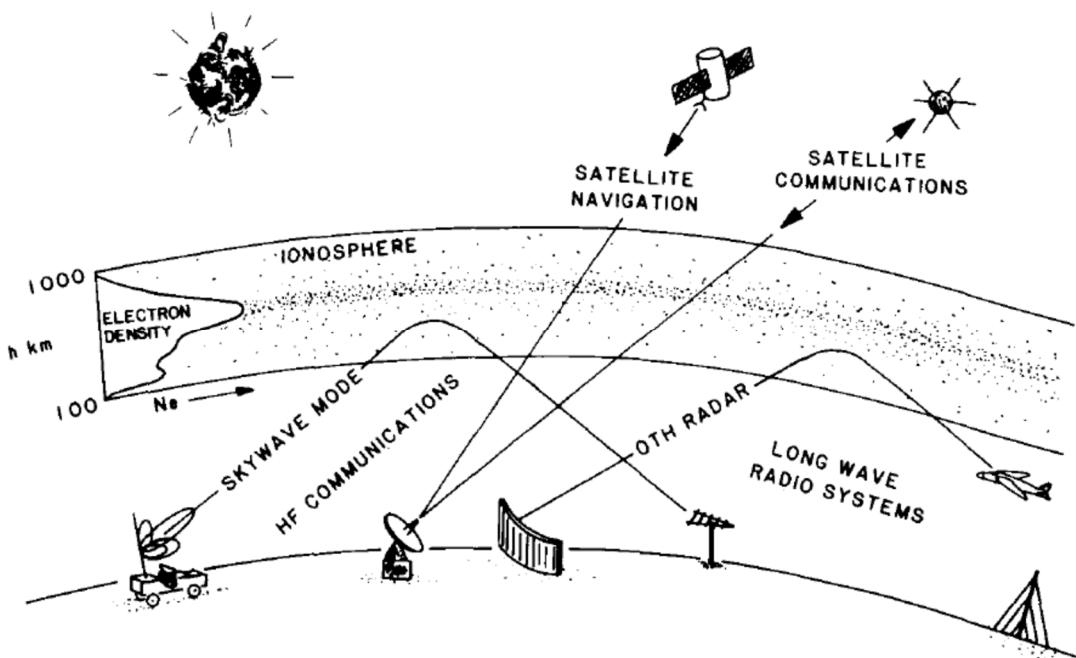


Рисунок 1.1. Функционирование радиотехнических средств через ионосферу (Fig. 1 из статьи [Goodman and Aarons, 1990]).

где  $X = \left( \frac{f_N}{f} \right)^2$  – отношение плазменной частоты  $f_N$  к частоте сигнала  $f$ ,

$Y = \frac{f_H}{f} = \frac{eB_0}{2\pi mf}$  – отношение гирочастоты  $f_H$  к частоте сигнала ( $e$  – заряд

электрона,  $B_0$  – напряженность магнитного поля,  $m$  – масса электрона),  $Y_L = Y \cos \theta$ ,  $Y_T = Y \sin \theta$ ,  $\theta$  – угол между лучом распространения сигнала и магнитным полем,  $Z = \frac{v}{2\pi f}$  – отношение частоты соударений  $v$  к частоте сигнала  $f$ .

В Таблице 1.1 приведена частотная зависимость регулярных эффектов. Частотная зависимость эффектов позволяет использовать двухчастотные (многочастотные) измерения глобальных навигационных спутниковых систем в интересах мониторинга ионосферы. При этом мониторинг может вестись не только для регулярных, но и для нерегулярных эффектов [Fu et al., 1999; Jiao et al., 2015].

Ниже рассматриваются в основном действие регулярных ионосферных эффектов на радиотехнические системы.

### **1.1.1. Влияние ионосферы на функционирование радиолокационных систем**

Точность траекторных измерений – одна из актуальнейших проблем радиолокации, поэтому требования к ним значительно возросли в последние годы [Караченцев и др., 2012]. В частности, по мнению авторов [Караченцев и др., 2012] точность угловых измерений должна быть не хуже единиц–десятков угловых секунд, а по дальности – десятков сантиметров. В то же время реальные точности измерения дальности составляют более 100 м [Караченцев и др., 2012].

Таблица 1.1. Частотная зависимость регулярных эффектов

Эффект	Вид зависимости
Затухание амплитуды радиосигнала в ионосфере	$D_a \sim 1/f^2$
Дополнительное фазовое запаздывание сигнала и, соответствующее изменение фазового пути	$\Delta\phi \sim 1/f$ $\Delta L \sim 1/f^2$
Смещение частоты	$\Delta f \sim 1/f$
Фарадеевское вращение плоскости поляризации	$\Omega \sim 1/f^2$
Задержка сигнала в ионосфере	$\Delta T \sim 1/f^2$
Регулярная рефракция: - Отклонение при вертикальном распространении	$\operatorname{tg}\alpha \sim 1/f^3$
Отражение КВ-радиоволн	
Дисперсия КВ-сигнала	

Одним из важных эффектов, определяющих энергетический потенциал радиолокационных систем, является затухание радиоволн [Гришин и др., 1990]. Для УКВ-сигналов наибольшие эффекты вносят водяные пары, дождь, град, а для КВ-сигналов – ионосфера. Другой эффект, связанный с уменьшением общей энергии, – рассеяние радиосигнала на неоднородностях показателя преломления.

В КВ-диапазоне дальность радиолокационных средств определяется ионосферной рефракцией. Прием загоризонтных сигналов в РЛС был открыт Н.И. Кабановым [Мищенко, 1972]. При этом из-за постоянной изменчивости ионосферы точность таких методов невелика [Гришин и др., 1990]. Одним из ключевых источников ошибок являются вариации высоты отражения

сигнала. Кроме того, ухудшение точности может быть связано с появлением дополнительных траекторий распространения [Tsunoda et al., 2016].

Для радиолокационных станций дальнего обнаружения негативное влияние ионосферы заключается в изменении угла прихода (вследствие отклонения направления распространения сигнала) [Оводенко и Трёкин, 2016] и ионосферной задержке радиосигнала [Логовский и Дмитриевская, 2016], а также в помехах вследствие авроральных явлений для северных направлений. При этом при предположении о стационарности ионосферы на периоде 1 часа получение полного ионосферного портрета методами некогерентного рассеяния может занять до 80 % времени работы станции, если использовать ее собственный потенциал (по крайней мере, на уровне существующих методов) [Логовский и Дмитриевская, 2016].

Это говорит о целесообразности использования дополнительных средств мониторинга ионосферы с целью устранения ионосферной ошибки технических систем и построения карт ионосферных искажений над необходимыми зонами. Об этом же говорят отчеты BBC США [Allen, 1977a], где показано, что моделирование ионосферной ошибки позволяет устранять только ~25–50 % ошибки. Более новые модели (например, модель IRI) позволяют уменьшить эту ошибку [Курикша и Липкин, 2013]. Активно проводимые в этом направлении работы говорят о недостаточной коррекции. Ключевыми проблемами называются сильная изменчивость ионосферы от дня ко дню (даже в условиях слабых изменений солнечной и геомагнитной активности), а также перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ).

Один из новых классов загоризонтных радаров являются импульсные декаметровые радары, включая радары SuperDARN [Chisham et al., 2007]. Измерения таких радаров также в большой степени подвержены воздействию ионосферного распространения радиоволн, а также воздействию регулярной изменчивости ионосферы [Бернгардт, 2017]. С одной стороны, суточные вариации электронной концентрации приводят к изменению максимальной

радиолокационной дальности. В [Berngardt et al., 2015] указано, что при использовании моделей долгосрочного прогноза ошибка по дальности может достигать 100–200 км даже при калибровке модели ионозондовыми измерениями. Ошибка существенно выше без такой коррекции. С другой стороны, эти же самые суточные вариации электронной концентрации меняют ошибку в течение суток. Учет ионосферной ошибки необходим даже для оценки скорости рассеивателей [Gillies et al., 2011].

В работе [Zolesi et al., 2016] сообщается о развертывании канадской системы загоризонтных радаров для контроля за морским и воздушным пространством на средних и высоких широтах. Для этой системы также требуется аккуратный учет воздействия ионосфера на распространение радиосигналов, что ограничено сложностью эмпирического моделирования высокоширотной ионосферы. Для решения этой задачи в Канаде развертывается сеть CHAIN (Canadian High Arctic Ionospheric Network) [Jayachandran et al., 2009] из 25 пунктов, включая станции ГНСС и 8 ионозондов, и создается эмпирическая ионосферная модель региона (Empirical Canadian High Arctic Ionosphere Model – E-CHAIM) [Themens et al., 2017].

При наземной радиолокации космических аппаратов ионосфера также вносит соответствующие ошибки. При анализе данных юстировочных космических аппаратов авторы [Оводенко и Трекин, 2016] отметили, что невязку больше заданной нормативно-техническими документами (величина не приведена в статье) по дальности имеют ~70 % измерений, по углу места – ~60 %. При этом использование модели долгосрочного прогноза ионосферы значительно улучшает ситуацию для определения угла места: невязка выше требуемой имеет место только в ~10 % случаев, и оперативная коррекция не изменяет результат. Для невязки по дальности долгосрочный прогноз позволяет получить приемлемую невязку только в ~50 % случаев, в то время как коррекция по текущим данным приводит к тому, что почти 100 %

измерений имеют приемлемую невязку. В абсолютных величинах возникающая ошибка по углу места может составлять 5–20 угл. мин. [Соколов и др., 2012].

### **1.1.2. Влияние ионосферы на функционирование радионавигационных систем**

Для радионавигационных систем погрешность местоопределения определяется как рефракцией, так и задержкой радиосигнала в ионосфере. Например, навигационная система наземного базирования OMEGA [Asche, 1972], запущенная в действие в 1980-х гг. и работающая в УКВ-диапазоне, имела точность (СКО ошибки)  $\sim 1$  морской мили. При этом во время возмущений в ионосфере ошибка вырастала на порядок [Goodman and Aarons, 1990].

Другой системой наземного базирования была система LORAN (Long Range Navigation), функционировавшая в 1957–2010 гг. и использовавшаяся для авиации. С 1997 г. LORAN-C использовала частоты ниже 500 КГц с отражением от D-области ионосферы. Вариации высоты D-слоя значительно сказывались на точности позиционирования [Januszewski, 2012].

ГНСС первого поколения TRANSIT (Парус, Цикада), функционирующие на частотах 150/400 МГц, даже в невозмущенных условиях давали ошибки  $\sim 0.5$  морской мили, а во время возмущенных условий – до 5.5 миль.

В ГНСС второго поколения (GPS, ГЛОНАСС и др.) рабочие частоты выбраны значительно выше с целью уменьшения ионосферных эффектов (даже в одночастотном режиме). Ионосферная составляющая 1 TECU ( $10^{16}$  эл/ $m^2$ ) приводит к ошибке измерения дальности  $\sim 16$  см на частоте L1 GPS/ГЛОНАСС. Во время магнитной бури значения ПЭС могут превышать 100 TECU, что приводит к ошибке  $\sim 16$  м в дальностях и  $\sim 32$ –48 м в общей ошибке позиционирования [Kintner and Ledvina, 2005], а при появлении

ионосферных пузырей – до 50 TECU и соответствующей общей ошибке позиционирования ~16–24 м [Kintner and Ledvina, 2005].

Подавляющее большинство используемых приемников, в том числе установленных в смартфонах, использует одночастотное оборудование. Для коррекции одночастотных измерений на основной частоте в GPS была предложена модель Клобучара [Klobuchar, 1987]. Модель достаточно проста и является параметризацией суточного хода синусоидальной функцией для дневного времени и константой в ночное время с разложением амплитуды по геомагнитной широте. Считается, что применение модели Клобучара позволяет устраниТЬ до 50 % ионосферной ошибки [Klobuchar, 1987; Yuan et al., 2019]. Активно развивались и иные модели, в том числе NeQuickG для Galileo [EC, 2016; Nava et al, 2008], BDGIM для BeiDou [Yuan et al., 2019], модель ГЛОНАСС [ИКД-ГЛОНАСС, 2016], в том числе и альтернативные – такие как, например, модель GEMTEC, разработанная в Иркутском государственном университете (Global empirical model of total electron content), требующая на вход только данные об индексе солнечной активности F10.7 [Ivanov et al., 2011].

При позиционировании в режиме дифференциальной навигации RTK (Real Time Kinematic) удаление от базовой станции приводит увеличению ошибки. Точность ухудшается пропорционально расстоянию. Согласно [Евстафьев, 2009], для измерений в режиме реального времени с сантиметровой точностью в режиме RTK удаление приемного оборудования от базовой станции должно быть не более 25–30 км. Основное ограничение обусловлено ионосферой. Анализ [Гавриленко, 2016] показал, что при ограничении на систематическую ошибку по горизонтали 10 см, расстояние до базовой станции не должно превышать 40 км. По вертикали такая точность достигается для расстояний до 100 км. Случайные же ошибки возрастают с увеличением расстояний, но находятся на уровне точности 10 см при расстояниях до 180 км.

### **1.1.3. Влияние ионосферы на функционирование систем радиосвязи**

Системы радиосвязи зависят от состояния ионосферы в еще большей степени. Прежде всего, следует сказать, что для коротковолновых систем связь на длительные расстояния возможна только благодаря ионосфере: распространение сигнала за пределы зоны видимости обусловлено отражением радиоволны от ионосферы. При этом вводится ограничение на минимальное расстояние (называемое «мертвой зоной»). Дальность мертвых зон зависит от частоты используемого сигнала и состояния ионосферы.

Для первых связных КВ-систем, использующих в середине прошлого века азбуку Морзе, ионосфера приводила к существенному ограничению передачи информации до 75 бит/с [Raab et al., 2002]. Развитие технологии (использование более сложной модуляции) позволило достичь скорости 64 кБит/с.

Одним из ключевых факторов является многолучевость сигнала, приводящая к появлению интерференционных минимумов и максимумов. Дисперсионные искажения за счет различного времени распространения различных компонент сигнала приводят к наложению символов. Для устранения негативного воздействия ионосферы используются разные подходы. Например, может использоваться алгоритм устранения многолучевости сигнала [Price and Green, 1958]. Для современной КВ-связи часто используют адаптивные алгоритмы, когда отправляется пакет частот и оптимальная частота выбирается на основе анализа амплитуды принимаемых компонент [Служивый, 2000; Шиманов и др., 2013]. В любом случае принципиальная нестационарность ионосферы не позволяет осуществлять КВ-связь с использованием одной частоты [Raab et al., 2002]. Однако в случае скрытой связи с односторонней передачей, такие алгоритмы невозможны. Кроме того, данный подход может не работать в условиях нарушения теоремы взаимности [Jull and Pettersen, 1964].

Одним из подходов для повышения скорости передачи информации в радиоканале является увеличение полосы частот [MIL-STD-188-110D, 2017]. При этом дисперсия сигнала в ионосфере может приводить к значительным искажениям, что требует их учета [Аджемов и др., 2019]. В эксперименте на наклонной трассе ~3000 км для сигнала с шириной 400 кГц и рабочей частоты 0.85–1.05 от МПЧ падение эффективной принимаемой мощности за счет ионосферы составило ~6.5 дБ [Аджемов и др., 2019].

Для классической КВ-радиосвязи влияние ионосферы ставит задачу выбора оптимальных рабочих частот [Freeman, 2006]. Результат может зависеть от опыта оператора, использования долгосрочного прогноза, реальных наблюдений или автоматического выбора [Freeman, 2006].

Для спутниковой радиосвязи в случае линейно поляризованных сигналов важен эффект фарадеевского вращения. Для частоты 4 ГГц фарадеевское вращение мало и составляет несколько градусов [Freeman, 2006].

Принципиально важным является воздействие D-области ионосферы на распространение КВ-сигналов. Увеличение концентрации электронов в этой области приводит к поглощению радиосигналов [Дэвис, 1973]. Согласно [РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R Р.531-8, 2005], на средних широтах для частот 30 МГц поглощение будет составлять в нормальных условиях 0.2 – 0.5 дБ и возрастать во время солнечных вспышек и в ряде случаев во время магнитных бурь, когда за счет расширения аврорального овала среднеширотная ионосфера характеризуется авроральными условиями и авроральным поглощением.

Для краткосрочного прогноза состояния КВ-трасс радиоволн может использоваться модельный прогноз с оперативной коррекцией моделей ионосферы. Коррекция может проводиться, например, на основе данных наклонного зондирования ионосферы на однотипных радиотрассах при наличии измерений [Борисова и др., 2017].

Особенно актуален прогноз возможности работы КВ-радиосвязи для высокоширотной связи, в том числе на трансполярных маршрутах [Warrington et al., 2016]. Например, эксперименты [Boteler, 2018] для мощных магнитных бурь 2003 г. показывают значительные нарушения радиосвязи в Канаде, наблюдавшиеся практически повсеместно между самолетами и центрами управления, что привело к тому, что самолеты были вынуждены перемещаться по более низкоширотным маршрутам. Одним из подходов здесь может быть создание модели ионосферы, использующей ассимиляцию текущих измерений ПЭС, получаемого по данным ГНСС, ионозондов и других средств. При этом Warrington et al. [2016] указывают, что во время интенсивных событий на Солнце работа связной КВ-системы на отражении радиосигнала от F-слоя может быть невозможна, однако может применяться спорадический слой Es с повышением частоты радиосвязи.

#### **1.1.4. Влияние ионосферы на радиоастрономические наблюдения**

При радиоастрономических наблюдениях ионосфера является причиной возникновения погрешностей меры вращения и меры дисперсии радиоисточников, размытия интерферометрических картин, а также ошибок измерения углов прихода.

Влияние ионосферы на наблюдения астрономических явлений известно достаточно давно. В 1947 г. MaCready et al. [1947], наблюдая радиоизлучение солнечных пятен на частоте 200 МГц, пришли к выводу, что существует рефракционный эффект в атмосфере Земли, ухудшающий потенциально достижимую точность местоопределения источника излучения. При этом для измерений такого типа ионосферная рефракция была признана пренебрежимо малой [Payne-Scott and McCready, 1948]. Для более низких частот было предложено использовать двухчастотные измерения солнечного радиоизлучения для оценки рефракции. В частности, были проведены наблюдения на частотах 200 МГц и 60 МГц [Payne-Scott and McCready, 1948].

Smith [1952], изучая положение четырех радиоисточников на частоте 81.5 МГц, показал, что горизонтальные градиенты электронной концентрации в ионосфере вносят ошибку. Komesaroff [1960] получил выражение для кажущегося смещения космических источников вследствие ионосферной рефракции.

Spoelstra [1983] анализировал данные радиоинтерферометрических наблюдений на сети из четырнадцати 25-м телескопов Westerbork Synthesis Radio Telescop, работающих в диапазоне 608.5 и 1415 МГц. Для коррекции им привлекались независимые ионосферные измерения (данные ионозондов). Наблюдения выявили эффекты перемещающихся ионосферных возмущений. В восходные часы при усилении ионосферных градиентов регистрируемая картина ухудшалась. Эффект появления нерегулярной рефракции был отмечен Ryle and Hewish [1950] при наблюдении дискретных радиоисточников на длине волны 3.7 м (~80 МГц) и 6.7 м (~45 МГц). Такие эффекты приводили к вариациям интенсивности и положения источника. Последнее достигало 3 угл. мин. (на длине волны 3.7 м). При этом появление таких вариаций имело существенный суточный ход. Оценка размеров неоднородностей показала, что их масштаб составляет ~5 км. Нерегулярные эффекты приводят и к модуляции кажущегося положения радиоисточников на Солнце. Так, Wild et al. [1959] регистрировали модуляцию с периодом ~20 мин в нескольких экспериментах по наблюдению радиосплексов 3-го типа.

Sukumar [1987] столкнулся с проблемой влияния ионосферы при интерферометрических наблюдениях на Ooty Synthesis Radio Telescope на частоте 326.5 МГц. При этом простые модели (по сути не учитывающие градиенты и распределение электронной концентрации) давали переоценку ионосферного вклада ~40 %. Кроме того, отмечался значительный эффект среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (100–200 км). Такие ПИВ приводили к вариациям фазы с амплитудой (peak-to-peak) 60°.

Проблема влияния ионосферы на радиоастрономические наблюдения в низкочастотном спектре настолько существенна, что в 1986 г. были проведены эксперименты SpaceLab-2 [Ellis et al., 1986], в которых осуществлялось «прожигание дыры» в ионосфере (см. схематичное изображение на рис. 1.2). Используя воздействие маневренных двигателей космического аппарата, Ellis et al. [1986] регистрировали галактическое фоновое радиоизлучение на частотах 1–2.7 МГц, получив приемлемое угловое разрешение.

Koval et al. [2017] зарегистрировали несколько иной эффект воздействия ионосферы (ионосферы возмущений) на солнечные радионаблюдения. Анализируя динамические спектры в диапазоне 10–80 МГц, полученные в обсерватории Nancay (Nancay Decametric Array), они выявили возникновение вариаций интенсивности (обусловленных солнечными радиовсплесками), существенно отличающейся от известных характеристик. Такие особенности были зарегистрированы для 129 дней в 1999–2015 гг. Источником таких особенностей явилось линзирование радиоизлучения на перемещающихся ионосферных возмущениях.

Vedantham et al. [2014] работали в диапазоне 45–85 МГц с целью измерения зависимости яркостной температуры красного смещения на длине волны сверхтонкого расщепления водорода (21 см). Их оценки показали, что ионосферная рефракция и поглощение дают ошибку на уровне 1 %, что на 2–3 порядка выше, чем ожидаемый эффект в принимаемом 21-см-сигнале. Также следует отметить, что при высокой концентрации в F-слое ( $2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ) нижнее ограничение по углу места начинает неконтролируемо изменяться и приводить к нежелательной модуляции измеряемого спектра в используемом диапазоне (40–85 МГц).

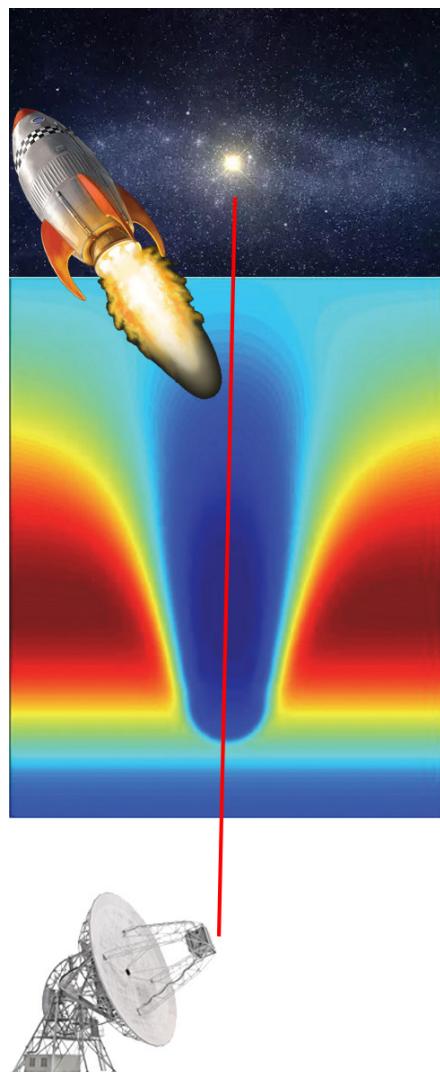


Рисунок 1.2. Схематичное изображение эксперимента по созданию «окна» в ионосфере.

Ионосфера значительно влияет на прием космического радиоизлучения. Datta et al., [2016] столкнулись с проблемой воздействия ионосферы на измерения низкочастотного реликтового радиоизлучения на длине волны 21 см. В результате такого воздействия регистрируемые на поверхности Земли сигналы реликтового излучения искажаются и начинают мерцать с характерным масштабом  $f^2$  на фоне четкого галактического фона  $f^S$  (где  $S$  – спектральный индекс). Из-за ионосферной рефракции все источники в области обзора должны смещаться в область зенита (максимума диаграммы направленности), что приводит к завышению оценок температуры. Это значительно загружает наземные наблюдения.

Вариации ионосферного ПЭС приводят к изменению спектральных характеристик с течением времени/сезона/факторов космической погоды. Естественное 21-см излучение также должно характеризоваться слабым изменением характеристик, которые на фоне ионосферного воздействия обнаружить проблематично. При этом требование, которое авторы накладывают на точность восстановления ионосферы, составляет  $\sim 1\%$ , что в настоящее время малореалистично. Также следует отметить, что ионосферные параметры некоррелированы от ночи к ночи, что могло бы использоваться для накопления статистики. Однако для получения приемлемой точности 1 мК, как указано в [Datta el, 2016], требуется  $\sim 300\,000$  лет непрерывных измерений.

С близкими проблемами сталкиваются на радиоинтерферометрах (в том числе интерферометрах со сверхдлинной базой) типа LOFAR (LOw Frequency ARray) и SKA (Square Kilometer Array). Gasperin et al. [2018] проводили оценки таких эффектов наряду с анализом данных низкочастотной антенны LOFAR и обнаружили, что ионосферные эффекты приводят к мерцаниям регистрируемого сигнала, а также к расфазировке интерферометра. При этом амплитудные мерцания на частотах менее 100 МГц присутствуют по их наблюдениям постоянно. Появление мерцаний

приводит к потере  $\sim 30\%$  данных во время ночных наблюдений, однако непонятна природа этих мерцаний (межпланетные или ионосферные). Gasperin et al. [2018] предложили использовать прямые ионосферные наблюдения, чтобы решить, проводить ли астрономические наблюдения или нет.

Порайко и др. [2019] установили, что для радиотелескопа LOFAR максимально возможная в настоящее время точность при оценке ионосферного вклада по глобальным ионосферным картам позволяет проводить измерения меры фарадеевского вращения пульсаров в межзвездной среде на уровне  $\sim 0.07 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-2}$ . Для анализа ими использовались наблюдения пяти пульсаров в частотном диапазоне 100–200 МГц на четырех пунктах в Германии (DE601, DE603, DE605, DE609) в течение  $\sim 3.5$  лет. При этом, чтобы достичь необходимой чувствительности для выделения вклада изменчивости межзвездной среды, потребуется накопление  $\sim 40$  лет измерений при текущем развитии ионосферного мониторинга.

Yan et al. [2011] изучали сигналы 20 пульсаров на основе данных приемников сети Parkes Pulsar Timing Array с центральной частотой 1369 МГц. Даже в этом частотном диапазоне ионосферные эффекты все еще значительны, хотя и гораздо меньше чем на 100 МГц. Типичные значения ионосферной меры вращения составляют порядка  $0.5\text{--}1 \text{ рад} \cdot \text{м}^{-2}$ . В этом случае ионосферная мера вращения может быть успешно моделирована.

## **1.2. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство мониторинга ионосферы Земли: обзор состояния проблемы**

В настоящее время в мире действуют четыре глобальных навигационных спутниковых системы: американская GPS [IS-GPS-200J, 2018], российская ГЛОНАСС [ИКД-ГЛОНАСС-2008], европейская система Galileo [ICD-Galileo, 2016], и китайская система BeiDou/Compass [ICD-BDS, 2016]. Каждая из систем на 2021 г. обеспечивает возможность решения

навигационной задачи в любой точке земного шара, т.е. наблюдение не менее четырех навигационных спутников. В этой связи ионосфера в зоне приемника зондируется большим количеством лучей.

Любая ГНСС состоит из трех ключевых подсистем (общая информация о структуре ГНСС использована из [Харисов и др., 1998]): космический сегмент, сегмент управления, сегмент потребителей.

*Космический сегмент* включает в себя навигационные спутники. По данным информационно-аналитического центра ГЛОНАСС (<http://www.glonass-center.ru/>) на 10.10.2022 г. космический сегмент ГЛОНАСС включает в себя 26 космических аппаратов (КА), из которых 22 КА используются по целевому назначению; GPS – 32 КА (31 используется), BeiDou – 49 КА (44 используется); Galileo – 28 КА (23 используется).

В таблицах 1.2 и 1.3 приведены основные характеристики спутников GPS и ГЛОНАСС. Изображения спутников заимствованы с сайта АО «Российские космические системы» (<http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/>) и [Spaceflight now, 2016]. Стабильность бортового эталона частоты GPS приведена по данным [Parkinson et al., 1996] и [Teunissen and Montenbruck, 2017].

Основные функции космического сегмента [Соловьев, 2000] – формирование и излучение навигационного сигнала, автономное эфемеридно-временное обеспечение, управление и контроль бортовых систем.

*Наземный сегмент* представляет собой систему управления всей ГНСС и выведения спутников на орбиту.

Таблица 1.2. Основные характеристики спутников ГЛОНАСС

Тип спутника	ГЛОНАСС	ГЛОНАСС-М	ГЛОНАСС-К
Изображение спутников			
Масса	1415	1415	995
Ресурс спутника, лет	3	7	10
Стандарт частоты	Cs	Cs	Rb+Cs
Стабильность частоты	$5 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-14} \dots 1 \cdot 10^{-13}$
Кол-во частот	2	2	3

Таблица 1.3. Основные характеристики спутников GPS

Тип спутника	GPS-II	GPS-IIA	GPS-IIR	GPS-IIRM	GPS-IIF
Изображение спутника					
Масса	885	1500	2000	2000	2170
Ресурс спутника, лет	7.5	7.5	10	10	15
Стандарт частоты	Cs	Cs	Rb	Rb	Rb+Cs
Стабильность частоты	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$10^{-14}$	$10^{-14}$	$0.5 \dots 1 \cdot 10^{-14}$
Кол-во частот	2	2	2	2	3

Задачи наземного сегмента: вывод спутников на требуемые орбиты и корректировка орбит, эфемеридное и частотно-временное обеспечение навигационных спутников, мониторинг радионавигационного поля, радиоуправление функционированием спутников, радиотелеметрический мониторинг космических аппаратов, координация всех элементов ГНСС.

*Сегмент потребителей (пользователей)* включает аппаратуру потребителей, используемую для решения навигационной задачи. Основные функции сегмента потребителей: прием сигнала, определение необходимой информации (координаты, скорость).

В последние годы идет рост орбитальной группировки, а также количество постоянно действующих приемных станций. В настоящее время в свободный доступ предоставляют данные ГНСС-измерений ряд организаций (см., например, список на <https://simurg.iszf.irk.ru/sources>), включая International GNSS Service.

На территории Российской Федерации существует ряд ведомственных сетей, таких, как, например, сеть Росгидромета [Алешин и др., 2015], сеть геодинамических наблюдений Дальневосточного отделения РАН [Сорокин и др., 2017], а также частных сетей (EFT-CORS, HIVE и др.). Недавно создан Федеральный центр навигационных данных (<https://fcnd.ru/>).

На верхней панели рис. 1.3 приведена динамика количества двухчастотных приемников ГНСС, данные которых находятся в свободном доступе (без учета японской сети GSI и российских сетей). Их общее число составляет  $>6000$  (а по отдельным упоминаниям  $\sim 9000\text{--}10000$ ). На нижней панели приведено расположение этих приемников на 1 января 2019 г. Наиболее плотно сеть приемников покрывает Северную Америку и Европу, Японию; гораздо реже станции расположены в Азиатском и Африканском регионах, Тихом и Атлантическом океанах. Даже такое неоднородное заполнение позволяет решать задачу глобального мониторинга ионосферы и детектирования ионосферных возмущений.

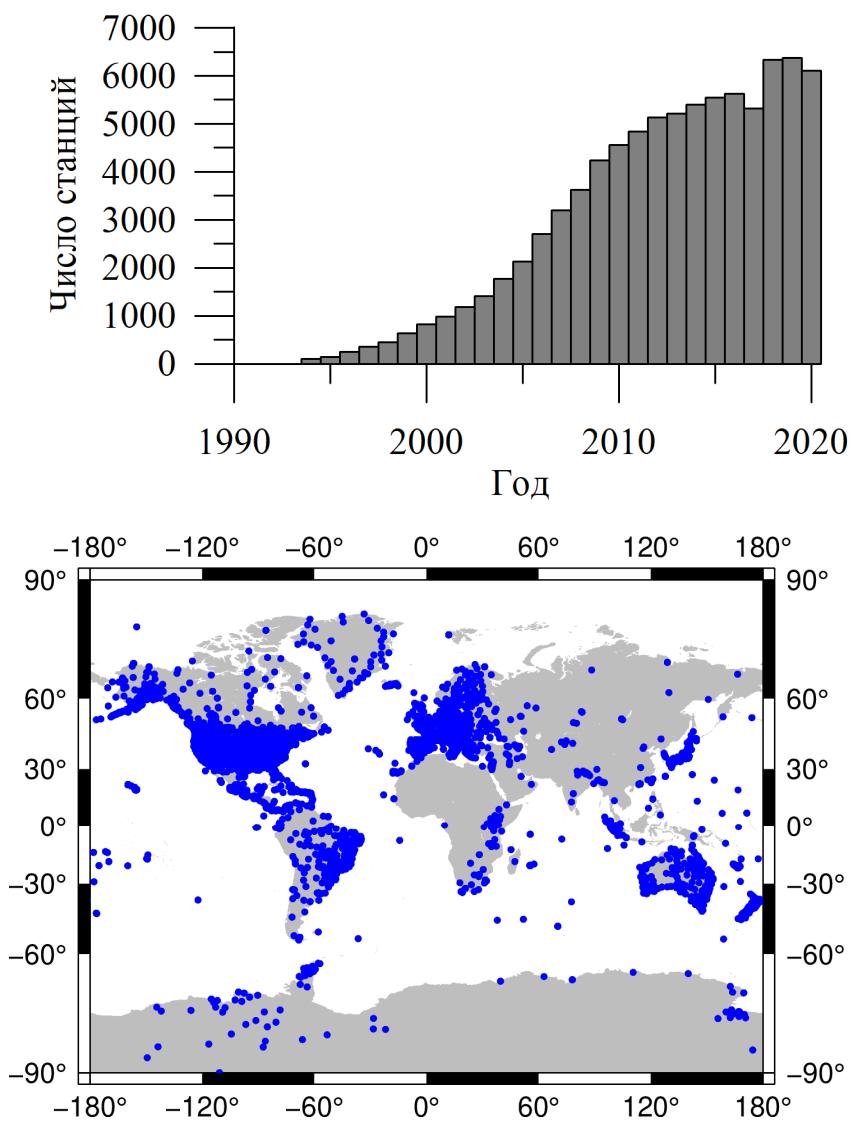


Рисунок 1.3. Динамика количества двухчастотных приемников ГНСС, данные которых находятся в свободном доступе (верхняя панель), и расположение по земному шару приемников ГНСС, данные которых находились на 1 января 2019 г. в открытом доступе (нижняя панель).

### 1.2.1. Вычисление полного электронного содержания по данным ГНСС

Вычисление ПЭС основано на частотной зависимости коэффициента преломления в ионосфере [Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Афраймович и Перевалова, 2006]. Двухчастотные приемники оценивают групповую псевдодальность между спутником и приемником, а также фазу сигнала (фазовый путь) на двух частотах. ПЭС вдоль луча зрения из точки приёма на навигационный спутник рассчитывается по групповым ( $I_P$ ) и фазовым ( $I_\phi$ ) измерениям соответственно как:

$$I_P = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + c\Delta t + \sigma P] \quad (1.2)$$

$$I_\phi = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + \sigma L] \quad (1.3)$$

где  $f_1, f_2$  – рабочие частоты ГНСС, Гц;  $P_1, P_2$  – измерения псевдодальности на первой и второй частотах, м;  $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$  – измерения фазового пути радиосигналов на первой и второй частотах, м;  $L_1, L_2$  – число оборотов фазы на рабочих частотах ГНСС;  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн, м;  $K$  – постоянная величина, определяемая неоднозначностью измерения фазы, м;  $\sigma P, \sigma L$  – шумовые погрешности, обусловленные шумами измерений группового и фазового пути, м;  $\Delta t$  – дифференциальная кодовая задержка (ДКЗ), обусловленная разным временем распространения сигнала различных частот в радиотрактах спутника и приемника, с;  $c$  – скорость света в вакууме, 299 792 458 м/с.

Как правило, в исследованиях ионосферных неоднородностей используют фазовые измерения (1.3) [Afraimovich et al., 2013] из-за высоких шумов групповых измерений (до 100 % и более процентов [Куницын и др., 2007]). Пример рядов ПЭС, рассчитанных по групповым и фазовым измерениям (формулы (1.1) и (1.2)) без учета шумовых составляющих и не известных постоянных  $\sigma P, K$ , приведен на рисунке 1.4.

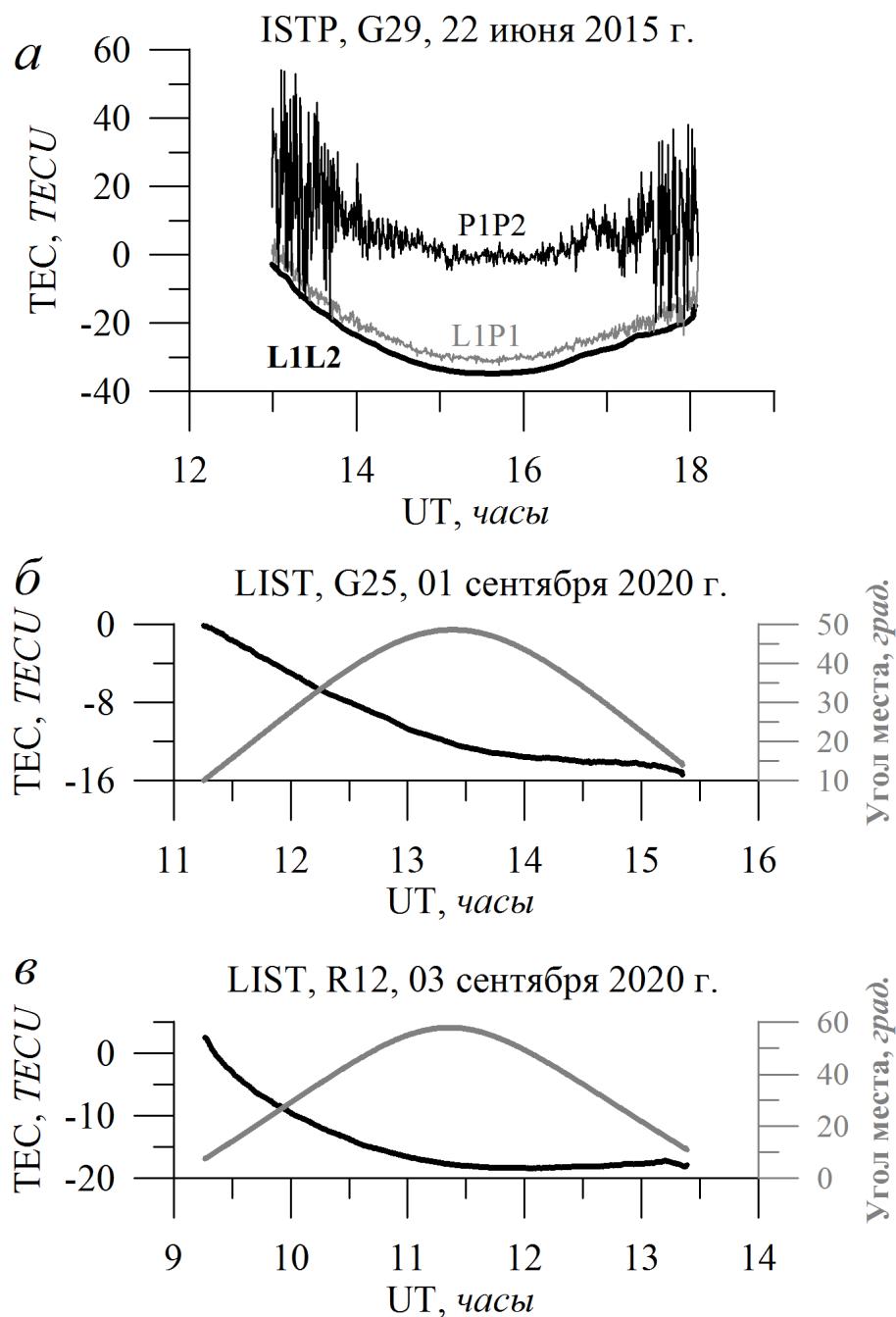


Рисунок 1.4. Динамика наклонного полного электронного содержания.  
*а* – ПЭС на станции ISTP, полученное по двухчастотной комбинации L1L2 (нижняя черная кривая), одночастотной комбинации L1P1 (средняя серая кривая) и двухчастотной комбинации P1P2 (верхняя черная кривая); *б* и *в* – ПЭС на станции LIST, соответственно, по двухчастотной комбинации L1L2 (черные кривые) и угол места спутника (серые кривые). Данные за 22 июня 2015 г. (*а*), 1 сентября 2020 г. (*б*) и 3 сентября 2020 г. (*в*). Станции входят в сеть SibNet ИСЗФ СО РАН.

Можно видеть, что наибольшие шумы имеет ПЭС, рассчитанное по двухчастотной комбинации псевдодальностей P1P2, а наименьшие – ПЭС, рассчитанное по двухчастотным фазовым измерениям L1L2.

Рис. 1.4, б, в демонстрирует отличие динамики ПЭС от типичной: при уменьшении угла места не происходит увеличения ПЭС.

Помимо двухчастотных вычислений ПЭС возможны и одночастотные на основе комбинации совместных измерений фазы и псевдодальности.

$$I_{P\varphi} = \frac{1}{2} \frac{f_1^2}{40.308} [(P_1 - L_1 \lambda_1) + PK + \sigma LP] \quad (1.4)$$

где  $PK$  – постоянная величина, определяемая неоднозначностью измерения фазы сигнала и временем распространения сигнала в аппаратуре спутника и приемника;  $\sigma LP$  – суммарные шумы фазовых и групповых измерений.

Формулы (1.2)–(1.4) записаны с использованием формулы Эплтона – Хартри в первом приближении. Если учесть следующий порядок разложения, то без учета ошибок измерения выражение для фазовой псевдодальности примет вид [Kedar et al., 2003]

$$L\lambda = D - 40.3I_1/f^2 - 40.3I_2/f^3 \quad (1.5)$$

$$I_1 = \int_0^h N dl; \quad I_2 = \int_0^h N f_H \cos \gamma dl$$

где  $D$  – геометрическая дальность,  $N$  – электронная концентрация,

– гирочастота электронов,  $\gamma$  – угол между лучом спутник – приемник и вектором магнитного поля.

Учет второго и более высоких порядков в формуле Эплтона – Хартри дает малые систематические ошибки, величина которых на два порядка меньше, чем эффекты первого порядка [Morton et al., 2009].

Данные кодовых и фазовых измерений псевдодальностей приемников ГНСС, необходимые для вычислений (1.2)–(1.4), хранятся, как правило, в стандартизированном формате RINEX [Gurtner and Estey, 2009].

ГНСС-измерения полного электронного содержания среди прочего дают возможность оценки ионосферной возмущенности. Наиболее известный параметр – индекс ROTI (Rate Of TEC Index), представляющий собой среднеквадратичное отклонение (СКО) производной ПЭС [Pi et al., 1998]. В последние годы был разработан ряд индексов, основанных на данных ГНСС, представляющих улучшенную версию ROTI, таких как AATR (Along Arc TEC Rate) [Juan et al., 2018], DIX (Disturbance Ionosphere index) [Jakowski et al., 2012] и DIXSG (Disturbance Ionosphere Index Spatial Gradient) [Wilken et al., 2018]. Кроме того, разработаны индексы, характеризующие ионосферную возмущенность локально и глобально [Nesterov et al., 2017; Gulyaeva and Stanislawska, 2008] и основанные на глобальных ионосферных картах. Проф. Э.Л. Афраимовичем был предложен несколько иной подход к оценке возмущенности ионосферы, показывающей состояние волновой активности. С этой целью в качестве индекса предложено среднее среднеквадратичное отклонение вариаций ПЭС [Afraimovich et al., 2008b]. В работе [Воейков и др., 2015] предложенный метод был улучшен, а вместо СКО использована огибающая вариаций. Полученный в результате индекс WTEC также отражает состояние волновой активности, показывает уровень возмущенности ионосферы и хорошо коррелирует с солнечной и геомагнитной активностью [Перевалова и др., 2016].

### **1.2.2. Проблемы оценки абсолютных значений полного электронного содержания и дифференциальных кодовых задержек**

При определении ПЭС по фазовым измерениям существуют неоднозначности, связанные с неоднозначностью фазовых измерений. Расчеты по групповым измерениям (1.2) лишены этого недостатка, однако с другой стороны, включают в себя дифференциальные кодовые задержки.

*Дифференциальные кодовые задержки* – это отличие времени распространения сигнала различных частот и обработки различных

сигнальных компонент в радиотрактах спутника и приемника. При этом дифференциальные кодовые задержки имеют место в частотных каналах аппаратуры как спутников, так и приемников.

Для фазовых измерений систематическая ошибка не меняется для непрерывного ряда наблюдений выбранного спутника при отсутствии срывов сопровождения навигационного сигнала. ДКЗ предполагаются мало меняющимися на интервале несколько дней [Schaer, 1998], хотя имеют место исключения.

В соответствии с формулами (1.2)–(1.3) ДКЗ и фазовые неоднозначности приводят к появлению произвольной систематической ошибки при измерении ПЭС. **Таким образом, получение абсолютных величин ПЭС по исходным измерениям ГНСС принципиально невозможно.**

Игнорирование дифференциальных кодовых задержек приведет к ошибкам определения ПЭС на единицы–десятки TECU, что является неприемлемым для решения задач мониторинга. Таким образом, для получения абсолютных ионосферных параметров с использованием данных ГНСС при привлечении групповых измерений требуется обязательный учет дифференциальных кодовых задержек.

Вариации ДКЗ могут быть связаны с изменениями параметров окружающей среды приемника. В отдельных редких случаях регистрировались большие изменения ДКЗ ото дня ко дню, соответствующие ошибке ПЭС  $\sim$ 1–8 TECU [Ciraolo et al., 2007].

Следует отметить, что используемое в литературе разделение ДКЗ на ДКЗ спутников и ДКЗ станций является достаточно условным. Без непосредственных калибровочных измерений точно разделить эти вклады не представляется возможным. С целью разделения используют условие нулевого среднего (zero-mean condition) [Li et al., 2012], предполагающее, что суммарные ДКЗ по всей орбитальной группировке ГЛОНАСС (и GPS, и иных) равны нулю. В целом такое условие вполне допустимо, так как при

корректировке ПЭС необходимо использовать сумму ДКЗ спутника и приемника (как сделано в формуле (2.1)). Безусловно, при запуске новых спутников вследствие этого условия все ДКЗ будут заново оценены. Изменение составляет величину реальных ДКЗ нового спутника, разделенную на общее число спутников в группировке.

Процедура оценки ДКЗ является достаточно проблематичной. Одна из проблем – влияние ионосферной вариабельности при оценке, и, в первую очередь, изменение средней высоты ионосферы [Zhang et al., 2014; Themens et al., 2013]. По этому вопросу нет однозначного мнения, и ряд работ показывает отсутствие подобной связи [Zhong et al., 2016b], а одной из причин называют температурную зависимость [Themens et al., 2015].

Помимо дифференциальных кодовых задержек, в аппаратуре ГЛОНАСС имеются так называемые межчастотные кодовые задержки [Reussner and Wanninger, 2012]. Такое отличие от остальных систем, в том числе от GPS, связано с использованием частотного разделения каналов в ГЛОНАСС. На рисунке 1.5 представлены результаты, полученные в [Reussner and Wanninger, 2012]. Дифференциальные кодовые задержки для разных спутников могут достигать нескольких метров (1 метр –  $\sim 3$  нс или  $\sim 9$  TECU).

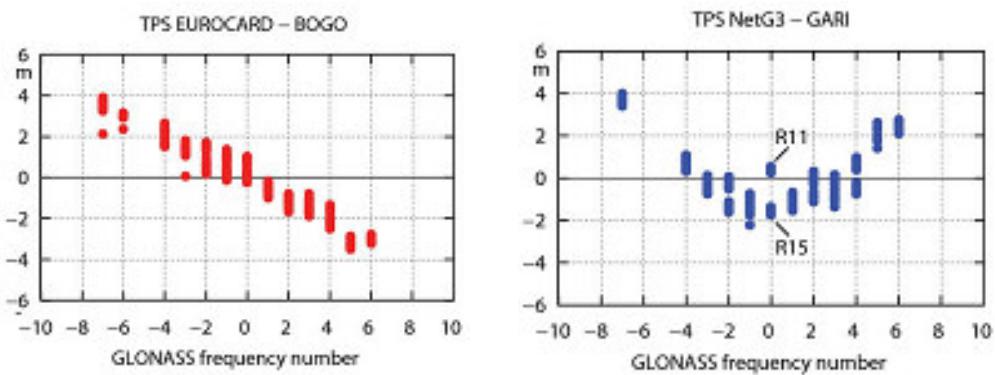


Рисунок 1.5. Средняя задержка в канале ГЛОНАСС для двух приемников BOGO и GARI для различных частотных каналов ГЛОНАСС (GLONASS frequency number). Переработанный рисунок 1 из статьи [Reussner and Wanninger, 2012].

Несмотря на явную частотную зависимость межчастотных задержек, в большинстве случаев их достаточно тяжело моделировать [Reussner and Wanninger, 2012]. Например, для станции GARI межчастотные задержки для антиподных спутников R11 и R15 различаются на  $\sim 2$  м.

Стабильность ДКЗ отличается для разных систем и приемников. Так, оценки ДКЗ Galileo являются достаточно стабильными [Montenbruck et al., 2014]. А для китайской системы BeiDou первого поколения была выявлена значительная нестабильность ДКЗ отдельных спутников [Montenbruck et al., 2014; Li et al., 2012]. Определенный значительный эффект на ДКЗ вносит заземление [Choi and Lee, 2018].

В настоящее время существует ряд методов для оценки вертикального ПЭС, которое в дальнейшем может использоваться для компенсации ионосферной ошибки в радиотехнических системах. Основной смысл всех методов – задание модели измерений и оценка параметров этой модели. При этом методы, используемые на сети станций и по отдельным станциям, могут быть достаточно близкими, но использовать разный базис, корректно учитывающий особенности.

Для построения глобальных ионосферных карт на сети станций ряд групп использует разложение по сферическим гармоникам [Mannucci et al., 1998; Schaer et al., 1998b; Schaer, 1999; Шагимуратов и др., 2013]. На конец 2022 г. существовало семь основных производителей глобальных ионосферных карт GIM (global ionosphere maps) – ассоциированных членов IGS.

Продукты указанных организаций находятся в свободном доступе на сайте <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>. Названия организаций перечислены в таблице 1.4. Здесь же приведены названия основных продуктов GIM и список систем, данные которых используются в обработке [Roma-Dollase et al., 2017].

Таблица 1.4. Сведения о научных центрах, рассчитывающих карты GIM

Организация	Основной продукт	Используемые системы
The International GNSS Service	IGSG	-
Center for Orbit Determination in Europe	CODG	GPS
European Space Agency	ESAG	GPS+ГЛОНАСС
Jet Propulsion Laboratory	JPLG	GPS+ГЛОНАСС (?)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-IonSAT)	UPCG	GPS
Chinese Academy of Sciences	CASG	GPS+ГЛОНАСС+BeiDou(?)
Natural Resources Canada	EMRG	GPS+ГЛОНАСС
Wuhan University	WHUG	GPS+ГЛОНАСС

При этом для JPLG и CASG информация, указанная в самих картах, несколько расходится со сведениями из [Roma-Dollase et al., 2017]. В файлах в формате IONEX для указанных центров не приведены значения ДКЗ для ГЛОНАСС в случае с Jet Propulsion Laboratory и для BeiDou в случае с Chinese Academy of Sciences. В таблице 1.5 (переработана из таблицы 1 в [Roma-Dollase et al., 2017]) приведены сведения по принципам построения GIM. В основном построение GIM осуществляется на базе разложения измеренных значений ПЭС на определенной сети станций по сферическим гармоникам. Значительно отличается технология, применяемая UPC-IonSAT, основанная на томографическом подходе. В качестве стандарта сообществом принимается продукт IGSG [Hernández-Pajares et al., 2009], представляющий собой средневзвешенное значение по основным продуктам 4 лабораторий.

Временное разрешение карт традиционно составляет 2 ч. В настоящее время наметился переход к более высокому разрешению. Так продукт CODG

имеет разрешение 1 ч. UPC-IonSAT производит карты с разрешением 15 мин (UQRG). В литературе обсуждается возможность получения карт JPL с разрешением 15 мин (см., например, [Roma-Dollase et al., 2017]), но в открытом доступе данные карты отсутствуют. Как правило, для расчетов карт GIM используется 250–400 станций. В работе [Komjathy et al., 2005] технология расчета GIM была улучшена с возможностью обработки более 1000 двухчастотных ГНСС-приемников. Большой объем данных GIM позволяет строить на их основе новые ионосферные модели (см., например, [Ivanov et al., 2011]).

В работе [Durmas and Karslioglu, 2014] для построения карт GIM использовались B-сплайны. Существует ряд работ, использующих для разложения полиномы. Впервые такой метод был использован в одной из самых первых работ по использованию сигналов ГНСС [Lanyi and Roth, 1988] для оценки ПЭС. В работе [Schaer, 1999], посвященной глобальному картированию ионосферы, было высказано предположение, что локальные измерения ПЭС должны лучше описываться Тейлоровским разложением.

Даже данные карт ПЭС содержат отрицательные значения. Так, являющиеся одним из лучших продуктов UQRG (разрешение по времени 15 мин) имеют до 3550 отрицательных значений за год, а в общей статистике – ~0.005 %. Наиболее часто используемые продукты CODG – ~1 % (!) нулевых значений (отрицательные значения, по всей видимости, заменяются нулевыми) в среднем за период 1998–2020 гг.

В литературе отсутствуют проработка и валидация методов оценки абсолютного ПЭС по данным одной станции, а также оценка работоспособности методов в условиях нерегулярных факторов космической погоды. **Настоящее диссертационное исследование детально проясняет вопрос возможностей использования Тейлоровского разложения для решения задачи получения абсолютного ПЭС и развивает новые методы.**

Таблица 1.5. Методики расчета глобальных ионосферных карт

GIM	Метод расчета	Модель ионосферы	Начало расчетов	Разрешение по врем., ч.	Число станций	ссылка
IGSG	Взвешенное среднее	-	1998.4	2	-	[Hernández-Pajares et al., 2009]
CODG	Сферические гармоники 15 степени, солнечно-геомагнитная система отсчета	Модифицированная однослойная модель 2-D	1998.4	2/1	~300	[Schaer, 1999]
ESAG	Сферические гармоники 15 степени, солнечно-геомагнитная система отсчета	Однослойная модель 2-D	1998.4	2/1(?)	~300	[Feltens, 2007]
JPLG	Билинейный градиент ПЭС, солнечно-вмороженная система	Трехслойевая 3-D	1998.4	2/0.25(?)	> 200	[Mannucci et al., 1998]
UPCG	Томография с использованием сплайнов	3-D	1998.4	2	~200	[Hernández-Pajares et al., 1999]
UQRG	Томография с использованием кригинга	3-D	2011	0.25	~200	[Orús et al., 2005]
CASG	Сферические гармоники 15 степени и обобщенные, тригонометрические ряды	Однослойная модель 2-D	2016	2	~400	[Li et al., 2015]
EMRG	Сферические гармоники 15 степени, солнечно-геомагнитная система отсчета	Однослойная модель 2-D	1998.4	2/1(?)	~350	[Ghoddousi-Fard, 2014]
WHRG	Сферические гармоники 15 степени, марковская модель	Однослойная модель 2-D	2016	2	~250	[Zhang et al., 2013]
WHUG	Сферические гармоники 15 степени и МНК.	Однослойная модель 2-D	2016	2	~250	[Zhang et al., 2013]

В последние годы активно ведется работа по использованию одностанционных решений. В работах В.М. Смирнова [Смирнов, 2007; Смирнов и Смирнова, 2010; Смирнов и Смирнова, 2017] для определения профиля электронной концентрации предложено использовать решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Задачи данного типа относятся к классу некорректных задач. Как указано в [Смирнов и Смирнова, 2017], уравнение содержит «неустранимую погрешность измерений», которая, по всей видимости, может сказываться на результате. В этой связи актуальна задача получения на первом этапе абсолютных измерений наклонного и вертикального ПЭС максимального достижимого качества.

В работе [Sardón et al., 1994] использовались линейные градиенты вокруг станции для оценки абсолютного ПЭС. При этом не принималась в расчет временная динамика, что будет сказываться на результате. В [Ma and Maruyama, 2003] использовалась модель неизменного ПЭС (нулевое приближение), но на сети станций с отнесением измерений к различным ячейкам. Многостанционная обработка позволяет уменьшить ошибку. В работе [She et al., 2019] также использовалось нулевое приближение.

Среди работ российских групп следует отметить работы КФ ИЗМИРАН [Шагимуратов и др., 2015]. Близкий к рассмотренным выше подход был реализован в 1996 г. под руководством И.И. Шагимуратова [Шагимуратов и др., 1996]. Принципиальной особенностью данного алгоритма являлось разложение по гармоникам в функции местного времени. В [Шагимуратов и др., 2016] разложение с гармониками по времени было дополнено широтным градиентом 2-го порядка, а в [Zakharenkova et al., 2016] – методом главных компонент. При дальнейшем развитии методов использовались сферические гармоники для пространственного разложения на сети станций [Шагимуратов и др., 2013], близкие к алгоритму расчета глобальных ионосферных карт CODE [Schaer, 1999]. Для калибровки ПЭС с целью

ассимиляции данных ГНСС сферические гармоники использовались в диссертационной работе Титова А.А. [2016].

Более современный алгоритм используется в MIT Haystack Observatory (Madrigal-TEC). Ими разработан сервис и регулярно выдаются данные на сети станций [Rideout, Coster, 2006]. ДКЗ спутников определяются по данным Jet Propulsion Laboratory. Оценка ДКЗ приемника осуществляется на основе трех методов. Первый предполагает, что вертикальное ПЭС, рассчитанное на разных углах места, должно сохраняться. Другой подход для расчета ПЭС близок к методике [Rama Rao, 2006; Arikan et al., 2003], но использует разностное решение по двум приемникам. Третий подход заключается в выборе таких ДКЗ, чтобы минимальные значения ПЭС были равны нулю. Далее станции группируются (не менее трех), в качестве значения выбирается минимум по первой оценке и используется разностный метод.

Другой подход состоит в разложении поля ПЭС по модельным функциям. В работе [Mayer et al., 2011] использовалось разложение по эмпирическим функциям модели NTCM2. Авторами получено, что данные измерений неполного на 2011 г. сегмента Galileo также могут предоставить вполне хорошие оценки вертикального ПЭС.

В ряде случаев для получения абсолютных наклонных значений ПЭС используется калибровка на основе глобальных ионосферных карт. В частности, такой подход использовался для нормировки одночастотных данных [Hernandez-Pajares et al, 2018]. В работе [Терещенко и др., 2015] предложено осуществлять калибровку полного электронного содержания ГЛОНАСС на основе известных (при наличии) данных абсолютного ПЭС GPS. Данный подход при этом не решает задачу независимого мониторинга.

Практически во всех подходах используются совместно групповые и фазовые измерения. В [Smith et al., 2004] предложено использовать только фазовые измерения. Недостатком подхода является то, что число неизвестных сильно возрастает, особенно при наличии срывов

сопровождения фазы, так как после срыва появляется новая независимая константа.

Альтернативный подход для оценки вертикального ПЭС, основанный на введении дополнительного слагаемого при решении навигационной задачи, предложен в работе [Новиков, 2010]. К сожалению, работы были опубликованы только на русском языке и недавно данный подход был «переоткрыт» с публикацией результатов в ведущих мировых журналах [Lee et al., 2015; Xiang et al., 2017; Li et al., 2018]. В том числе рассматривается возможность многостанционного решения (array-added PPP) [Zhang, 2016].

**Следует отметить, что указанные методы тестировались в достаточной мере только для решений на сети станций. Метод с работой на отдельных станциях не отработан. Существенным недостатком всех методов можно отметить вероятность получения отрицательных значений ПЭС. Фактически величина ПЭС является условным параметром, позволяющим сходиться решению системы уравнений, – это говорит о том, что оно может принимать и отрицательные значения, что и происходит на практике.**

Возможность получения неотрицательного решения существует – например, неотрицательный метод наименьших квадратов применялся для улучшения глобальных ионосферных карт [Zhang et al., 2013]. Для решения, основанного на измерениях с отдельной станции, требуется разработка соответствующих подходов, учитывающих в том числе особенности измерений для одночастотного и двухчастотного режимов. Необходимо, чтобы разрабатываемая методика, помимо неотрицательных абсолютных вертикальных значений ПЭС, на выходе предоставляла неотрицательное ПЭС для всех лучей (по крайней мере, для двухчастотных измерений).

Часть существующих алгоритмов направлена непосредственно на оценку ДКЗ, что также в потенциале позволяет получать абсолютные значения ПЭС. При этом, как правило, ДКЗ все равно оцениваются

одновременно с оценкой абсолютного ПЭС как, например, при расчете глобальных ионосферных карт [Schaer, 1999]. Так, например, в [Jin et al., 2012] опубликован MatLab-код для расчета ДКЗ по данным GPS на основе разложения ПЭС по сферическим гармоникам. По сравнению с данными, публикуемыми лабораторией CODE, ошибка составляет до 0.4 нс ( $\sim$ 1 TECU).

В [Hong et al., 2008] предложен алгоритм, основанный на анализе данных с сети станций, когда один из приемников имеет известные ДКЗ. Новым шагом для оценки ДКЗ является технология высокоточного позиционирования методом PPP (precise point positioning), которая может позволить уменьшить шумовую ошибку при оценке на  $\sim$ 20 % [Fan et al., 2016], а также использование нейронных сетей для оценки ДКЗ [Ma et al., 2005]. Последний подход позволяет избавиться от необходимости в прямую вводить функцию преобразования наклонного ПЭС в вертикальное.

Среди существующих аналогов развивающихся в диссертационном исследовании подходов, находящихся в настоящее время в свободном доступе, следует отметить используемое в литературе программное обеспечение IONOLAB, разработанное в Университете Хаджеттепе, и SEEMALA-TEC, разработанное в Индийском институте геомагнетизма. Примеры суточной динамики ПЭС приведены на рис. 1.6.

Программное обеспечение IONOLAB (<http://www.ionolab.org/>) [Arikan et al., 2007] основано на простой модели, при которой ПЭС считается постоянным в регионе станций, то есть пренебрегается пространственными производными, а ПЭС на выбранных периодах считается неизменным (нулевое приближение) [Arikan et al., 2003; Arikan et al., 2004]. Исходные входные данные – измерения группового ПЭС, скорректированного по ДКЗ CODE. Модель ПЭС содержит ДКЗ станции и приемника, вертикальное ПЭС и функцию преобразования вертикального ПЭС в наклонное. осуществляется минимизация L2 нормы на основе метода наименьших квадратов.

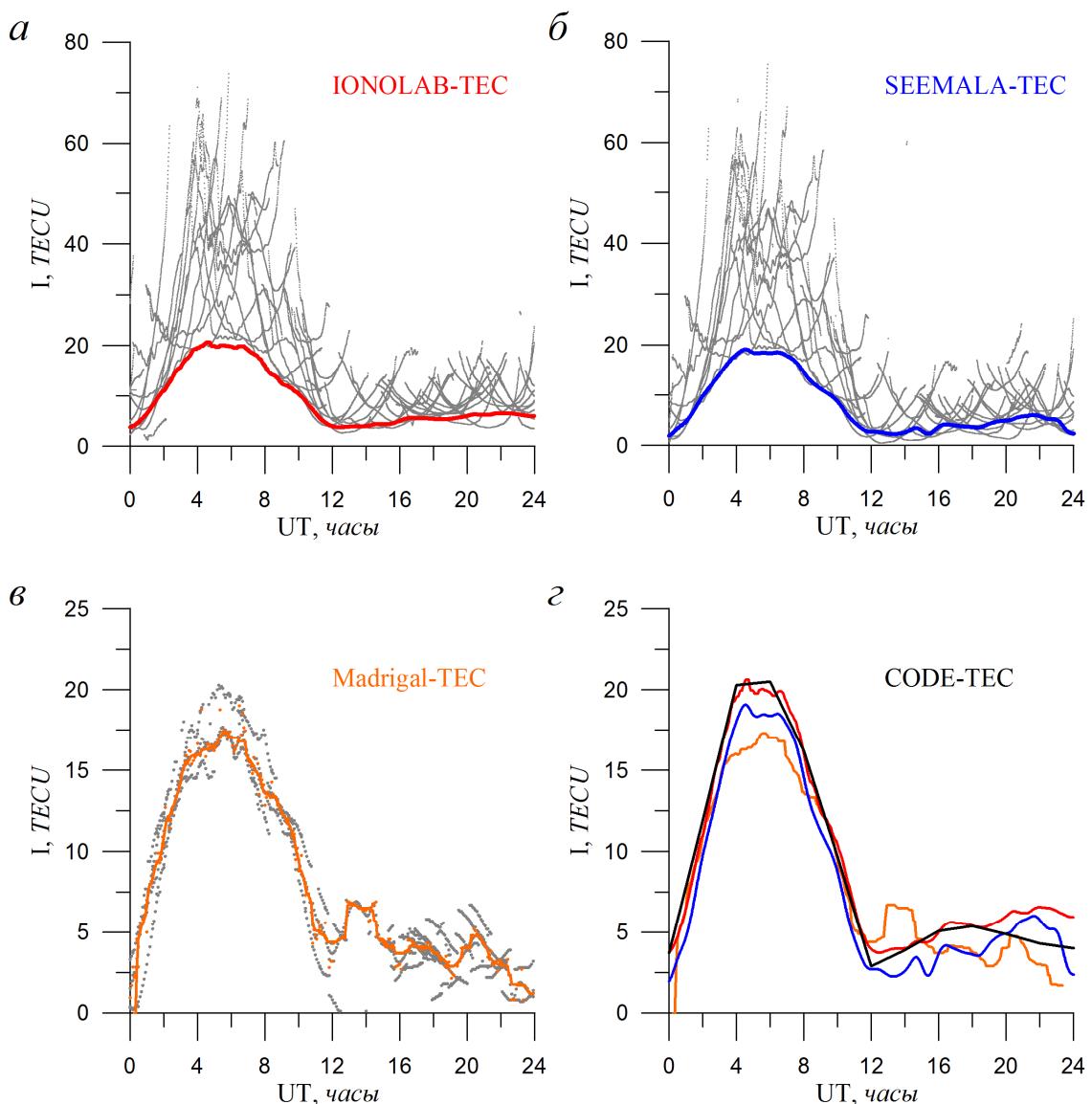


Рисунок 1.6. Суточная динамика ПЭС по данным IONOLAB (*а*), SEEMALA-TEC (*б*), Madrigal-ТЕС (*в*). Серые точки на панелях *а* и *б* показывают абсолютное наклонное ПЭС на различных лучах спутник – приемник, а на панели *в* – значения вертикального ПЭС в ячейках карт Madrigal в области ( $50^{\circ}$ – $54^{\circ}$ N,  $102^{\circ}$ – $106^{\circ}$ E). Оранжевые точки на панели *в* показывают медианное значение ПЭС по области ( $50^{\circ}$ – $54^{\circ}$ N,  $102^{\circ}$ – $106^{\circ}$ E), а оранжевая кривая – фитирование сплайном этих значений. Панель *г* – сравнение данных вертикального ПЭС IONOLAB, SEEMALA-ТЕС, Madrigal, а также данные CODE GIM (черная кривая). Данные представлены на 1 января 2014 г.

Статистические веса отдельных измерений определяются в соответствии с удаленностью подыоносферных точек (проекции ионосферных точек) от станции. Временная динамика задается набором последовательных значений. Осуществляется анализ только данных GPS. Опыт использования показывает наличие отрицательных значений в получаемых решениях, что приводит к выдаче предупреждения и невозможности обработки данных за сутки. Так, для 2009 г. в этой связи не было обработано  $>30\%$  суточных файлов по 5 станциям (ALRT, IRKJ, LPAL, NTUS, THU2), а за 2014 г. –  $\sim 14\%$  суточных файлов. В целом можно отметить его хорошую согласованность с данными глобальных ионосферных карт GIM (см. панель г).

Используемая модель измерений в SEEMALA-TEC [Rama Rao, 2006; Seemala, 2012] схожа с той, что используется в IONOLAB [Arikan et al., 2003]: вертикальное ПЭС представляет собой среднее по всем спутникам. Пример суточной динамики ПЭС по данным станции IRKJ (Иркутск, Россия) на 1 января 2014 г. приведен на рисунке 1.6, б. Программное обеспечение может осуществлять расчет собственных ДКЗ, но, по замечанию самих авторов, результаты оценки ПЭС при таком подходе оказываются достаточно плохими. На рис. 1.7 представлен пример данных ПЭС, выдаваемых программным обеспечением SEEMALA-ТЕС: внизу – данные без использования внешних значений ДКЗ CODE, вверху – после устранения ДКЗ по данным CODE. Данные, полученные без использования ДКЗ CODE, характеризуются сильными вариациями, совпадающими с трендами конвертированных наклонных рядов ПЭС для отдельных спутников. Такие вариации не имеют физического смысла. После устранения ДКЗ на основе данных CODE данные ПЭС становятся более корректными. При этом наличие вариаций в районе 14–15 UT 01 января 2014 г. также связано с артефактом обработки, а суточный ход для 01 сентября 2009 г. явно обусловлен некорректной оценкой ДКЗ.

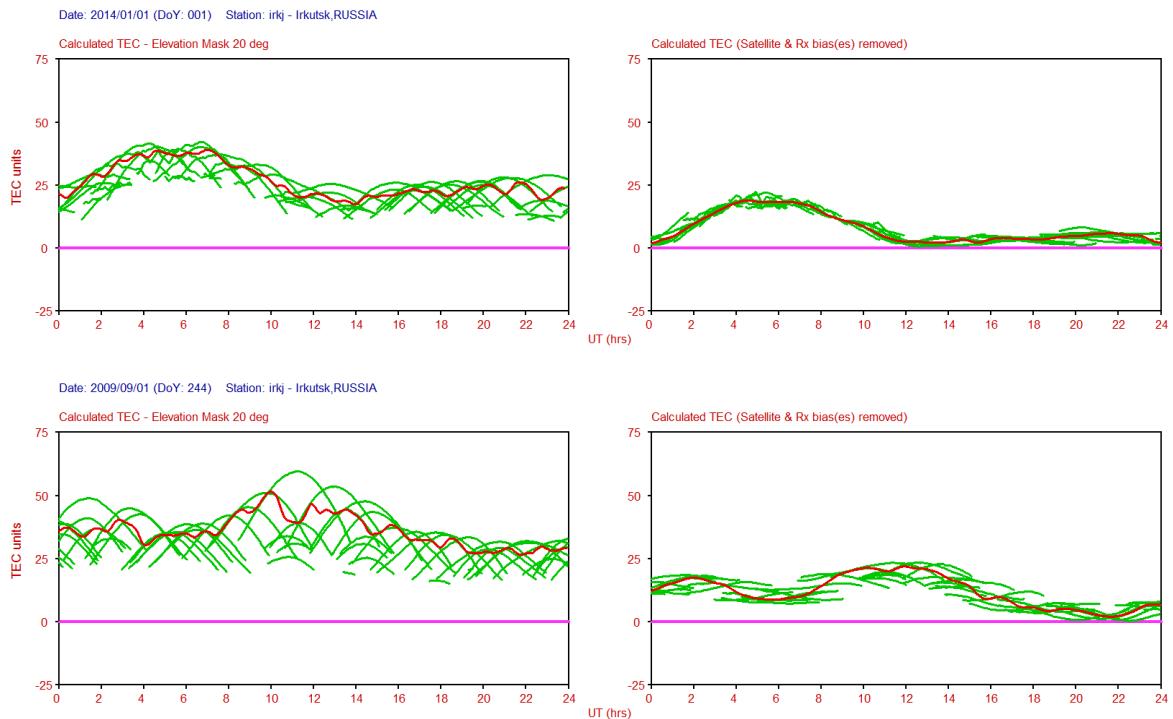


Рисунок 1.7. Вертикальное ПЭС, получаемое на основе программного обеспечения SEEMAL-TEC без использования ДКЗ CODE (слева) и при использовании ДКЗ CODE (справа). Станция IRKJ. Верхние панели – данные за 01 января 2014 г., нижние панели – данные за 01 сентября 2009 г.

Следует отметить, что Madrigal-TEC, полагающийся в основном на многостанционную обработку, дает достаточно хорошие результаты в регионах с большим числом станций, но имеет проблемы для регионов с малым числом станций (рис. 1.6, в). При этом можно видеть, что разные методы в целом хорошо согласуются по суточной динамике.

**Таким образом, проблема оценки абсолютного вертикального и наклонного полного электронного содержания все еще является нерешенной актуальной задачей.**

Развитие одночастотной аппаратуры пользователей привело к тому, что количество одночастотных пользователей ГНСС составляет  $\sim 5$  млрд смартфонов [EMR-2021, 2021]. Измерение вертикального ПЭС по одночастотным данным предложено в работе [Казанцев и Фатеев, 2002]. Однако отклонение динамики ПЭС от простой модели, в особенности рост ПЭС при увеличении угла места спутника, приводит к появлению отрицательных значений ПЭС. В этой работе не затронут вопрос измерений временных и пространственных производных ПЭС и измерения наклонного ПЭС. Привлечение даже 0.1 % таких данных на 3 порядка превысило бы объем данных от существующих постоянно действующих приемников ГНСС. **Поэтому должны создаваться методы с возможностью обработки не только двухчастотных, но и одночастотных данных.**

### **1.2.3. Необходимость регулярной оценки дифференциальных кодовых задержек**

Задача получения абсолютного ПЭС при привлечении групповых измерений связана с оценкой ДКЗ. В условиях неизменности ДКЗ спутников и приемников данную проблему можно было бы решить однократной калибровкой. В этой связи первым вопросом необходимо рассмотреть, насколько может изменяться ошибка оценки ПЭС вследствие вариаций ДКЗ.

Анализ систематической погрешности оценки ПЭС, связанной с ДКЗ в частотных каналах спутников и приемников, за период 2000–2014 гг. приведен на рис. 1.8. Черные кривые – данные GPS, серые – данные ГЛОНАСС. Видны, во-первых, значительная величина этой ошибки, а, во-вторых, наличие существенной изменчивости этой величины. Для оценки были использованы данные лаборатории CODE (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>), получаемые при анализе данных распределенной по миру сети станций.

Изменение ПЭС вследствие ДКЗ составляет от ~1 ТЕСУ/год до ~5–10 ТЕСУ/год. В отдельных случаях наблюдаются значительные нерегулярные вариации ДКЗ. Резкие скачки ДКЗ (рис. 1.8, з, и) связаны с заменой спутников. Запуск новых спутников (в силу использования условия «нулевого среднего» для спутниковой группировки [Li et al., 2012]) может приводить к резкому смещению ДКЗ всех спутников с соответствующей ошибкой ПЭС до 1.5 ТЕСУ. Это можно видеть в динамике ошибки для спутников GPS в 2004 г. (рис. 1.8), когда в период с декабря 2003 г. было последовательно введено в строй четыре спутника GPS: декабрь 2003 г., март 2004 г., июнь 2004 г., ноябрь 2004 г. (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/SpacecraftQuery.jsp>).

Стоит отметить, что для ГЛОНАСС наблюдаются значительные вариации ошибки, связанной с ДКЗ, превышающие общее систематическое изменение с амплитудой ~5 ТЕСУ. Для спутников GPS вариации с характерными периодами порядка года в разы меньше.

По аналогии с дифференциальными кодовыми задержками спутников имеются существенные вариации в ДКЗ приемников. На рисунке 1.9 представлен пример динамики ошибки ПЭС, связанной с ДКЗ, для 6 станций.

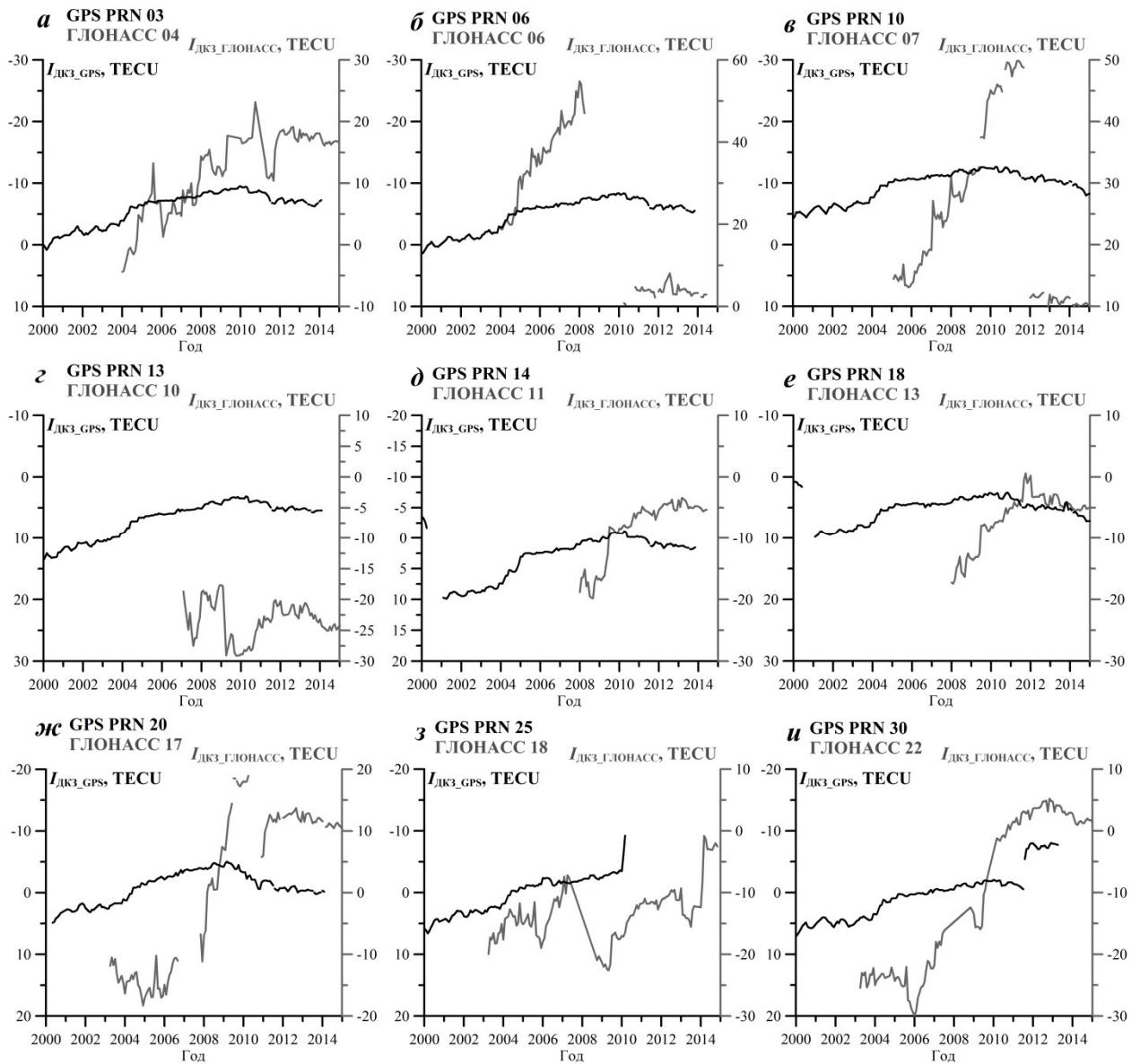


Рисунок 1.8. Динамика ошибки оценки ПЭС, связанной с дифференциальными кодовыми задержками в аппаратуре спутников GPS (серые кривые) и ГЛОНАСС (черные кривые). Номера спутников указаны на панелях.

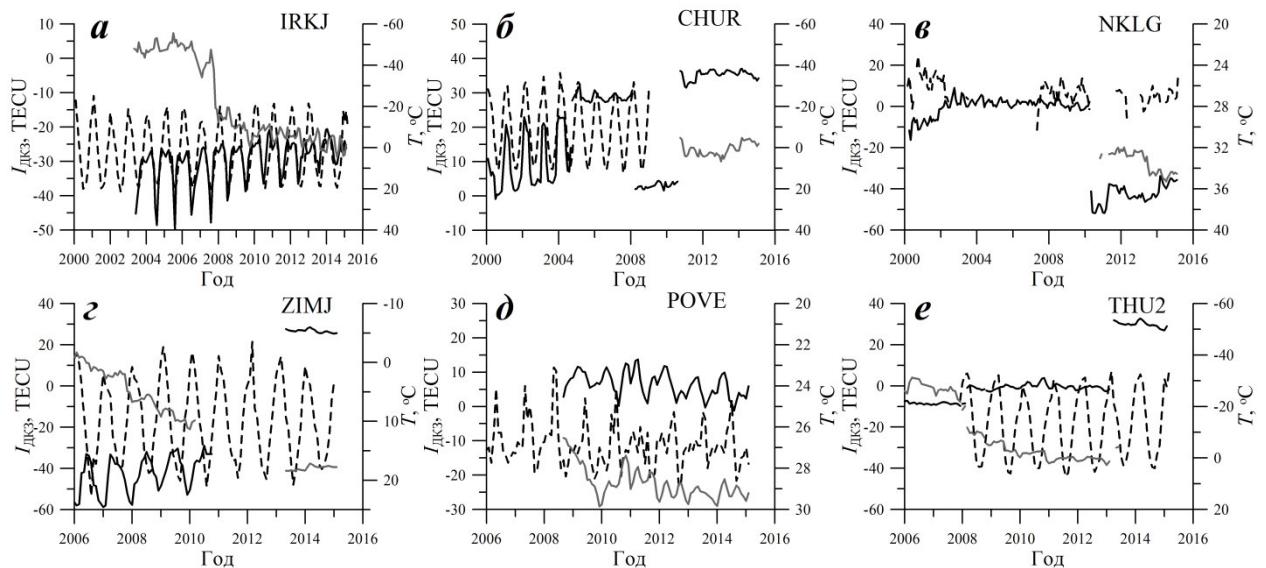


Рисунок 1.9. Динамика ошибки оценки ПЭС, связанной с дифференциальными кодовыми задержками, в приемниках для каналов GPS (серые кривые) и ГЛОНАСС (черные кривые). Номера спутников указаны на панелях. Штриховая линия – температура в регионе станции.

Представленные на рис. 1.9 данные для станций IRKJ, CHUR, ZIMJ, PROV характеризуются значительными сезонными вариациями. Амплитуда сезонных вариаций ошибки для станций IRKJ (*a*), CHUR (*б*), ZIMJ (*в*) составляет  $\sim 20$  TECU ( $\sim 7$  нс), для станции POVE (*г*)  $\sim 10$  TECU ( $\sim 3.5$  нс). В отдельные периоды перепады за пол года могут достигать 40–60 TECU, то есть даже ежемесячная калибровка даст значительную ошибку.

Таким образом, для получения абсолютных ионосферных параметров с использованием данных ГНСС при привлечении групповых измерений обновление дифференциальных кодовых задержек должно быть регулярным и, по крайней мере, ежедневным.

#### **1.2.4. Сбои измерения радионавигационных параметров во время эффективных гелиогеофизических событий**

Возможность использования ГНСС в неблагоприятных гелиогеофизических условиях связана с устойчивостью работоспособности. Повышение вероятности ухудшения функционирования ГНСС должно возникать в условиях возмущения околоземного космического пространства. В одной из пионерских работ на основе данных за 1999–2000 гг. было показано, что во время магнитных бурь происходит рост срывов сопровождения фазы [Afraimovich et al., 2002]. В дальнейшем было опубликовано большое количество работ, посвященных изучению сбоев сопровождения фазы навигационного сигнала. В частности, изучалась стабильность измерения фазы в одночастотной аппаратуре [Горбачев и др., 2010]. Была высказана гипотеза о существенном влиянии вторичного излучения самой атмосферы во время солнечных вспышек на стабильность работы ГНСС [Голубков и др., 2011]. В качестве значимых обобщающих работ необходимо отметить монографии [Афраймович и Перевалова, 2006; Демьянов и Ярюкевич, 2014; Demyanov et al., 2012]. Из ключевых

естественных факторов ОКП, влияющих на функционирование ГНСС, следует выделить три:

- магнитные бури [Afraimovich et al., 2002];
- ионосферные неоднородности (в том числе и на средних широтах [Afraimovich et al., 2011]) и связанные с ними ионосферные мерцания радиосигналов [Conker et al., 2003; Kintner et al., 2007];
- солнечное радиоизлучение [Klobuchar et al., 1999; Afraimovich et al., 2008c].

Первый фактор также связан с возникновением мелкомасштабных неоднородностей и резких градиентов электронной концентрации. Это приводит к случайным флюктуациям амплитуды и фазы сигнала, а также формы его огибающей и в результате к энергетическим потерям, в том числе при обработке сигнала [Маслов и Пашинцев, 2006]. Имеется прямая связь между мерцаниями сигнала и срывами измерений радионавигационных параметров. Вероятность срывов резко возрастает при интенсивности мерцаний больше 10 дБ [Rama Rao et al., 2009]. Третий фактор связан с возрастанием уровня шума на входе приемника [Afraimovich et al., 2008c; Yue et al., 2013, 2018].

Существует две зоны локализации интенсивных мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, приводящих к мерцаниям навигационного сигнала, и, соответственно, ухудшения характеристик работы ГНСС. Это авроральная область, располагающаяся в широтном диапазоне  $65^{\circ}$ – $90^{\circ}$ , и экваториальная область –  $0^{\circ}$ – $20^{\circ}$  [Kintner et al., 2009].

Одной из основных причин ионосферных возмущений в авроральной области является высыпание частиц. В работах Полярного геофизического института отмечается значительное влияние сияний на стабильность работы ГНСС [Черноус и др., 2016, 2018]. В экваториальной области наиболее интенсивные неоднородности, приводящие к ионосферным мерцаниям радиосигнала, происходят в основном в постзакатное время [Aarons et al.,

1996]. Данное явление обусловлено появлением ионосферных пузырей (bubbles) [McClure et al., 1977], возникающих в нижней части F-слоя с последующим поднятием вверх со скоростями  $\sim 150$  м/с, и характеризующихся значительным отклонением электронной концентрации от фонового уровня (до  $\sim 10$  раз). Появление этих неоднородностей имеет существенную сезонную динамику и прямую зависимость от уровня солнечной активности [Aarons, 1982; Aarons et al., 1996].

Высокоширотная ионосфера достаточно активна даже в спокойных условиях. Суточный ход интенсивности неоднородностей выражен слабо, но значимое влияние оказывает повышение уровня геомагнитной активности, приводящее также к значительному расширению области аврорального овала [Харгривс, 1982; Жеребцов и др., 1988]. В результате среднеширотная ионосфера приобретает свойства высокоширотной, а срывы измерения параметров радиосигнала ГНСС могут наблюдаться и на средних широтах [Afraimovich et al., 2004].

Кроме того, на границе аврорального овала происходит генерация крупномасштабных ПИВ, которые затем перемещаются в экваториальном направлении и могут приводить к появлению интенсивных мелкомасштабных неоднородностей вдали от авроральной области [Афраймович и др., 2006; Afraimovich et al., 2009b]. Ранее считалось, что на средних широтах отсутствуют условия, необходимые для развития интенсивных мелкомасштабных неоднородностей, а, следовательно, интенсивные мерцания наблюдаются не должны [Aarons, 1982]. Обобщение результатов последних двух десятилетий показывает, что это далеко не так [Демьянов и Ярюкевич, 2014]: на средние широты могут проникать ионосферные возмущения аврорального происхождения, а также суперпузыри из экваториальной ионосферы.

Проникая на средние широты мелкомасштабные неоднородности приводят к нерегулярным изменениям характеристик навигационного

сигнала, а в отдельных случаях – к срыву измерения параметров (фазы, задержки) сигнала.

В [Афраймович и др., 2004] впервые показано, что даже на средних широтах относительная плотность срывов сопровождения фазы на рабочих частотах L1/L2 GPS во время больших магнитных бурь возрастает на один-два порядка. При этом близкая картина имеет место для псевододальнostных измерений [Афраймович и др., 2002]. На рисунке 1.10 (заимствован из [Ушаков, 2004]) показаны вариации Н-компоненты геомагнитного поля (*a*, *d*), плотность сбоев измерения псеводальности по С-коду (*b*, *e*) и Р-коду (на первой или второй частоте) (*c*, *ж*), а также плотность сбоев фазовых измерений (комбинации) (*г*, *з*). Значительное увеличение плотности сбоев измерения радионавигационных параметров совпадает по времени с главной фазой магнитной бури.

Измерения параметров сигнала ГНСС, как уже было отмечено, подвержены негативным факторам воздействия солнечного радиоизлучения. В работе [Афраймович и др., 2009] было показано, что во время мощных вспышек солнечного радиоизлучения 6 и 13 декабря 2006 г. возникли массовые кратковременные сбои измерения радионавигационных параметров в приемниках GPS, преимущественно на второй частоте. Рисунок 1.11 (рис. 5 из работы [Афраймович и др., 2009]) показывает, что при увеличении интенсивности солнечного радиоизлучения в диапазоне работы ГНСС происходит увеличение плотности срывов сопровождения фазы сигнала, а также полная потеря слежения сигнала со спутника.

Были получены разные оценки по пороговому уровню радиошума, при котором возникает влияние на работоспособность ГНСС. Наиболее часто в качестве порогового уровня, при котором происходит значительное снижение качества приема сигнала, считают падение принимаемой мощности на 10 дБ [Klobuchar et al., 1999].

30-50°N, 200-300°E; Ashtech  
6-7 апреля 2000 г.                    15-16 июля 2000 г.

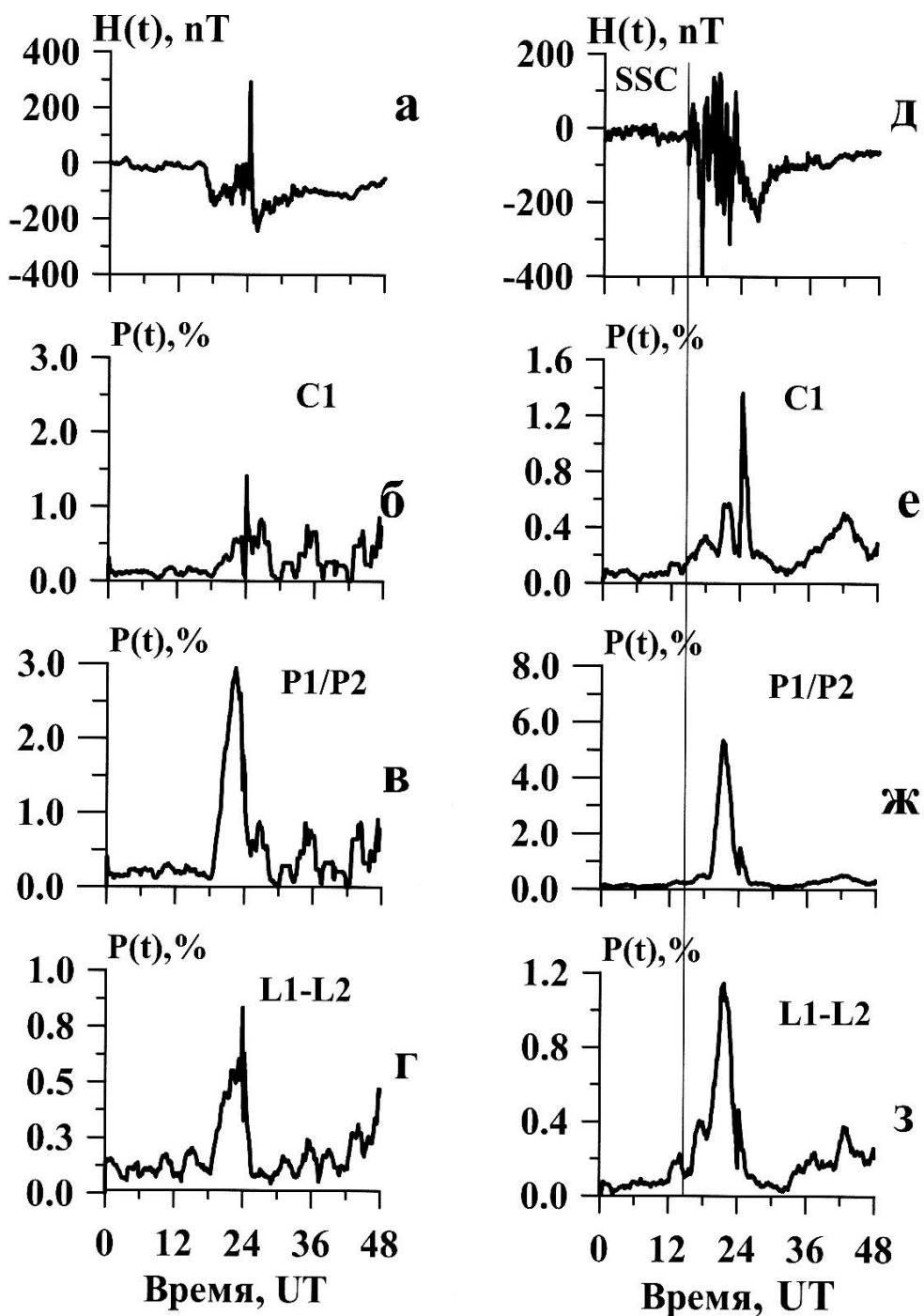


Рисунок 1.10. Вариации Н-компоненты геомагнитного поля (*а, д*), плотность сбоев измерения псеводальности по С-коду (*б, е*) и Р-коду (на первой или второй частоте) (*в, жс*), а также плотность сбоев фазовых измерений (комбинации) (*г, з*). (Рис. 2 из [Ушаков, 2004]).

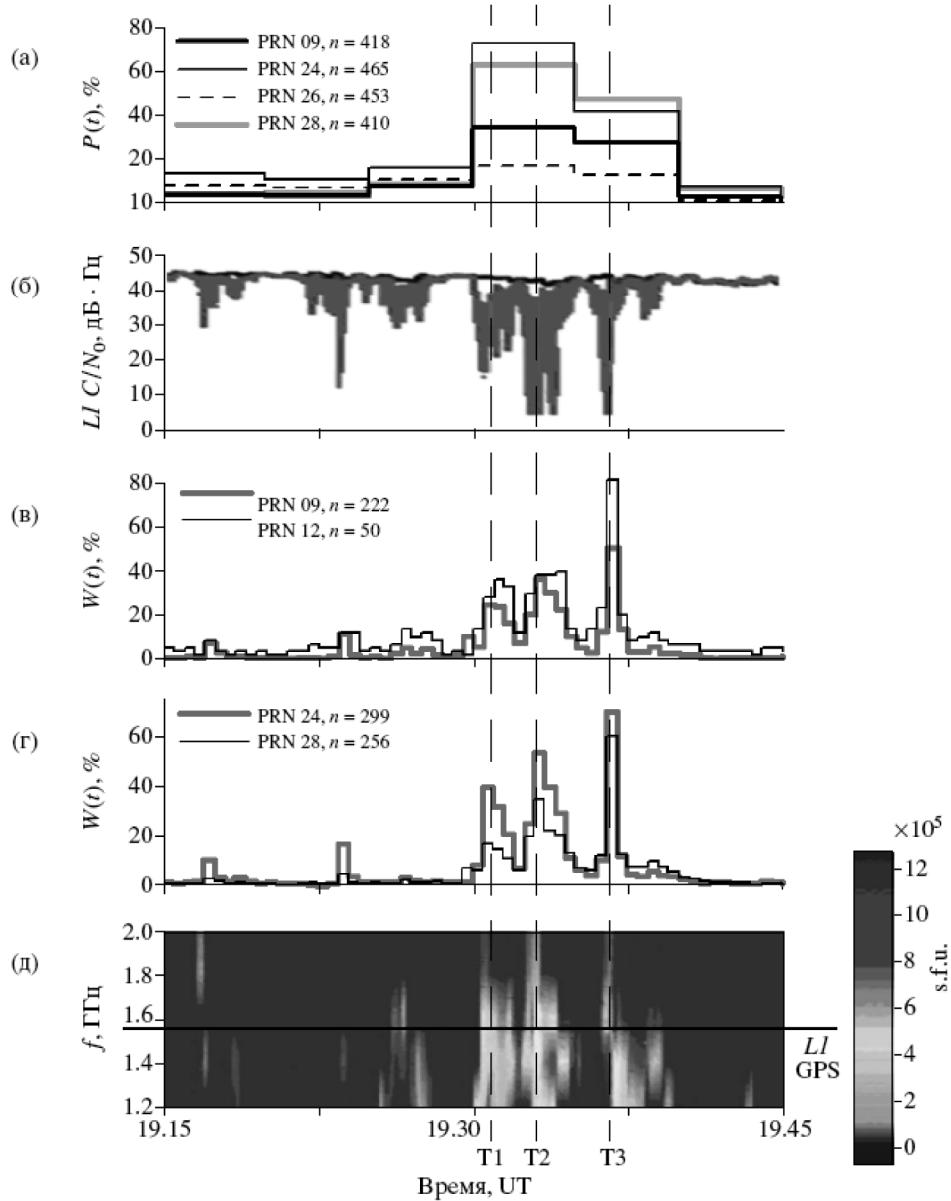


Рисунок 1.11. Сбои измерения радионавигационных параметров вследствие воздействия солнечного радиоизлучения. *а, в, г* – фазовые сбои  $P(t)$  и пропуски отсчетов  $W(t)$  для различных спутников GPS под воздействием солнечной радиовспышки 6 декабря 2006 г; *б* – изменение отношения сигнал/шум на первой частоте GPS, записанное на специализированном GPS-приемнике, *д* – спектр радиоизлучения Солнца в диапазоне 1.2–2.0 ГГц по данным солнечного радиоспектрографа OVSA (рисунок 5 из статьи [Афраймович и др., 2009]).

Величина 10 дБ дала эквивалентную интенсивность радиовсплеска в 200000 с.е.п. (солнечных единиц потока, 1 с.е.п. =  $10^{-22}$  Вт  $\text{м}^{-2}$  Гц $^{-1}$ ) для сигналов со спутников на низких углах места. При этом в [Klobuchar et al., 1999] говорится, что воздействие солнечного радиоизлучения может быть заметным и при более низком уровне – 40000 с.е.п. (3 дБ), но оно крайне низкое. В работе [Chen et al., 2005] было показано, что уровень 40000 с.е.п. сильно завышен. Во время вспышки 28 октября 2003 г. ими установлена новая величина порога 6000–12000 с.е.п. В работе [Афраймович и др., 2009] значение порога было переоценено на уровне 4 000 с.е.п.

Безусловно, модернизация спутниковой группировки и приемного оборудования должна сказываться на особенностях функционирования ГНСС. Так интерфейсный контрольный документ GPS говорит об увеличении обеспечиваемого минимально уровня мощности сигналов [IS-GPS-200J, 2018].

**Можно заключить, что возмущения в околоземном космическом пространстве являются значительным фактором, который может снижать качество функционирования ГНСС. При этом в литературе отсутствуют сведения о том, как развитие спутниковых систем сказывается на возможности использования ГНСС для мониторинга ионосферы.**

В работе [Afraimovich et al., 2002] наряду со срывами сопровождения фазы сигнала и измерения псевдодальности был предложен еще один параметр – сбои ПЭС. Под этим термином изначально предполагались физически не обоснованные значения вариаций ПЭС, вызванные срывом сопровождения фазы на одной из частот. В дальнейших работах стало понятно, что в ряде случаев имеют место ситуации, при которых срыв измерения фазы на обеих рабочих частотах ГНСС отсутствует, при этом получаемая величина ПЭС меняется нетипично для реальных ионосферных условий [Astafyeva et al., 2014]. Это позволило выделить сбои ПЭС как

диагностический параметр, характеризующий состояние ОКП. С другой стороны, появление таких сбоев в измерениях ПЭС является негативным фактором при использовании ГНСС для мониторинга ионосферы.

### **1.3. Выводы по Главе 1**

Проведенный обзор показывает, что на современном этапе развития ионосфера значительно влияет на функционирования различных радиотехнических систем, использующих ионосферные каналы, и существенно ограничивает потенциальные возможности систем. Ионосфера приводит к дополнительному запаздыванию принимаемых радиосигналов, изменению их фазовых, групповых, поляризационных и амплитудных характеристик, а также к изменению направления их распространения. Основной негативный вклад ионосферы для большого класса радиотехнических проблем приходится на интегральные эффекты, которые прямо связанные с абсолютным полным электронным содержанием.

С точки зрения оценок абсолютного ПЭС основное внимание исследователей было уделено решениям на основе сетей станций. Методики оценки ПЭС по данным отдельных приемников существуют, но должного методического внимания этой задаче уделено не было. Проблемой остается получение надежных измерений абсолютного ПЭС, характеризующихся отсутствием артефактов обработки (например, вариаций в данных), в том числе получение физически корректных неотрицательных величин абсолютного ПЭС. Важно отметить, что ни в одной из работ не обсуждается возможность получения абсолютного наклонного ПЭС. Анализ литературы показывает, что отсутствует понимание особенностей использования одночастотных и двухчастотных данных ГНСС для получения физически корректных с физической точки зрения оценок абсолютного ПЭС.

**Поэтому разработка методических основ обработки данных ГНСС и методов оценки корректных значений абсолютного ПЭС является**

**нерешенной и актуальной важной народно-хозяйственной задачей. Ее решение, в свою очередь, позволит решить задачу ионосферного обеспечения прикладных наземных и спутниковых средств. Для этого требуется разработка методов, алгоритмов и комплексов мониторинга для получения абсолютного наклонного и вертикального ПЭС.**

С точки зрения работоспособности технологии ГНСС для указанных задач, как показывают ранние исследования по данным 23-го цикла солнечной активности, космическая погода ограничивала потенциал мониторинга. При этом отсутствуют сведения о том, как развитие спутниковых систем сказывается на возможности использования ГНСС для мониторинга ионосферы. На современном этапе необходимо вернуться к этому вопросу и оценить, насколько развитие навигационных систем в настоящее время (и в перспективе) сможет повысить надежность использования ГНСС как средства мониторинга ионосферы в интересах коррекции ионосферной ошибки в радиотехнических системах.

## **ГЛАВА 2. ОЦЕНКА АБСОЛЮТНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОДНОГО ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

Настоящая глава посвящена описанию разработанного метода для получения абсолютного полного электронного содержания, его пространственных и временных производных на основе одночастотных и двухчастотных данных отдельного приемника сигналов ГНСС; и новому подходу к оперативному прогнозу вертикального ПЭС.

В работах, проводимых для получения результатов настоящей главы, участвовали А.М. Веснин, А.В. Жуков, В.Б. Иванов, А.А. Мыльникова, Д.Н. Сидоров. Разработка программного обеспечения для оценок абсолютного ПЭС выполнялось, в основном, А.А. Мыльниковой и А.М. Весниным. Первые подходы к оценке абсолютных параметров на основе данных двухчастотных измерений ГНСС реализованы А.А. Мыльниковой под руководством автора [Мыльникова, 2017]. Реализация модели ПЭС на основе методов машинного обучения выполнена А.В. Жуковым.

Результаты, полученные в настоящей главе, опубликованы в [Ярюкевич и др., 2013а; Ярюкевич и др., 2013б; Ярюкевич и др., 2015а; Ярюкевич и др., 2017а; Мыльникова и др., 2014; Mylnikova et al., 2015; Mylnikova et al., 2017а; Mlnikova et al., 2017b; Yasyukevich et al., 2015a; Yasyukevich et al., 2015b; Yasyukevich et al., 2015c; Yasyukevich et al., 2015d; Yasyukevich et al., 2020; Zhukov et al., 2018a; Zhukov et al., 2018b; Жуков и др., 2018]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ [Мыльникова и Ярюкевич, 2016].

На рис. 2.1 схематично представлена обработка информации ГНСС в интересах радиотехнических систем, использующих ионосферный канал. Первый этап – получение относительного ПЭС рассмотрен в Главе 1. В главе 2 рассматривается второй этап – получение абсолютных измерений.

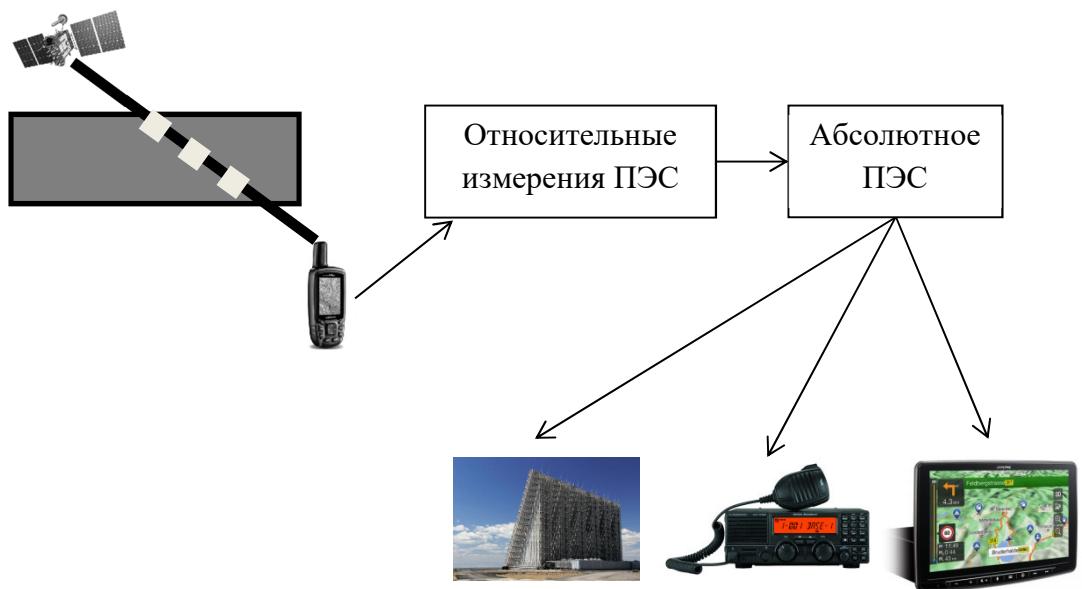


Рисунок 2.1. Блок-схема использования измерений ГНСС для прикладных задач

Разработанный в диссертационном исследовании метод позволяет оценивать как наклонное, так и вертикальное абсолютное ПЭС. Ставилась задача использовать как двухчастотные измерения, так и одночастотные.

## **2.1. Оценка абсолютного ПЭС на основе данных отдельного приемника сигналов ГНСС**

Как обсуждалось в Главе 1, исходное наклонное ПЭС может быть рассчитано на основе одночастотных и двухчастотных измерений с точностью до неоднозначностей, входящих в уравнения (1.2)–(1.4). В настоящем диссертационном исследовании разработан метод получения абсолютного ПЭС по измерениям на отдельном приемнике сигналов GPS/ГЛОНАСС/Galileo/BeiDou как при двухчастотных измерениях, так и одночастотных измерениях. Ниже сначала представлен подход минимизации функционала с использованием метода наименьших квадратов и метода наименьших квадратов с ограничениями (2.1.1), а затем приложение для двухчастотных ГНСС-измерений (2.1.2) и одночастотных измерений (2.1.3).

Общая блок-схема метода представлена на рисунке 2.2: по исходным измерениям фазы и псевдодорожки осуществляется вычисление наклонного ПЭС (одночастотные или двухчастотные) и соответствующих углов места для лучей спутник – приемник, далее задается модель измерений, определяются ее параметры (в том числе вертикальное абсолютное ПЭС над станцией, временные и пространственные производные), далее может осуществляться компенсация ионосферной ошибки (см. Главу 4).

Для получения абсолютных ионосферных параметров, прежде всего абсолютного полного электронного содержания, необходимо ввести те или иные предположения, позволяющие в конечном итоге устранить неоднозначности вычислений ПЭС в формулах (1.2)–(1.4). В разработанном методе используются следующие предположения:

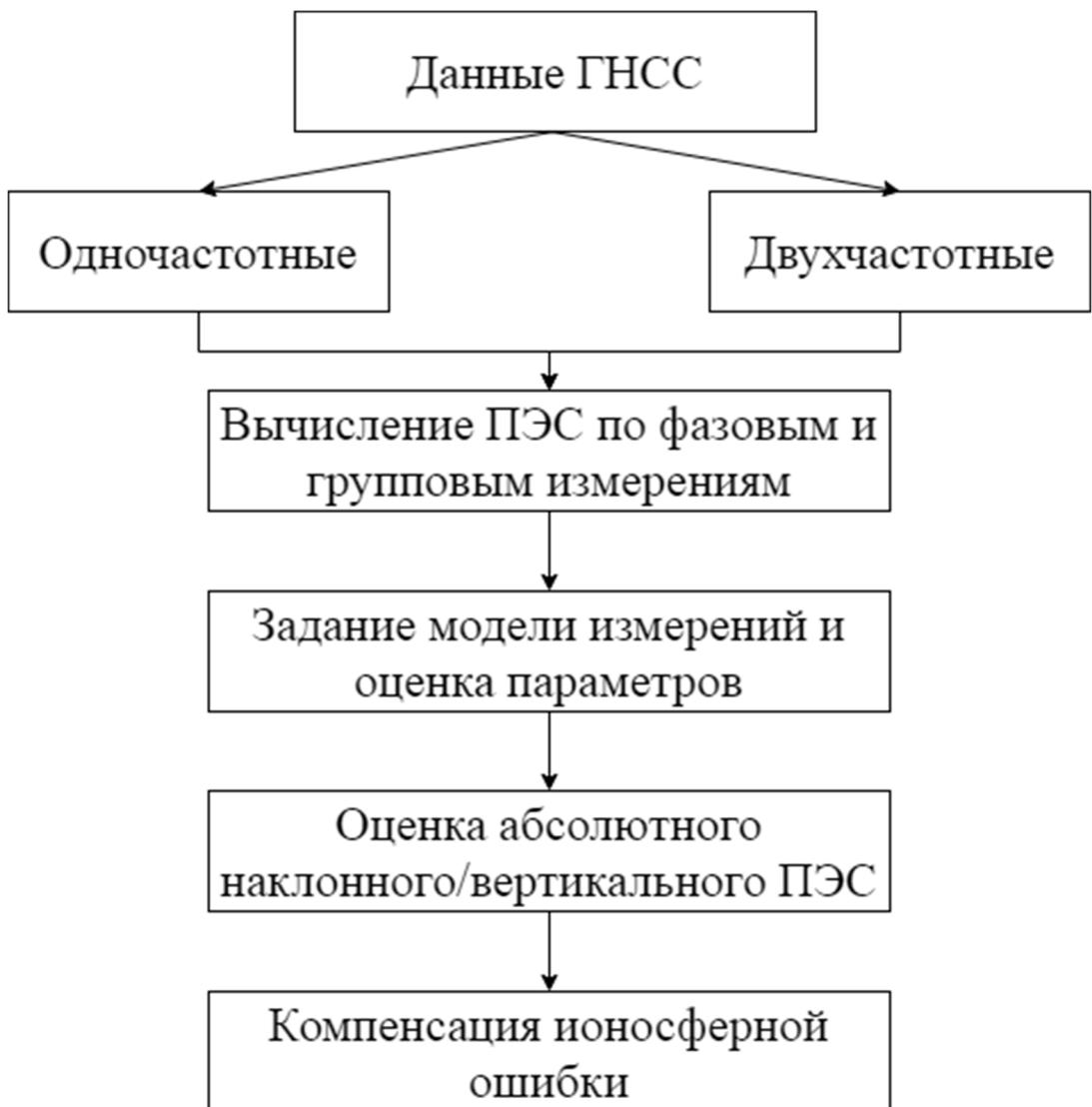


Рисунок 2.2. Схема оценки ионосферных параметров.

- 1) Существует возможность выполнить преобразование наклонного ПЭС в вертикальное с использованием той или иной функции преобразования.
- 2) Дифференциальные кодовые задержки характеризуются достаточным временем стационарности и не изменяются в течение некоторого (достаточно длительного) времени, а неоднозначность измерения фазы достаточно длительно не меняется при наблюдении спутника.
- 3) Характер вариаций дифференциальных кодовых задержек значительно отличается от характера изменения ПЭС. Если ДКЗ меняются очень быстро, например, на протяжении часа, то невозможно разделить, обусловлено ли такое изменение ионосферными возмущениями или ДКЗ без априорных знаний о таких изменениях, так как оба этих слагаемых входят в ПЭС (1.2) аддитивно.

Указанные приближения позволяют нам записать модель измерений наклонного ПЭС для некоторой ионосферной точки с географической широтой  $\phi$  и долготой  $l$  в момент времени  $t$  в виде:

$$I_M = S_j^i I_V(\phi, l, t) + I_{B,j} + b \cdot UT, \quad (2.1)$$

где  $I_V$  – пространственно-временное поле распределения вертикального полного электронного содержания;  $S_j^i$  – функция преобразования вертикального ПЭС в наклонное (в английской литературе – mapping function);  $I_{B,j}$  – 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  $j$  ставятся в соответствии с моментом времени и с номером ряда исходного наклонного ПЭС на котором  $I_{B,j}$  не меняется.

Если используются приемники геодезического класса, имеющие стабильные часы (в диссертационном исследовании выбран критерий, что

вклад последнего слагаемого <1 TECU), то последним слагаемым в (2.1) можно пренебречь:

$$I_M = S_j^i I_V(\phi, l, t) + I_{B,j} \quad (2.2)$$

В диссертационном исследовании все экспериментальные измерения были получены на приемниках геодезического класса, поэтому слагаемое, соответствующее уходу, часов было отброшено.

Стоит отметить, что  $I_{B,j}$  в (2.1) и (2.2) включают в себя и упомянутые выше межчастотные задержки ГЛОНАСС (при использовании групповых двухчастотных измерений).

В литературе описаны различные функции преобразования наклонного ПЭС в вертикальное [Rui et al., 2011; Abdullah, 2008; Wang et al., 2016; Schaer, 1999; Ou, 1996; Jiang et al., 2018; Lyu et al., 2018], в том числе и для случая размещения приемника на спутнике [Zhong et al., 2016a]. В настоящей работе используется одна из наиболее часто применяемых формул – формула тонкого сферического слоя (single layer model – SLM) и ее модификация (modified single layer model – MSLM, см. ниже), предложенная S. Schaer [1999] для расчета глобальных ионосферных карт CODE:

$$S_j^i = \left[ \cos \left\{ \arcsin \left( \frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin [\alpha (90 - \theta_i^j)] \right) \right\} \right]^{-1}, \quad (2.3)$$

где  $R_E$  – радиус Земли,  $h_{\max}$  – эффективный параметр, эквивалентный высоте тонкого сферического слоя,  $\alpha$  – корректирующий фактор,  $\theta_i^j$  – угол возвышения спутника. Для перехода к SLM нужно положить фактор  $\alpha=1$ . В MSLM высота  $h_{\max}$  может выбираться различным образом с соответствующей коррекцией  $\alpha$ . Параметры  $\alpha$  и  $h_{\max}$  влияют на точность преобразования ПЭС. В [Schaer, 1999] показано, что величины  $\alpha=0.97$ ,  $h_{\max}=450$  км или  $\alpha=0.9782$ ,  $h_{\max}=506.7$ ,  $R_E=6371$  дают хорошие точности.

Результаты для разных функций преобразования слабо отличаются на высоких углах места, а расхождение возникает на низких углах, которые, как

правило, либо вообще исключаются из рассмотрения, либо их статистический вес в решении устанавливается значительно ниже.

Следующий необходимый шаг – разложение поля ПЭС по некоторому базису. В диссертационном исследовании для такого исследования выбран тейлоровский базис, так как именно такое разложение должно лучше описывать локальные измерения. Используя разложение в ряд Тейлора в точке расположения станции  $(\phi_0, l_0, t_0)$ , можно записать

$$I_V(\phi, l, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} D_{mnk} \frac{\partial^{m+n+k} I_V}{\partial \phi^m \partial l^n \partial t^k} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0} \quad (2.4)$$

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

Степень разложения определяется задачей, которую необходимо решать.

В ходе работы нас интересовала, в первую очередь, точность восстановления абсолютного ПЭС. Результаты моделирования с использованием модели IRI-plas показали [Мыльникова, 2017; Yasyukevich et al., 2021], что для достижения ошибок менее 1 ТЕСУ при оценке абсолютного ПЭС необходимо использовать разложение до второго порядка, что дает следующее выражение для (2.2) [Ярюкевич и др., 2015а; Yasyukevich et al., 2020]:

$$\begin{aligned} I_M = & S_j^i [I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta \phi_j^i + G_{\phi\phi} (\Delta \phi_j^i)^2 + \\ & + G_l \Delta l_j^i + G_{ll} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{tt} (\Delta t_j^i)^2 + \\ & + G_{t\phi} \Delta t_j^i \Delta \phi_j^i + G_{tl} \Delta t_j^i \Delta l_j^i + G_{\phi l} \Delta \phi_j^i \Delta l_j^i] + I_{B,j} \end{aligned} \quad (2.5)$$

где  $G_\phi = \frac{\partial I_V}{\partial \phi} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,  $G_l = \frac{\partial I_V}{\partial l} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,  $G_t = \frac{\partial I_V}{\partial t} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,  $G_{\phi\phi} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_V}{\partial \phi^2} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,

$G_{ll} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_V}{\partial l^2} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,  $G_{tt} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I_V}{\partial t^2} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,  $G_{\phi l} = \frac{\partial^2 I_V}{\partial \phi \partial l} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,  $G_{tl} = \frac{\partial^2 I_V}{\partial t \partial l} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ ,

$G_{t\phi} = \frac{\partial^2 I_V}{\partial t \partial \phi} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0}$ .

При этом смешанными производными также можно пренебречь. Тогда (2.5) примет вид

$$I_M = S_j^i [I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta \phi_j^i + G_{\phi\phi} (\Delta \phi_j^i)^2 + G_u \Delta l_j^i + G_{ll} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{tt} (\Delta t_j^i)^2] + I_{B,j} \quad (2.6)$$

или в случае приемников низкого класса точности часов приемника

$$I_M = S_j^i [I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta \phi_j^i + G_{\phi\phi} (\Delta \phi_j^i)^2 + G_u \Delta l_j^i + G_{ll} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{tt} (\Delta t_j^i)^2] + I_{B,j} + b \cdot UT \quad (2.7)$$

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:

$$U^k = \sum_{j=1}^{N^k} \sum_{i=1}^{N_j^k} \omega_i^{k,j} (I_{M,i}^j - I_{Exp_i}^j)^2, \quad (2.8)$$

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 из измерений.

Функция статистических весов была выбрана исходя из следующих соображений:

- в коэффициенты в момент времени  $t^k$  дают вклад только измерения в определенном интервале времени от текущего измерения, например,  $\pm 1$  час (что использовалось в работе);
- статистический вес при удалении от  $t^k$  спадает;
- наибольший вклад дают измерения на высоких углах возвышения спутника.

Данные условия были записаны следующим образом:

$$\omega_i^{k,j} \equiv \omega^k(t_j^i) = \theta(t^k - t_j^i + \Delta t) \theta(t_j^i + \Delta t - t^k) \frac{1}{S_j^i} \left[ 1 + \left( \frac{\Delta t^{i,k}}{\Delta t} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (2.9)$$

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

Минимизируя функционал (2.8), мы решаем поставленную задачу получения абсолютных значений ПЭС.

### 2.1.1. Метод наименьших квадратов и метод наименьших квадратов с ограничениями

Минимизация функционала (2.8) возможна, например, широко используемым в различных областях науки методом наименьших квадратов (МНК) [Abdi, 2003]. Для этого необходимо дифференцировать (2.8) по параметрам входящим в выражение (2.6) –  $I_v^k$ ,  $G_t^k$ , ..., или (2.7) для приемников низкого класса точности. В результате получается система из  $7 \cdot k + N$  ( $7 \cdot k + N + 1$  – при учете ухода часов приемника) уравнений (где  $k$  – число моментов времени для расчета, а  $N$  – число рядов ПЭС с неизменными константами неоднозначностей измерения ПЭС) вида:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \quad (2.10)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица коэффициентов,  $\mathbf{b}$  – столбец свободных членов,  $\mathbf{x}$  – столбец неизвестных. Матрицы  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{b}$  составляются из матриц для всех  $k$  моментов времени  $P_k$  и  $R_k$ , соответственно, а также матриц, получаемых из уравнений на ДКЗ  $Q$  и  $T$ , соответственно:

$$A = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_k \\ Q \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_k \\ T \end{pmatrix}; \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_k \\ \{I_B\} \end{pmatrix}, \quad (2.11)$$

где

$$P_k = \begin{pmatrix} \sum_i \sum_j \omega_i^{k,j} (S_i^j)^2 & \sum_i \sum_j \omega_i^{k,j} (S_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \dots & \sum_i \sum_j \omega_i^{k,j} (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^2 & \sum_i \omega_i^{k,1} S_i^1 & \dots & \sum_i \omega_i^{k,N} S_i^N \\ \sum_i \sum_j \omega_i^{k,j} (S_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \sum_i \sum_j \omega_i^j (S_i^j)^2 (\Delta \phi_i^j)^2 & \dots & \sum_i \sum_j \omega_i^j (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^2 \Delta \phi_i^j & \sum_i \omega_i^{k,1} S_i^1 \Delta \phi_i^1 & \dots & \sum_i \omega_i^{k,N} S_i^N \Delta \phi_i^N \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_i \sum_j \omega_i^{k,j} (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^2 & \sum_i \sum_j \omega_i^j (S_i^j)^2 \Delta \phi_i^j (\Delta t_i^j)^2 & \dots & \sum_i \sum_j \omega_i^j (S_i^j)^2 (\Delta t_i^j)^4 & \sum_i \omega_i^{k,1} S_i^1 (\Delta t_i^1)^2 & \dots & \sum_i \omega_i^{k,N} S_i^N (\Delta t_i^j)^2 \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} \sum_k \sum_i \omega_i^{k,1} (S_i^1)^2 & \sum_k \sum_i \omega_i^{k,1} (S_i^1)^2 \Delta \phi_i^1 & \dots & \sum_k \sum_i \omega_i^{k,1} (S_i^1)^2 (\Delta t_i^1)^2 & \sum_k \sum_i \omega_i^{k,1} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \sum_k \sum_i \omega_i^{k,N} (S_i^N)^2 & \sum_k \sum_i \omega_i^{k,N} (S_i^N)^2 \Delta \phi_i^N & \dots & \sum_k \sum_i \omega_i^{k,N} (S_i^N)^2 (\Delta t_i^N)^2 & 0 & 0 & \sum_k \sum_i \omega_i^{k,N} \end{pmatrix}$$

$$R_k = \begin{pmatrix} \sum_j \sum_i \omega_i^{k,j} S_i^j I_{Exp_i}^j \\ \sum_j \sum_i \omega_i^{k,j} S_i^j I_{Exp_i}^j \Delta \phi_i^j \\ \dots \\ \sum_j \sum_i \omega_i^{k,j} S_i^j I_{Exp_i}^j (\Delta t_i^j)^2 \end{pmatrix},$$

$$T = \begin{pmatrix} \sum_k \sum_i \omega_i^{k,1} I_{Exp_i}^{-1} \\ \dots \\ \sum_k \sum_i \omega_i^{k,N} I_{Exp_i}^{-N} \end{pmatrix},$$

$$x_k = \begin{pmatrix} I_V^k \\ G_\phi^k \\ G_{\phi\phi}^k \\ G_l^k \\ G_{ll}^k \\ G_t^k \\ G_n^k \end{pmatrix},$$

$$\{I_B\} = \begin{pmatrix} I_{B,1} \\ I_{B,2} \\ \dots \\ I_{B,M} \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

где  $M$  – полное число рядов ПЭС с неизменными константами. Суммирование проводится по всем измерениям ( $i, j$ ). Для матриц  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{T}$  производится также суммирование по числу моментов времени  $k$ . В итоге осуществляется одновременный расчет параметров за полные сутки (или иной выбранный интервал) для различных моментов времени  $t^k$  на основе согласованной системы уравнений. Это делается для получения более устойчивых оценок ДКЗ. При этом для получения параметров для каждого момента времени  $t^k$  учитываются данные за интервал  $\pm \Delta t$  (1 ч) относительно  $t^k$ .

Большинство результатов в диссертационном исследовании получено на основе классического метода МНК. При этом классический МНК обладает рядом недостатков, основной из которых – возможность получения физически некорректных решений. В данной ситуации – это появление отрицательных значений вертикального ПЭС или наклонного ПЭС. Такая проблема возникает, например, при использовании программного обеспечения IONOLAB (<http://www.ionolab.org/>) [Arikan et al., 2007], в результате чего решение за полные сутки может быть отброшено.

В диссертации предложено использовать метод наименьших квадратов с ограничениями на параметры [Start and Parker, 1995; Waterman, 1974]. Данный алгоритм является итерационным алгоритмом, реализованным в настоящее время на ряде языков программирования.

Для получения ограничений на параметры модели (2.6) и (2.7) в диссертации использовались следующие соображения: а) оценки вертикального ПЭС  $I_V$  должны быть заведомо неотрицательными, б) при низких шумах измерений оценки всех наклонных измерений должны быть неотрицательными. В диссертационной работе в силу заведомой неотрицательности числа электронов предложено поднять этот порог выше нуля и получать значения не выше нуля, а выше заданного наперед значения  $a$ . Для вертикального ПЭС это позволило записать следующее условие:

$$I_{\mathcal{V}}(t^k) > a, \forall t^k. \quad (2.13)$$

Для обеспечения неотрицательности наклонного абсолютного ПЭС после коррекции на константы неоднозначности необходимо потребовать, чтобы для всех измерений ПЭС после коррекции измерений минимальное значение ПЭС было также выше  $a$ :

$$I_{B,j} < I_{Exp_i}^j - a, \forall i. \quad (2.14)$$

Это позволило записать дополнительное условие на ограничения следующим образом:

$$I_{B,j} < \min(I_{Exp_i}^j) - a \quad (2.15)$$

Дополнительно следует отметить, что условия (2.15) и (2.14) 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.

Параметр  $a$  может выбираться в некотором смысле произвольно. Но, во-первых, он должен быть больше нуля, а, во-вторых, меньше всех возможных наблюдаемых значений ПЭС. Для его оценки может использоваться эмпирическое моделирование для заданных условий. В работе предлагается использование значения 0.5 TECU, которое, как показывает опыт ионосферных измерений, не достигается в реальных условиях.

Алгоритм МНК с ограничениями, предложенный [Start and Parker, 1995; Waterman, 1974], является итерационным и включает следующие основные этапы:

1. Осуществляется решение системы (2.10) методом наименьших квадратов. Если полученное решение удовлетворяет ограничениям (2.13), (2.15) – в случае использования, то оно считается оптимальным. В противном случае осуществляется разделение всех переменных на два класса: свободный набор (free set), значения которого лежат в пределах ограничений, и активный набор (active set), значения которого лежат за пределами ограничивающих условий.

2. На каждом шаге итерационного алгоритма выбирается переменная, имеющая максимальное значение в функции потерь. Эта переменная переносится в свободный набор.

3. Для скорректированного вектора данных  $\mathbf{b}$  на значения в активном наборе ( $b'_j = b_j - \sum_{k \in \text{active set}} A_{jk} x_j$ ) строится урезанная система уравнений для свободного набора и решается методом наименьших квадратов.

4. Если какие-то из новых переменных в свободном наборе оказываются за пределами ограничений, осуществляется градиентная коррекция всего свободного набора (детали см. в [Start and Parker, 1995]).

5. Процедура продолжается до тех пор, пока все переменные не окажутся в свободном наборе, то есть пока все они не будут удовлетворять заданным ограничениям.

Алгоритм гарантирует точное решение в конечном итоге за число шагов, не превышающее число переменных. В качестве решений мы получаем вектор значений ПЭС для различных моментов времени, его производных по времени и пространству, а также значений неизвестных констант для корректировки наклонного ПЭС на всех лучах зрения, значения которых являются заведомо неотрицательными.

Для расчетов использующих МНК с ограничениями использовалась реализация алгоритма [Start and Parker, 1995] в библиотеке Python `scipy.optimize.lsq_linear`. 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) [Ясюкевич и др., 2015а; Yasyukevich et al., 2020].

### **2.1.2. Оценка абсолютного ПЭС на основе двухчастотных данных**

Частный случай реализации предложенного метода для определения абсолютного вертикального и наклонного ПЭС для двухчастотных измерений может быть записан следующим образом:

1. Вычисление ПЭС по групповым  $I_p$  и фазовым  $I_\phi$  измерениям по формулам (1.2)–(1.3).

2. Разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы.

3. Коррекция непрерывных рядов с целью устранения срывов сопровождения фазы и сбоев (выбросов) измерения псевдод задержки [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 (1.3) ведется по следующей формуле: 
$$K^j = \sum_{i=1}^{N^j} \frac{1}{S_i^j} (I_p^j - I_\phi^j)_i \left/ \sum_{i=1}^{N^j} \frac{1}{S_i^j} \right.$$
, где  $N^j$  – число измерений для  $j$ -го непрерывного интервала. В результате после проведения вычислений индекс  $j$  можно будет поставить в соответствие номеру спутника, а оставшаяся систематическая ошибка расчета ПЭС определяется исключительно дифференциальными кодовыми задержками этого спутника (1.2).

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:  $I_\phi \rightarrow I_\phi - K^j$ .

Пример рассчитанного вертикального ПЭС, его производных по времени и пространству на основе МНК с ограничениями в сравнении с данными глобальных ионосферных карт GIM CODG и JPLG представлен на рисунке 2.3. Красные линии показывают результаты, полученные по двухчастотным GPS/ГЛОНАСС-измерениям на станции IRKJ, синие линии – по данным глобальных ионосферных карт JPLG, черные линии – по данным CODG. Можно видеть хорошее соответствие результатов, получаемых на основе данных сети станций, и получаемых на основе данных отдельной станции, в особенности для ПЭС и его производной по времени.

Большая часть результатов в исследовании была получена с использованием классического метода наименьших квадратов. В целом результат дает достаточно стабильное и хорошее решение. На рисунке 2.4 приведен долговременный ряд вертикального ПЭС, рассчитанного при использовании классического МНК. Можно видеть, что получаемые данные достаточно хорошо прописывают как суточный ход, так и сезонную и 27-дневную ионосферную изменчивость.

В работе был проведен анализ распределений разности ПЭС по данным GIM и ПЭС, получаемых по данным отдельной станции. Анализ проведен на основе двух полных лет данных для станции IRKJ. Результаты представлены на рисунке 2.5. ПЭС по данным IRKJ получены на основе разработанного метода с использованием классического МНК.

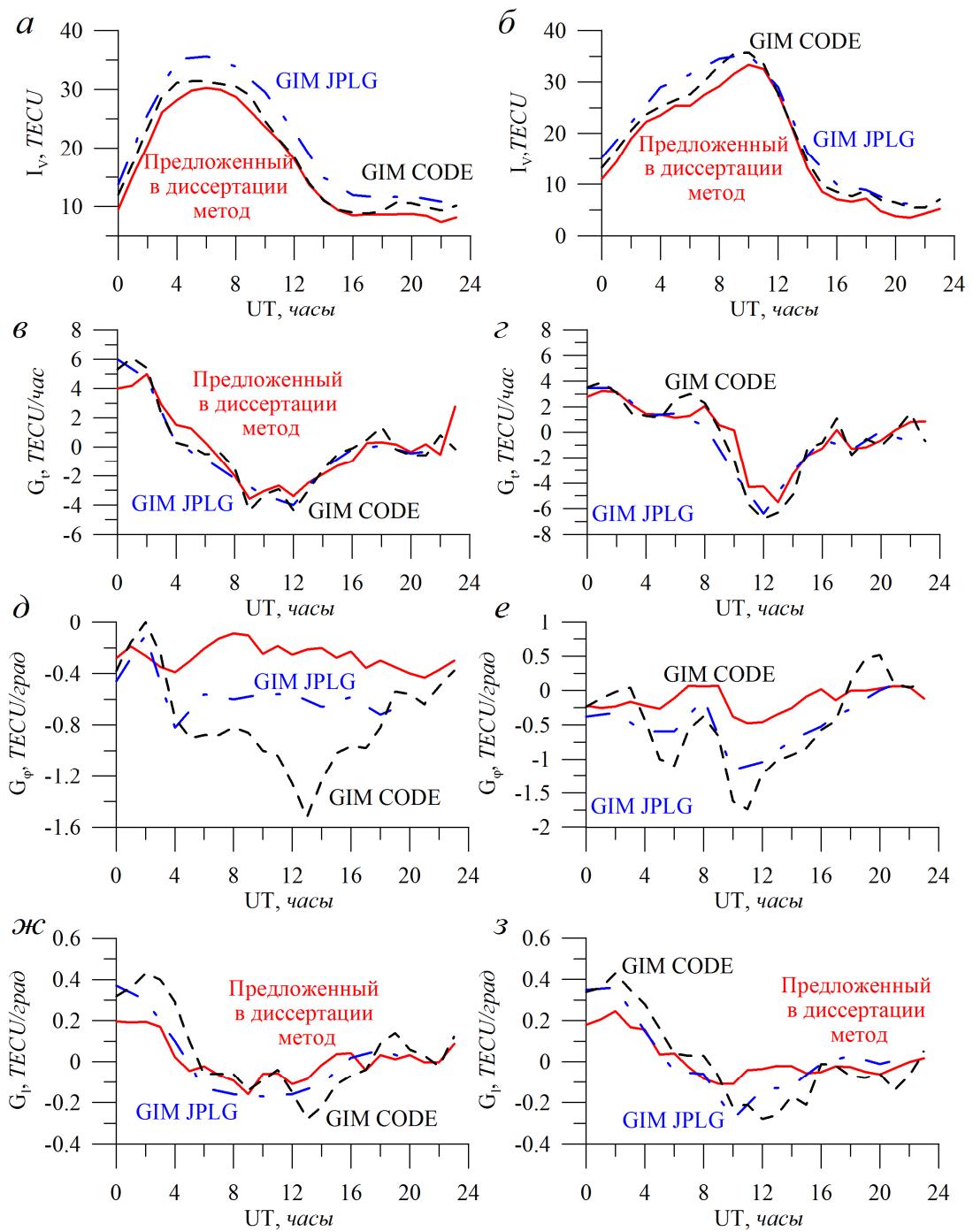


Рисунок 2.3. Абсолютное вертикальное ПЭС ( $a, b$ ), производные ПЭС по времени ( $c, g$ ), широте ( $d, e$ ), долготе ( $жс, з$ ) полученное по данным GPS/ГЛОНАСС на станции IRKJ (красные линии) на основе разработанного в диссертации метода в сравнении с данными JPLG (синие линии) и CODE (черные линии). Левый столбец – 5 марта 2015 г. ( $K_{Pmax} = 2.3$ ), правый столбец – 17 марта 2015 г. ( $K_{Pmax} = 7.7$ ).

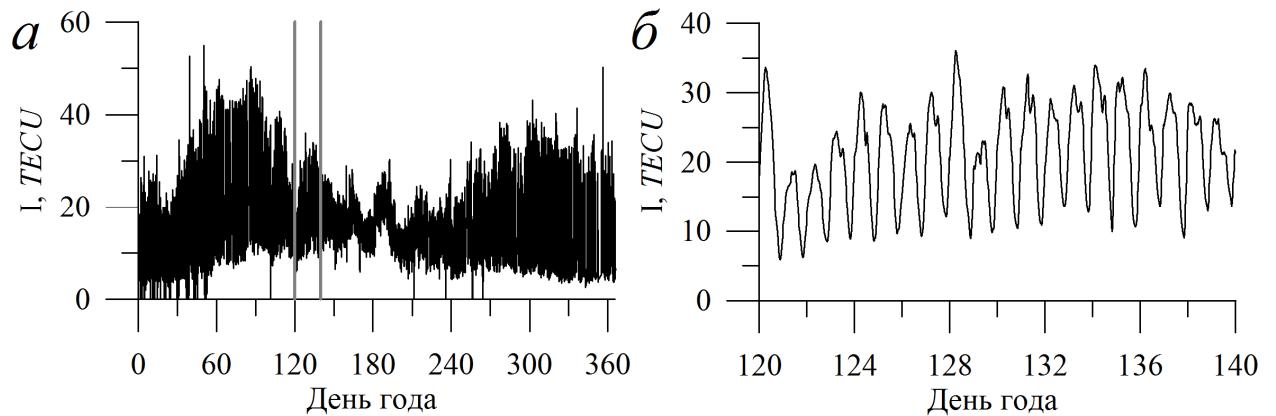


Рисунок 2.4. Динамика ПЭС по данным станции IRKJ ( $52^{\circ}\text{N}$ ,  $104^{\circ}\text{E}$ ): *a* – за 2014 г. *б* – за 120–139 дни 2014 г.

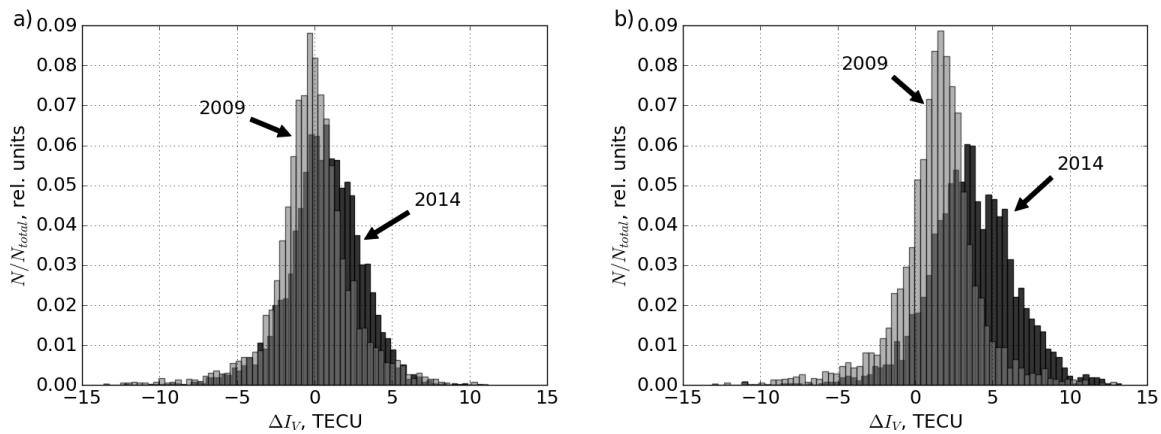


Рисунок 2.5. Нормированная гистограмма  $\Delta I_V$  (разница между значениями  $I_V$  по данным GIM и на основе представленного алгоритма): *a* – в сравнении с GIM CODE, *b* – в сравнении с GIM JPL. Серый цвет – данные для 2009 г. (минимум солнечной активности), черный цвет – для 2014 г. (максимум солнечной активности). Данные для станции IRKJ.

Характер распределений близок к нормальному. Наиболее вероятное значение отклонения составляет 0 TECU в 2009 г., 1.5 TECU в 2014 г. для CODE, 1.5 TECU в 2009 г., 4 TECU в 2014 г. для JPL. Данные приведены для различного уровня солнечной активности. В [Афраймович и др., 2008б] показано, что существует систематическое отклонение между значениями ПЭС по данным GIM различных лабораторий, достигающее в среднем по земному шару на длительном временном интервале ~3 TECU. ПЭС по картам JPL дают наиболее высокие значения относительно данных других карт. В этой связи, имеющиеся систематические отклонения находятся на уровне типичных расхождений между данными ПЭС различных лабораторий.

Одной из наиболее сложных задач является оценка абсолютного наклонного ПЭС. В предложенном подходе для этого необходима точная оценка ошибки, обусловленная дифференциальными кодовыми задержками. Чтобы проверить точность измерения ПЭС на наклонных лучах, было проведено сравнение восстанавливаемого наклонного ПЭС и вертикального. Пример рядов ПЭС, получаемого по данным ГЛОНАСС, представлен на рисунке 2.6. Использовались данные GPS/ГЛОНАСС-измерений на станции IRKJ 11 апреля 2012 г. Оценка ПЭС получена при использовании ДКЗ, оцениваемых на основе разработанного метода с классическим методом наименьших квадратов (а), и ДКЗ CODE (б). Серые кривые – исходные ряды, черные – скорректированные. Жирная серая линия – вертикальное ПЭС.

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, получаемые на основе разработанного метода, удовлетворяют означеному условию и демонстрируют лучшее согласие, чем при использовании ДКЗ CODE.

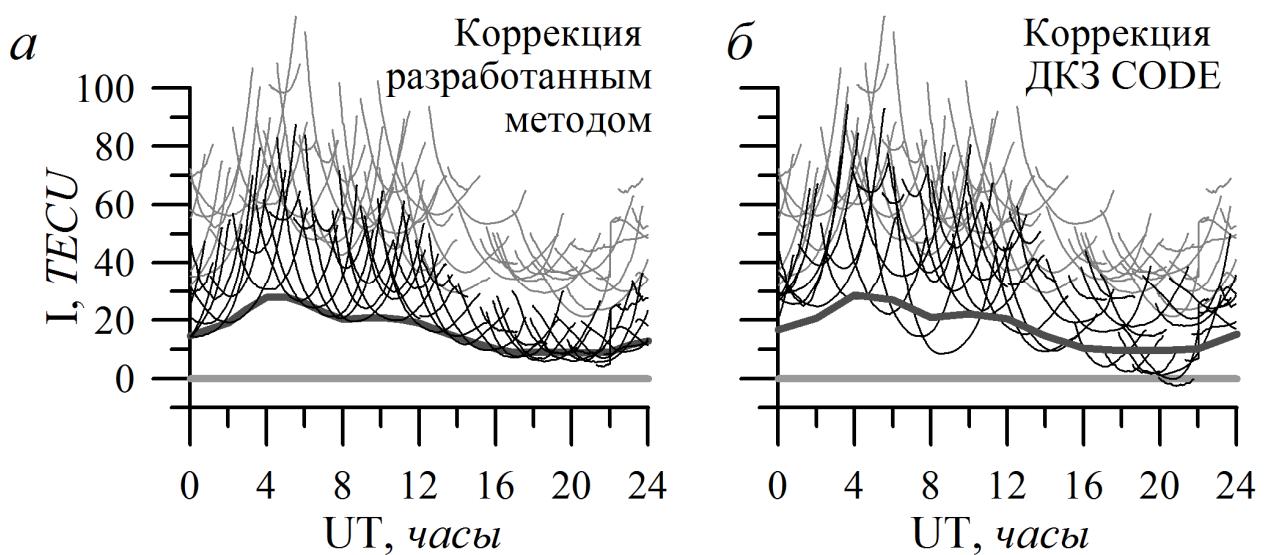


Рисунок 2.6. Наклонное ПЭС для спутников ГЛОНАСС без корректировки на ДКЗ (серые кривые) и с корректировкой на ДКЗ (черные кривые): *a* – ДКЗ по данным представленного алгоритма, *б* – ДКЗ по данным CODE. Серая кривая – абсолютное вертикальное ПЭС, полученное по соответствующим методикам. Данные на основе измерений IRKJ 11 апреля 2012 г.

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 (описанных ранее – см. Главу 1): SEEMALA-TEC, Madrigal-TEC, IONOLAB-TEC и глобальные ионосферные карты CODG и JPLG.

Рисунок 2.7 показывает результаты. Сравнение данных вертикального ПЭС полученного на основе разработанного в диссертации метода с данными CODE показано на панели *a*, Madrigal-TEC – *б*, IONOLAB-TEC – *в*, SEEMALA-TEC – *г*. Панель *д* показывает сравнение глобальных ионосферных карт JPL и CODE, *е* – решений, получаемых без ограничения и с ограничением, панели *ж* и *з* – моделей IRI-2016 и IRI-Plas с данными IGSG.

Можно видеть, что распределение, показывающее разность для двух типов глобальных ионосферных карт GIM, имеет тот же вид, что и распределение CODE-TuRBOTEC или IONOLAB-TuRBOTEC. Среднеквадратическое отклонение составляет 1.5 TECU, 1.7 TECU, 2.1 TECU, соответственно. В то же время, имеет место значительное СКО в данных SEEMALA-TEC и Madrigal-TEC по отношению к результатам TuRBOTEC. В этом случае СКО составляет 10–12 TECU. Модели IRI-2016/IRI-plas дают СКО ~4.5 TECU.

Панель *е* показывает влияние ограничений на оценку вертикального ПЭС: ~9 % значений ПЭС при использовании ограничений более чем на 1 TECU превышают аналогичное решение без использования ограничений.

### **2.1.3. Оценка абсолютного ПЭС на основе одночастотных данных**

Оценка ПЭС с использованием одночастотных данных может быть выполнена практически по той же самой методике, что и при использовании двухчастотных данных. Из ключевых отличий можно отметить следующие:

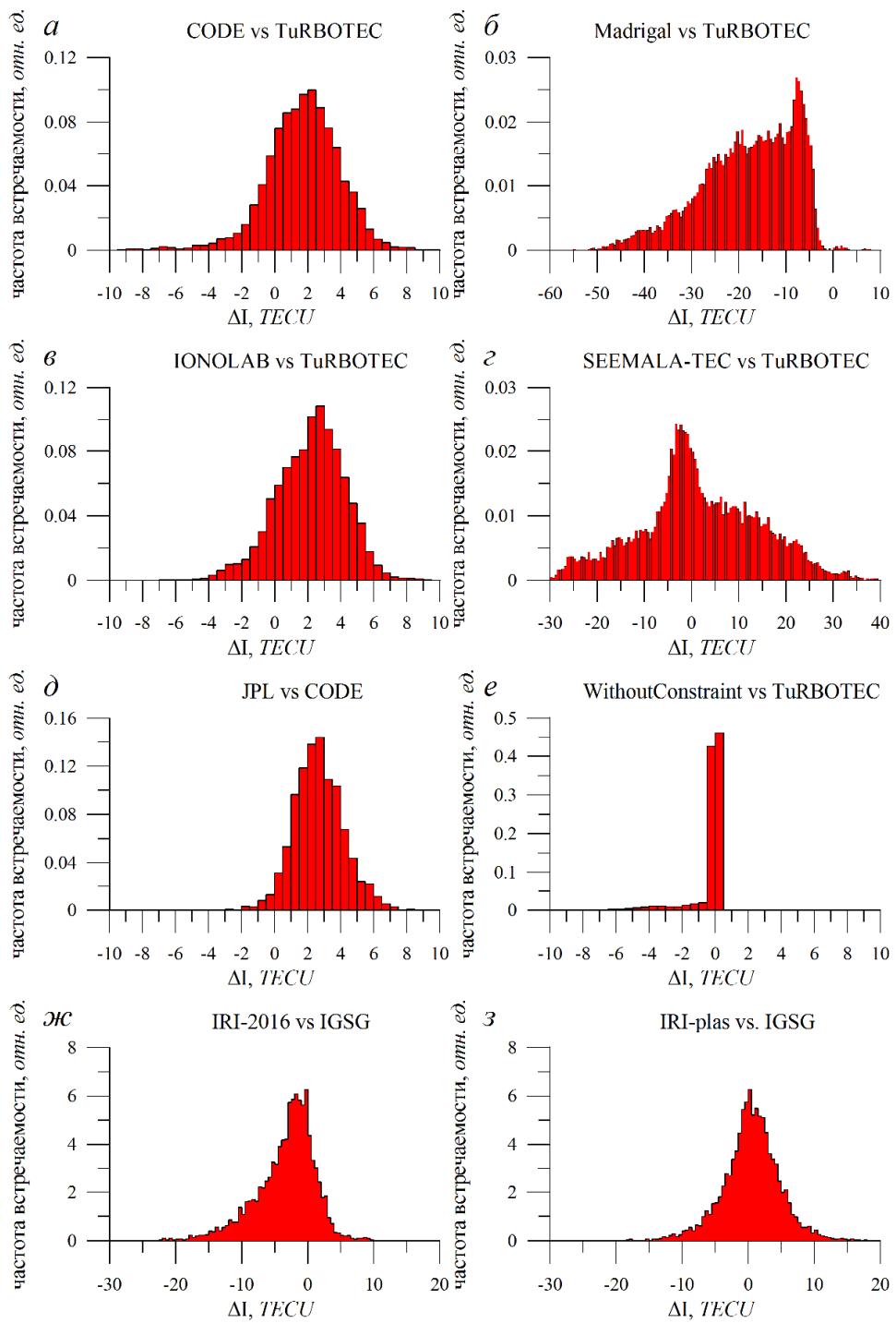


Рисунок 2.7. Сравнение данных вертикального ПЭС получаемого по разным методам: полученного на основе разработанного в диссертации метода с данными CODE (*а*), Madrigal-TEC (*б*), IONOLAB-TEC (*в*), SEEMALA-TEC (*г*); глобальных ионосферных карт JPL и CODE между собой (*д*); решений, получаемых без ограничения (TayAbsTEC) и с ограничением (TuRBOTEC) (*е*); моделей IRI-2016 (*ж*) и IRI-plas (*з*) с данными IGSG.

- Более высокий уровень шумов (см. рис. 1.4) по сравнению с фазовыми измерениями. Хотя шумы групповых измерений достаточно высоки, тем не менее можно ожидать, что оценки ПЭС будут вполне адекватны за счет усреднения. Более низкий шум имеет место для открытого С/А-кода. Требование на ограничения ПЭС на наклонных лучах не может быть применено, так как отдельный выброс в данных наклонного ПЭС значительно сместит все решение.

- В случае приемников с более низкой стабильностью опорного генератора, чем у приемников геодезического класса, возможен уход часов. Как правило, для его учета ухода часов используют линейную модель [Перов и Харисов, 2005]. Уход часов на 1 нс приводит к ошибке  $\sim 3$  TECU. В этом случае последнее слагаемое в (2.1) должно быть учтено. В связи с тем, что при выполнении работы использовались приемники геодезического класса, уходом времени пренебрегалось.

- Возможные изменения слагаемого  $PK$  в (1.4). В одночастотных измерениях данная константа связана как с неоднозначностью фазовых измерений, так и с задержками в аппаратуре. Если последние можно считать неизменными на протяжении достаточно длительного времени, то неоднозначность фазовых измерений меняется при срывах фазы, а также при перезахвате спутника в новый момент времени.

Тогда частный случай реализации предложенного метода для определения абсолютного вертикального и наклонного ПЭС для одночастотных измерений, может быть записан следующим образом:

1. Вычисление ПЭС по одночастотной комбинации  $I_{P\phi}$  (1.4).
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.

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. Устранение неоднозначностей: 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.

Для анализа экспериментальных данных были использованы результаты измерений двухчастотных приемников сети IGS [Dow et al., 2009] в азиатском и американском секторах Северного полушария (станции IRKJ —  $52.2^\circ$  N,  $104.3^\circ$  E; NRC1 —  $45.5^\circ$  N,  $104.4^\circ$  W; YELL —  $62.5^\circ$  N,  $115.5^\circ$  W). Это позволило получить оценки ПЭС как для двухчастотного, так и одночастотного случаев.

На рисунке 2.8 представлены результаты работы двух режимов (одночастотного и двухчастотного) в сравнении с данными ПЭС из глобальных ионосферных карт GIM лаборатории CODE [Schaer, 1999]. Разрешение по времени составляет 1 ч для данных, полученных для одной станции, и 2 ч — для данных GIM.

Рисунок 2.8 показывает хорошее согласие динамики вертикального ПЭС, полученного различными методами. При этом имеет место и качественное, и количественное совпадение. Данные за 20 мая 2014 г. на станции NRC1 показывают более значительное расхождение ( $> 2$  TECU) между одночастотным и двухчастотным решениями (рис. 2.8, б). В ряде случаев возникают большие ошибки между одностанционным решением и оценками глобальных ионосферных карт CODE.

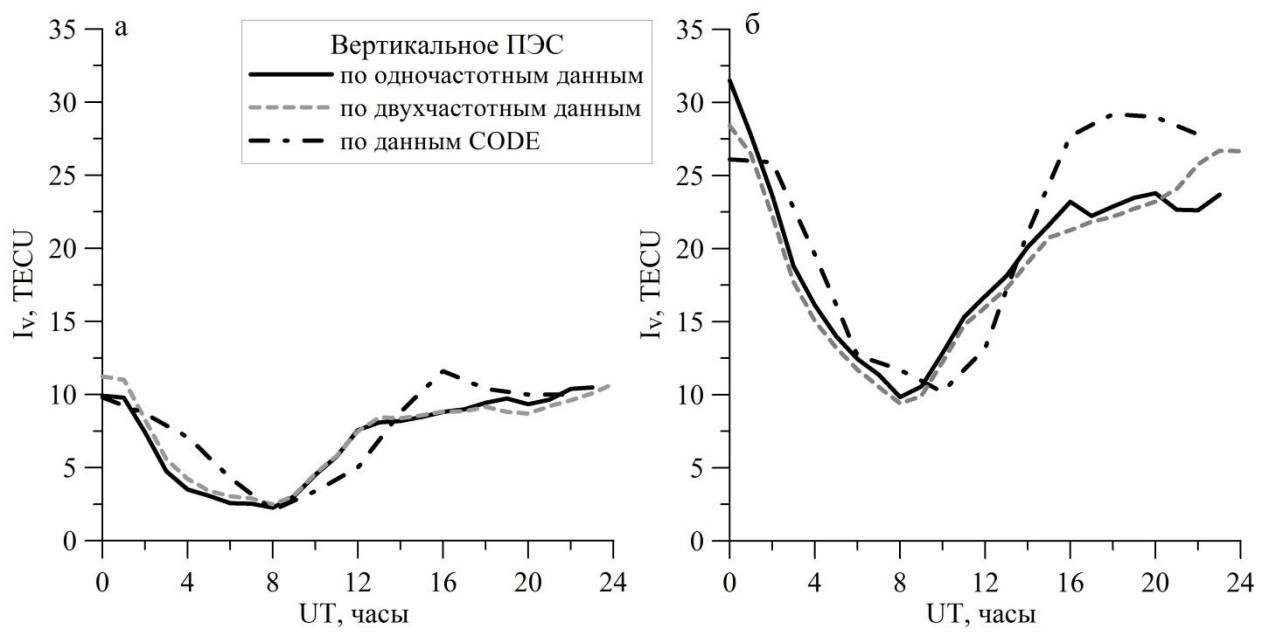


Рисунок 2.8. Суточная динамика абсолютного ПЭС над станцией NRC1 ( $45.5^{\circ}$  N,  $104.4^{\circ}$  W) 20 мая 2009 г. (а) и 20 мая 2014 г. (б).

Для оценки возможных ошибок был проведен анализ распределения отклонений абсолютного ПЭС, получаемых по двухчастотным и одночастотным измерениям. Для этой цели на основе данных IRKJ и NRC1 для 2009 г. (минимум солнечной активности) и 2014 г. (максимум солнечной активности) были посчитаны 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 представлены на рисунке 2.9: *а* – NRC1, панель *б* – IRKJ. Гистограммы нормированы на общее число измерений  $N_{\text{total}}$ .

Для станции NRC1 распределение имеет систематическую составляющую  $\sim 0.5$  TECU и разброс с СКО  $\sim 1.5$  TECU для низкой солнечной активности, и  $\sim -0.5$  TECU и  $\sim 3.5$  TECU – для высокой. Для станции IRKJ эти значения выше: систематическая составляющая  $\sim -1.5$  TECU и СКО  $\sim 2.5\text{--}3$  TECU. Эти ошибки (отклонения) соответствуют по порядку величины систематическим и случайным отклонениям между данными карт GIM различных лабораторий. В связи с этим полученные отклонения могут считаться вполне приемлемыми.

На рисунке 2.10 представлены полученные ряды рассчитанного наклонного ПЭС: одночастотное фазово-групповое ПЭС без корректировки (черная сплошная кривая), одночастотное фазово-групповое абсолютное ПЭС с устраниенной неоднозначностью (серая кривая), двухчастотное фазовое абсолютное ПЭС с устраниенной неоднозначностью (черная пунктирная кривая). Исходные измерения для расчетов получены на станции IRKJ 11 мая 2009 г.

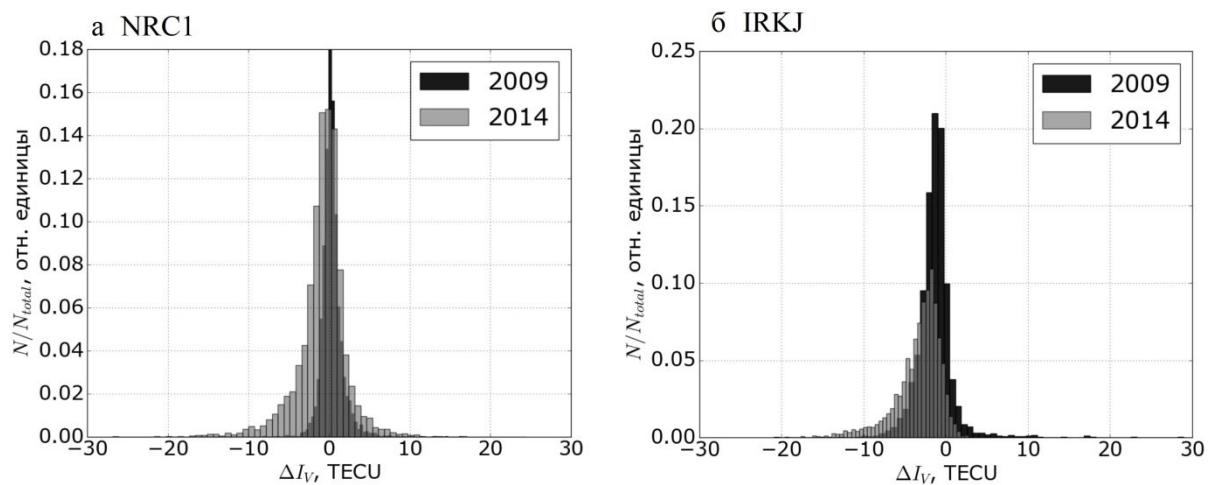


Рисунок 2.9. Гистограммы распределений разности значений вертикального абсолютного ПЭС, полученных по одночастотным и двухчастотным измерениям, на станциях NRC1 (а) и IRKJ (б) для 2009 г. и 2014 г.

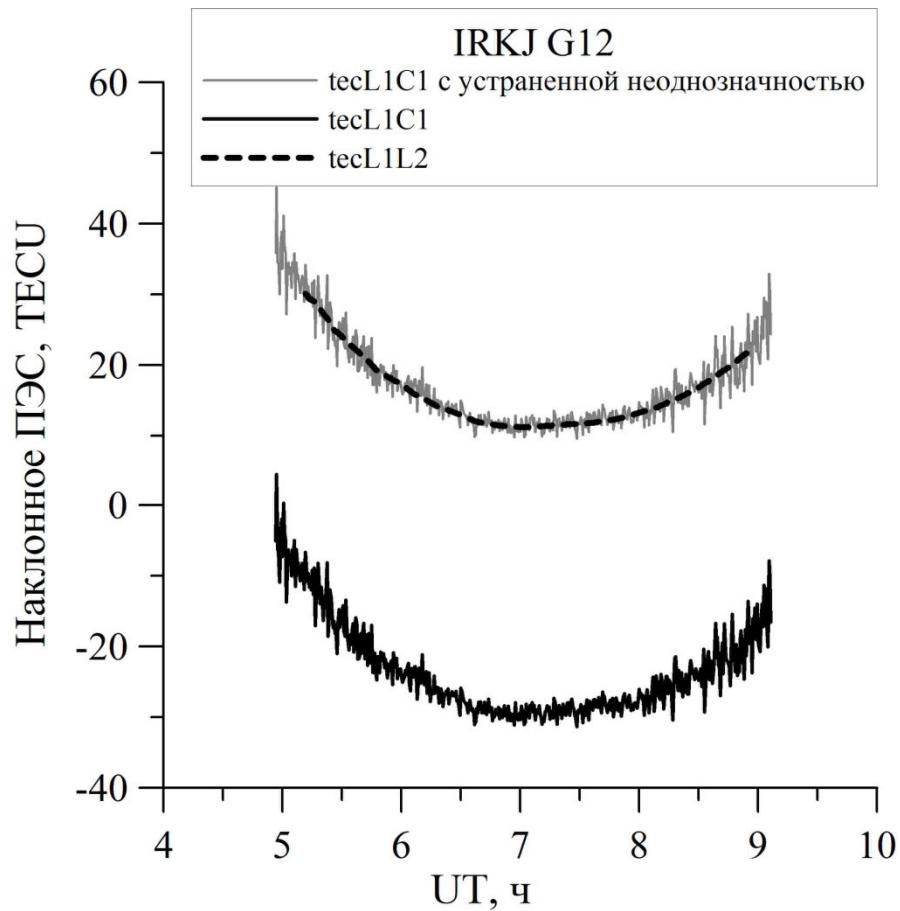


Рисунок 2.10. Наклонное ПЭС вдоль луча спутник GPS G12 – станция IRKJ, 11.05.2009 г. Чёрная кривая – исходное ПЭС, вычисленное по одночастотным измерениям, серая и чёрная кривые – абсолютное ПЭС, получаемое на основе разработанной методики по одночастотным и двухчастотным измерениям, соответственно.

Важным фактом является то, что в отличие от исходных значений ПЭС, после коррекции значения одночастотного ПЭС являются положительно определенными, несмотря на отсутствие ограничений на оценки наклонного ПЭС. Таким образом методика позволяет получать физически корректные значения. Представленные данные являются «чистыми», т.е. не содержат эффекты фильтрации. Оценки наклонного абсолютного ПЭС, полученные на основе одночастотных и двухчастотных измерений коррелируют.

Работоспособность разработанного в диссертационном исследовании метода была проверена в условиях нерегулярных интенсивных возмущений: при геомагнитной возмущенности и в высокоширотном регионе. С этой целью были проведены расчеты динамики вертикального ПЭС в условиях сильной магнитной бури 17 марта 2015 г. [Astafyeva et al., 2015]. Динамика абсолютного вертикального ПЭС в этот день представлена на рисунке 2.11. Приведены данные для двух станций – среднеширотной станции IRKJ ( $52.2^{\circ}$  N,  $104.3^{\circ}$  E) (a) и высокоширотной станции YELL ( $62.5^{\circ}$  N,  $115.5^{\circ}$  W) (б). Штрих-пунктиром приведены данные глобальных ионосферных карт GIM.

Рисунок 2.11, а демонстрирует классическую картину суточного хода абсолютного вертикального ПЭС для средних широт. Представлена динамика ПЭС по данным GIM CODG (штрих-пунктирная кривая) и ПЭС, полученного на основе метода, разработанного в диссертации, использующего одночастотные (черная сплошная кривая) и двухчастотные (серая штриховая кривая) ГНСС-измерения. Отклонение от данных GIM CODG не превышает 5 TECU для обоих вариантов расчета. Таким образом, даже в условиях мощной бури результаты работоспособности одночастотного (и двухчастотного) режима остаются вполне приемлемые.

Если для средних широт общая динамика ПЭС восстанавливается достаточно хорошо, то для высокоширотного региона (рис. 2.11, б) качество работы метода при использовании одночастотных данных несколько хуже. Тем не менее, он дает приемлемые результаты.

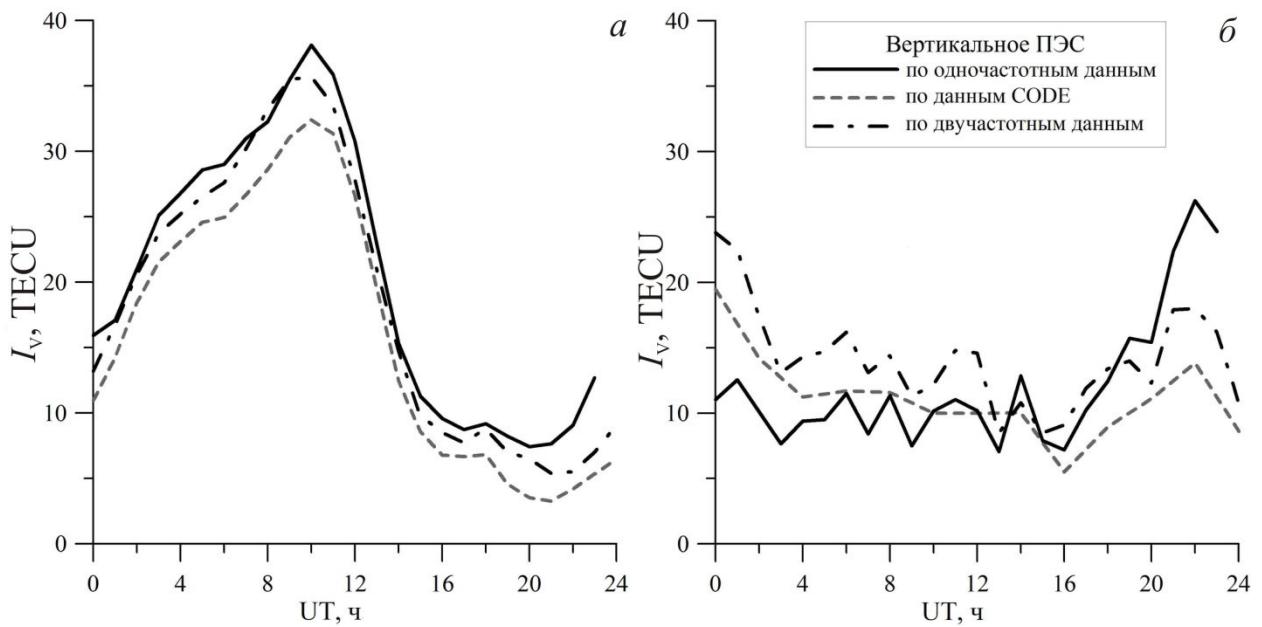


Рисунок 2.11. Суточная динамика абсолютного вертикального ПЭС над среднеширотной станцией IRKJ (*а*) и высокоширотной станцией YELL (*б*) во время сильной магнитной бури 17 марта 2015 г.

Основная проблема, по всей видимости, – низкие значения ПЭС, большая изменчивость и срывы сопровождения фазы сигнала. Наблюдаемая резкая вариабельность в динамике абсолютного вертикального ПЭС присутствует в результатах, основанных как на одночастотных, так и на двухчастотных ГНСС-измерениях. В картах GIM подобная вариабельность оказывается подавлена в силу временного накопления и сглаживания сферическими функциями. Кроме того, возникает проблема с качественной динамикой ПЭС, особенно в начале и в конце суток, что связано с ограничением рядов данных. Это указывает на сложность использования одночастотных данных в высоких широтах в возмущенных условиях при реализации режима реального времени.

При тестовом анализе в высокоширотном регионе для ряда станций не удалось получить адекватные оценки ПЭС. Возможность использования алгоритма в высоких широтах определяется качеством исходных данных, а именно непрерывностью измерений (количеством срывов сопровождения фазы) и количеством наблюдаемых спутников. Эти условия на высоких широтах хуже, чем на средних (см. Главу 5).

Срывы сопровождения фазы в условиях наличия интенсивных неоднородностей, усиливающихся в условиях магнитных бурь, сильноказываются на качестве и объеме входных данных. В совокупности с малым числом наблюдаемых спутников и низкими углами наблюдения это может привести к невозможности получения адекватного решения, особенно в условиях гелиогеомагнитных возмущений. Вопросам устойчивости сопровождения фазы посвящена Глава 5. Здесь необходимо отметить большую устойчивость сопровождения фазы на основной частоте, на которой и ведутся, как правило, одночастотные измерения ПЭС.

Результаты, полученные для одночастотного метода, указывают на применимость данного метода и для двухчастотной аппаратуры при появлении срывов сопровождения сигнала на вспомогательной частоте.

## **2.2. Примеры независимого применения разработанного метода**

Одним из свидетельств надежной работы созданного в рамках диссертационного исследования метода служит возможность его использования сторонними пользователями. В настоящем параграфе представлены некоторые результаты, полученные на основе представленного выше метода без участия автора и научной группы ИСЗФ СО РАН. Следует отметить, что указанные результаты получены с использованием подхода включающего классический МНК (TayAbsTEC).

Sergeeva et al. [2018] на основе разработанного в настоящей диссертации метода изучали поведение абсолютного ПЭС над Мексикой (см. рис. 2.12). Преимуществом предложенного в диссертационном исследовании метода относительно данных GIM авторами [Sergeeva et al., 2018] названо то, что в сети, используемой для расчета GIM, практически отсутствуют приемники ГНСС в Мексике. В то же время, там существует сеть станций, которая позволяет проводить ГНСС-мониторинг. В их работе наряду с тем, что были выделены суточные, сезонные и годовые вариации ПЭС, было обнаружено смещение дневного максимума на 14 LT. Полученные данные позволяют выделять влияние солнечной активности, высокую вероятность ночного усиления ионизации, а также значительную годовую и зимнюю аномалии. Кроме того, было выявлено, что положительное кратковременное усиление ПЭС характерно для Мексиканского региона даже при спокойных условиях.

Преимущества локальных измерений в Мексике над данными GIM можно видеть из рисунка 2.13, полученного в работе [Sergeeva et al., 2017]. Метод, разработанный в диссертации, показывает большую вариабельность абсолютного ПЭС, а также локальные эффекты в изменении ионизации в регионе. В статье [Sergeeva et al., 2017] говорится, что данные GIM могут быть недостаточны для корректной оценки динамики ПЭС.

## TEC, TECU: Mexico, 19-21 November 2007

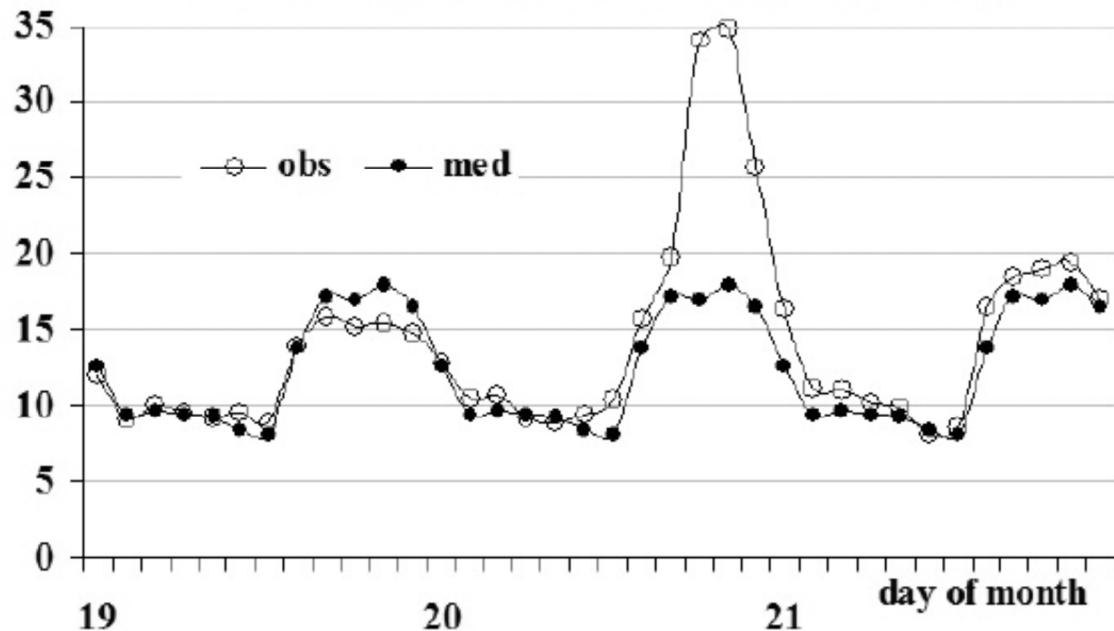


Рисунок 2.12. Короткоживущие усиления электронной концентрации (часть рис. 11 из статьи [Sergeeva et al., 2018]). Сплошные черные круги – медианные значения ПЭС, окружности – текущие наблюдения ПЭС на основе разработанного в диссертационном исследовании метода.

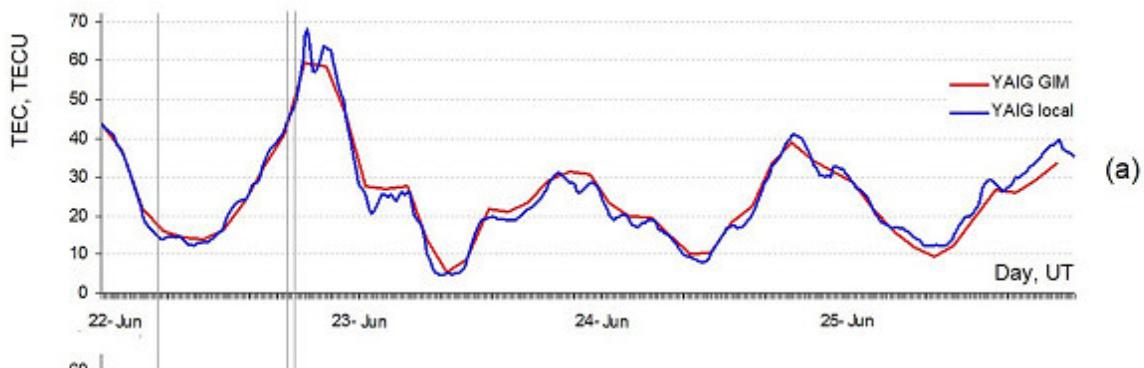


Рисунок 2.13. Динамика ПЭС по данным GIM и ПЭС, полученным на основе разработанного в диссертации метода (рис. 9а из статьи [Sergeeva et al., 2017]). Красная кривая – данные GIM, синяя кривая – данные ПЭС, полученные на основе метода, разработанного в диссертации.

В работе [De la Luz et al., 2018] данные абсолютного ПЭС, полученные на основе разработанного в диссертации алгоритма использовались для оценки возмущенности ионосферы над Мексикой для сильной магнитной бури 22–23 июня 2015 г. Была отмечена смена положительной фазы магнитной бури в данных ПЭС на отрицательную. Восстановление ПЭС до невозмущенного уровня произошло после 28 июня 2015 г. (рис. 2.14).

В работах группы Поволжского государственного технологического университета [Ivanov et al., 2017; Ivanov et al., 2019] была создана методика оценки дисперсионных искажений широкополосного радиосигнала при ионосферном распространении на основе данных ПЭС. В качестве входных данных использовались значения абсолютного ПЭС, полученные на основе метода, разработанного в настоящей диссертации. Пример карты полос когерентности из статьи [Ivanov et al., 2019] представлен на рисунке 2.15.

Blagoveshchensky and Sergeeva [2019] использовали разработанный метод для оценки динамики абсолютного ПЭС во время следовавших друг за другом двух магнитных бурь 7–8 сентября 2017 г. (рис. 2.16). Авторами [Blagoveshchensky and Sergeeva, 2019] установлено, что амплитуда вариаций ПЭС была повышена до начала бурь. ПЭС в начале первой бури демонстрировало положительную фазу, интенсивность которой менялась от станции к станции, после чего наблюдалась отрицательная фаза. Данные ПЭС позволили авторам [Blagoveshchensky and Sergeeva, 2019] выявить, что вторая буря существенно отличалась от классической картины: положительная фаза не наблюдалась вовсе, а ПЭС было понижено в течение всего дня 8 сентября 2017 г.

Gonzalez-Esparza et al. [2018] использовали разработанный метод для мультиинструментального анализа эффектов космической погоды во время событий сентября 2017 г. (рис. 2.17).

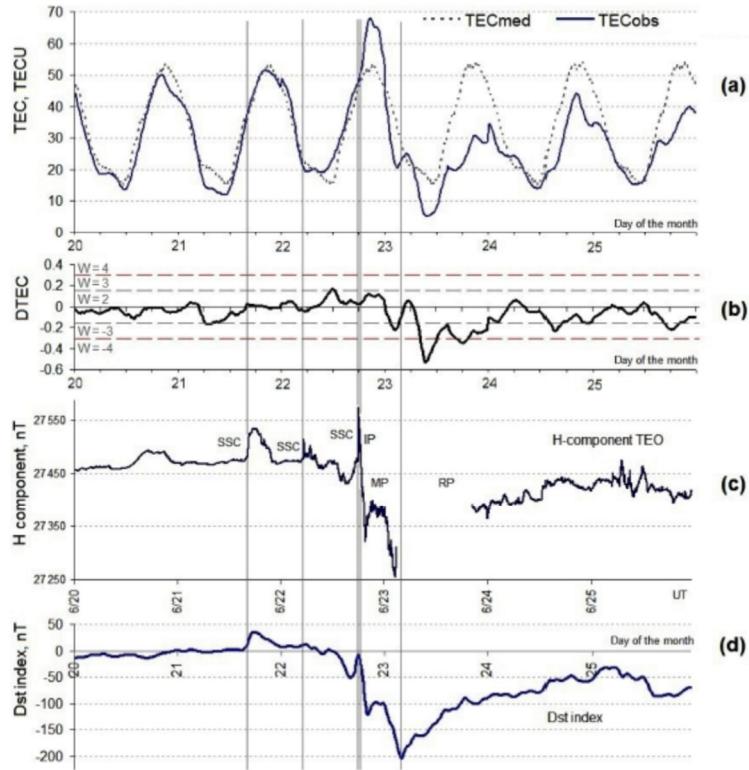


Рисунок 2.14. Вариации абсолютного вертикального ПЭС, изменчивости ПЭС, Н-компоненты магнитного поля, а также индекса  $Dst$  (сверху вниз). (Рис. 5 из статьи [De la Luz et al., 2018]).

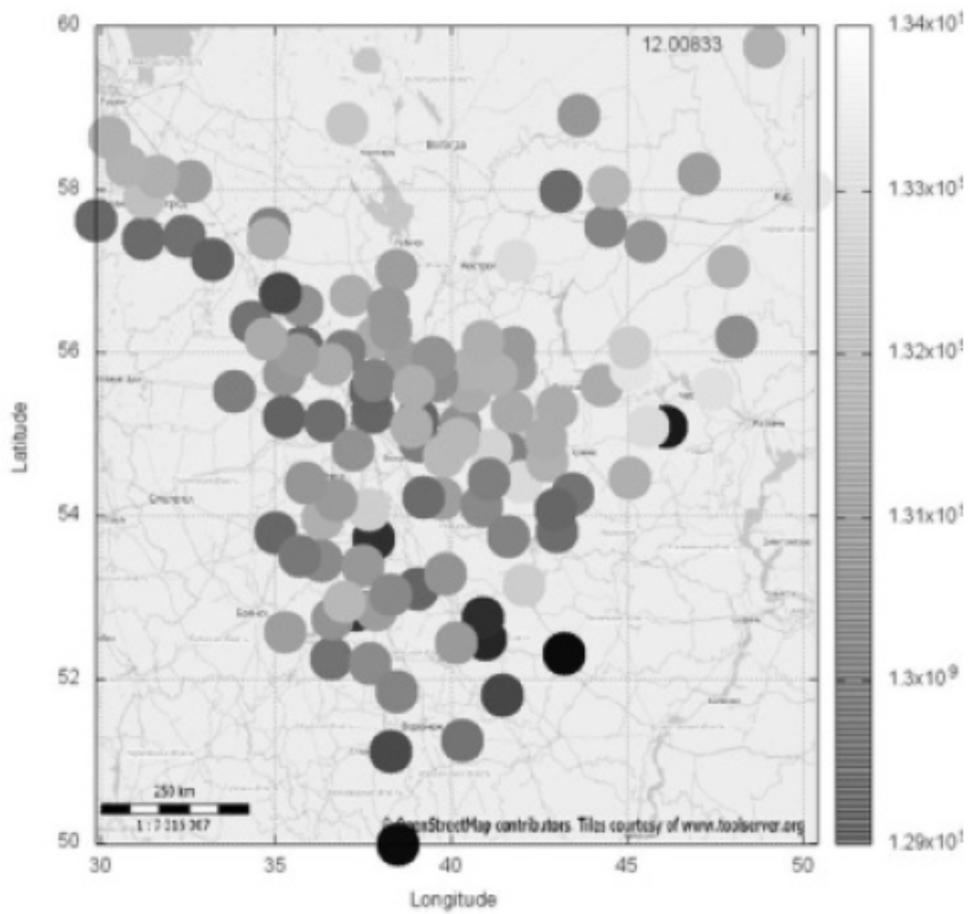


Рисунок 2.15. Пример карт полос когерентности в регионе Москвы (рис. 1 из статьи [Ivanov et al., 2019]).

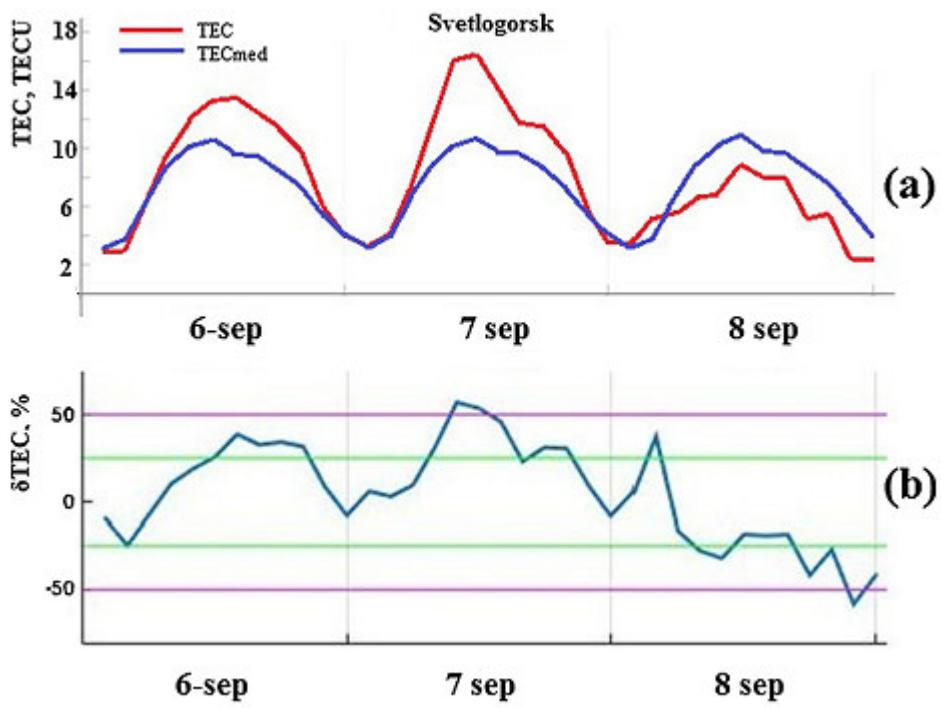


Рисунок 2.16. Динамика абсолютного ПЭС над станцией в Светлогорске 6–8 сентября 2017 г. (a) и отклонение ПЭС от медианного значения (b) (Рис. 9а, б из статьи [Blagoveshchensky and Sergeeva, 2019]). На панели а приведены текущее значение абсолютного ПЭС (красная кривая) и медианные значения абсолютного ПЭС (синяя кривая).

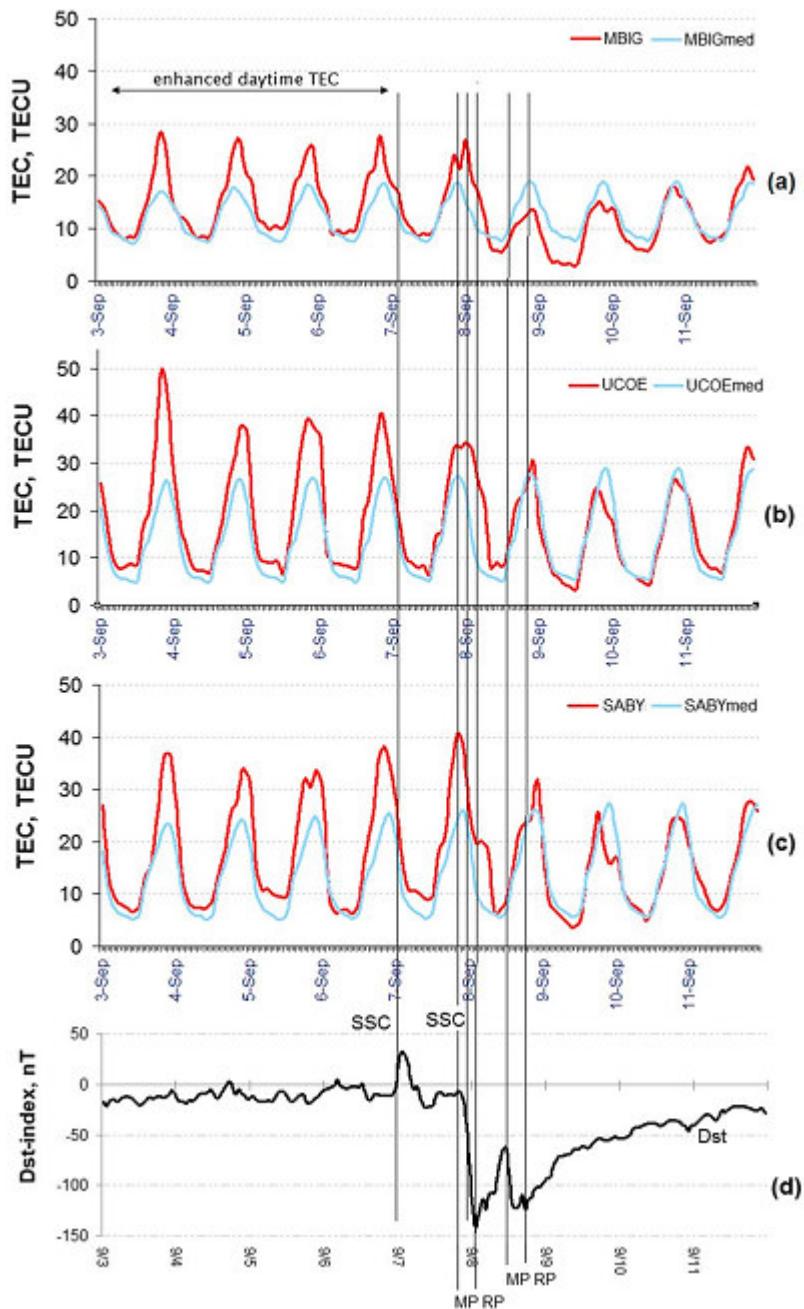


Рисунок 2.17. Наблюдаемое (красные линии) и медианное (голубые линии) абсолютное ПЭС 3–11 сентября 2017 г. Рис. 7 из статьи [Gonzalez-Esparza et al., 2018]. Абсолютное ПЭС получено по ГНСС-измерениям на станциях MBIG (a), UCOE (b), SABY (c). На панели d приведена динамика индекса Dst.

Авторы [Gonzalez-Esparza et al., 2018], обсуждая отсутствие ионосферного отклика в данных абсолютного ПЭС (полученного на основе разработанного в диссертационном исследовании метода) на вторую бурю (8 сентября), предполагают возможную компенсацию буревых эффектов в нижней и верхней ионосфере (или ионосфере и плазмосфере). Кроме того, локальные данные показывают не только широтную зависимость эффектов бури, но также и долготный эффект.

Динамика ПЭС, полученного на основе алгоритмов, разработанных в диссертации представлена в ряде недельных отчетов SCiESMEX (см., например, [http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reporte\\_semanal\\_20191128.pdf](http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reporte_semanal_20191128.pdf); [http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reporte\\_semanal\\_20191212.pdf](http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reporte_semanal_20191212.pdf)) (см. рис. 2.18).

*Таким образом, можно отметить применимость получаемого абсолютного ПЭС для геофизических исследований и работоспособность метода при использовании сторонними пользователями.*

### **2.3. Возможности машинного обучения для оперативного прогноза ПЭС**

В ряде случаев, например в задачах КВ-радиосвязи и радиолокации, недостаточно иметь текущие измерения абсолютного ПЭС, но необходимо осуществлять оперативный прогноз ПЭС [Куркин и др., 1997; Jakowski et al., 2002; Zolesi and Cander, 2014].

Один из подходов основан на эмпирическом моделировании и корректировке измеряемых значений по текущим данным. Например, в работах [Zolesi et al., 1993; Zolesi et al., 2004] используется линейная регрессия Фурье-коэффициентов измерений ПЭС на число солнечных пятен R12. Наряду с существующими классическими методами оперативного прогноза [Ильин и др., 2018] используется прогнозирование на основе нейронных сетей [Tulunay et al., 2004; El-naggar et al., 2013; Huang and Yuan, 2014].

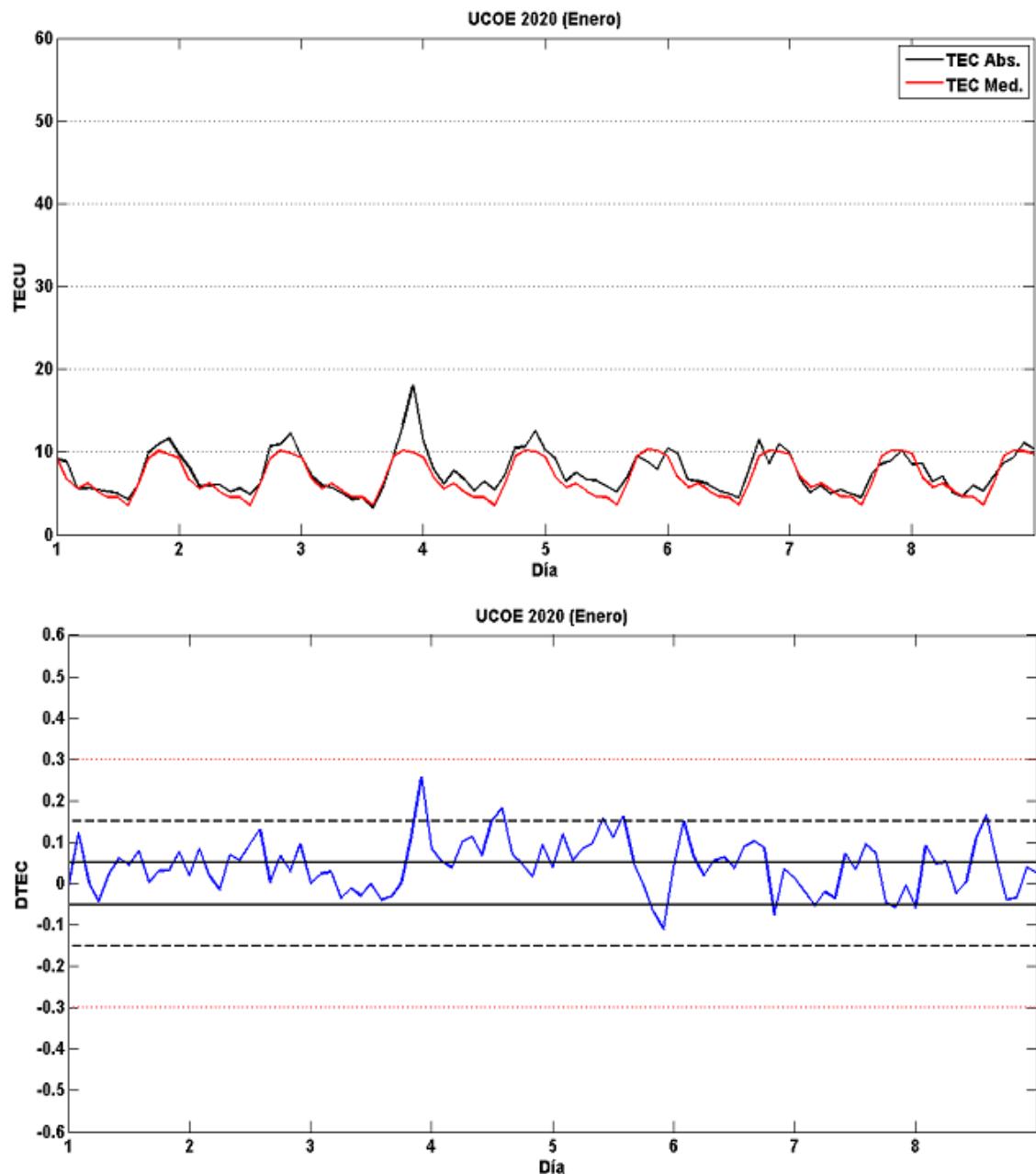


Рисунок 2.18. Динамика ПЭС 1–8 января 2020 г. на станции UCOE в Мексике. Рисунок на стр. 17 из отчета [http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reporte\\_semanal\\_20200109.pdf](http://www.sciesmex.unam.mx/static/media/uploads/reporte_semanal_20200109.pdf)

В диссертационном исследовании предложено использовать методы машинного обучения для получения оперативного прогноза абсолютного вертикального ПЭС на основе данных, получаемых в рамках созданного метода. Для оценки возможности методов машинного обучения решалась задача прогноза абсолютного вертикального ПЭС с горизонтом прогноза 4 ч. В качестве входных данных использовались данные абсолютного вертикального ПЭС, а также первой и второй производных по времени  $G_t$ ,  $G_{tt}$ , полученные на основе разработанного метода с использованием двухчастотных фазовых измерений на среднеширотной станции IRKJ, за 2014 г. Разрешение исходных данных составляло 0.5 часа. Дополнительно в качестве входных параметров использовался индекс солнечной активности  $F10.7$  и индексы геомагнитной активности  $AE$  и  $SYM-H$  (<ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/>).

Для построения модели машинного обучения использовались три основных подхода: метод опорных векторов (МОВ) [Chen and Lin, 2006], композиционный метод на основе решающих деревьев типа случайного леса (СЛ) [Breiman, 2001], а также градиентный бустинг над решающими деревьями (ГБРД) [Saeys et al., 2008]. Полученные оценки точности представлены ниже для демонстрации возможности потенциала предложенного подхода.

*Метод опорных векторов* представляет собой метод для регрессии и классификации данных. Основной смысл в задаче регрессии заключается в нахождении гиперплоскости максимально удаленной от границ обучающего множества (опорных точек или векторов). При этом требуется максимизировать «зазор» между искомой гиперплоскостью (аппроксиматором) и границей. Для этого осуществляется минимизация функционала (2.16) с заданными ограничениями (2.17) на нарушение границы:

$$\min_{w,b,\xi,\xi^*} \left[ \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \right] \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} y_i - \langle w, \phi(x_i) \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \langle w, \phi(x_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*, \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0, i = 1, N \end{cases}, \quad (2.17)$$

где  $C$  – постоянная, характеризующая компромисс между линейностью целевой функции и допустимыми максимальными отклонениями  $\varepsilon$ ;  $\xi, \xi^*$  – величины захода вектора за границу области;  $w$  – матрица весов искомых функций  $\phi$ , так что искомая функция  $Y(x) = \langle w, \phi(x) \rangle + b$  (здесь  $b$  – систематическое смещение). Для учета нелинейности вводится нелинейная функция ядра в виде радиальных базисных функций Гаусса [Vapnik, 1998]

*Метод случайного леса* – еще один метод машинного обучения. Каждое дерево решений строится по выборке с фиксированным числом случайно отбираемых признаков обучения. Регрессия строится путем усреднения по всем деревьям решений.

Метод имеет следующие значимые преимущества [Чистякова, 2013]:

- метод гарантирует защиту от переобучения (overfitting) даже в случае, когда количество признаков значительно превышает количество наблюдений;
- для построения случайного леса по обучающей выборке требуется задание всего двух параметров, которые требуют минимальной настройки;
- случайные леса позволяют производить оценку наиболее информативных признаков.

*Градиентный бустинг* [Saeys et al., 2008] использует большое число (ансамбль) моделей низкого качества («слабых моделей»), но за счет большого количества и правильного итеративного обучения дает на выходе высокую точность. На каждом шаге градиентный бустинг добавляет одну новую слабую модель, высчитывает градиент функции потерь и выбирает

такие статистические веса для новой модели на отклонение, чтобы минимизировать функцию потерь.

Для решения задачи построения модели оперативного прогноза входной набор данных разделялся на 3 части: обучающая выборка (67.5 %), тестирующая выборка (22.5 %), проверочная выборка (10 %). Тестирующая выборка используется для настройки гиперпараметров модели, а проверочная выборка – для окончательной оценки точности.

В качестве входных параметров использовались параметры  $I_V$ ,  $G_t$ ,  $G_{tt}$ , получаемые при работе метода разработанного в настоящей диссертации, индекс солнечной активности  $F10.7$ , индексы геомагнитной активности  $SYM-H$ ,  $AE$ , а также их сглаженные значения с различными окнами и данные с различной задержкой, а также функция от локального времени ( $\cos(LT)$ ).

В качестве ключевых метод случайного леса позволил отобрать следующие параметры:  $I_V$ ,  $G_t$ ,  $F10.7$ ,  $SYM/H$ ,  $\cos(LT)$ ,  $Iv.L12$ ,  $F10.7.L72$ ,  $F10.7.L360$ ,  $Iv.MA24$ ,  $Iv.MA12$ ,  $SYM/H.MA96$ ,  $SYM/H.MA24$ . Здесь  $LN$  означает запаздывание ( $L - Lag$ ) по времени указанного параметра на  $N$  часов, а  $MA_N$  – экспоненциальное взвешенное среднее с окном  $N$  часов. Отбор осуществлялся на основе оценки информативности признаков с использованием метода случайного леса.

На рисунке 2.19 представлены ряды экспериментальных данных ПЭС (серая штриховая кривая) и прогнозных значений, полученных на основе МОВ (красная кривая), ГБДР (синяя кривая), СЛ (зеленая кривая), а также линейной модели (ЛМ) на ключевых параметрах (черная кривая).

В таблице 2.1. приведены значения среднеквадратичного отклонения и средней абсолютной ошибки (САО). Наряду с ошибкой для СЛ, ГБДР, МОВ, ЛР указаны ошибки для двух простейших моделей: N1 – ПЭС со временем не изменяется, N2 – ПЭС изменяется линейно в соответствии с производной  $G_t$ .

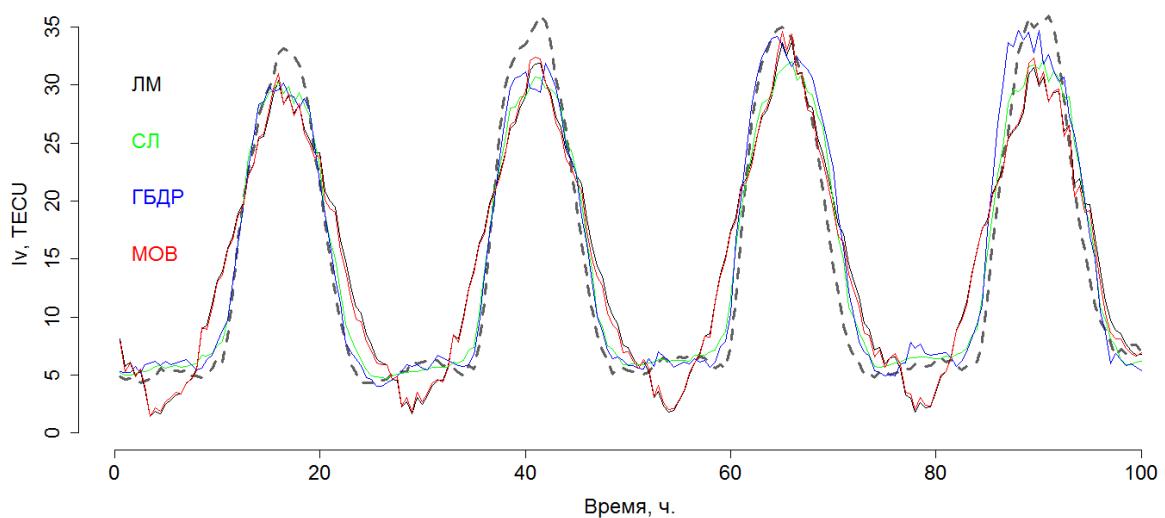


Рисунок 2.19. Исходные данные вертикального ПЭС (серая штриховая линия) и прогнозные значения для моделей на основе машинного обучения (красная кривая – МОВ, синяя – ГБДР, зеленая – СЛ, черная – ЛМ).

Таблица 2.1. Среднеквадратичное отклонение (СКО) и средняя абсолютная ошибка (САО) различных моделей для горизонта прогноза 4 ч. Значения даны в единицах ТЕСУ.

	СЛ	ГБДР	МОВ	N1	N2	LR
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

Можно видеть, что модели, построенные с использованием методов машинного обучения СЛ и ГБДР, дают достаточно хорошие результаты. Эффективность МОВ в данном случае невысокая и находится на уровне эффективности линейной модели по ключевым параметрам, которые, в свою очередь, отбирались на основе модели случайного леса.

Модель, основанная на методах машинного обучения, позволяет получать ошибку оценки ПЭС на 4-х часовом горизонте на уровне  $\sim 3.5$  ТЕСУ, линейная регрессия на оптимальные параметры –  $\sim 4.5$  ТЕСУ, простая модель неизменной ионосферы или линейного изменения ПЭС –  $\sim 9\text{--}17$  ТЕСУ.

Аналогичный подход может быть использован для широкого круга задач, в том числе для оперативного прогноза геостационарного ПЭС, индексов возмущенности ионосферы, сбоев функционирования ГНСС и др.

## 2.4. Выводы по Главе 2

В диссертации разработан новый метод получения абсолютного ПЭС по данным измерений одного приемника ГНСС. Метод основан на разложении ПЭС в ряд Тейлора (в качестве оптимального выбран второй порядок разложения). Отличительными особенностями метода являются:

- возможность определения ДКЗ, абсолютного вертикального и наклонного абсолютного ПЭС, временной и пространственных производных вертикального абсолютного ПЭС;
- возможность определения указанных величин по двухчастотным и одночастотным измерениям приемника ГНСС;
- возможность получения заведомо неотрицательных значений вертикального абсолютного ПЭС как при одночастотном, так и при двухчастотном приеме, а также заведомо неотрицательных значений наклонного абсолютного ПЭС вдоль всех лучей спутник – приемник при двухчастотном приеме.

Среднеквадратическое отклонение абсолютного вертикального ПЭС, получаемого с использованием разработанного метода, и данных глобальных ионосферных карт GIM (создаваемых на основе данных сети станций) не превышает СКО между данными карт GIM 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 разработанного в настоящей работе метода – 2.1 TECU. Анализ выявил проблемы используемой в литературе технологии Seemala, а также в регионах с малым числом станций (например, Сибири) широко используемой технологии ионосферных карт Madrigal (MIT). Получено, что при оценке вертикального ПЭС использование ограничений на неотрицательность ПЭС приводит к коррекции более чем на 1 TECU ~9 % измерений.

Продемонстрирована работоспособность разработанного метода как при высокой, так и при низкой солнечной активности, а также в условиях сильных геомагнитных бурь. Использование разработанного метода в независимых работах дополнительно указывает на его корректность.

Следует отметить возможность создания локальных моделей оперативного прогноза абсолютного ПЭС на основе получаемых в рамках предложенного метода данных. Предложенная схема оперативного прогноза

вертикального ПЭС на основе методов машинного обучения с привлечением данных, получаемых на основе разработанного метода, а также индексов солнечной и геомагнитной активности протестирована на данных за 2017 г. Получено, что методы интеллектуального анализа данных позволяют достичь СКО на уровне  $\sim 3.5$  TECU на 4-х часовом горизонте, линейная регрессия на оптимальные параметры –  $\sim 4.5$  TECU, простая модель неизменной ионосферы или линейного изменения ПЭС –  $\sim 9\text{--}17$  TECU.

### **ГЛАВА 3. СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРНОГО АБСОЛЮТНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ**

Настоящая глава посвящена разработанной системе дистанционного мониторинга ионосферного абсолютного полного электронного содержания, реализованной в настоящей диссертации. В качестве основы был использован метод, предложенный в Главе 2. Основные результаты опубликованы в [Ясюкевич и др., 2018; Yasyukevich et al., 2022]. Система прошла апробацию на полигонах ИСЗФ СО РАН в рамках сети SibNet. Работы по разработке системы мониторинга выполнены под руководством автора при участии А.М. Веснина, А.В. Киселева, А.А. Мыльниковой.

Создание систем дистанционного мониторинга представляет собой важную народно-хозяйственную задачу. За исключением систем мониторинга ионосферных неоднородностей и мерцаний сигналов, в литературе имеется мало материала по системам мониторинга абсолютных ионосферных параметров на основе данных ГНСС.

Как правило, системы мониторинга, позволяющие работать в реальном времени основываются на многостанционной обработке в регионах с большим числом станций. Titov et al. [2013] разработали систему мониторинга на сети станций с использованием ассимиляционной модели, где в качестве входной модели измерений ПЭС в интересах их калибровки использован алгоритм сферических гармоник [Schaer, 1998]. Pathy et al. [2019] создали систему для расчета распределения ПЭС и ионосферной возмущенности также на основе сферических гармоник с использованием программного кода [Jin et al., 2012]. Mendoza et al. [2019] описывают систему ионосферного мониторинга над Южной Америкой. Следует отметить, что указанные статьи не содержат программных и информационных структур систем. Это не позволяет воспроизвести разработанные решения.

Magsi et al. [2019] описывают систему мониторинга вариаций ПЭС, основанную на измерениях на одном приемнике, но данные не включают абсолютное полное электронное содержание.

Среди существующих одностанционных систем мониторинга следует отметить, систему, разработанную в ИРЭ РАН для оценки высотного распределения электронной концентрации по данным ГНСС [Смирнова и др., 2011] на основе метода радиопросвечивания [Смирнов, 2007]. Подобная система может успешно применяться и для зондирования ионосферы над морскими акваториями [Смирнов и Смирнова, 2019].

Система мониторинга, созданная в рамках диссертации, представляет собой программно-аппаратный комплекс (см. схему на рис. 3.1), основанный на предложенном методе получения абсолютного полного электронного содержания, его пространственных и временных производных на основе данных отдельного приемника сигналов ГНСС (Глава 2).

*Цель системы:* мониторинг абсолютного полного электронного содержания, его производных по времени и пространству на основе данных ГНСС в квази-реальном времени.

*Задача системы:* обработка параметров сигналов ГНСС GPS/ГЛОНАСС/Galileo/BeiDou в интересах мониторинга ионосферы.

*Структурные части системы:* аппаратная часть, включающая оборудование Сибирской сети приемников SibNet; информационная часть, включающая алгоритмы и программы обработки данных ГНСС (рис. 3.1).

*Требования к системе:* обеспечение зондирования в различных азимутальных секторах; работа с различными ГНСС; возможность работы в режиме времени близком к реальному.

*Входная информация:* двухчастотные (одночастотные) фазовые и групповые измерения ГНСС GPS/ГЛОНАСС/Galileo/BeiDou.

*Выходная информация:* ПЭС, его производные по времени и пространству с временным запаздыванием не более 30 с.

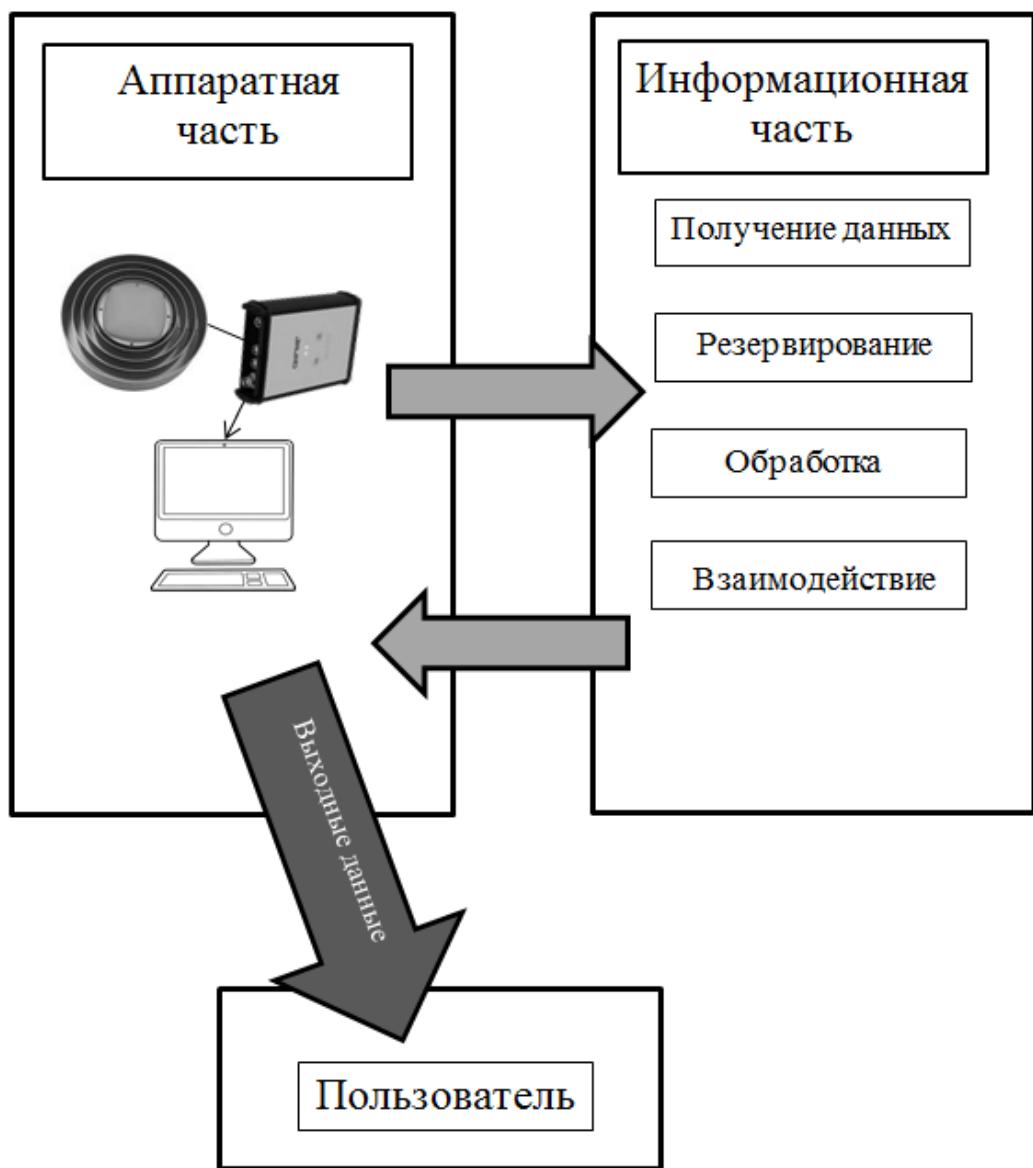


Рисунок 3.1. Общая схема системы мониторинга.

### **3.1. Сибирская сеть приемников SibNet ИСЗФ СО РАН**

В ИСЗФ СО РАН в 2015–2020 гг. под руководством автора велись работы по обеспечению работоспособности и модернизации Сибирской сети приемников SibNet [Ясюкевич и др., 2018]. На рис. 3.2 представлена схема расположения приемников ГНСС Сибирской сети SibNet ИСЗФ СО РАН. Основная часть пунктов расположена в Прибайкальском регионе, один пункт – в регионе г. Норильск.

Реализации системы мониторинга осуществлялось на основе оборудования сети SibNet.

В сети используются приемники трех основных типов:

- Javad Delta-G3T,
- Javad SigmaQ,
- NovAtel GPStation-6.

Основной тип приемника – Javad-G3T, установленный на всех пунктах за исключением п. TORY. Приемник NovAtel, являющийся специализированным приемником для измерения ионосферных мерцаний, установлен в дополнение к приемникам Javad в пунктах NORI, TORY, ISTP.

В сети используются антенны трех основных типов:

- Javad GrAnt-G3T,
- Javad RingAnt-G3T,
- NovAtel GNSS-750.

На рисунке 3.3 представлены изображения приемников (верхний ряд) и антенн (нижний ряд) сети SibNet ИСЗФ СО РАН.

### **3.2. Аппаратная структура системы мониторинга**

Система мониторинга ионосферного полного электронного содержания аппаратно состоит из трех частей: антenna, приемник сигналов ГНСС и управляющий компьютер для обработки данных (рис. 3.4).

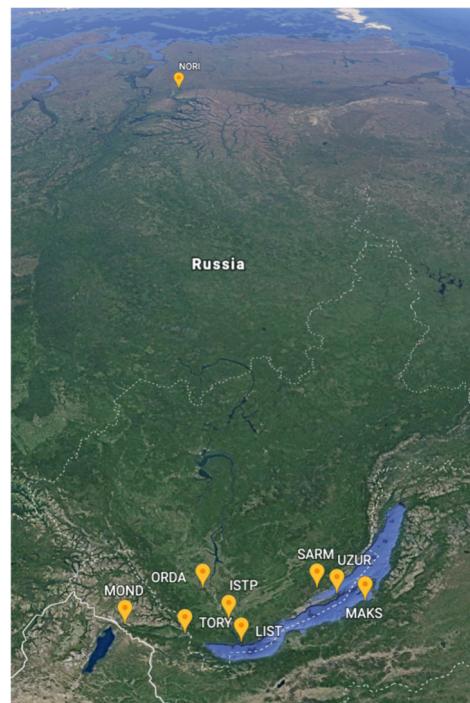


Рисунок 3.2. Схема расположения приемников ГНСС Сибирской сети SibNet ИСЗФ СО РАН.



Рисунок 3.3. Оборудование, используемое в сети SibNet. Верхний ряд: ГНСС приемники Javad Delta, Javad SigmaQ, NovAtel GPStation-6. Нижний ряд: ГНСС антенны GrAnt-G3T, RingAnt-G3T, NovAtel GNSS-750.

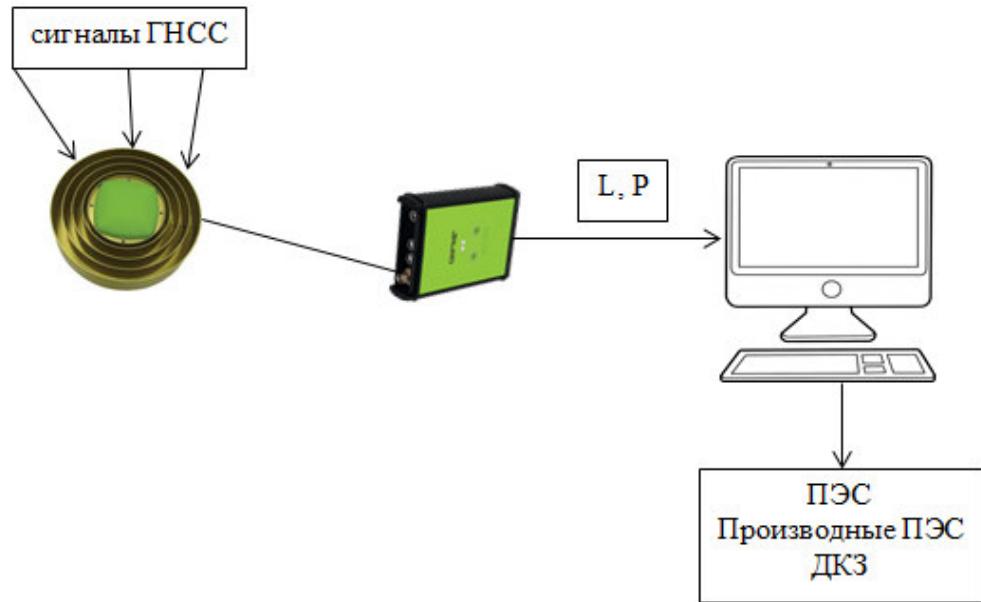


Рисунок 3.4. Аппаратная схема системы мониторинга ионосферного полного электронного содержания.

**Основные требования к системе:**

- прием сигналов не менее двух глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС,
- регистрация данных с частотой не менее раз в 30 с,
- использование приемников геодезического класса с низким уровнем шума и высокой стабильностью опорного генератора,
- подавление многолучевости сигналов.

Указанные требования позволяют использовать приемники Javad Delta-G3T с антеннами RingAnt, являющимися составной частью сети SibNet.

Приемники и антenna имеют следующие характеристики:

- прием сигналов спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, SBAS;
- прием сигналов на частотах L1, L2, L5;
- регистрация данных с частотой 1 с в стандартном режиме (и до 50 Гц в специальных режимах);
- подавление многолучевости сигналов.

Поскольку указанные приемники регистрируют сигналы на двух частотах, использовалась двухчастотная схема, представленная в Главе 2.

Приемник соединяется с антенной антенным кабелем RG-213 с низким затуханием в рабочей полосе ГНСС. Длина кабеля – 30 м. При большей длине требуется дополнительный усилитель мощности.

Компьютер осуществляет обработку данных приемника ГНСС и передает на выход информацию о ПЭС, производных ПЭС и ДКЗ. Для управления компьютером была выбрана система Linux. В качестве реализации в системе мониторинга использован компьютер LENOVO ThinkCentre Tiny M630e с процессором Intel® Core™ i5, и оперативной памятью 8 Гб DDR4.

### **3.3. Информационная структура системы мониторинга**

Информационно система мониторинга состоит из набора модулей, работающих независимо (см. рис. 3.5). Поток информации имеет вид:

- ↓ Приемник выдает набор сырых данных по интерфейсу USB;
- ↓ Управляющий компьютер сохраняет данные в банке данных;
- ↓ Модуль обработки сырых данных обрабатывает данные и получает исходные измерения ПЭС и дополнительную информацию;
- ↓ Осуществляется сохранение данных для горячего старта;
- ↓ \* При необходимости извлекаются данные для горячего старта;
- ↓ Осуществляется вычисление абсолютного ПЭС и производных ПЭС (на основании методов, описанных в Главе 2);
- ↓ Данные выдаются пользователю;

В целях минимизации влияния модулей друг на друга каждый модуль представляет собой отдельное приложение. Возможные задержки и ошибки в одном из модулей не могут испортить корректность работы другой программы. Остановка одного из модулей также не приводит к остановке всей системы, впоследствии данный модуль может быть перегружен без потери информации в других модулях.

Менеджер модулей ведет системный журнал, что дает возможность отслеживать состояние и правильность работы запущенных программ. В случае сбоя и непредвиденного завершения работы модулей осуществляется их автоматическая перезагрузка.

#### *Сырые данные приемника ГНСС*

Данные поступают с приемника ГНСС по интерфейсу USB в управляющий компьютер. Приемник Javad использует собственный прикладной интерфейс Receiver External Interface Specification (GREIS), описанный в интерфейсном документе [GREIS, 2021]. Данный интерфейс обеспечивает доступ ко всем возможностям и функциям приемника.

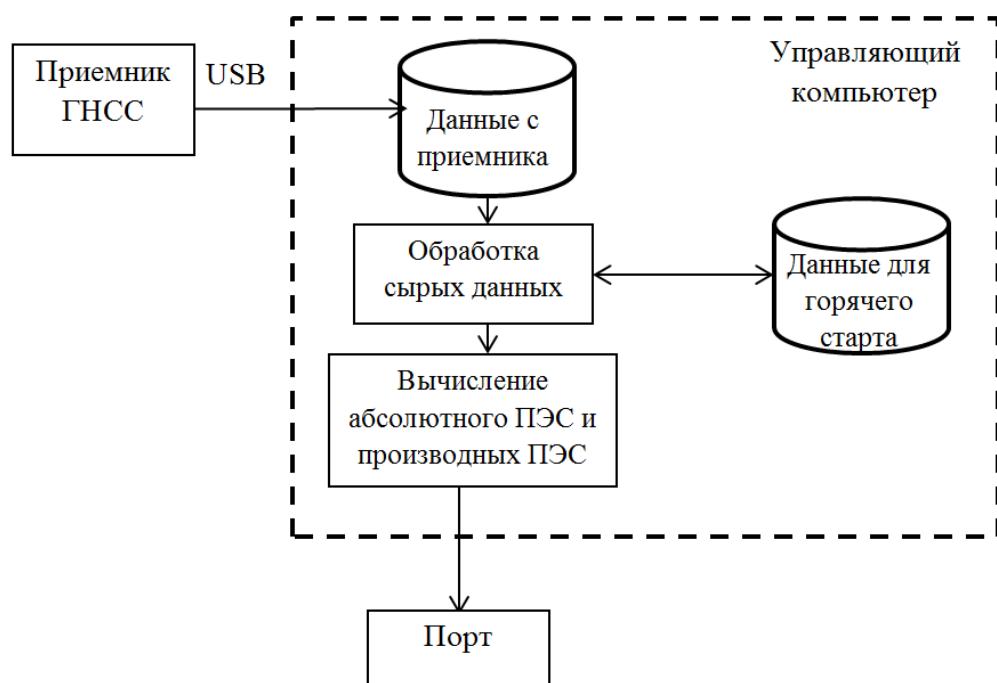


Рисунок 3.5. Информационная схема системы мониторинга ионосферного полного электронного содержания.

GREIS описывает общий язык не зависимый от конкретного приемника Javad, что позволяет осуществлять модернизацию и замену приемника в системе мониторинга при необходимости.

Данные с приемника идут в виде бинарного потока различных сообщений: различные измерения, расчетные значения. Каждое сообщение идет согласно своему расписанию. GREIS определяет специальные методы и типы сообщений, что позволяет стандартным способом получать необходимую информацию из потока. Сообщения, идущие с приемника, разбиты на блоки фиксированного размера. В случае возникновения помех на линии связи потерянные блоки отправляются повторно.

Поток данных с приемника включает заголовок и некоторое (произвольное) число блоков информации. Каждый блок начинается с метки времени. Данные между двумя последовательными метками относятся к первой метке.

В качестве информационных сообщений в системе используются следующие: [R1], [R2], [P1], [P2], [SI], [EL], [AZ], [SI].

[R1], [R2] – групповая псевдодальность на первой и второй частотах.

[P1], [P2] – фазовая псевдодальность на первой и второй частотах.

[EL], [AZ] – угол места и азимут.

[SI] – служебные сообщения, в том числе информация о спутниках.

Сообщения [SI] служит для индексации данных других сообщений и отнесения конкретного измерения к конкретному спутнику.

Сообщения [R1], [R2], [P1], [P2] состоят из переменного числа (по количеству наблюдаемых спутников) полей типа float (8 байт) и одного поля типа unsigned integer (1 байт) для контрольной суммы. Сообщения [EL] состоят из переменного числа (по количеству наблюдаемых спутников) полей типа integer (1 байт) и одного поля типа unsigned integer (1 байт) для контрольной суммы. Сообщения [AZ] состоят из переменного числа (по количеству наблюдаемых спутников) полей типа unsigned integer (1 байт) и

одного поля типа `unsigned integer` (1 байт) для контрольной суммы. Угол места дан с точностью  $1^\circ$ , азимут – с точностью  $2^\circ$ . Для получения гладких рядов угла места и азимута необходима интерполяция.

#### *Хранение сырых данных приемника ГНСС*

Данные с приемника сохраняются на файловой системе в соответствии со стандартной структурой JPS [GREIS, 2021]. Хранение файлов осуществляется в течение полугода. Ежедневно файлы проверяются на предмет превышения срока хранения, старые данные удаляются.

Объем данных за сутки при регистрации данных с частотой 1 с составляет  $\sim 250$  Мб. Достаточным является выделение 1 Тб дискового пространства для данных приемника ГНСС. В связи с тем, что сырье измерения могут использоваться для других задач, частота записи сырых данных может быть увеличена до 50 Гц. В этом случае суточный объем сырых данных составляет  $\sim 10$  Гб, а хранение исходных файлов осуществляется на протяжении одного месяца.

#### *Обработка сырых данных приемника ГНСС*

Модуль обработки сырых данных обеспечивает получение исходных сырых измерений ПЭС с приемника, а также углов места и азимутов. Информационная схема представлена на рис. 3.6.

Ключевым является модуль RAW-FLOW, организующий поток исполнения набора модулей. Модуль определяет последний доступный файл, в который в текущий момент времени пишется поток данных с приемника и отслеживает поступающие сообщения. Модуль осуществляет непрерывный прием данных с приемника и его резервирование, а также запуск и необходимый обмен информацией с остальными модулями.

В случае сбоев работы системы модуль на старте получает данные из резервного хранилища.

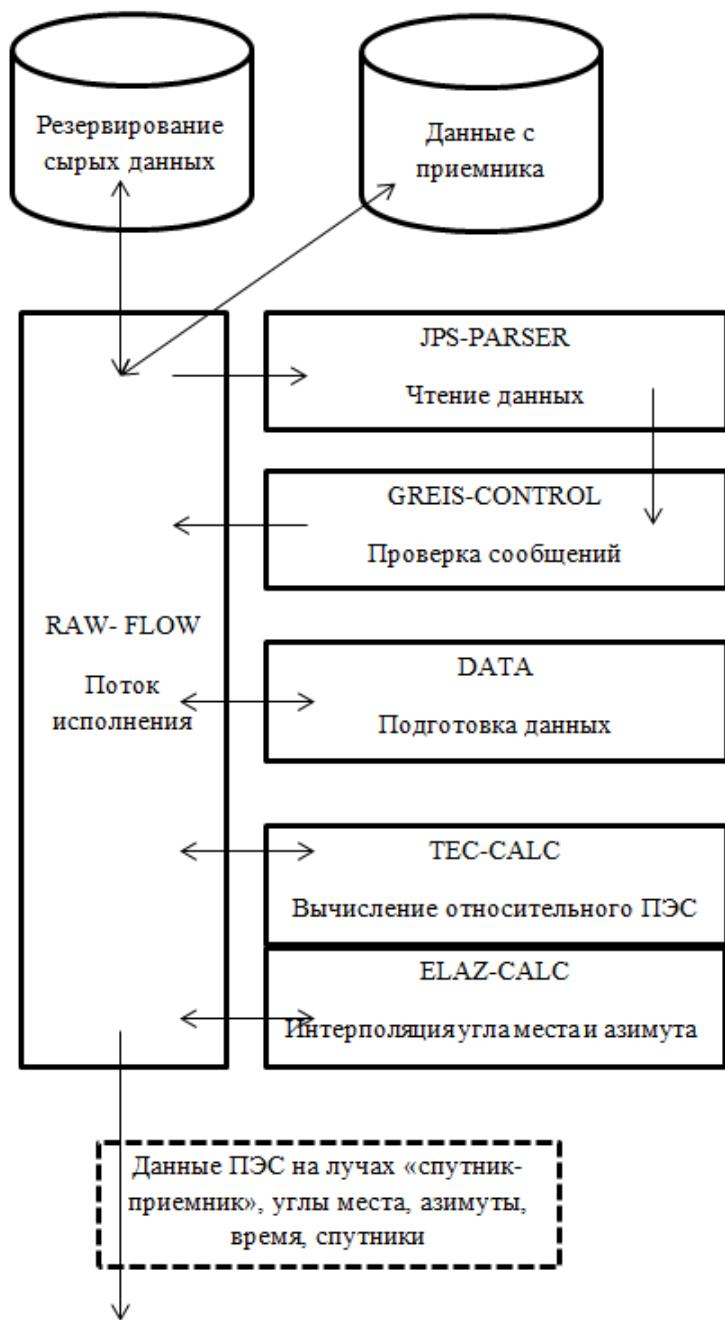


Рисунок 3.6. Информационная схема модуля обработки сырых данных приемника ГНСС.

При запуске системы после непродолжительного перерыва (горячий старт) вследствие различных сбоев, модуль RAW-FLOW проводит контроль имеющейся истории данных, выходит на последнее состояние и продолжает функционировать в установленном порядке. Выходные данные модуля обработки сырых данных считаются устаревшими, если с момента регистрации прошло более 48 ч. По мере устаревания происходит ротация записей, тем самым текущая обработка использует только оперативные данные. В целях уменьшения нагрузки на жесткий диск и увеличения его срока службы запись данных осуществляется только после накопления за 5 мин.

Модуль JPS-PARSER осуществляет чтение файлов со структурой JPS и осуществляет выборку данных, оставляя только те поля, которые необходимы для дальнейших расчетов. Выборка осуществляется только для данных, которые еще не поступали в обработку. Для этого модуль получает от RAW-FLOW информацию о последних обработанных данных.

Целостность данных выполняется модулем GREIS-CONTROL и обеспечена проверкой контрольной суммы, рассчитываемой алгоритмом «циклический избыточный код», описанным в GREIS.

Модуль DATA структурирует и готовит данные в виде используемых в системе форматов.

На основании данных о групповых и фазовых измерениях псевдодальности [R1], [R2], [P1], [P2] модуль TEC-CALC на основе формул (1.2)–(1.4) осуществляет вычисление ПЭС. Для вычисления частот ГЛОНАСС для конкретных спутников, модуль использует информацию о номере частотного канала  $n$  из служебных сообщений [SI].

$$\begin{aligned} f_1 &= F_1 + n \cdot \Delta F_1 \\ f_2 &= F_2 + n \cdot \Delta F_2 \end{aligned} \tag{3.1}$$

здесь  $F_1=1602$  МГц,  $F_2 = 1246$  МГц,  $\Delta F_1 = 0.5625$  МГц,  $\Delta F_2 = 0.4375$ .

Модуль ELAZ-CALC вычисляет углы места и азимуты для лучей спутник – приемник для каждого измерения. Как было сказано выше, приемник Javad выдает данные об азимуте с точностью до  $2^\circ$  градусов ( $0, 2, 4, \dots$ ), а об угле места – с точностью до  $1^\circ$  ( $1, 2, 3, \dots$ ). В целом измерения на близких углах места различаются мало, но ступенчатое изменение угла места может негативно сказаться на используемой системе уравнений.

В этом случае возможен либо дополнительный расчет на основе параметров орбит, либо интерполяция имеющихся данных. Поскольку динамика угла места с высокой точностью описывается кривой второго порядка, то локальной интерполяции получаемых данных вполне достаточно. При этом точки перехода с одного значения на другое однозначно фиксируют новое значение, что позволяет проводить интерполяцию по точным значениям.

Азимуты не входят в выражения для вычисления ПЭС, а хранятся для контроля, поэтому для них можно не осуществлять интерполяцию.

Полученная информация об измерениях ПЭС, углах места и азимутах, а также соответствующая служебная информация сохраняется на диск для резервирования и передачи другим модулям. Это минимизирует дальнейшие затраты на операции с большим объемом данных с приемника и позволяет осуществлять быстрый горячий старт после сбоя системы в связи с отключением электропитания и другими причинами.

#### *Вычисление абсолютного ПЭС и производных ПЭС*

Вычисление ПЭС и производных ПЭС осуществляется на основе метода, предложенного в Главе 2.

Информационная схема показана на рис. 3.7. На вход модуля поступают ряды данных группового и фазового ПЭС, угол места, время и информация о спутнике.

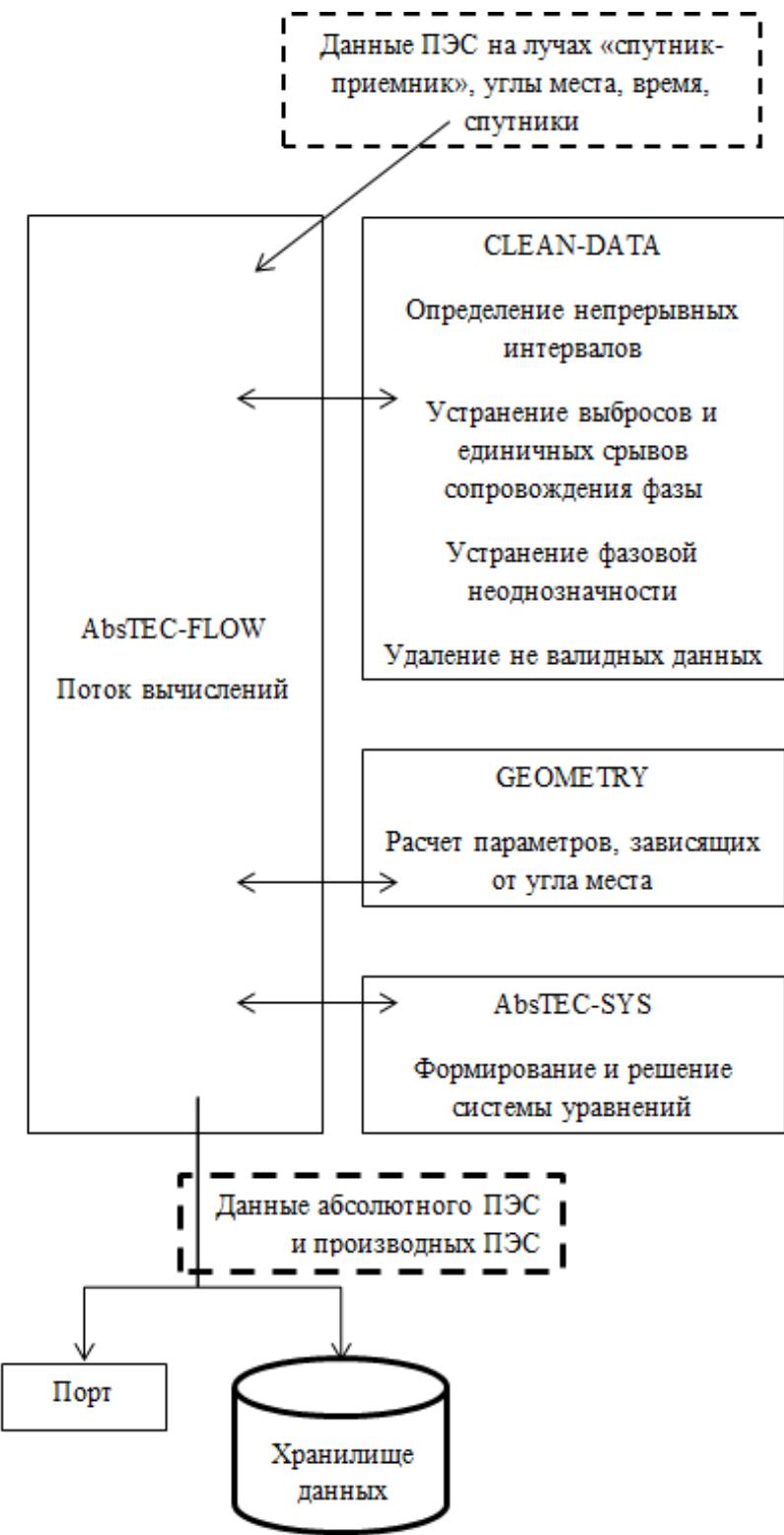


Рисунок 3.7. Информационная схема модуля получения абсолютного ПЭС.

Модуль CLEAN-DATA определяет непрерывные интервалы, устраниет выбросы и срывы сопровождения фазы (см. Главу 2) и устраниет фазовую неоднозначность. При длине непрерывного ряда менее 10 мин либо при отсутствии одного из измеряемых параметров данные считаются невалидными. Условие на непрерывность интервала – разрыв не более 2 мин по времени и изменение угла места не более  $10^\circ$ .

Модуль GEOMETRY осуществляет расчет функции преобразования наклонного ПЭС в вертикальное (mapping function).

Модуль AbsTEC-SYS осуществляет формирование системы уравнений, вычисление статистических весов. Матрица решений содержит ряд абсолютного ПЭС, производной по времени и пространственных градиентов ПЭС. Значения ПЭС и производных по времени и пространству для текущего момента времени передаются в порт для оперативного использования и записываются в хранилище данных в стандартном формате JSON.

### **3.4. Оценка показателей работы системы**

#### **3.4.1. Потребление ресурсов**

Потребление ресурсов является одним из показателей стабильности работы системы мониторинга. Рисунок 3.8 демонстрирует потребление ресурсов системой дистанционного мониторинга.

Измерения проведены с частотой 1 раз в 30 с. Загрузка процессора (левая панель) является практически непрерывной, но не превышает 25 %. Потребление памяти управляющего компьютера (правая панель) также находится на одном уровне. Это говорит об отсутствии утечек памяти в блоках системы мониторинга и возможности непрерывной работы в течение длительного времени.

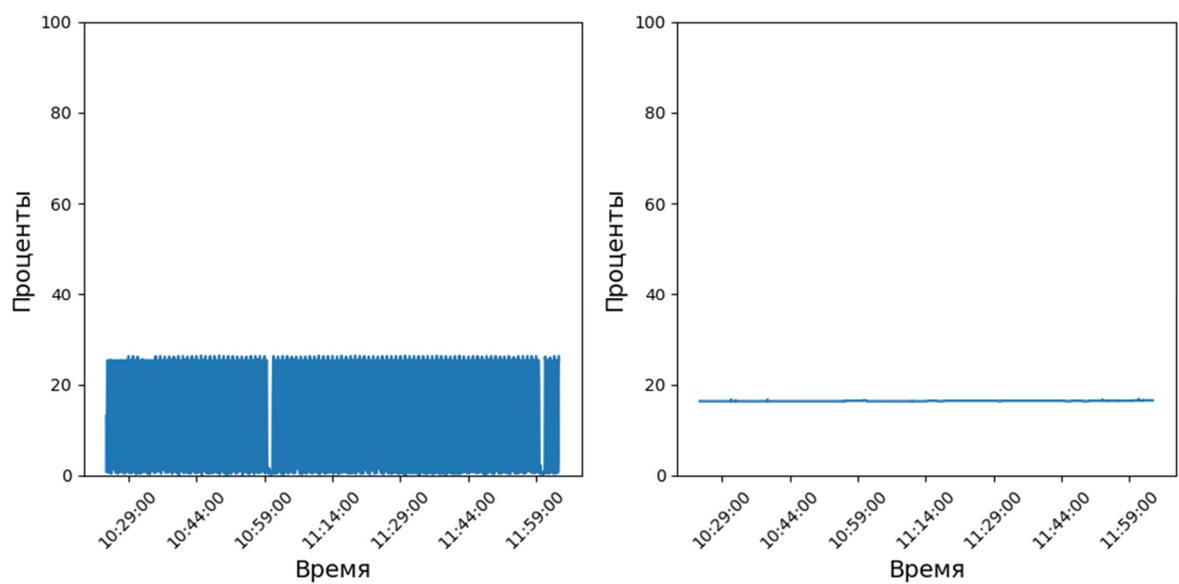


Рисунок 3.8. Потребление ресурсов системой с запущенными модулями.  
Левая панель – загрузка процессора, правая панель – потребление памяти.

### **3.4.2. Геометрия зондирования ионосферы сигналами различных ГНСС**

Важной характеристикой системы является геометрия зондирования спутниками различных систем. В настоящем параграфе приведены расчеты зондирования ионосферы системой мониторинга в различных областях.

На рис. 3.9 представлена динамика количества наблюдаемых спутников для разных систем 10.10.2022 г. в азиатском ( $52^{\circ}$  N,  $100^{\circ}$  E) и американском ( $52^{\circ}$  N,  $-100^{\circ}$  E) секторах: GPS – синий, ГЛОНАСС – оранжевый, Galileo – зеленый, BeiDou/COMPASS – красный. Данные получены на основе расчетов положения спутников по эфемеридам. Для построения рисунка столбики, соответствующие числу спутников для различных систем, накладывались один на другой, так что максимальное значение представляет собой суммарное число спутников всех ГНСС.

Группировки GPS, ГЛОНАСС и Galileo являются достаточно равномерными и имеют близкое количество спутников в американском и азиатском секторах (20–30). Группировка BeiDou значительно отличается – в азиатском секторе наблюдается значительно больше спутников.

В азиатском регионе больше всего наблюдается спутников китайской системы BeiDou. Приемников, регистрирующих сигналы этих спутников, в настоящее время в мире развернуто не очень много. Основная часть приемников принимает сигналы только GPS и ГЛОНАСС. В американском секторе (нижняя панель) спутников BeiDou меньше, чем спутников GPS.

На рисунках 3.10 и 3.11 представлено сравнение областей покрытия ионосферными точками (точки пересечения лучей спутник – приемник и сферы на заданной высоте в ионосфере) за сутки для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou на различных широтах и долготах. Ионосферные точки рассчитаны для высоты 300 км. Рисунок 3.10 – для долготного региона  $-100^{\circ}$ E (американский сектор), рисунок 3.11 – для долготного региона  $100^{\circ}$ E (азиатский сектор). Данные приведены на 10.10.2022 г.

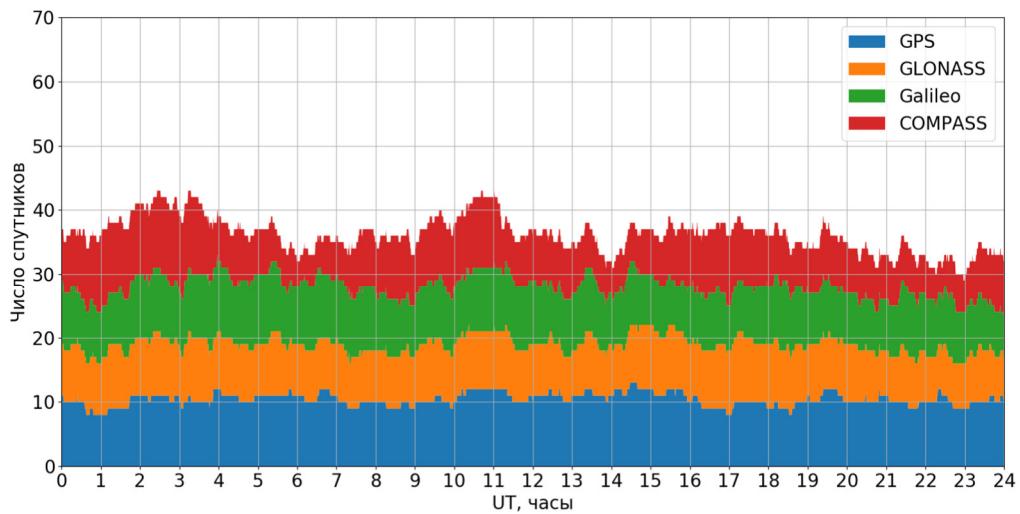
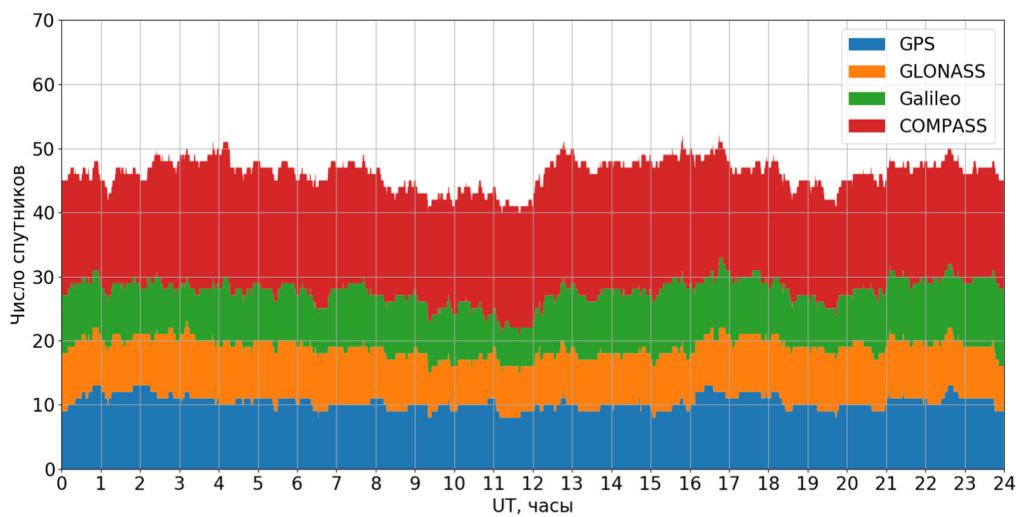


Рисунок 3.9. Количество наблюдаемых спутников для разных систем: GPS – синий, ГЛОНАСС – оранжевый, Galileo – зеленый, BeiDou – красный. Вверху – данные для азиатского сектора ( $52^{\circ}$  N,  $100^{\circ}$  E), внизу – для американского ( $52^{\circ}$  N,  $-100^{\circ}$  E). По результатам расчетов на 10.10.2022 г.

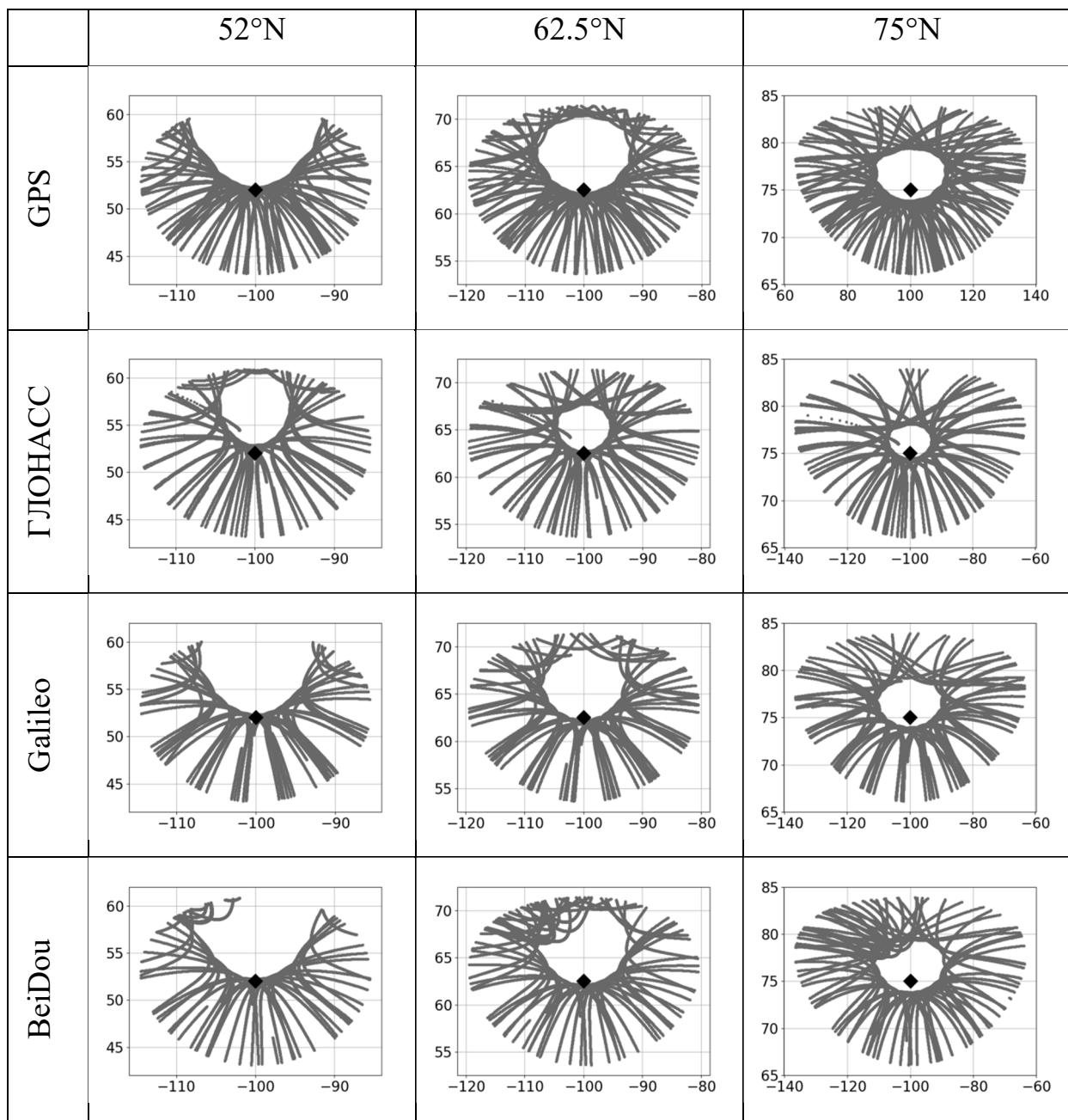


Рисунок 3.10. Ионосферные точки для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou (сверху вниз) за сутки. Ромб отмечает положение станции. Долгота станции составляет  $-100^{\circ}$  Е. Левый столбец – для широты  $52.2^{\circ}$  N, средний столбец – для широты  $62.5^{\circ}$  N, правый столбец – для широты  $75^{\circ}$  N. По результатам расчетов на 10.10.2022 г.

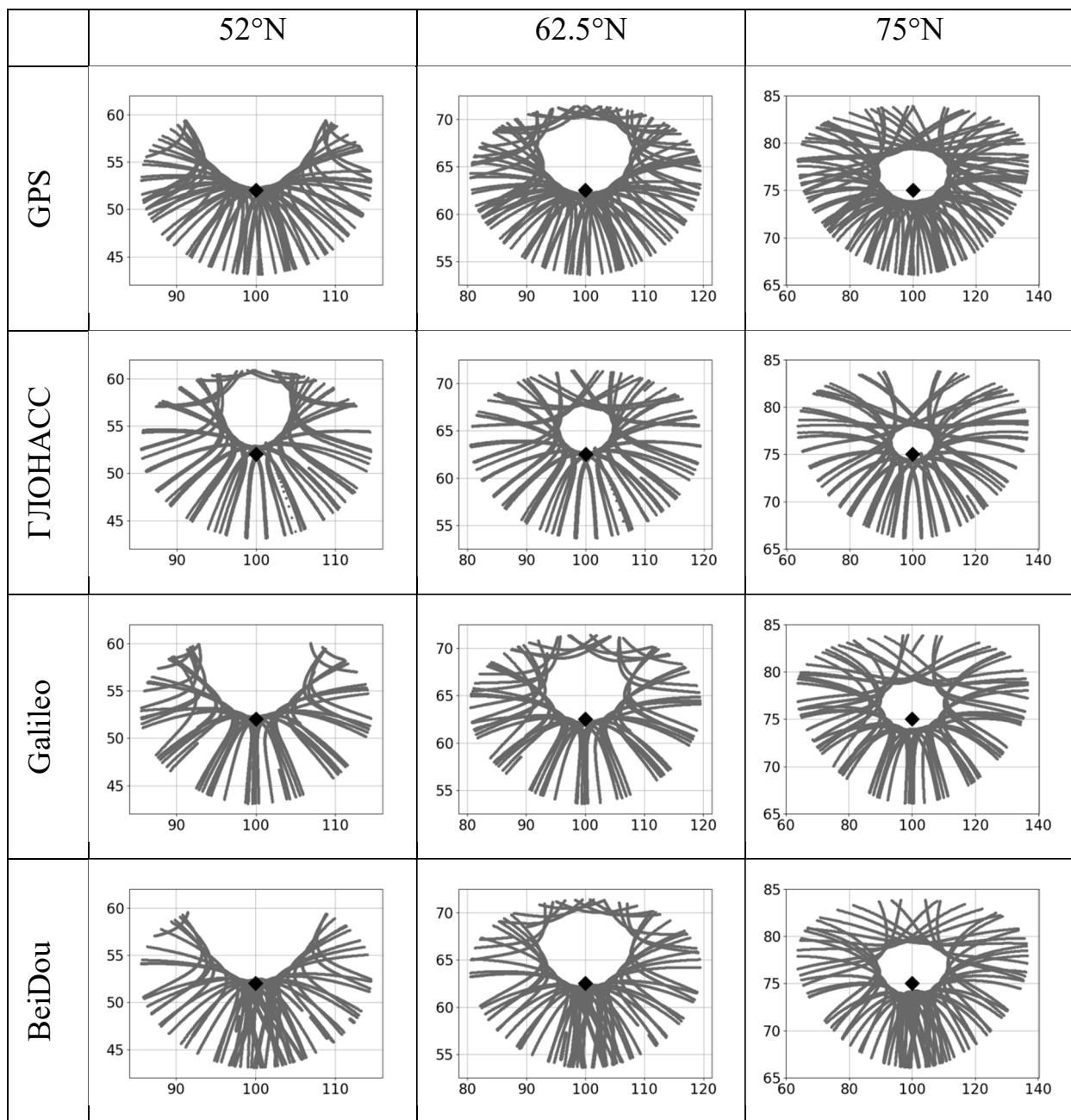


Рисунок 3.11. Ионосферные точки для систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou (сверху вниз) за сутки. Ромб отмечает положение станции. Долгота станции составляет  $100^{\circ}$  Е. Левый столбец – для широты  $52.2^{\circ}$  N, средний столбец – для широты  $62.5^{\circ}$  N, правый столбец – для широты  $75^{\circ}$  N. По результатам расчетов на 10.10.2022 г.

Каждая из систем, за исключением Galileo, обеспечивает достаточно равномерное покрытие. Можно видеть, что если для среднеширотных станций ( $52^{\circ}$  N) в направлении на север измерения GPS, Galileo, BeiDou практически отсутствуют вследствие низкого наклонения орбиты ( $\sim 55^{\circ}$ ), то для более высокоширотных станций измерения в северном направлении присутствуют в связи с регистрацией заполярных спутников. Прием сигналов ГЛОНАСС обеспечивает измерения в северном направлении и для среднеширотных станций. Как западный, так и восточный сектора представлены в статистике измерений достаточно хорошо. Указанные выводы справедливы и для американского, и для азиатского секторов.

Использование совместно систем GPS и ГЛОНАСС позволяет за сутки охватить все направления. Исключением является кольцевая область севернее станции, где отсутствуют измерения.

На рисунке 3.12 представлены ионосферные точки для часовых интервалов в течение полных суток. Синие точки – GPS, оранжевые – ГЛОНАСС, зеленые – Galileo, красные – BeiDou. Ромб отмечает положение станции (координаты  $60^{\circ}$ N,  $100^{\circ}$ E). Отсечка по углу места составляет  $10^{\circ}$ . Данные приведены на 10.10.2022 г.

Несмотря на наличие слепого сектора (см. рис. 3.10, 3.11), ионосферные точки распределены достаточно равномерно даже для часовых интервалов (рис. 3.12), в их распределении присутствуют все направления, включая северное. Совместное использование данных ГНСС позволяет получить измерения как в северном, так и в южном направлениях.

Хорошая геометрия позволяет иметь наблюдения в различных направлениях от станции как в американском, так и в азиатском секторах на различных широтах. Рисунок 3.13 показывает ионосферные точки за час (12–13 UT) для двух секторов. Данные приведены на 10.10.2022 г. Таким образом, ГНСС обеспечивают хорошее покрытие при зондировании в различных регионах земного шара.

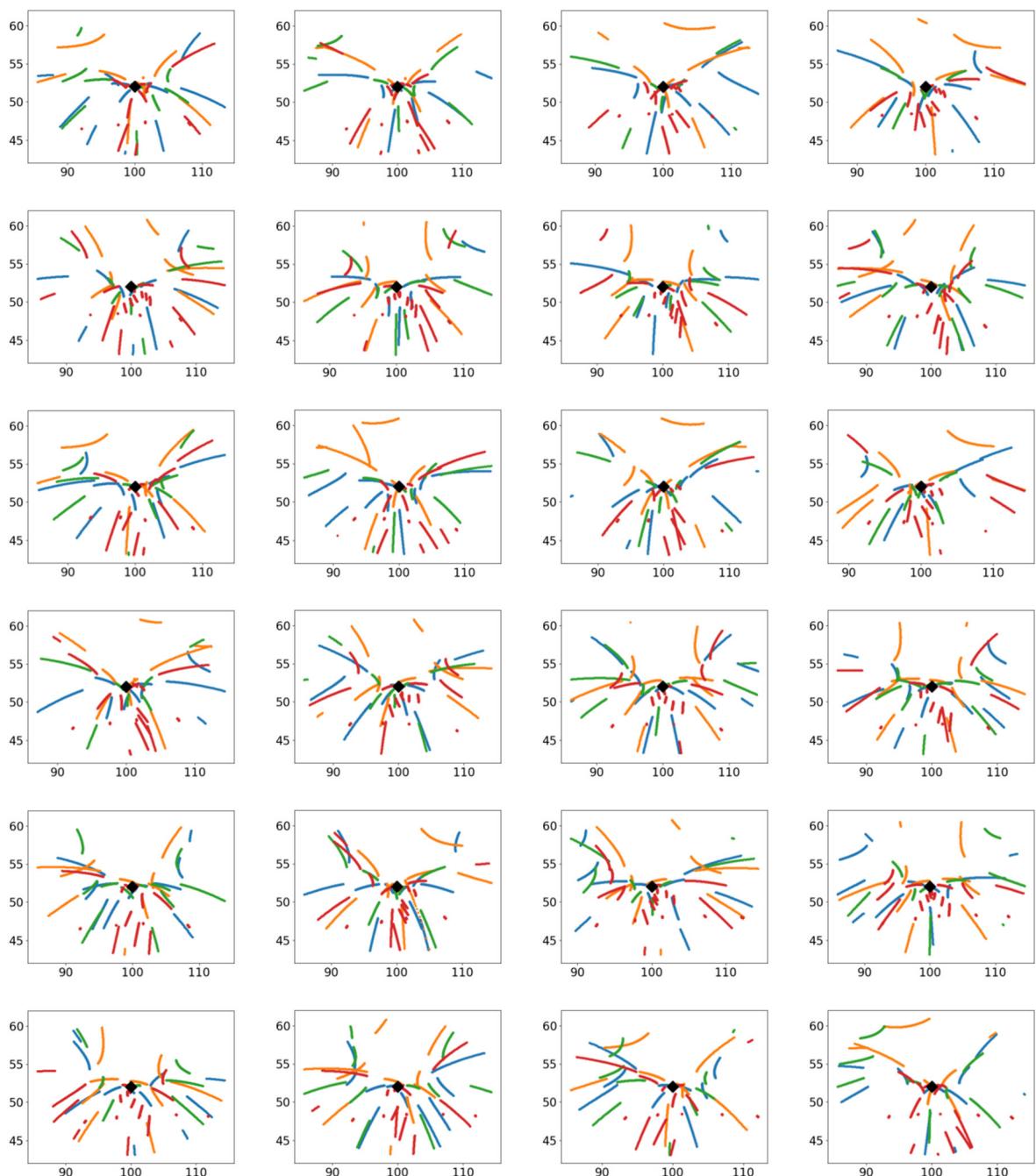


Рисунок 3.12. Ионосферные точки за каждый час в течение суток. Синие точки – GPS, оранжевые – ГЛОНАСС, зеленые – Galileo, красные – BeiDou. Ромб отмечает положение станции. По результатам расчетов на 10.10.2022 г.

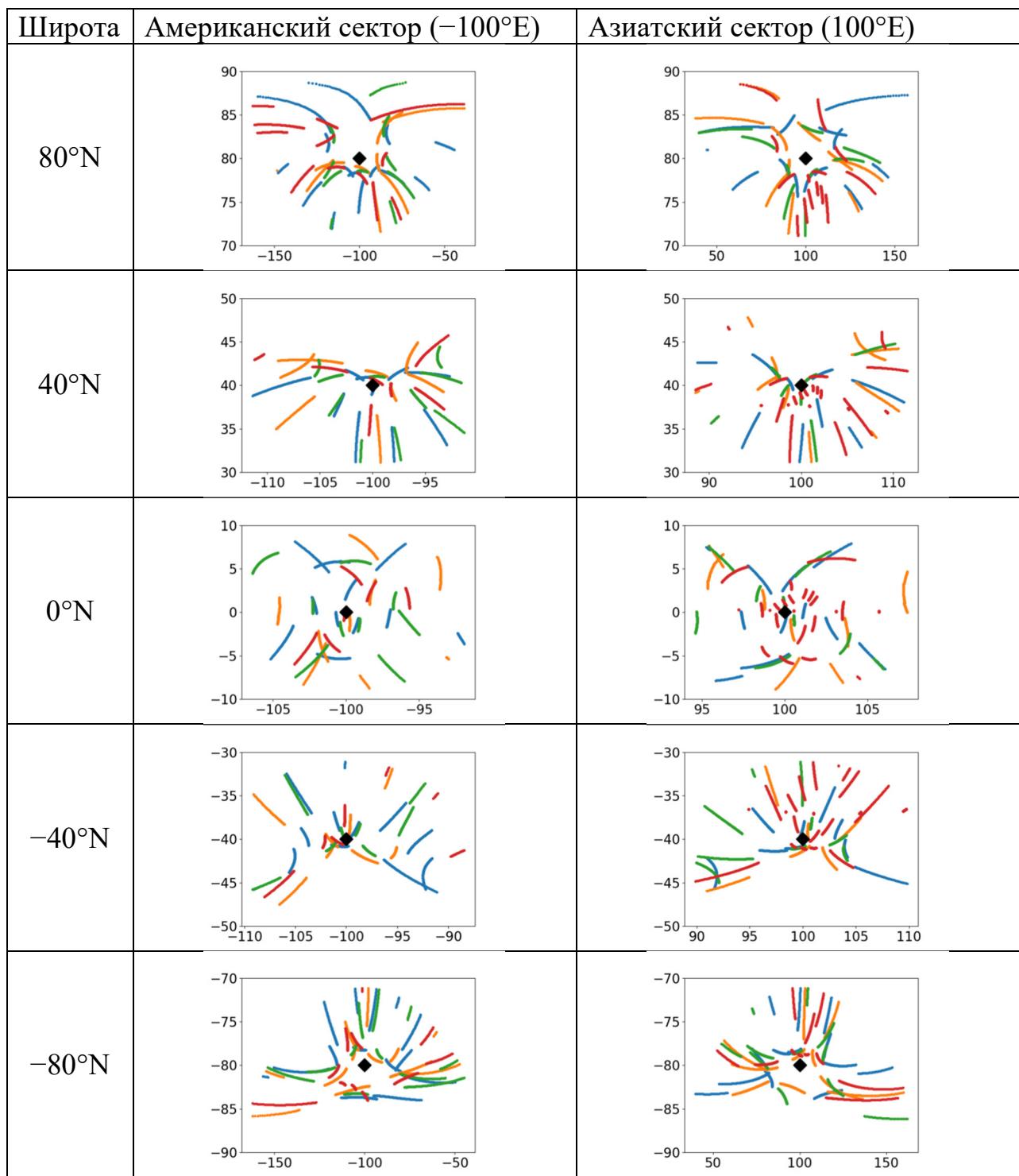


Рисунок 3.13. Ионосферные точки в период 12–13 UT 10.10.2022 г. на различных широтах в американском (средняя колонка,  $-100^{\circ}\text{E}$ ) и в азиатском (правая колонка,  $100^{\circ}\text{E}$ ) секторах. Синие точки – GPS, оранжевые – ГЛОНАСС, зеленые – Galileo, красные – BeiDou. Черный ромб отмечает положение станции. Слева указана широта станции.

### **3.4.3. Время выхода в рабочий режим**

Важным параметром является время выхода приемника в рабочий режим. Термин «холодный режим» связан с необходимостью приемника после длительного выключения осуществить поиск навигационных спутников. Характерное время выхода из холода режима составляет для современных приемников менее 1 мин.

Для корректной оценки дифференциальных кодовых задержек приемника требуется значительно большее время. В литературе, как правило, используются суточные данные для анализа данных [Shaer et al., 1998], однако оценка времени выхода на решение не осуществляется. Для задач навигации часто используется термин «время выхода на решение» (convergence time). Здесь можно использовать термин «режим выхода на решение», чтобы охарактеризовать переходный период между включением и получением данных с необходимой точностью.

Для оценки длительности режима выхода на решение мы провели имитацию работы приемника ГНСС в условиях включения. Расчет проводился с использованием данных за полные сутки, а также с использованием данных, накопленных за ограниченный интервал времени  $dt$ . Далее находилось отклонение полного электронного содержания, полученного с использованием полных данных и с использованием данных за ограниченный интервал времени.

Статистика включает данные за 1 месяц наблюдений. Результаты расчетов представлены на рис. 3.14. Расчет осуществлялся с использованием данных GPS/ГЛОНАСС при развертывании системы мониторинга в пункте TORY ( $51.8^\circ$  N,  $103.1^\circ$  E) сети SibNet. Разрешение исходных данных групповых и фазовых измерений наклонного ПЭС составляет 30 с. Расчет проведен с разрешением 1 час, т.е. рассчитывались ошибки через 1, 2, 3 ч и т.д. после включения.

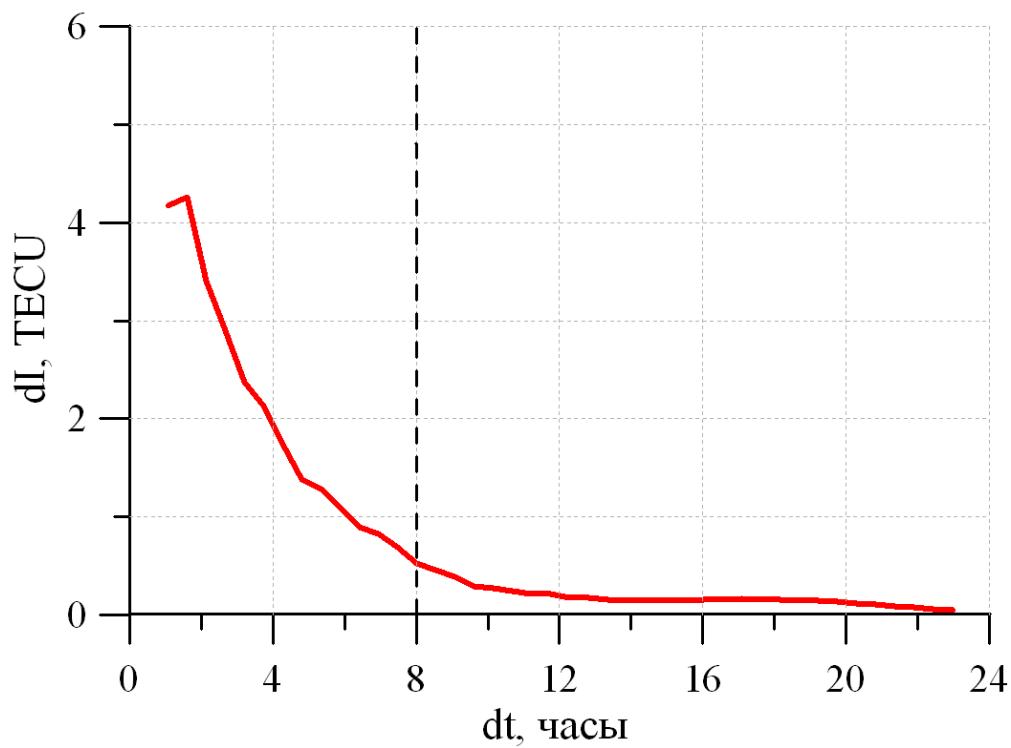


Рисунок 3.14. Ошибка определения ПЭС при различном времени относительно первого старта приемника. Штриховая вертикальная линия отмечает приемлемое время начала работы после холодного запуска приемника.

Рисунок 3.14 показывает, что непосредственно сразу после включения приемника имеет место ошибка  $\sim 4$  TECU. Эта ошибка практически монотонно уменьшается и через 8 ч после начала работы приемника доходит до  $\sim 0.5$  TECU (на уровне ошибки измерений). После 9 ч ошибка составляет  $<0.25$  TECU и асимптотически приближается к исходному решению. Данный анализ позволяет оценить время «режима выхода на решение» как 8 ч.

#### **3.4.4. Максимальное время отключения приемника ГНСС**

Другая важная величина, связанная с работоспособностью системы мониторинга, – это максимальное время краткосрочного отключения оборудования (вследствие пропадания электроэнергии, сбоев самих навигационных систем, сбоев приемника), при котором сохраняется прежнее качество решения и приемник не переходит в режим «режим выхода на решение». Далее используется термин «время сохранения рабочего режима».

Время сохранения режима обусловлено изменением параметров ионосферы, входящих в модель оценки, наличием экспериментальных данных (полученных ранее), требуемых для анализа, а также изменением дифференциальных кодовых задержек приемника.

Мы предполагаем, что это время существенно зависит от типа оборудования и особенностей установки приемника, так как от них могут зависеть ДКЗ [Mylnikova et al., 2015].

Для оценки времени сохранения режима была проведена имитация работы приемника ГНСС в условиях выключения на различное время. Анализ проведен с использованием системы мониторинга, развернутой в п. TORY ( $51.8^\circ$  N,  $103.1^\circ$  E) сети SibNet с использованием статистики за период 1 месяц. Имитировалось пропадание входных данных на время  $dt$ . Для этого мы проводили расчет с использованием данных за полные сутки, а также с использованием только части данных, принимая, что приемник длительное время  $dt$  был выключен.

Отклонение измерений ПЭС после включения от полных данных характеризует способность сохранять режим работоспособности. Разрешение исходных данных групповых и фазовых измерений наклонного ПЭС составляет 30 с. Расчет проведен с разрешением 1 ч. Результаты расчетов представлены на рис. 3.15.

Рис. 3.15 показывает, что при увеличении времени разрыва ошибка начинает монотонно нарастать. При разрыве по времени менее 8 ч величина этой ошибки не превышает для отдельных измерений 0.5 ТЕСУ. В течение 15 ч ее величина не превышает 1 ТЕСУ. Резкий рост ошибки при увеличении разрыва связан с малым числом измерений.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что время сохранения рабочего режима системы составляет 8 ч.

### **3.5. Выводы по Главе 3**

В настоящей главе представлена система мониторинга ионосферы, реализованная на основе оборудования сети SibNet ИСЗФ СО РАН.

Созданная система характеризуется возможностью работы с данными GPS/ГЛОНАСС/Galileo и может в настоящее время быть развернута на оборудовании Javad, использующих интерфейсный протокол GREIS.

Развернутая система мониторинга характеризуется хорошей геометрией, охватывающей практически все азимутальные направления.

Проведенная оценка времени выхода на решения и времени сохранения рабочего режима составляет 8 ч для используемого оборудования.

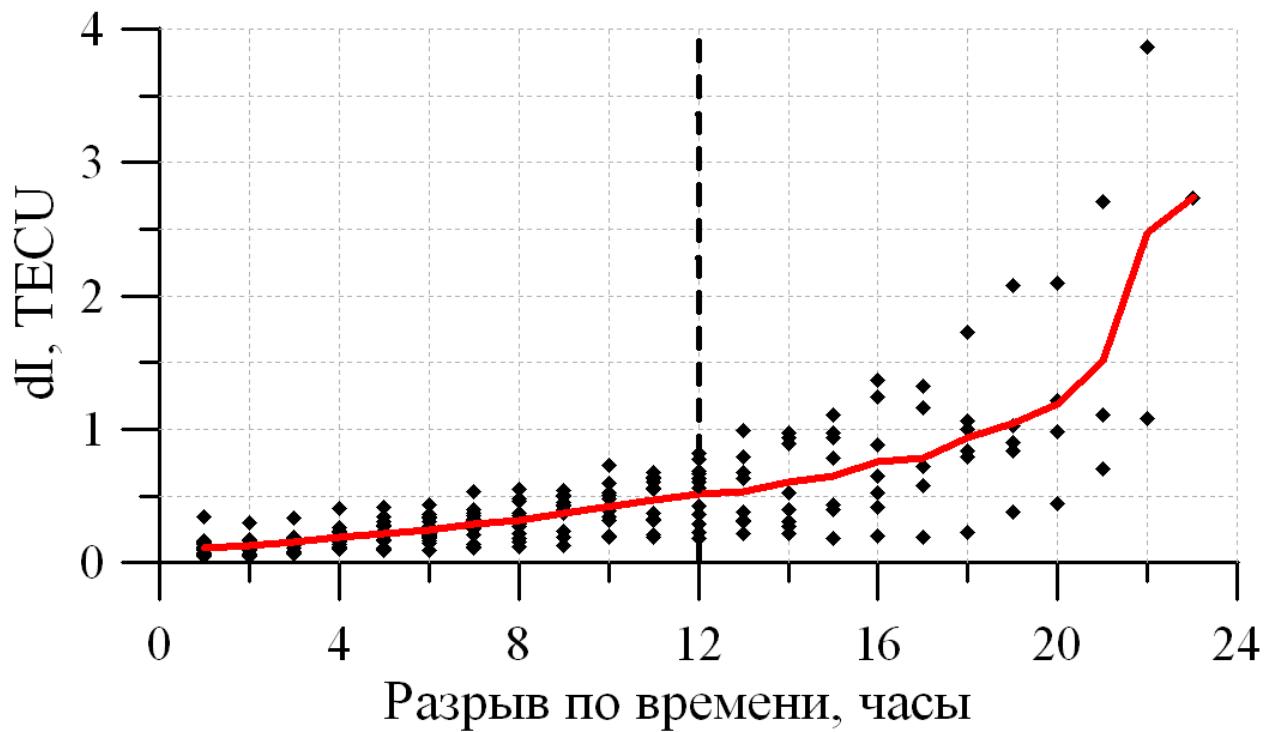


Рисунок 3.15. Ошибка определения ПЭС при различном времени относительно первого старта приемника. Штриховая вертикальная линия отмечает допустимый интервал времени, в течение которого система мониторинга сохраняет рабочий режим.

## **ГЛАВА 4. КОРРЕКЦИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Настоящая глава посвящена анализу возможностей использования данных абсолютного полного электронного содержания, получаемого на основе предложенного метода (Глава 2) и системы мониторинга (Глава 3), для корректировки ионосферных ошибок в радиотехнических системах, в том числе ряду методологических вопросов в интересах адаптации радиотехнических систем, использующих ионосферный канал.

Основные результаты, полученные в настоящей главе, опубликованы в [Ярюкевич и др., 2017б; Афраймович и Ярюкевич, 2007; Афраймович и др., 2007; Афраймович и др., 2008а; Kotova et al., 2020; Afraimovich and Yasukevich, 2008; Afraimovich and Yasyukevich, 2009; Ярюкевич и др., 2020]. Часть результатов опубликована в [Веснин и др., 2018; Лебедев и др., 2012].

Работы по применению данных ГНСС для коррекции радиотехнических средств выполнены в консорциуме с коллегами из ИСЗФ СО РАН (Афраймович Э.Л., Веснин А.М., Живетьев И.В., Куркин В.И., Лебедев В.П., Ойнац А.В.), КФ ИЗМИРАН (Клименко М.В., Котова Д.С.), НИИДАР (В.Б. Оводенко); по анализу экспериментальных данных солнечного радиоизлучения – из ИЗМИРАН (Ю.Я. Ружин).

### **4.1. ГНСС в интересах оперативного мониторинга радиоканала: проблемы и перспективы**

К основным параметрам ионосферного радиоканала можно отнести диапазон частот (максимальные и наименьшие наблюдаемые частоты, МНЧ и ННЧ), моды распространения, многолучевость, амплитудные характеристики, дисперсионные искажения и другие параметры. Для определения этих параметров необходимо знать, в первую очередь,

трехмерное распределение электронной концентрации или, как минимум, профиль электронной концентрации в средней точке трассы.

Разработанный в диссертационном исследовании метод и созданная система мониторинга могут быть использованы для диагностики коротковолновых и ультракоротковолновых радиоканалов в интересах радарных и связных систем. Такие задачи могут решаться путем адаптации ионосферных моделей с использованием получаемых данных.

В ходе диссертационного исследования был проведен анализ проблем и перспектив использования отдельных приемников ГНСС для таких задач. С точки зрения возможностей ГНСС для мониторинга радиоканала необходимо отметить следующие особенности ГНСС измерений, обусловливающие как достоинства, так и недостатки данного инструмента:

- 1) большое число измерений;
- 2) стабильность измерений;
- 3) пассивность измерений;
- 4) малая потребляемая мощность;
- 5) отсутствие влияния поглощения;
- 6) проблемы оценки абсолютных значений;
- 7) интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала, в том числе влияние формы профиля, влияние градиентов, влияние плазмосферы;
- 8) невозможность учета слоев E, Es, D.

Пункты 1 и 2 являются безусловно положительными, 3 и 4, в целом, тоже характеризуют достоинства ГНСС-измерений, в то время как 5-8 являются недостатками, особенно с точки зрения коротковолновых радиоканалов. Все эти факторы рассматриваются далее по порядку.

*Большое число измерений.* Каждый приемник ГНСС потенциально способен принимать в любой точке земного шара не менее четырех спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou/Compass. Возможность приема

сигналов различных систем связана с особенностями самого приемника, но современные приемники потенциально могут принимать все возможные навигационные системы. В Главе 3 показано, что ионосферу в области приемника может одновременно зондировать до 50 спутников различных систем с равномерным покрытием в различных азимутальных секторах.

*Стабильность измерений* ГНСС обусловлена высокими требованиями на точность, глобальность, непрерывность и целостность навигационных определений [Харисов и др., 1998], в результате чего измерения ПЭС также достаточно стабильны. Вопросам устойчивости измерения параметров сигналов ГНСС в различных условиях посвящена Глава 5 настоящей работы. Имеется некоторый фоновый уровень сбоев измерения радионавигационных параметров (фазы и псевдодорожки сигнала), наблюдается также увеличение числа таких сбоев измерения радионавигационных параметров и сбоев вычисления полного электронного содержания в результате воздействия тех или иных факторов. При этом общий уровень сбоев в последние годы значительно снижается и находится на достаточно приемлемом уровне даже во время мощных гелиогеофизических возмущений.

*Пассивность измерений* является несомненным плюсом при создании скрытного канала. Поскольку между приемником и спутником отсутствует взаимный канал связи, уровень его скрытности определяется уровнем скрытности канала передачи получаемых данных в центр обработки, что может быть выполнено на достаточно хорошем уровне.

*Малая потребляемая мощность* и простота установки приемников ГНСС являются преимуществами при развертывании выносных пунктов в условиях ограниченной инфраструктуры.

*Отсутствие влияния поглощения.* В связи с тем, что ГНСС работают на высоких частотах, поглощение в D-области ионосферы практически не оказывается на них. Затухание сигнала в атмосфере согласно интерфейсному контролльному документу может достигать 2 дБ [IS-GPS-200J, 2018], но

существенного воздействие на параметры фазы и псевдозадержки (в том числе их шумы) это не оказывает. С одной стороны, отсутствие поглощения является безусловным плюсом. ГНСС позволяют получать оценки ионосферных параметров даже в условиях сильных магнитных бурь, когда сильное развитие поглощения в D-области приводит к блэкауту на ионозондах. С другой стороны, полученные оценки могут не иметь ничего общего с возможностью приема КВ-радиосигнала и работы радарных станций, так как возникшее реальное поглощение будет значительно сказываться на прохождении волн более низкого по сравнению с ГНСС диапазона.

*Проблемы оценки абсолютных значений.* Формулы определения ПЭС по фазовым и групповым измерениям (1.2) и (1.3) позволяют получать интегральное содержание электронов вдоль луча спутник – приемник с точностью до неизвестных констант. В (1.3) константа связана с неоднозначностью фазовых измерений, а в (1.2) – с наличием дифференциальных кодовых задержек. Влияние этих констант можно видеть на рисунке 1.4, где отчетливо наблюдаются нефизичные отрицательные значения ПЭС. Сложность оценки абсолютного ПЭС особенно актуальна при решении задач в условиях *реального времени*.

*Интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала* является значимым минусом ГНСС-измерений. Формулы (1.2) и (1.3) позволяют оценить только интеграл от числа электронов вдоль луча спутник – приемник (даже, если определить неоднозначности). В работе [Maltseva, 2019] отмечается нелинейная связь экспериментальных значений ПЭС и критической частоты. Возможность использования глобальных ионосферных карт для оценки критической частоты [Gerzen et al., 2013] не решает этой проблемы. В результате возникает сложность с пересчетом интегральных измерений ПЭС в параметры радиоканала. Как правило, для этого используются ионосферные модели (см.

далее). Однако связь ПЭС и параметров радиоканала, например, критической частоты F2-слоя, в большой степени обусловлена точностью используемой модели.

Прежде всего, на точность оценки параметров влияет *форма профиля* электронной концентрации (ЭК) в F-области. На рисунке 4.1 представлены разные профили электронной концентрации при одном и том же значении ПЭС (20 TECU). Профили получены на основе модели IRI-2016 (черная кривая) [Bilitza, 2018], IRI-Plas (красная кривая) [Gulyaeva and Bilitza, 2012] и NeQuick2 (синяя кривая) [Nava et al., 2008]. Расчеты выполнены для пункта ( $104^{\circ}$  E,  $52^{\circ}$  N) и момента времени 01:30 UT 1 января 2000 г. Даже при корректной оценке вертикального ПЭС в интересуемой точке значения максимальной электронной концентрации  $NmF2$  ( $foF2$ ) могут значительно отличаться, что существенно для моделирования распространения радиоволн. Например, меньшие значения  $NmF2$  связаны с более медленным спаданием профиля электронной концентрации. Для NeQuick2 и IRI-2016 отличие профилей ниже максимума F2-слоя компенсируется более медленным (но достаточно мало различающимся) спаданием профиля выше 400 км.

Простая оценка максимально применимой частоты (МПЧ) для данных условий может быть получена для трасс 3000 км на основе фактора распространения  $M(3000)F2$ . Для оценки  $M(3000)F2$  указанные модели используют стандарт Сектора радиосвязи Международного телекоммуникационного союза (ITU-R) [CCIR, 1967], поэтому для всех вариантов модельных расчетов его величина близка и составляет  $\sim 3.1$ . Оценка МПЧ на трассах 3000 км составляет  $\sim 20.6$  МГц для IRI-Plas,  $\sim 23$  МГц для NeQuick2,  $\sim 23.8$  МГц для IRI-2016, то есть расхождение составляет  $\sim 4$  МГц. Также стоит отметить, что расчеты МПЧ на основе  $M(3000)F2$  являются достаточно приближенными, в то время как ГНСС могут обеспечить более точные расчеты при оценках распределения электронной концентрации (ЭК) вдоль траектории распространения КВ-сигналов.

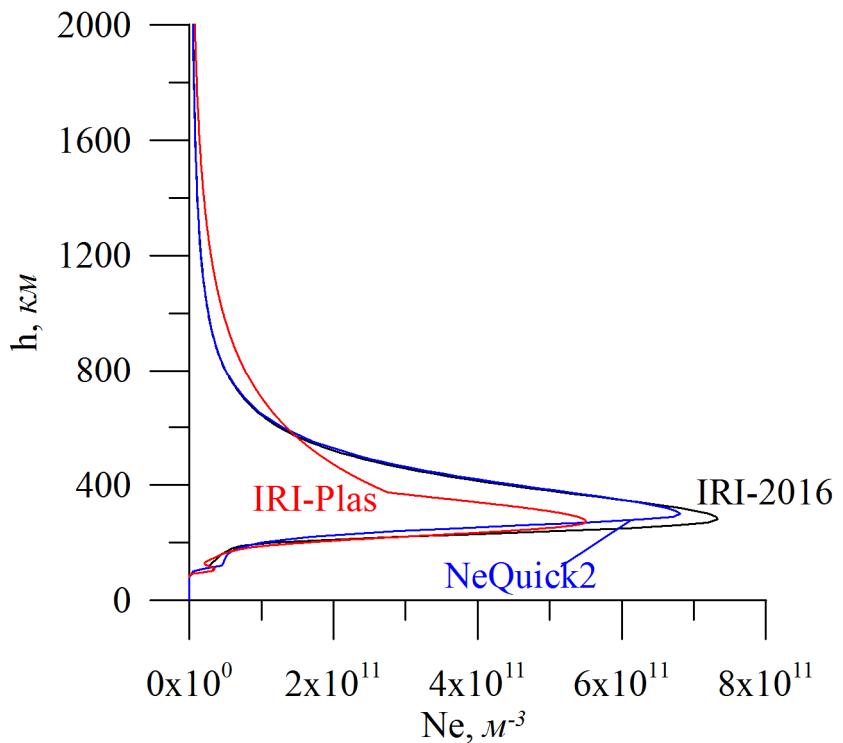


Рисунок 4.1. Профиль электронной концентрации при одном и том же значении ПЭС (20 TECU) для моделей IRI-2016 (черная кривая), IRI-Plas (красная кривая), NeQuick2 (синяя кривая).

Еще одним фактором, усложняющим оценку параметров радиоканала и ПЭС, является *влияние плазмосферы* [Kotova et al., 2018]. Плазмосфера может вносить значительный вклад в ПЭС, при этом ее точный учет достаточно затруднителен и большинство моделей ее не включают (исключением является модель IRI-Plas). Существенное влияние на оценку параметров радиоканала могут оказывать *градиенты ПЭС* [Kotova et al., 2018] и *ионосферные неоднородности*. В результате экстраполяции (интерполяции) данных ПЭС из области наблюдения в область интереса результаты могутискажаться. Рисунок 4.2 демонстрирует экстраполяцию 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.

При расчете максимально применимой частоты могут возникать дополнительные затруднения. Один из наиболее часто используемых методов – метод кривых передач (или метод Смита) не учитывает градиенты электронной концентрации [Котович и др., 2006]. Метод геометрической оптики [Кравцов и Орлов, 1980; Крюковский и др., 2012] это позволяет, но требует информации о распределении ЭК вдоль радиотрассы, налагая существенные требования на точность оценки градиентов ЭК.

*Невозможность учета областей E, Es, D* обусловлена малым вкладом указанных областей в полное электронное содержание, а также отличием фотохимии F-области, плазмосферы и областей E/D. В результате этого корреляция ПЭС и электронной концентрации в областях E и D невелика, и практически не связана с величиной электронной концентрации в Es-слое. При этом слои E, Es, D оказывают значительное влияние на распространение КВ-сигналов, и, следовательно, на параметры КВ-радиоканала.

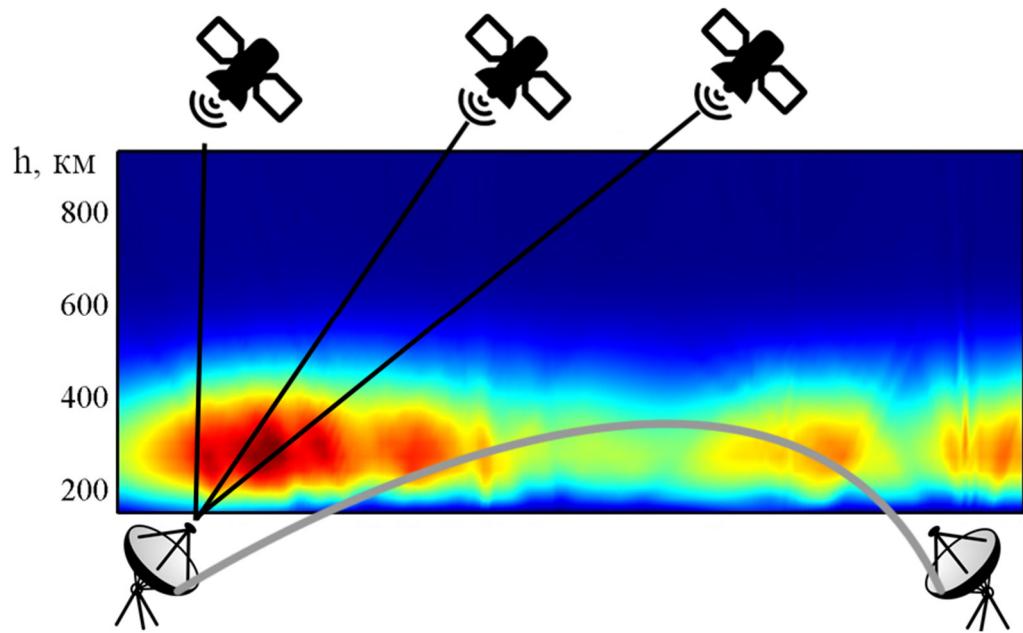


Рисунок 4.2. Геометрия зондирования ионосферы приемником ГНСС при наличии ионосферных градиентов и неоднородностей. В качестве подложки использована 2D-реконструкция ионосферы из работы [Kunitsyn et al., 2013]. Серая линия – условная траектория распространения сигнала между передатчиком и приемником.

## **4.2. Схемы адаптации**

Следующий важный методический вопрос, решаемый в диссертационном исследовании, – систематизация различных существующих методов, основанных на привлечении данных ГНСС для адаптации радиотехнических систем к изменяющимся ионосферным условиям.

Использование возможностей ГНСС для коррекции ионосферной ошибки радиотехнических систем (РТС) в различных диапазонах длин волн привлекает большое внимание в последнее время, что обусловлено ростом собственных точностей измерений [Ткачев, 2017].

Впервые, по всей видимости, в открытой печати проблемы влияния ионосферы на точность трансионосферных РТС отмечались в работах при проведении астрономических наблюдений [Reber and Ellis, 1956; Lovell, 1959]. Впоследствии стало понятно, что и радиолокационные системы (РЛС) в значительной степени подвержены ионосферному воздействию [Allen et al., 1977b; Daniell et al., 2007; Hunt et al., 2000]. Для уменьшения ионосферных ошибок были предложены подходы по созданию искусственной дыры в ионосфере с помощью выброса специальных химических веществ [Papagiannis and Mendillo, 1975].

Определенные возможности для компенсации влияния ионосферы в радиотехнических системах могли бы дать глобальные или региональные карты полного электронного содержания [Schaer et al., 1998b; Mannucci et al., 1998; Hernandez-Pajares et al., 2009]. Однако такие карты выходят, как правило, с задержкой в несколько дней, хотя в последние два года появились данные в реальном времени. К сожалению, использование таких карт в настоящее время затруднительно, в связи с тем, что для их построения требуются станции, передающие данные в реальном времени, число которых за исключением территории Австралии и США очень ограничено, хотя в ближайшие годы, возможно, данный метод получит значительное развитие. Более того, имеется однозначная сложность использования таких карт на

территории России, особенно там, где населенные пункты достаточно удалены и возможности размещения приемников для построения карт с приемлемой точностью малы.

Предлагается следующая схема адаптации:

- В рабочей зоне устанавливается система мониторинга на основе приемника сигналов ГНСС, описанная в Главе 3 или аналогичная.
- Оценивается абсолютное наклонное и вертикальное ПЭС, а также его производные по времени и пространству, на основе метода изложенного в Главе 2.
- Выбирается адаптируемая модель (IRI, IRI-Plas, NeQuick, иная).
- Осуществляется адаптация модели по измеряемым параметрам абсолютного полного электронного содержания.
- Рассчитывается корректирующая поправка к измеряемому радиотехнической системой параметру.
- Осуществляется коррекция ионосферной ошибки.

В настоящем разделе дается методическое описание возможных существующих схем учёта ионосферной составляющей в ошибке измерений с использованием данных ГНСС-ПЭС, получаемого на основе предложенного в Главе 2 метода. Проведенный в диссертационном исследовании анализ позволил выделить преимущества и недостатки различных схем.

Были выделены три ключевые существующие схемы коррекции ионосферной ошибки РТС на основе данных о ПЭС:

- Использование измерений на отдельных лучах спутник – приемник.
- Корректировка глобальной/региональной ионосферной модели по обобщенному параметру с использованием данных на отдельных лучах спутник – приемник.

- Корректировка глобальной ионосферной модели по локальным параметрам на основе полученных с использованием ГНСС вертикального абсолютного ПЭС и его пространственных градиентов.

#### **4.2.1. Использование измерений на отдельных лучах спутник – приемник**

Использование абсолютного наклонного ПЭС на отдельных лучах спутник – приемник предложено автором настоящей диссертации совместно с проф. Э.Л. Афраймовичем в работе [Афраймович и Ярюкевич, 2007]. Данная схема использует прямые оценки ПЭС без привлечения дополнительных модельных расчетов. Для устранения ионосферной ошибки используются оценки абсолютного ПЭС. Выбираются такие лучи спутник – приемник, которые находятся на минимальном угловом расстоянии от объекта, для которого проводится компенсация (рис. 4.3). По аналогии с системами адаптивной оптики такой подход для радиоастрономических измерений получил название «Адаптивная радиоастрономия» [Афраймович и Ярюкевич, 2007]. Алгоритм учета ионосферной ошибки может быть следующим.

- 1) Определение спутника ГНСС, находящегося на минимальном угловом расстоянии от наблюдаемого объекта.
- 2) Определение абсолютного наклонного ПЭС вдоль луча спутник – приемник на основе предложенного в диссертационном исследовании метода.
- 3) Калибровка ПЭС с целью учета отличия угла места на объект и на спутник ГНСС. В первом приближении это может быть осуществлено с использованием формулы модифицированного тонкого слоя (modified single layer model) MSLM (2.3) [Schaer, 1999].

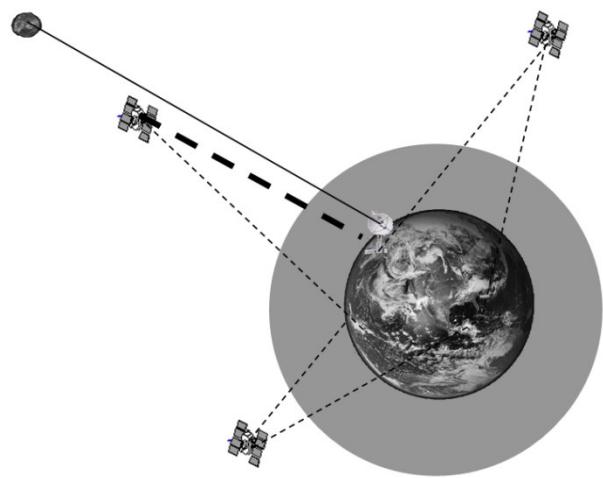


Рисунок 4.3. Схема учета ионосферной ошибки в РТС с использованием отдельных лучей спутник – приемник ГНСС. Жирная штриховая линия – выбранный для оценки ПЭС луч спутник – приемник.

$$I = \frac{I_s \times \cos \left[ \arcsin \left( \frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin [\alpha(90 - \theta_{\text{sat}})] \right) \right]}{\cos \left[ \arcsin \left( \frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin [\alpha(90 - \theta_{\text{tar}})] \right) \right]}, \quad (4.1)$$

где  $R_E$  – радиус Земли;  $h_{\max}$  – условная высота ионосферы,  $\theta_{\text{sat}}$  и  $\theta_{\text{tar}}$  – углы места луча на навигационный спутник и на цель, отсчитываемые от поверхности Земли. Традиционно используются параметры  $\alpha=0.97$ ,  $h_{\max}=450$  км или  $\alpha=0.9782$ ,  $h_{\max}=506.7$ ,  $R_E=6371$ .

4) Корректировка фазы сигнала, сдвига частоты, ионосферной задержки, поворота плоскости поляризации проводится по следующим формулам [Дэвис, 1973].

Изменение фазы:

$$\Delta\varphi = \frac{8.44 \cdot 10^{-7}}{f} I \quad (4.2)$$

Сдвиг частоты:

$$\Delta f_I = -40.308 \cdot c^{-1} f^{-1} \frac{dI}{dt} \quad (4.3)$$

Групповое запаздывание:

$$\Delta t = \frac{40.308}{c f^2} I \quad (4.4)$$

Мера вращения  $RM$ :

$$RM = 2.365 \cdot 10^4 \int_S N_e B \cos \xi ds \approx 2.365 \cdot 10^4 \langle B \cos \xi \rangle I \quad (4.5)$$

Связанный с  $RM$  поворот плоскости поляризации:

$$\Omega \approx 2.365 \cdot \frac{10^4}{f^2} \langle B \cos \xi \rangle I \quad (4.6)$$

Здесь  $f$  – рабочая частота РТС,  $N_e$  – электронная концентрация,  $I$  – ПЭС,  $B$  – напряженность магнитного поля,  $\xi$  – угол между лучом спутник – приемник и вектором магнитного поля на высоте ионосферы,  $\langle B \cos \xi \rangle$  – среднее вдоль луча на источник значение проекции вектора магнитного поля на направление распространения сигнала.

*Достоинства метода:*

- Высокая точность компенсации ионосферных эффектов в силу привлечения прямых измерений ПЭС.
- Использование прямых измерений ПЭС без привлечения моделей долгосрочного прогноза (типа IRI).

*Недостатки метода:*

- Выполняется корректировка интегральных параметров (фазы, задержки, допплеровского сдвига частоты).
  - Сложно использовать для искривленных лучей в интересах КВ-систем.
  - Требуется наличие спутников в заданном направлении. В противном случае адаптация будет адекватно работать только при достаточно точном выполнении приближения сферической симметрии ионосферы.
  - Неучет дальности до объекта. ПЭС рассчитывается вдоль всего луча спутник – приемник. При этом объект может располагаться ближе, чем навигационный спутник. Если высоты различны, то может произойти переоценка ПЭС, и, соответственно, перекомпенсация ионосферной ошибки, что может даже ухудшить точность [Лебедев и др., 2012]. На рисунке 4.4 приведена динамика высоты объекта, на которой ионосферная ошибка без поправки по интегральному ПЭС равна ошибке с поправкой (высота  $Z_0$ ). Зависимость  $Z_0$  дана как функция UT и дня. В качестве исходных данных об ионосферной задержке использовались данные ионозонда DPS-4 [Ратовский и Потехин, 2004] с профилем выше максимума электронной концентрации F2-слоя, определяемым автоматически [Huang and Reinisch, 2001]. Рисунок 4.4 показывает, что высота  $Z_0$  составляет от 220 до 500 км, затрагивая орбиты размещения большого числа космических объектов.

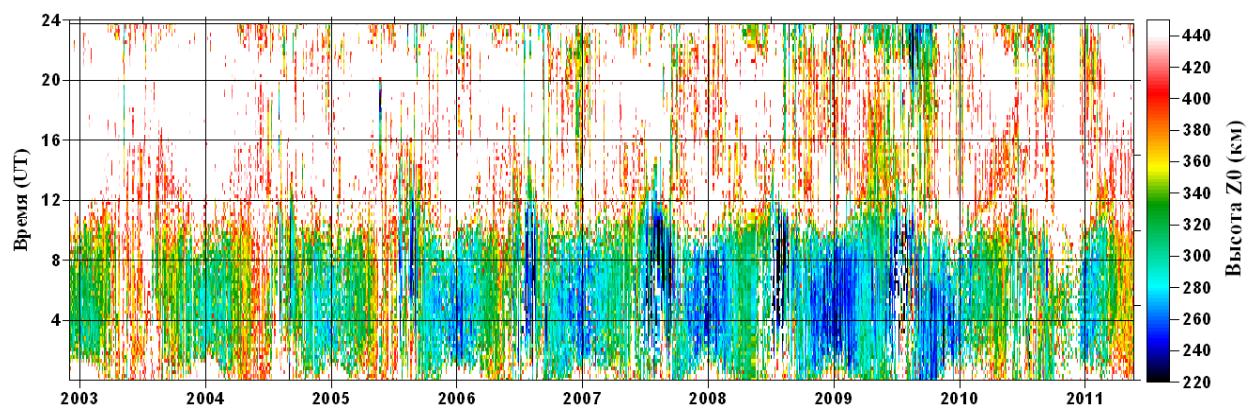


Рисунок 4.4. Распределение высоты ( $Z_0$ ), на которой ошибка без поправки по интегральному ПЭС содержанию равна ошибке с поправкой. Данные приведены для региона Иркутска.

### *Возможные направления развития:*

– Для устранения возможной перекомпенсации из-за различия высот объекта и опорного спутника ГНСС возможно использовать модельные расчеты. Тогда соотношение измеряемого ПЭС и того ПЭС, которое дает вклад до интересующей высоты, может быть вычислено на основе модели и применено для коррекции данных. При этом есть возможность учета особенностей ионосферной динамики.

#### **4.2.2. Корректировка глобальной/региональной ионосферной модели по обобщенному параметру**

Данный подход к коррекции предложен в работе [Komjathy et al., 1998] и использован, в частности, в работе [Ovodenko et al., 2015]. Основной смысл методики заключается в минимизации отклонения абсолютного ПЭС, получаемого по данным установленного приемника ГНСС, и результатов моделирования ПЭС для аналогичных лучей спутник – приемник. Для адаптации модели используется один драйвер модели – некоторый обобщенный (управляющий) параметр, такой как число солнечных пятен, индексы  $F10.7$ ,  $IG12$  и др.).

Рисунок 4.5 показывает пространственное распределение модельных значений максимума электронной концентрации F2-слоя при различном значении индекса  $IG12$  в модели IRI-2012 [Bilitza et al., 2014]. Левая панель – данные  $NmF2$ , рассчитанные с использованием модели IRI-2012 на основе прогнозного значения  $IG12$ ; средняя панель – та же величина при  $IG12=100$ , правая панель – та же величина при  $IG12=200$ . Модельные расчеты проводились для 06:00 UT 31 января 2012 г. Рисунки показывают существенную вариабельность пространственного распределения электронной концентрации. Кроме того, при различных значениях  $IG12$  пространственное распределение существенно изменяется.

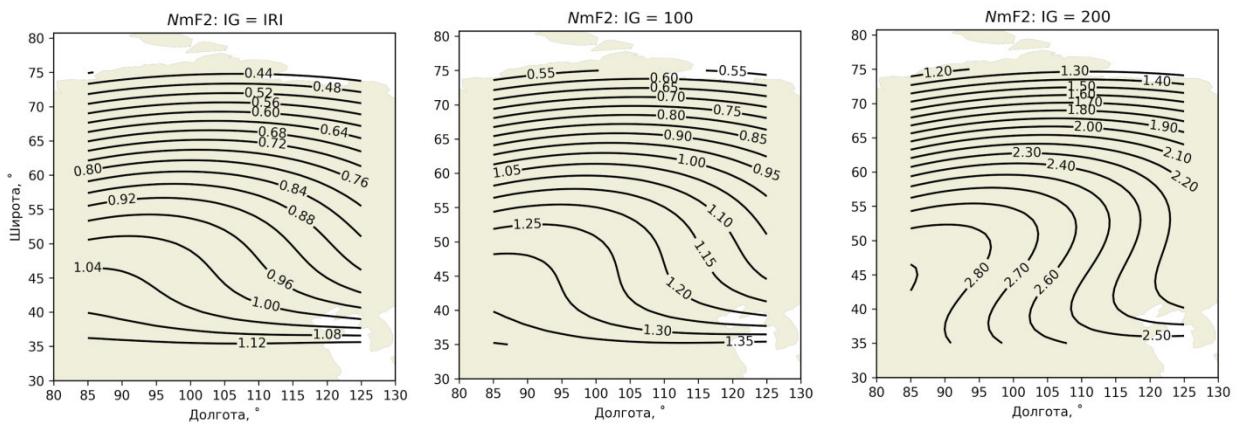


Рисунок 4.5. Поля электронной концентрации NmF2 в регионе при различных значениях индекса  $IG12$  в модели IRI-2012. Левая панель – исходные данные IRI (прогнозное значение), средняя панель – значения при  $IG12=100$ , правая панель – при  $IG12=200$ . Данные приведены для 06:00 UT 31 января 2012 г.

В работе [Pignalberi et al., 2017] предлагается осуществлять расчет эффективных индексов для модели IRI в различных регионах.

Алгоритм учета ионосферной ошибки может быть следующим.

- 1) Расчет абсолютного ПЭС вдоль всех лучей спутник – приемник.
- 2) Корректировка выбранной ионосферной модели по управляющему параметру и минимизация среднеквадратичного отклонения экспериментальных и модельных данных ПЭС. В качестве управляющего параметра в модели IRI [Bilitza et al., 2014] и NeQuick [Nava et al., 2008] выступает Rz12 (IG12) или F10.7.
- 3) Расчет значений поправок по корректированной модели для реальной геометрии работы РТС и осуществление коррекции.

*Достоинства метода:*

- Метод может применяться для РТС, работающих в различных частотных диапазонах, в том числе в диапазонах КВ и УКВ, и таким образом учитывает рефракционные искажения сигнала, позволяя на основе распределения проводить анализ максимально применимой частоты и других параметров радиосигнала.
- Возможность применять метод в регионах с малым числом трасс ГНСС, например в полярной области.
- Проблема с перекомпенсацией, имеющая место в предыдущем подходе, не возникает, так как используются реальные траектории радиосигналов.

*Недостатки метода:*

- Неучет реальных пространственных градиентов и производных ПЭС. Градиенты и производные ПЭС определяются используемой моделью (например, IRI). При адаптации по обобщенному параметру контролировать изменение градиентов не удается. Если в области работы РТС число измерений ГНСС мало, но при этом велико в другом секторе, результаты могут быть определены неточными градиентами модели.

– Проблемы с формой профиля. Профиль электронной концентрации полностью задается используемой моделью. В результате модель может влиять на результат (пример см. ниже для локальных измерений).

*Возможные направления развития:*

- Осуществление адаптации модели независимо в различных азимутальных областях. При наличии достаточного числа измерений в каждой из областей решение будет более приближено к реальности.
- Развитие возможностей адаптации интерполяционных моделей за счет их многопараметрической аддитивной коррекции по доступным измерениям абсолютных значений ПЭС.

#### **4.2.3. Корректировка ионосферной модели по локальным параметрам**

Как было описано в Главе 2, ГНСС позволяет получать абсолютное значение вертикального ПЭС над станцией, его пространственные градиенты, временную производную. Основой метода является коррекция модели в заданной точке на основе вертикального абсолютного ПЭС (пространственного распределения ПЭС в регионе). Метод берет начало в работах [Fox et al., 1991; Gulyaeva, 2003; Barabashov et al., 2004].

Алгоритм учета ионосферной ошибки может быть следующим.

- 1) Расчеты фазового и группового ПЭС вдоль всех лучей спутник – приемник (без учета ДКЗ и фазовой неоднозначности).
- 2) Расчет абсолютного вертикального ПЭС, его пространственных градиентов и временной производной на основе ГНСС-измерений с использованием методики, представленной в диссертации.
- 3) Расчет пространственного распределения вертикального ПЭС (для расчета не только в регионе станции) с привлечением оцениваемых пространственных производных ПЭС наряду с вертикальным ПЭС.
- 4) Адаптация выбранной модели ионосферы осуществляется в опорных узлах, выбираемых исходя из особенностей распространения сигнала РТС.

Адаптация, например для модели IRI, может осуществляться на основе вариации критической частоты или использования тех же параметров, что и для глобальной адаптации с тем отличием, что для каждой нужной точки адаптация осуществляется отдельно.

5) Расчет корректирующих поправок измерений в РТС с помощью адаптированной модели.

На рисунке 4.6 приведено пространственное распределение максимума электронной концентрации в F2-слое  $NmF2$  и полное электронное содержание в 02:00 UT 11 марта 2014 г. Левый столбец – данные IRI-2012 без коррекции, правый столбец – данные полученные с использованием ГНСС-ПЭС. После коррекции данные электронной концентрации  $NmF2$  и ПЭС отличаются до двух и более раз.

*Достоинства метода:*

- Метод учитывает градиенты ПЭС. Это дает возможность получать данные в областях, где проходит мало зондирующих лучей спутник–приемник.

- Возможность проводить коррекцию по нескольким параметрам.

*Недостатки метода:*

- Метод требует наряду с оценкой наклонного ПЭС также проводить оценку вертикального ПЭС и его градиентов.

*Возможные направления развития:*

- Привлечение данных альтернативных средств для отдельных областей позволит уточнять коррекцию.

- В работе [Шлюпкин, 2006] для пространственной экстраполяции данных локальной коррекции предлагалось использовать кригинг.

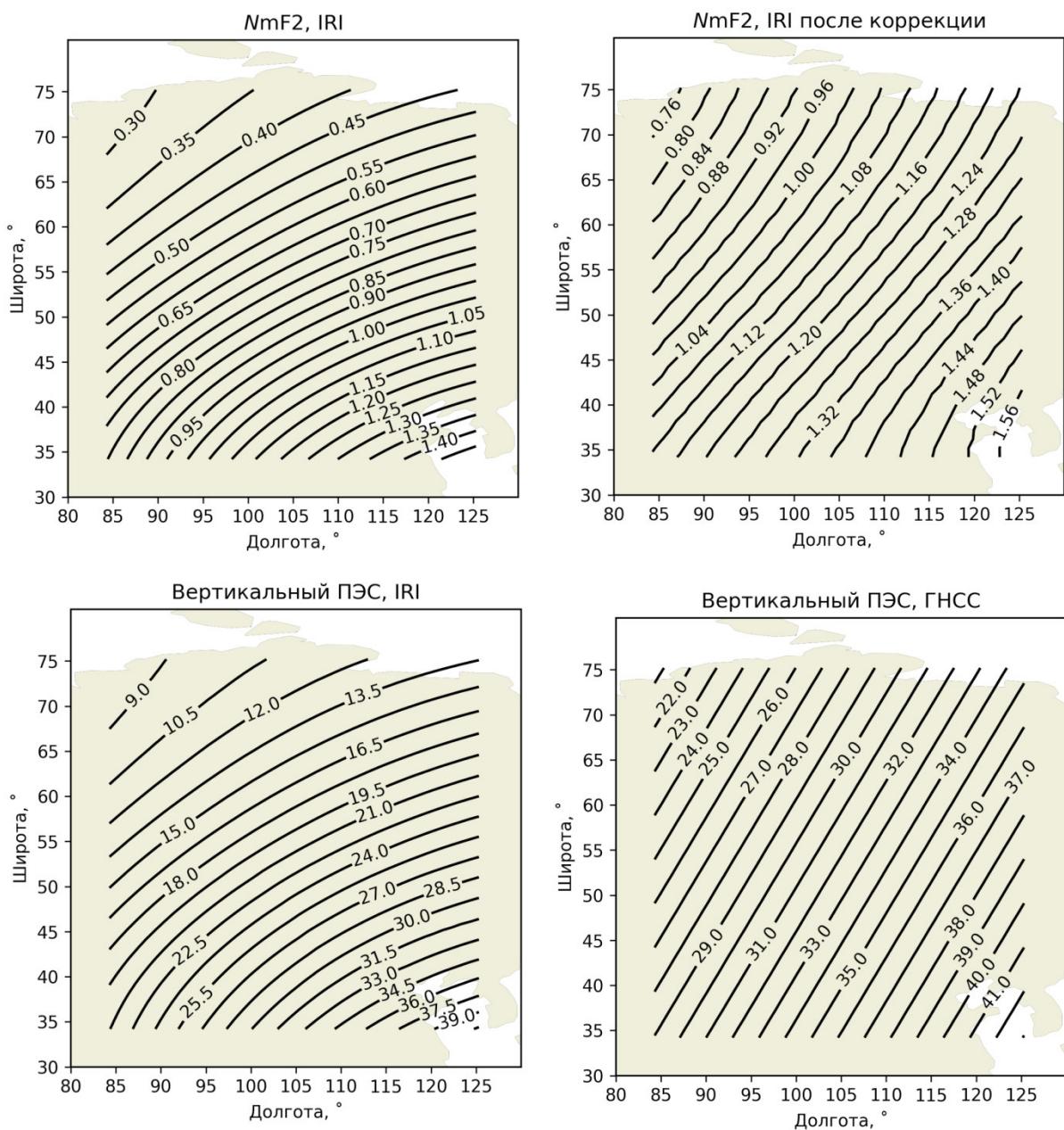


Рисунок 4.6. Пространственное распределение электронной концентрации в максимуме F2-слоя (верхние панели) и вертикального ПЭС (нижние панели). Левый столбец – данные IRI-2012 без коррекции, правый столбец – данные, полученные с использованием ГНСС-ПЭС. Расчеты проведены для 02:00 UT 11 марта 2014 г.

В работе [Maltseva and Mozhaeva, 2015] был выявлен синхронизм в динамике  $foF2$  и ПЭС, что позволяет в спокойных и слабовозмущенных условиях использовать изменения ПЭС для оценки  $foF2$ . Maltseva [2018] на основе анализа данных трех станций в американском секторе указывает на возможность локальной коррекции (в точке расположения станции ГНСС) для всех широт. При этом точность оценки  $foF2$  улучшается в 1.5–2.5 раза относительно долгосрочного прогноза IRI.

Таким образом, выше обобщены три схемы компенсации ионосферной ошибки радиотехнических систем с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS и ГЛОНАСС. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки и может быть выбран исходя из поставленных задач. Метод, основанный на корректировке глобальной ионосферной модели по локальным параметрам с использованием вертикального ПЭС и его пространственных градиентов, обладает тем преимуществом, что физически корректно учитывает пространственные градиенты ПЭС. При этом схема, основанная на корректировке глобальной ионосферной модели по обобщенному параметру с использованием отдельных лучей спутник – приемник, в ряде случаев может быть более эффективной. Основными ограничениями для нее является наличие достаточной статистики наблюдений в направлении на исследуемый объект. Это может затруднить наблюдения в Арктическом и Антарктическом регионах. Схема, основанная на использовании исходных данных ПЭС по отдельным лучам спутник – приемник, может использоваться для более узкого класса задач, когда рефракцией можно пренебречь.

#### **4.3. Восстановление критической частоты $foF2$**

В ходе работы была проведена серия экспериментов по возможности применения получаемого абсолютного полного электронного содержания

для оценки критической частоты с использованием различных моделей ионосферы [Oinats et al., 2019; Котова и др., 2019; Kotova et al., 2020].

Для оценки возможности получения критической частоты на удалении более 1000 км осуществлялись расчеты ПЭС на станции GPS/ГЛОНАСС в Иркутске ( $52^{\circ}$  N,  $104^{\circ}$  E), а также данные по трем станциям вертикального зондирования в Моке (январь, март, июнь), Якутске (январь, март, июнь) и Подкаменной Тунгуске (январь, апрель, июнь). Использовались данные за 2014 г. Для оценки  $foF2$  использовалась локальная адаптация модели IRI-Plas, представленная в разделе 4.2.3 на основе вертикального ПЭС, его производных по времени и пространству. Следует отметить, что временные ряды исходных экспериментальных данных  $foF2$  (по данным ионозондов) использовались без предварительного усреднения, т.е. в них сохранены эффекты перемещающихся ионосферных возмущений.

На рисунке 4.7 представлены результаты регрессии оцениваемых с помощью измерений абсолютного ПЭС и модели IRI-Plas значений критической частоты  $foF2$  на реальные измерения.

Из рисунка 4.7. можно видеть, что использование коррекции в среднем позволяет улучшить корреляцию оцениваемого ПЭС по сравнению с данными долгосрочного прогноза. В особенности это проявляется в снижении систематического смещения. Также следует отметить, что наихудшая коррекция наблюдается для северных широт. Таким образом, описанный способ адаптации может быть использован для прогнозирования прохождения КВ-сигнала в удаленном пункте.

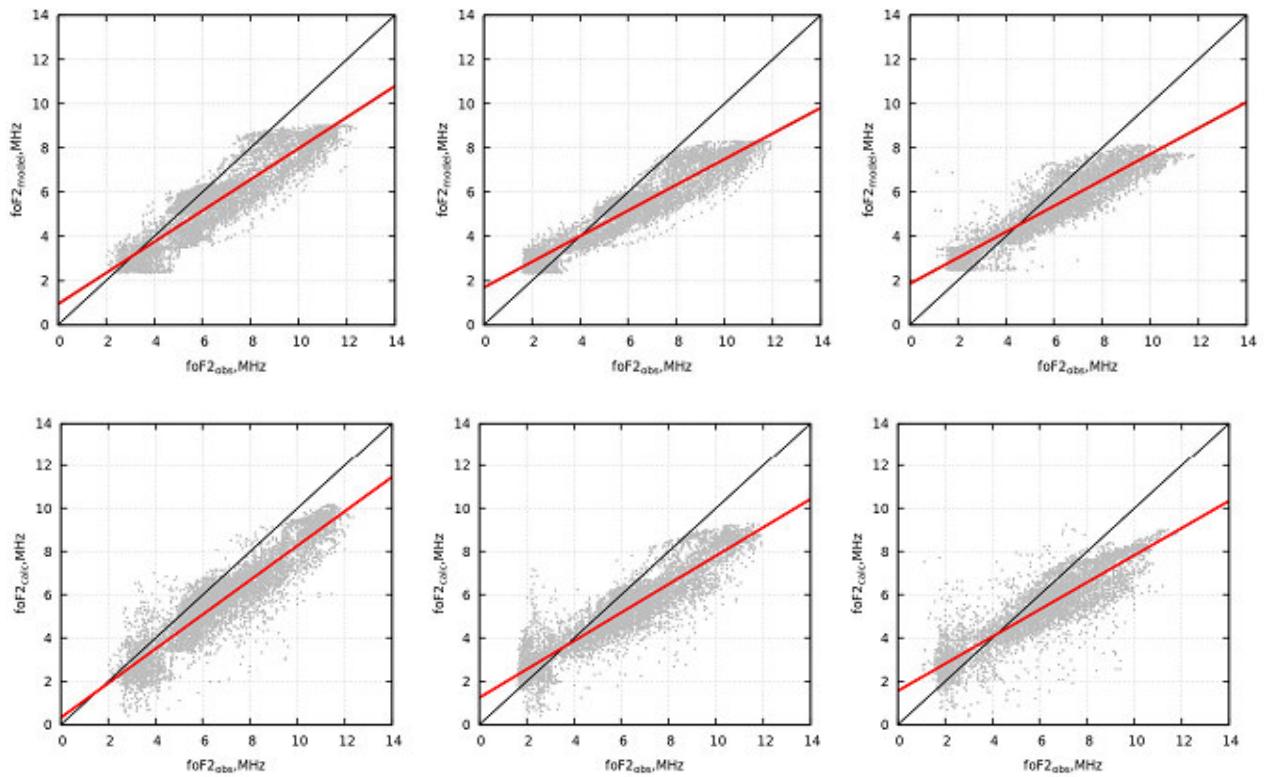


Рисунок 4.7. Регрессия оцененной критической частоты и наблюдений на трех станциях вертикального зондирования (слева направо: Моке, Якутск, Подкаменная Тунгуска). Верхние панели – в качестве оцениваемых используются данные долгосрочного прогноза IRI-Plas, нижние панели – данные, полученные с применением коррекции IRI-Plas по измерениям абсолютного вертикального ПЭС. Чёрная линия – идеальный вариант регрессии, красная линия – линейная регрессия данных  $foF2$  ГНСС на ионозондовые измерения.

С использованием корректировки глобальной модели по обобщенному параметру (4.2.2) на основе данных абсолютного ПЭС был проведен анализ остаточной ошибки для отдельных дней с целью выявления возникающих проблем. Эксперимент проводился для средних широт на основе данных ионозонда DPS-4 ИСЗФ СО РАН и приемника ГНСС, расположенного в Иркутске. Абсолютное ПЭС рассчитывалось на основе двухчастотных измерений, после чего осуществлялась коррекция ионосферной модели на основе данных наклонного ПЭС.

Получаемая ошибка значений критической частоты  $foF2$ , прогнозируемых моделью с применением коррекции по ПЭС, по сравнению с реальными данными ионозонда DPS-4 (ИСЗФ СО РАН) представлена на рисунке 4.8. Сплошные точки – данные прогноза модели с коррекцией, окружности – без коррекции. Рассмотрены дни 22 марта 2014 г. (левая верхняя панель), 22 июня 2014 г. (правая верхняя панель), 22 сентября 2014 г. (левая нижняя панель), 18 декабря 2014 г. (правая нижняя панель). Коррекция осуществлялась на основе параметра  $Rz$ . Синие точки отмечают данные для NeQuick [Hochegger et al., 2005; Nava et al., 2008], красные – для IRI-Plas [Gulyaeva and Gallagher, 2007].

В целом можно видеть, что для рассматриваемого периода имеет место хорошее качество долгосрочного прогноза. Данные, представленные на рисунке 4.8, показывают, что введение коррекции может даже уменьшать точность. Уменьшение ошибки при коррекции в среднем имело место для мартовских и июньских данных. В сентябрьских и декабрьских данных, наоборот, наблюдалось увеличение ошибки.

Таким образом, при коррекции модели с целью получения критической частоты и прогноза распространения КВ-сигналов использование данных ПЭС возможно. В среднем использование таких данных приводит к уменьшению ошибки, хотя в отдельных случаях ошибка может увеличиваться в силу ограничений, указанных в разделе 4.1.

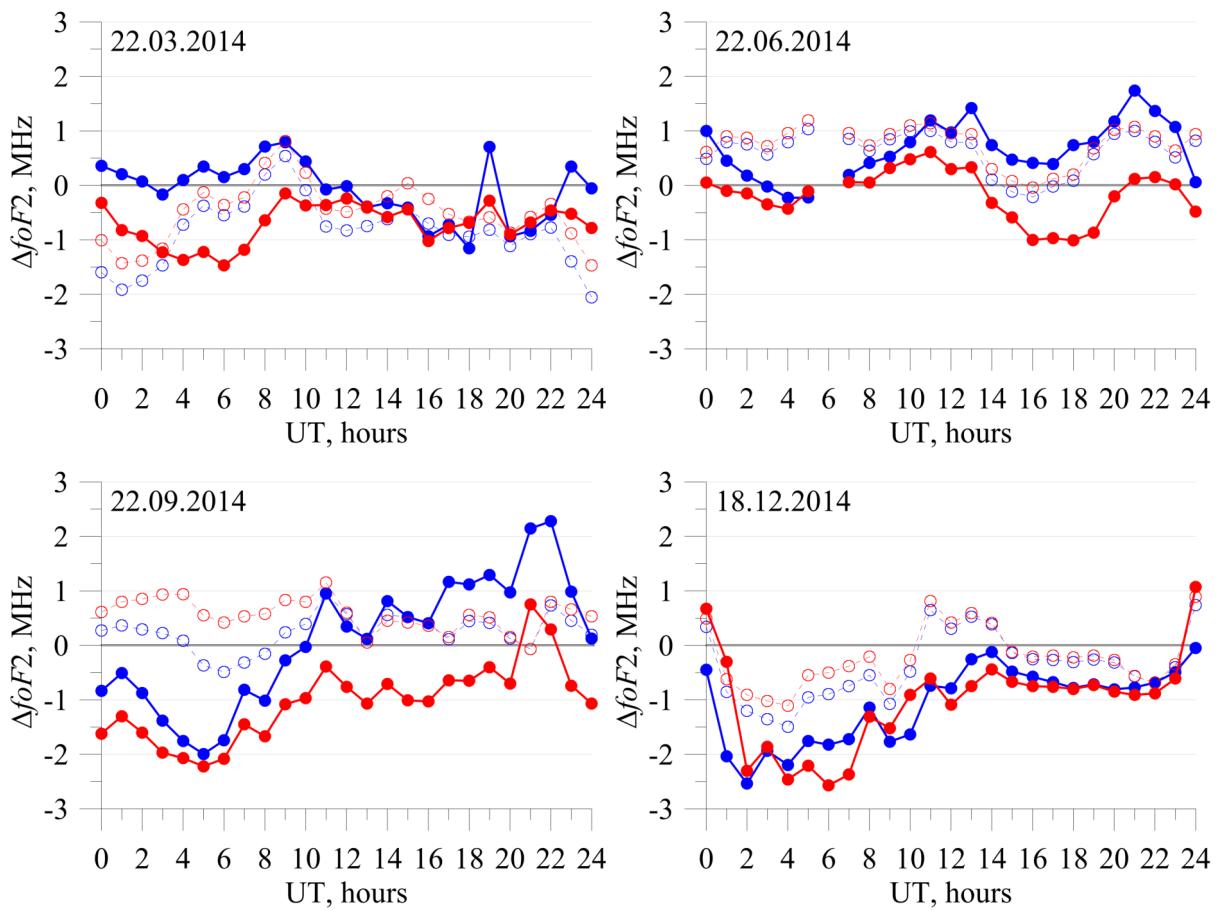


Рисунок 4.8. Вариации отклонения значений критической частоты над Иркутском, получаемой по данным ГНСС, от измерений на ионозонде DPS-4. Данные приведены для 22 марта 2014 г. (левая верхняя панель), 22 июня 2014 г. (правая верхняя панель), 22 сентября 2014 г. (левая нижняя панель), 18 декабря 2014 г. (правая нижняя панель). Синие точки отмечают данные для NeQuick, красные – для IRI-Plas. Сплошные точки – с применением коррекции по данным ПЭС ГНСС при ограничении азимутального сектора, окружности – без коррекции. Коррекция осуществлялась на основе  $Rz$ .

#### **4.4. Восстановление МПЧ для наклонных трасс**

Данные ПЭС могут использоваться для получения значений максимально применимой частоты в задачах расчета трасс наклонного зондирования. Для анализа МПЧ, получаемых с применением данных абсолютного ПЭС [Веснин и др., 2018], использовались данные приемника ГНСС, установленного в г. Иркутск (ИСЗФ СО РАН), а также измерения МПЧ по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования на трех наклонных трассах: Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы сети ИСЗФ СО РАН. Трасса Хабаровск – Торы и Магадан – Торы являются среднеширотными, а трасса Норильск – Торы – частично высокоширотной.

Для проведения эксперимента комплекс, представленный в Главе 3, был развернут на основе оборудования п. Торы. Измерительная компания составила семь дней в феврале 2018 г. В качестве эталона использовались данные МПЧ, полученные с помощью ручной обработки ионограмм ЛЧМ-зондирования.

Сначала осуществлялась коррекция по локальному параметру, которая далее распространялась на всю модель. В качестве такого параметра использовалась критическая частота в точке измерения. Модель IRI-Plas корректировалось по вертикальному полному электронному содержанию в точке измерения (полученному с учетом градиентов) и определялась критическая частота  $foF2_{GNSS}$ , соответствующая величине абсолютного ПЭС. Далее рассчитывался коэффициент коррекции, который применялся для всех измерений  $\tau = foF2_{GNSS}/foF2_{IRI}$ . Полученная оценка критической частоты использовалась далее для расчета МПЧ на каждой из рассматриваемых трасс.

В настоящем эксперименте расчет МПЧ проводился методом кривых передач (метод Смита) [Котович и др., 2006]. Метод позволяет провести расчет распространения радиоволн с хорошей точностью на односкачковых трассах. В ИСЗФ СО РАН разработаны алгоритмы для расчета на основе метода Смита. Последний для расчета высотно-частотной характеристики

(ВЧХ), требуемой для метода Смита, использует полуэмпирическую модель ионосферы (ОПЭМИ) [Поляков и Суходольская, 1986], разработанную в ИГУ. Коррекция модели ОПЭМИ осуществлялась на основе оценки критической частоты, получаемой на основе данных абсолютного вертикального ПЭС с использованием представленного в Главе 2 метода.

На рис. 4.9 приведена динамика максимально применимой частоты для трех трасс. Чёрными точками представлены данные ручной обработки ионограмм, серыми – данные полученные с использованием оценки МПЧ 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. В первый день в силу технических проблем отсутствовали измерения на трассе Норильск – Торы. Как уже обсуждалось в п. 4.1, оценка МПЧ на основе сигналов ГНСС, которые не испытывают поглощения, может не передать реальной картины, так как КВ-сигнал будет поглощаться. В целом, результаты показывают, что ошибку  $<10\%$  имеют  $\sim 43\%$ ,  $51\%$ ,  $42\%$  измерений на трассах Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы, соответственно. При этом следует отметить, что работа проводилась в условиях низкихочных значений МПЧ, что естественно увеличивало относительную ошибку. Ожидается, что при более высокой солнечной активности относительная ошибка уменьшится из-за роста абсолютных значений.

Следует отметить, что пространственные градиенты при расчете МПЧ не учитывались. Также не учитывались эффекты перемещающихся ионосферных возмущений. Наиболее проблемные измерения для средних широт – это измерения на трассе Хабаровск – Торы. В ночное время имеет место переоценка МПЧ. По всей видимости, эта переоценка связана с недоучетом плазмосферного электронного содержания в модели, что приводит к ошибкам при адаптации по ПЭС.

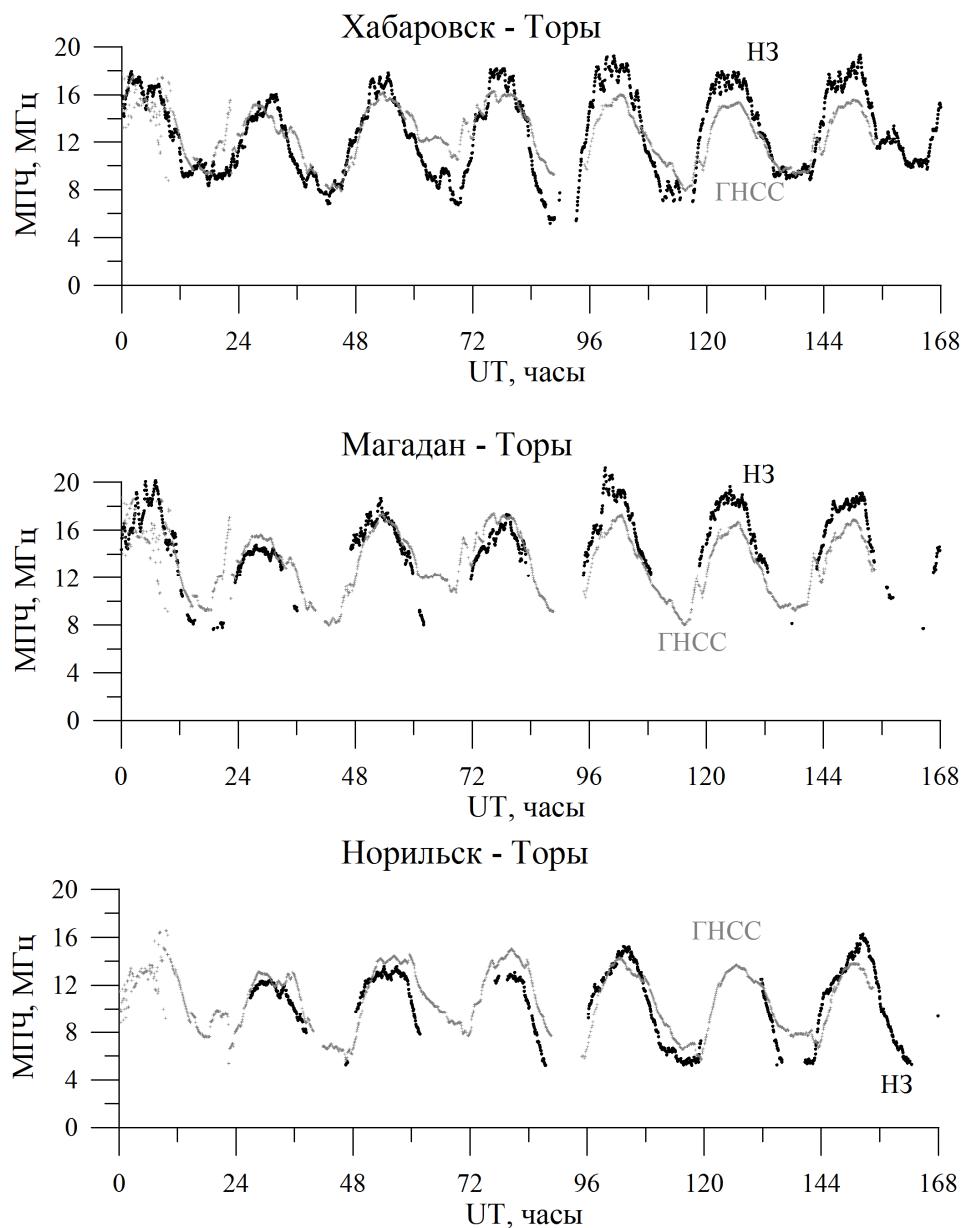


Рисунок 4.9. Максимально применимая частота на трассах Хабаровск – Торы, Магадан – Торы, Норильск – Торы. Чёрные точки – по данным ионограмм наклонного зондирования (ручная обработка), серые точки – оценки, полученные на основе полного электронного содержания по данным ГНСС.

## **4.5. Воздействие ионосферы на радиоастрономические измерения и возможности использования абсолютного ПЭС для коррекции**

Выше было отмечено, что ионосфера может вносить значимый вклад в ошибки радиоастрономических наблюдений. В диссертационном исследовании проведена оценка влияния ионосферы на измерение меры вращения и меры дисперсии астрономических радиосигналов. Результаты представлены для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г. и сильнейшей магнитной бури 23-го цикла солнечной активности 30 октября 2003 г. [Mannucci et al., 2005; Sahai et al., 2005]. Расчеты выполнены для американского сектора вблизи радиотелескопа Arecibo ( $18.33^{\circ}\text{N}$ ,  $-66.75^{\circ}\text{E}$ ).

Для расчетов использовались данные двухчастотного GPS-приемника PUR3 ( $18.46^{\circ}\text{N}$ ,  $-67.07^{\circ}\text{E}$ ). Геометрия зондирования представлена на рисунке 4.10. На панели *a* представлены данные для 30 октября 2003 г., на панели *b* – для 04 декабря 2004 г. (*b*). Красной кривой со стрелкой показана проекция положения спутника на землю: *a* – PRN01, *b* – PRN08. Треугольниками отмечены крупные радиотелескопы LOFAR, Arecibo, MIRA. Пунктирная линия отмечает геомагнитный экватор. Фоном представлено распределение вертикального ПЭС по данным карт GIM лаборатории JPL (JPLG) для 20 UT.

Можно видеть, что 30 октября 2003 г. в 20 UT (рис. 4.10, *a*) в экваториальном регионе американского сектора имеет место значительное усиление экваториальной аномалии (супер-фонтан эффект [Tsurutani et al., 2004.]). Значения ПЭС в гребнях достигают 180 TECU, а пространственные градиенты 5–8 TECU/градус. При этом даже для спокойного дня 04 декабря 2004 г. (рис. 4.10, *b*) наблюдаются достаточно сильные градиенты и высокие значения ПЭС, которые, однако, не превышают 80 TECU в гребнях экваториальной аномалии. Высокие значения обусловлены супер-фонтан-эффектом во время магнитной бури 29 октября 2003 г. [Mannucci et al., 2005; Веселовский и др., 2004].

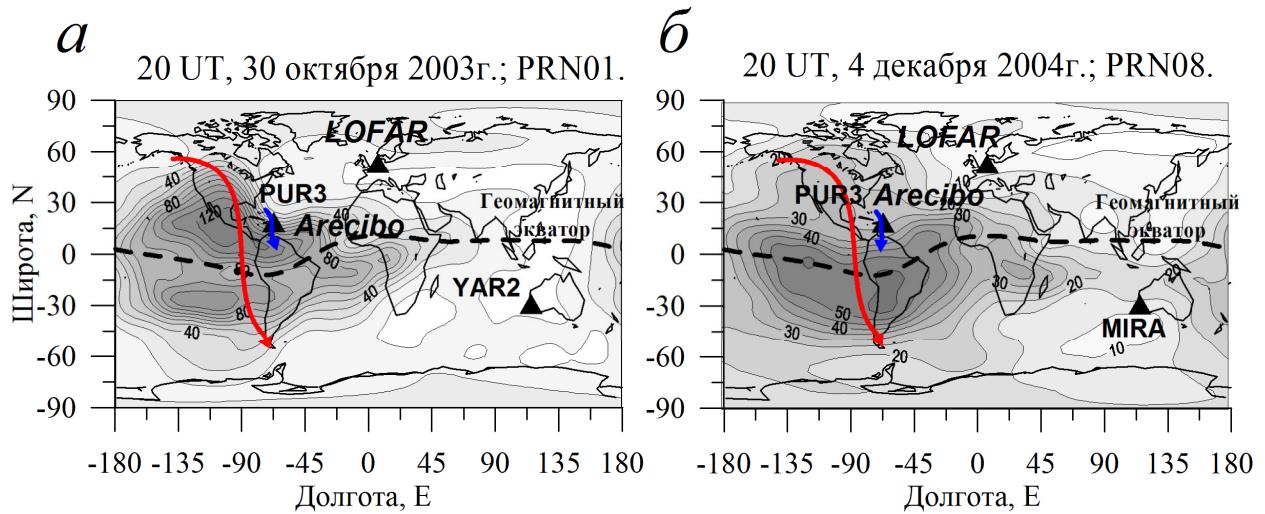


Рисунок 4.10. Геометрия эксперимента по оценке меры вращения и меры дисперсии астрономических радиосигналов 30 октября 2003 г. (а) и 04 декабря 2004 г. (б). Красная кривая со стрелкой – проекция положения спутника на Землю, синяя кривая – положение ионосферной точки на высоте 300 км. Треугольниками отмечены крупные радиотелескопы. Штриховая линия отмечает геомагнитный экватор. Фоном показано распределение вертикального ПЭС по данным глобальных ионосферных карт JPLG для 20 UT.

На рисунках 4.11 и 4.12 для 04 декабря 2004 г. и 30 октября 2003 г. соответственно показаны динамика наклонного абсолютного ПЭС, полученного по данным двухчастотного GPS-приемника PUR3 (*a*), угол места и азимут луча спутник – приемник. Данные приведены для спутников PRN01 (30 октября 2003 г.) и PRN08 (04 декабря 2004 г.). Для частоты 100 МГц рассчитаны поворот плоскости поляризации  $\Omega$  (с привлечением модели магнитного поля IGRF-10 [Maus et al., 2005]) (*в*) и соответствующая ему мера вращения  $RM$  (*г*), модулирующая функция ионосферы (*д*), а также дополнительный набег фазы в ионосфере  $\Delta\phi$ . Дополнительное фазовое запаздывание  $\Delta\phi$  (*б*) в ионосфере и поворот плоскости поляризации  $\Omega$ , обусловленный эффектом Фарадея, и связанная с ним мера вращения определяются формулами (4.2)–(4.6).

Геометрия луча спутник – приемник такова, что в обоих случаях траектория распространения сигнала GPS начинает приближаться к параллельной по отношению к магнитному полю. В результате  $\cos\xi$  (рис. 4.11, *б*; 4.12, *б*) стремится к 1, приводя к более точному выполнению условия квазипродольного распространения. Для спокойного дня значения наклонного ПЭС по данным измерений на луче PUR3-PRN01 составляли 30–60 ТЕСУ (рис. 4.11, *а*), а во время возмущенных условий превышали 300 ТЕСУ после 21 UT (рис. 4.12, *а*). Соответствующее значение дополнительного набега фазы может достигать  $10^4$  рад.

Рисунки 4.11 и 4.12 показывают высокие значения угла поворота плоскости поляризации. Мера вращения, рассчитанная на основе данных GPS, достигает  $2 \cdot 10^5$  для спокойных условий (рис. 4.11, *в*) и  $10^6$  МГц<sup>2</sup>·рад для возмущенных (рис. 4.12, *в*). Это сравнимо с мерой вращения, измеряемой, например, для радиопульсара PSR0943+10 ( $1.2 \cdot 10^6$  МГц<sup>2</sup>·рад) [Манчестер и Тейлор, 1980]. Для другого пульсара PSR1237+25, мера вращения значительно ниже и составляет  $\sim 3.6 \cdot 10^5$  МГц<sup>2</sup>·рад, что не превышает меру вращения в ионосфере.

## PUR3, 4 декабря 2004 г.

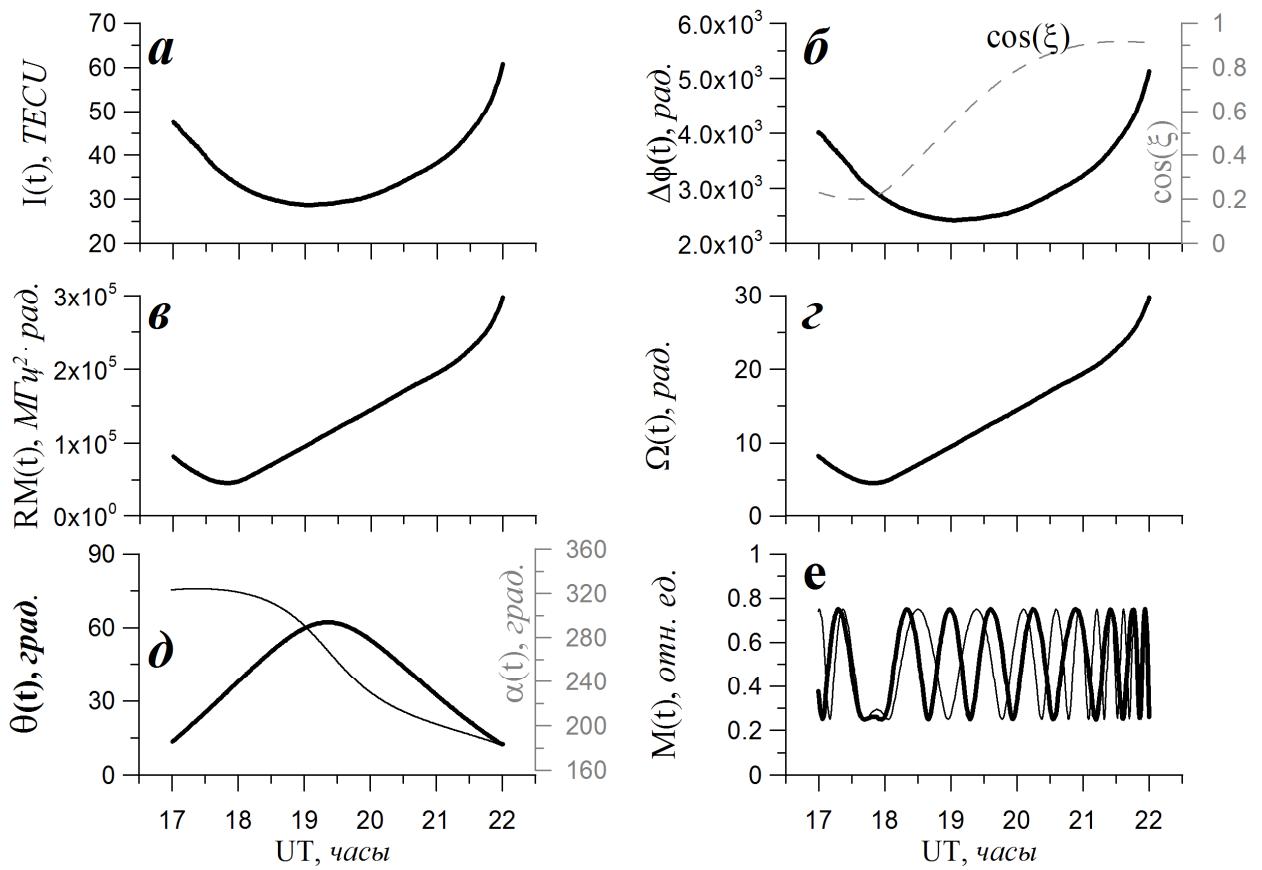


Рисунок 4.11. Влияние ионосферы на параметры радиосигналов для частоты 100 МГц для региона радиотелескопа Arecibo. *а* – абсолютное наклонное ПЭС, полученное по двухчастотным измерениям сигналов спутника GPS PRN08 приемником PUR3; *б* – дополнительный набег фазы в ионосфере; *в* – мера вращения  $RM$ ; *г* – поворот плоскости поляризации  $\Omega$ ; *е* – соответствующая величине  $\Omega$  модулирующая функция  $M(t)$ ; *д* – угол места  $\theta$  (черная кривая, шкала слева) и азимут  $\alpha$  (серая кривая, шкала справа). Данные представлены для магнитоспокойного дня 4 декабря 2004 г.

## PUR3, 30 октября 2003 г.

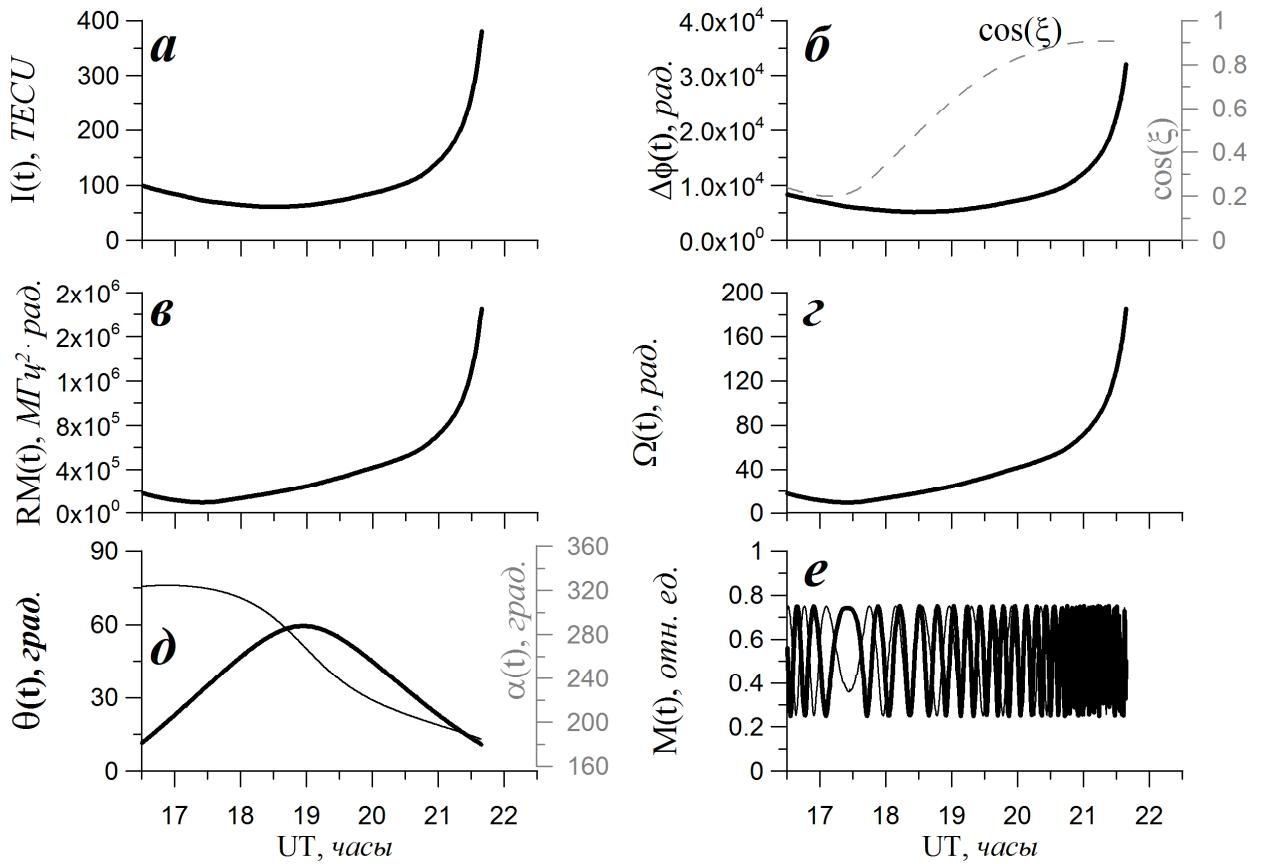


Рисунок 4.12. Влияние ионосферы на параметры радиосигналов для частоты 100 МГц для региона радиотелескопа Arecibo. *а* – абсолютное наклонное ПЭС, полученное по двухчастотным измерениям сигналов спутника GPS PRN01 приемником PUR3; *б* – дополнительный набег фазы в ионосфере; *в* – мера вращения  $RM$ ; *г* – поворот плоскости поляризации  $\Omega$ ; *е* – соответствующая величине  $\Omega$  модулирующая функция  $M(t)$ ; *д* – угол места  $\theta$  (черная кривая, шкала слева) и азимут  $\alpha$  (серая кривая, шкала справа). Данные представлены для магнитной бури 30 октября 2003 г.

При приеме сигнала линейной или эллиптической поляризации на антенну линейной поляризации возникнет модуляция амплитуды сигнала на входе приемника. Модуляция может быть описана функцией  $M(t)$  [Afraimovich, 1981]:

$$A(t) = M(t) \cdot R(t), \quad (4.7)$$

$$M(t) = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cdot \cos[2\Omega(t) + \varphi_0]}, \quad (4.8)$$

где  $R(t)$  и  $A(t)$  – радиосигнал до прохождения ионосферы и после прохождения ионосферы,  $a$  – соотношение амплитуд компонент электромагнитной волны с правым и левым направлениями вращения,  $\varphi_0$  – неизвестная начальная фаза,  $\Omega$  – поворот плоскости поляризации.

Периоды фарадеевской амплитудной модуляции составляли около часа в спокойных условиях (рис. 4.11, *e*), а в возмущенных достигали 200–300 с (рис. 4.12, *e*), то есть периоды модуляции оказываются сравнимыми с периодами мерцаний, обусловленных рассеянием радиосигнала на мелкомасштабных неоднородностях размера порядка первой зоны Френеля [Yeh and Liu, 1982]. Такая модуляция с малым периодом может привести к ошибкам в оценках, получаемых при исследовании межзвездной среды по анализу мерцаний [Ульянов и др., 2006; Манчестер и Тейлор, 1980].

Экспериментально эффекты воздействия ионосферы на параметры радиоастрономических сигналов, которые могли быть сопоставлены с данными абсолютного ПЭС, были обнаружены автором в данных солнечного радиоизлучения солнечной вспышки X3.8 17 января 2005 г. [Афраймович и др., 2007]. Для указанной вспышки наблюдался значительный разброс максимумов амплитуды профиля принимаемого УКВ-радиоизлучения в Европе на станциях, разнесенных на различное расстояние от 100 до 1000 км. В связи с тем, что большинство станций имело антенну линейной поляризации ионосферные эффекты могут приводить к повороту плоскости поляризации радиосигнала и модуляции его амплитуды.

На рисунке 4.13 представлено расположение станций, а на рисунке 4.14 – форма профилей солнечного радиоизлучения на частотах 230–245 МГц. Станции были расположены в Греции, Италии, России (ИЗМИРАН). Основная часть станций входит в греческую сеть Electromagnetic Variation Field Stations (EMVFS) и осуществляет измерения на частотах в диапазоне 142–415 МГц. Характеристики станций и их координаты приведены в таблице 4.1.

Практически на всех профилях радиоизлучения проявляется узкополосный импульсный всплеск. Длительность всплеска составляет менее 10 с. Всплеск не наблюдается только на приемнике Artemis-IV в связи с недостаточным временным разрешением данных (10 с). Синхронность всплеска говорит о синхронности часов различных приемников. При этом максимум основной части профиля регистрируемого излучения на приемниках с антеннами линейной поляризации оказывается смещен относительно приемника с антенной круговой поляризацией Artemis-IV, где он наблюдался в 9:57 UT. Разброс по времени составлял от 10:01:48 (KEK) до 10:14:12 (ИЗМИРАН).

Таблица 4.1. Станции УКВ-диапазона и их характеристики

	1	2	3	4	5	6	7
Название	Ioannina	Kefalonia	Kerkyra	Ithomi	San Vito	ИЗМИРАН	Artemis-IV
Обозна- чение	JAN, J	VLS, F	KEK, P	ITM, O	SVT	IZMI	ART-IV
N°	39.66	38.18	39.71	37.18	40.4	55.28	38.49
E°	20.85	20.59	19.8	21.93	17.43	37.19	22.41
Поляри- зация	Лин. верт.	Лин. верт.	Лин. верт.	Лин. верт.	Круг. ?	Лин. верт.	Круг.
Частота, МГц	142	142		142	25–180		20–600
		178	178	178		169	
	230	230	230	230	245	204	
	320	320	320	320			
	390		390	390			
	415	415		415	410		
					2695	3000	

Широта, N

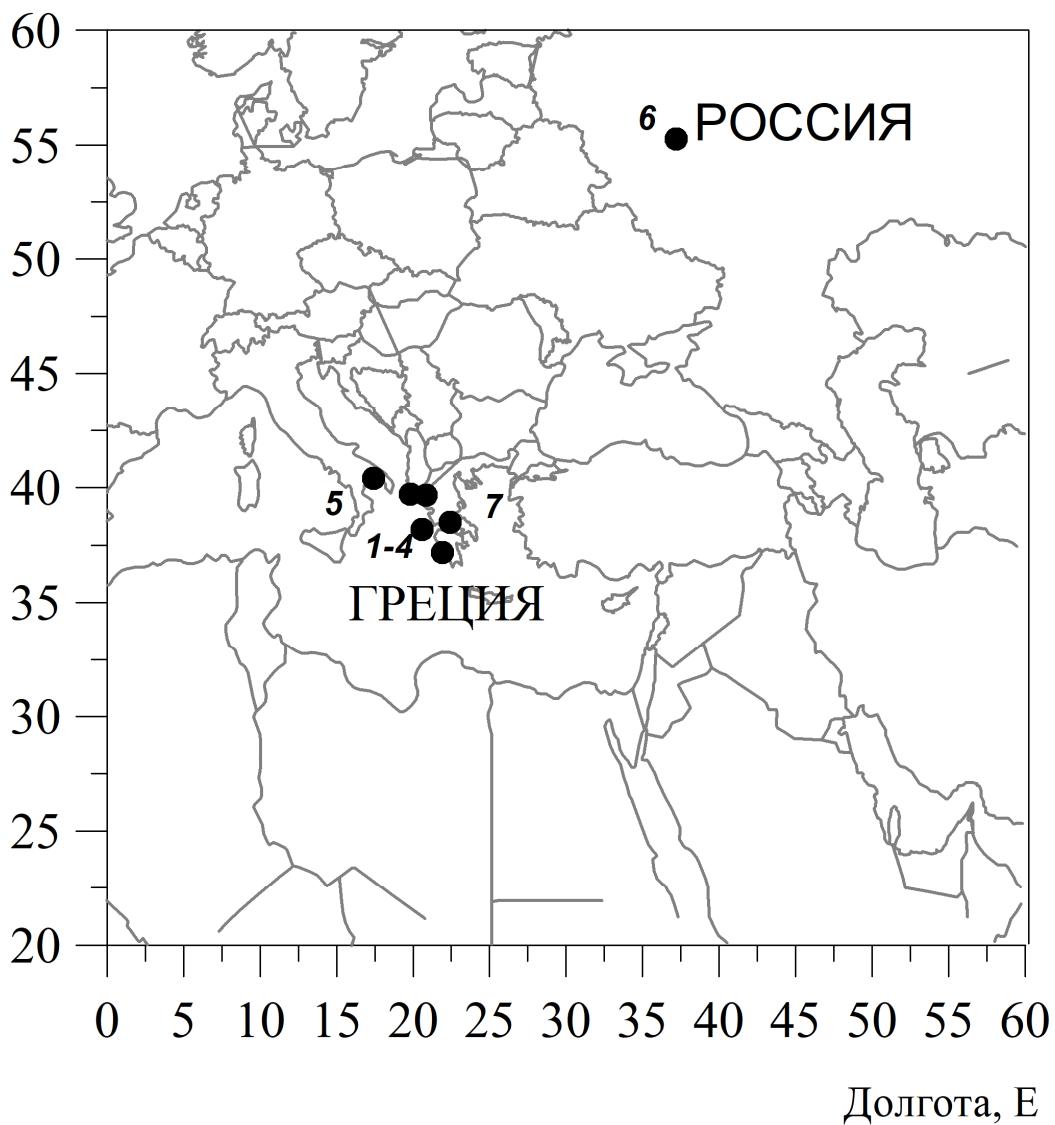


Рисунок 4.13. Расположение приемных станций УКВ-диапазона.

17 января 2005 г.

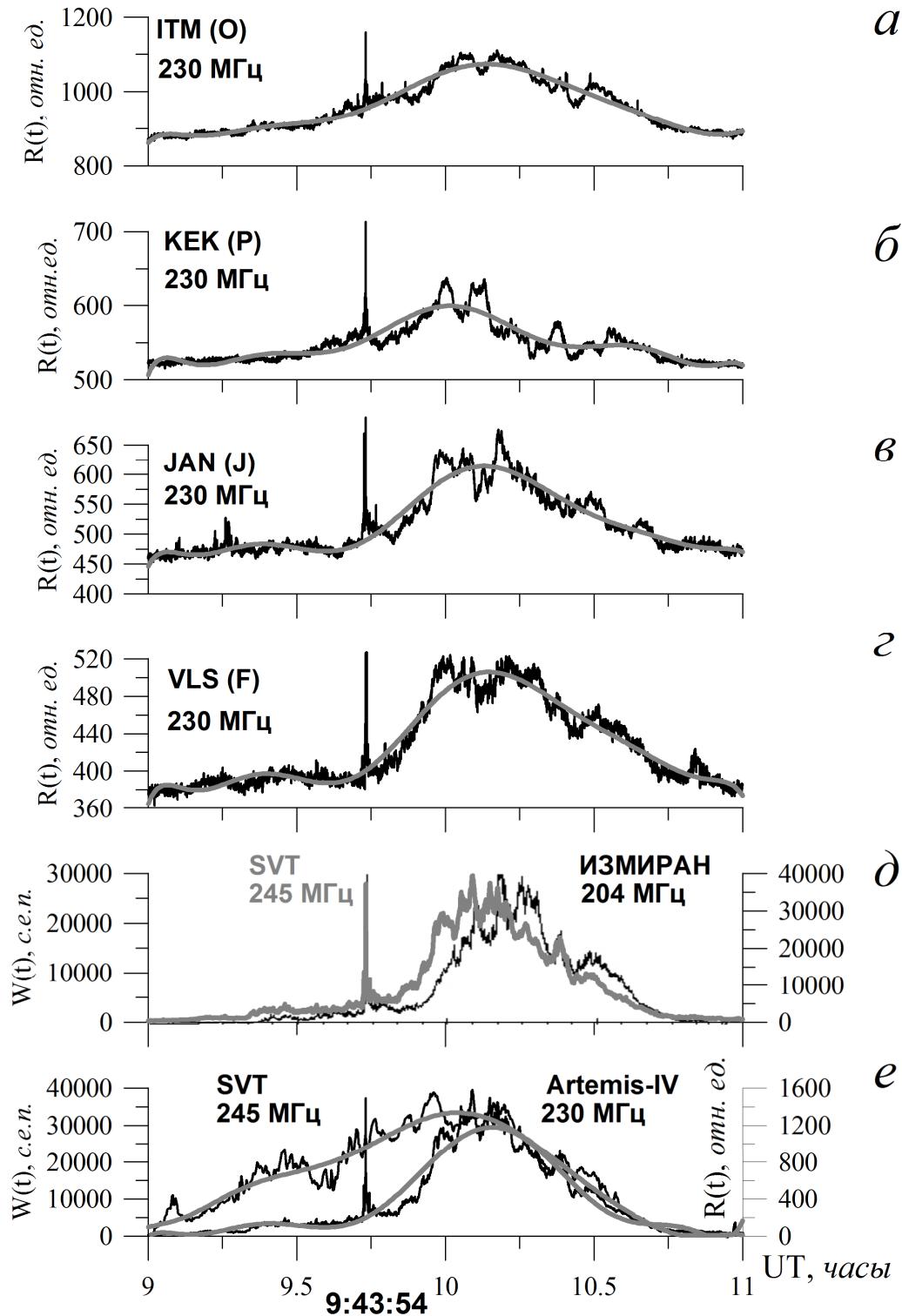


Рисунок 4.14. Профили радиоизлучения вспышки X3.8 17 января 2005 г. на различных приемных станциях. Код станции указан на панели. Серая кривая на панелях *a*–*г* – аппроксимация сглаживающим полиномом без учета всплеска.

Анализ показывает, что различия по форме профилей уменьшаются с увеличением частоты сигнала. Кроме того, при увеличении расстояния между станциями растет смещение по времени. Поскольку сдвиг шкалы отсутствует, то данный эффект может быть связан только с влиянием ионосферы.

В этом эксперименте в качестве абсолютного ПЭС использовались не данные, полученные на основе метода, представленного в диссертации, а данные глобальных ионосферных карт GIM (т.к. метод в тот момент еще не был разработан). Данные отдельных станций также могут использоваться.

Для повышения разрешения по времени данных карт GIM профиль аппроксимировался гауссовым с постоянной составляющей. Преобразование в наклонное ПЭС осуществлялось на основе модели тонкого слоя (single layer model), полагая в (2.3)  $\alpha=1$  [Schaer, 1999].

Для расчета модулирующей функции было необходимо выбрать параметры  $a$  и  $\phi_0$ . В данном эксперименте они были выбраны равными 0.5 и 3 рад, соответственно. Выбор был сделан, в некоторой степени, случайным образом для качественного анализа картины таким образом, чтобы сдвигка была видна достаточно хорошо. В экспериментах может осуществляться перебор этих параметров для достижения наилучшего соответствия со всеми наблюдаемыми профилями.

В связи с тем, что станции сети EMVFS расположены достаточно близко, то в данном случае имеет смысл делать расчет для всей группы одновременно. На рисунке 4.15, *a* показан исходный профиль (Artemis), аппроксимированный функцией Гаусса  $R_0(t)$ . Рисунок 4.15, *б* показывает расчеты модулирующей функции  $M(t)$  для частоты 230 МГц, полученной на основе рядов ПЭС (рис. 4.15, *в*).

Начальная фаза  $\phi_0$  влияет на то, будет ли максимум результирующего профиля опережать или запаздывать, относительно исходного. Как показывают результаты расчетов, такое смещение может достигать 15 мин.

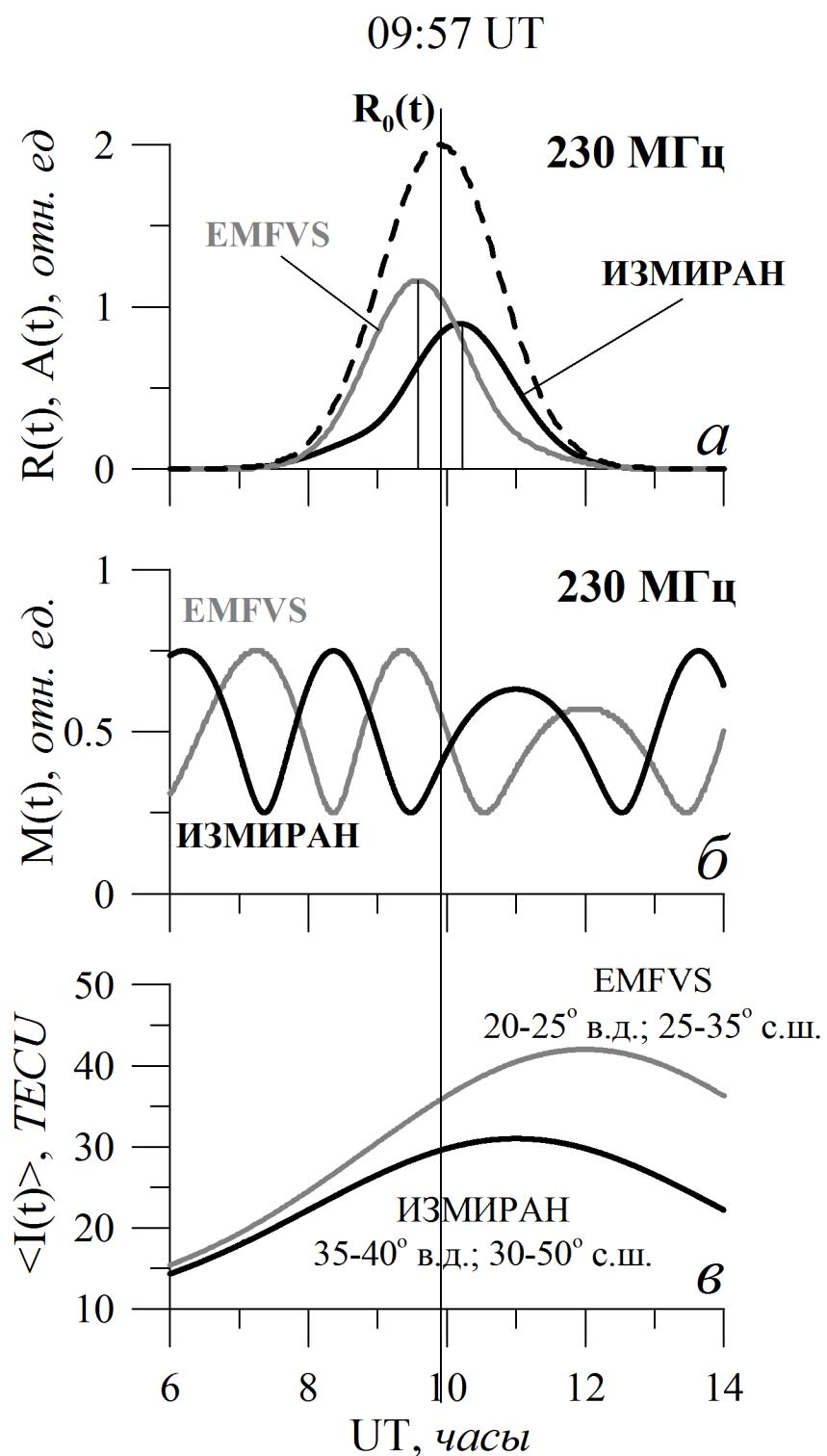


Рисунок 4.15. Апроксимированный профиль радиоизлучения вспышки X3.8 17 января 2005 г.  $R_0(t)$  на частоте 230 МГц, а также результат его модуляции (а); модулирующая функция  $M(t)$  (б); наклонное ПЭС вдоль линии станция – Солнце (в).

При этом кратковременный всплеск будет оставаться практически на месте. Это вполне соответствует экспериментальным результатам. Смещение для станции ИЗМИРАН в данном случае оказывается достаточно правильным, но для сетей EMFVS максимум наблюдается раньше.

На рисунке 4.16 показаны результаты коррекции профиля для станции Ithomi. Для расчета модулирующей функции начальная фаза перебиралась с шагом  $\pi/4$ . Следует отметить, что выбор начальной фазы является в целом достаточно сложной задачей. Он определяется не особенностями излучения, а прежде всего особенностями геометрии луча сигнала, магнитным полем, а также геометрией антенны.

Черная жирная линия – данные Artemis-IV, тонкие линии – аппроксимированный профиль, толстая серая линия на панели *a* – моделирующая функция, используемая для расчетов, штриховая линия на панели *a* – данные Ithomi, серая толстая и штриховая линии на панели *b* – данные Itomi до и после коррекции. Профиль Artemis-IV и Ithomi на панели *a* нормированы на 2, на панели *b* нормировки выбраны так, чтобы показать все три кривые одновременно.

На рис. 4.16, *b* приведены результаты коррекции. Наилучшее согласие для коррекции данных Ithomi по времени смещения максимума регистрируемого профиля радиоизлучения было получено при начальной фазе  $\phi_0=6\pi/4$ .

Таким образом, использование данных абсолютного ПЭС может быть использовано для интерпретации и устранения ионосферных эффектов в радиоастрономических измерениях.

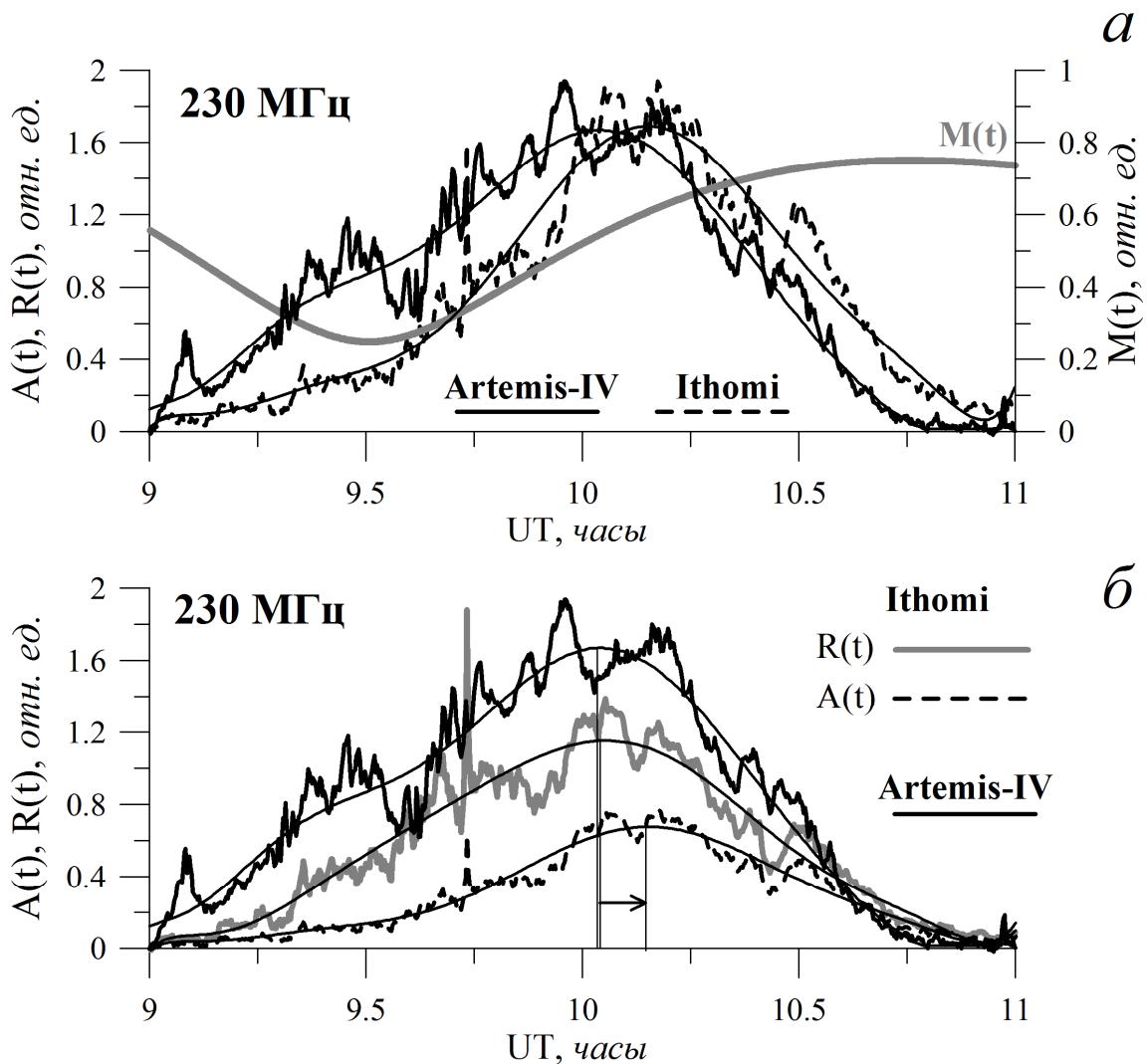


Рисунок 4.16. Коррекция профиля солнечного радиоизлучения, зарегистрированного на станции Ithomi, в сравнении с данными специализированного солнечного спектрографа Artemis-IV. Чёрная жирная линия – данные Artemis-IV, тонкие линии – аппроксимированный профили, толстая серая линия на панели *а* – моделирующая функция, используемая для расчетов, штриховая линия на панели *а* – данные Ithomi, серая толстая и штриховая линии на панели *б* – данные Ithomi до и после коррекции. Профиль Artemis-IV и Ithomi на панели *а* нормированы на 2, на панели *б* нормировки выбраны произвольно.

#### **4.6. Выводы по Главе 4**

В настоящей главе проанализированы возможности использования данных абсолютного полного электронного содержания для корректировки ионосферных ошибок в радиотехнических системах.

Для систем радиосвязи восстановленные величины МПЧ в рамках проведенного эксперимента в условиях минимума солнечной активности имели ошибки  $<10\%$  в 40-50 % измерений на трассах, на которых часть распространяется в высокоширотной области. Для радиоастрономических сигналов данные ГНСС позволяют устранять модуляцию профиля регистрируемого излучения, которое может достигать более 10 минут.

С точки зрения перспективы использования данных ГНСС в интересах оценки влияния ионосфера на распространение радиосигналов положительными характеристиками являются большое число измерений, стабильность измерений (более детально см. Главу 5), пассивность измерений, малая потребляемая мощность. Отрицательные факторы – отсутствие влияния поглощения (которое, однако может быть положительным для отдельных задач), проблемы оценки абсолютных значений ПЭС, интегральный характер измерений и отсутствие точной связи ПЭС и параметров радиоканала, а также невозможность учета областей E, Es, D.

Необходимо отметить, что использование данных ГНСС-ПЭС имеет свои ограничения, но в целом приводит к уменьшению остаточных ионосферных погрешностей в радиотехнических системах. Методически были определены три возможных подхода к коррекции ионосферной ошибки на основе данных ГНСС. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Результаты экспериментальных наблюдений демонстрируют сложности оценки критической частоты.

## **ГЛАВА 5. СТАБИЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ГНСС В РАЗЛИЧНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Настоящая глава посвящена анализу стабильности измерений ПЭС на основе ГНСС. Ключевая задача – понять, насколько надежны ГНСС-измерения для решения задачи оперативной диагностики среды в различных регионах и в различных условиях. Используются два ключевых термина: срывы сопровождения фазы сигнала (или вероятности/плотности срывов) и появление нефизичных вариаций ПЭС (сбоев ПЭС).

В работах, проводившихся для получения результатов настоящей главы, участвовали Э.И. Астафьева, В.В. Демьянов, И.В. Живетьев, В.И. Захаров, А.С. Ярюкевич. Результаты, полученные в настоящей главе, опубликованы в [Ярюкевич и др., 2015б; Ярюкевич и др., 2017в; Захаров и др., 2016; Astafyeva et al., 2014; Yasyukevich et al., 2018; Yasyukevich et al., 2021; Demyanov et al., 2022]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ [Ярюкевич и Ярюкевич, 2021].

### **5.1. Сбои ПЭС и срывы сопровождения сигнала во время магнитных бурь**

С целью ответа на вопрос, насколько работоспособным остается метод оценки ПЭС в условиях мощных магнитных бурь и какова тенденция развития ГНСС, требуется провести анализ качества функционирования ГНСС в различных периодах. Для этого в ходе диссертационного исследования был проведен анализ срывов сопровождения фазы на частотах L1 и L2 для бурь в 23-м и 24-м циклах солнечной активности.

#### **5.1.1. Бури и супербури 23-го цикла солнечной активности**

Одной из мощнейшей бурь 23-го цикла солнечной активности была буря, зарегистрированная 20 ноября 2003 г. Динамика срывов сопровождения

фазы сигнала в глобальном масштабе во время этой бури представлена на рисунке 5.1 красными точками: L1 GPS (*в*), L2 GPS (*д*); L1 ГЛОНАСС (*г*), L2 ГЛОНАСС (*е*). Серыми точками представлены аналогичные величины для контрольного дня 19 ноября 2003 г. со спокойными геомагнитными условиями. Панели *а* и *б* являются аналогичными и показывают динамику *Bz*-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) (черная кривая) и индекса *SYM-H* (синяя кривая). Минимум *SYM-H* достиг  $-488$  нТл в 18:15 UT.

Можно видеть, что число срывов сопровождения фазы на основной частоте L1 гораздо меньше, чем на вспомогательной частоте L2. Хорошо видно отличие в величине срывов сопровождения фазы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Вероятность срывов сопровождения фазы сигналов ГЛОНАСС более высока, но не носит регулярного характера. Частично это связано с отличием в статистике одновременных измерений для 2003 г.:  $\sim 11500$  для GPS против  $\sim 120$  для ГЛОНАСС. В результате явный эффект бури наблюдается только в данных GPS. Увеличение числа срывов сопровождения фазы во время магнитной бури (красные точки) может превышать фоновый уровень (серые точки) более чем в 6 раз.

Для анализа сбоев ПЭС применялись измерения фазового пути сигнала ГНСС. В связи с тем, что шумы фазовых измерений гораздо ниже шумов групповых измерений [Куницын и др., 2007], анализ сбоев ПЭС имеет смысл только для фазовых измерений. В качестве сбоя ПЭС в работе принималось изменение ПЭС относительно предыдущего значения, по величине превышающее заданный порог при отсутствии срыва сопровождения фазы.

Пороговым значением для фиксации сбоев ПЭС были выбраны следующие величины: 2 ТЕСУ/мин для высоких широт ( $\theta > 75^\circ$ ), 4 ТЕСУ/мин для средних широт ( $25^\circ < \theta < 75^\circ$ ), 6 ТЕСУ/мин для низких широт ( $\theta < 25^\circ$ ). Следует отметить, что мы рассматриваем сбои ПЭС как вероятностную величину. Тогда отношение наблюдаемого числа сбоев ПЭС к общему числу измерений имеет характер вероятности сбоев ПЭС.

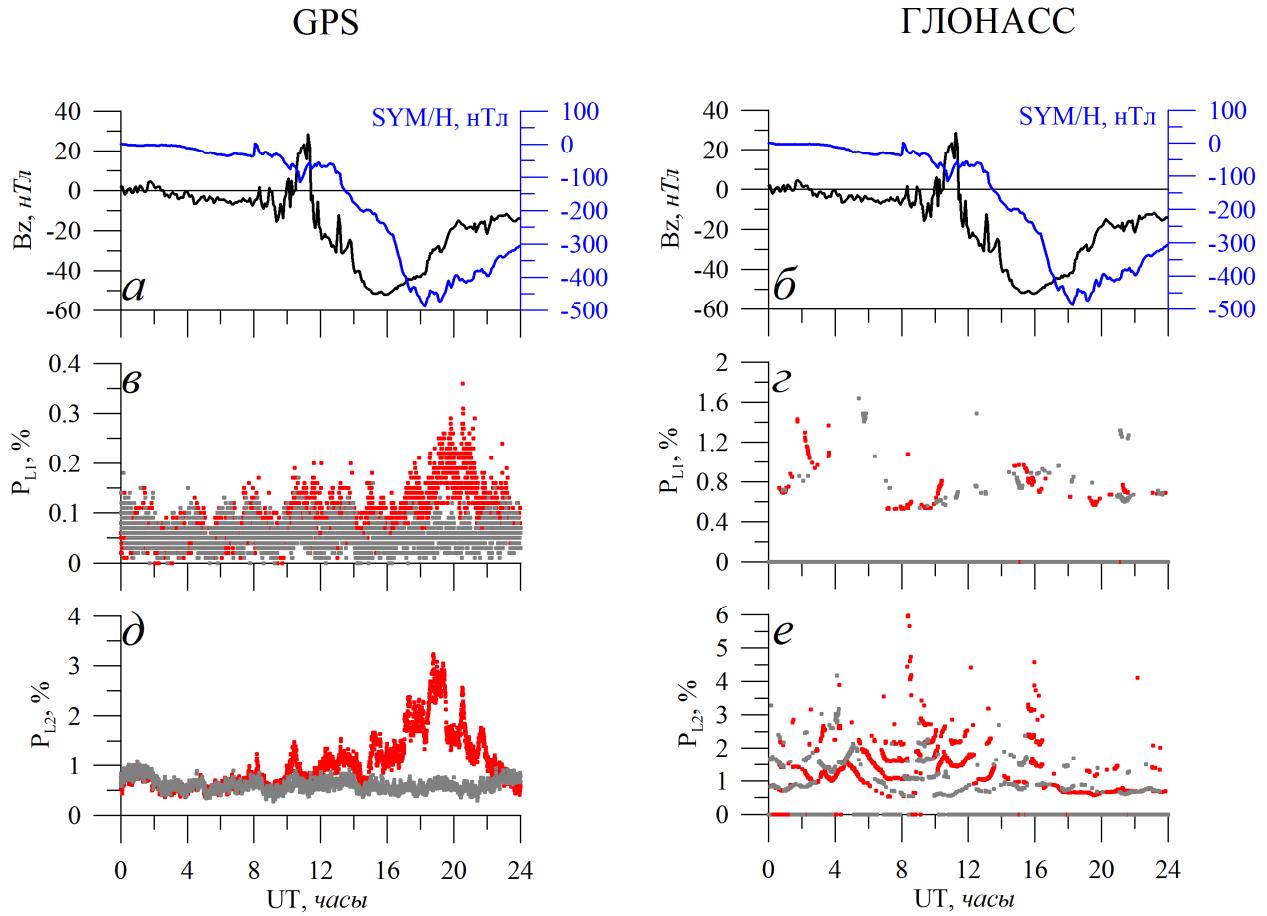


Рисунок 5.1. Динамика срывов сопровождения фазы во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. (красные точки):  $\sigma$  – L1 GPS,  $\delta$  – L2 GPS;  $\tau$  – L1 ГЛОНАСС,  $\epsilon$  – L2 ГЛОНАСС. Серыми точками представлены аналогичные величины для контрольного дня – 19 ноября 2003 г.  $a$  и  $\beta$  – динамика  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля (черная кривая) и индекса  $SYM-H$  (синяя кривая).

При анализе сбоев ПЭС имеет смысл отбросить низкие углы места. Проведенный в настоящей работе анализ показал, что число сбоев ПЭС существенно зависит от угла места спутника (рис. 5.2). Это обусловлено геометрией зондирования: с одной стороны здесь увеличиваются значения ПЭС и производные ПЭС, а кроме того увеличивается длина радиолуча, что приводит к снижению мощности сигнала и ухудшению качества приема. При этом при увеличении угла места наблюдается сильное спадание вероятности сбоев, которое становится мало при достижении  $10^{\circ}$ – $20^{\circ}$ . При обработке данных ГНСС исключаются измерения на низких углах места (менее  $10^{\circ}$ ) [Афраймович и Перевалова, 2006]. В этой связи данные ниже порога (отмечен вертикальной линией на рис. 5.2) отбрасываются.

Для анализа появления сбоев ПЭС при неблагоприятных факторах космической погоды в диссертации анализируются четыре бури разной интенсивности – две супербури (в части возникновения суперфронтан-эффекта и значительной перестройки ионосферы [Astafyeva 2009]: 07 сентября 2002 г. (минимальный  $SYM-H$  –144 нТл), 20 ноября 2003 г. (минимальный  $SYM-H$  –422 нТл); и две менее интенсивные в части проявления ионосферных эффектов бури: 15 мая 2005 г. (минимальный  $SYM-H$  –302 нТл), 24 августа 2005 г. (минимальный  $SYM-H$  –220 нТл).

На рисунке 5.3 представлена геометрия эксперимента. Серые точки отмечают положение приемников доступных для анализа событий магнитных бурь 7 сентября 2002 г. (а), 20 ноября 2003 г. (б), 15 мая 2005 г. (в), 24 августа 2005 г. (г). Можно видеть, что основная часть приемников располагается в средних широтах и только малое число приемников находится на территории РФ или Африки, и, конечно, океанов.

Динамика развития возмущенности горизонтальной компоненты магнитного поля ( $SYM-H$ ) и вариации  $Bz$ -компоненты межпланетного магнитного поля с усреднением 5 мин показаны на рис. 5.4 для 15 мая 2005 г. (а) и 20 ноября 2003 г. (ж)

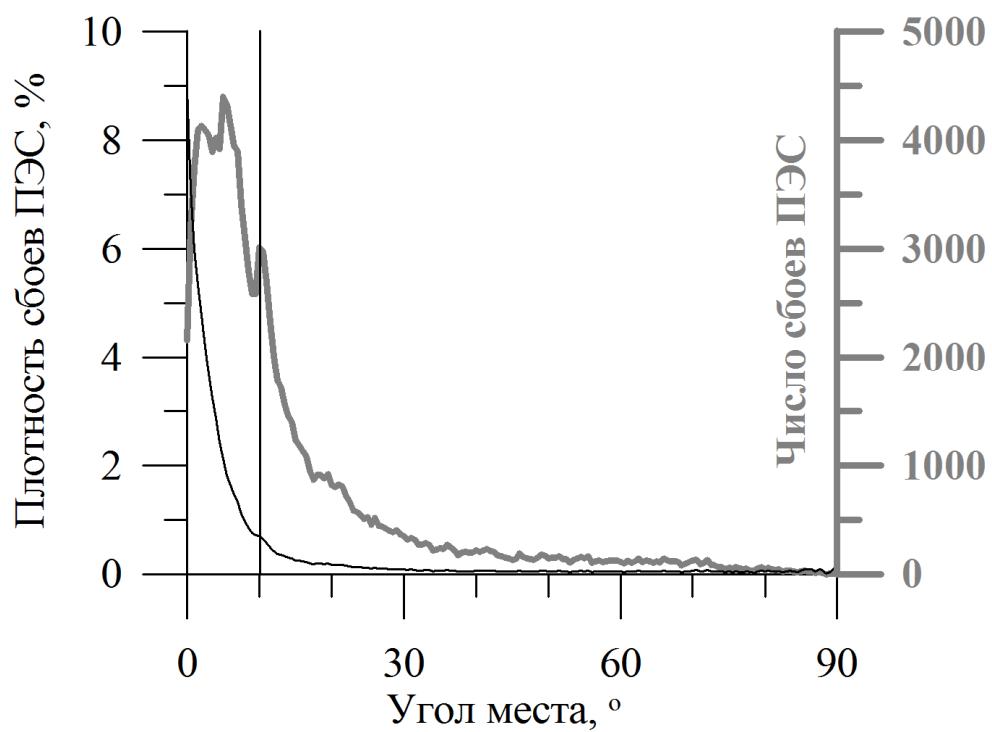


Рисунок 5.2. Зависимость количества и плотности сбоев ПЭС от угла места для спокойных условий 14 мая 2005 г.

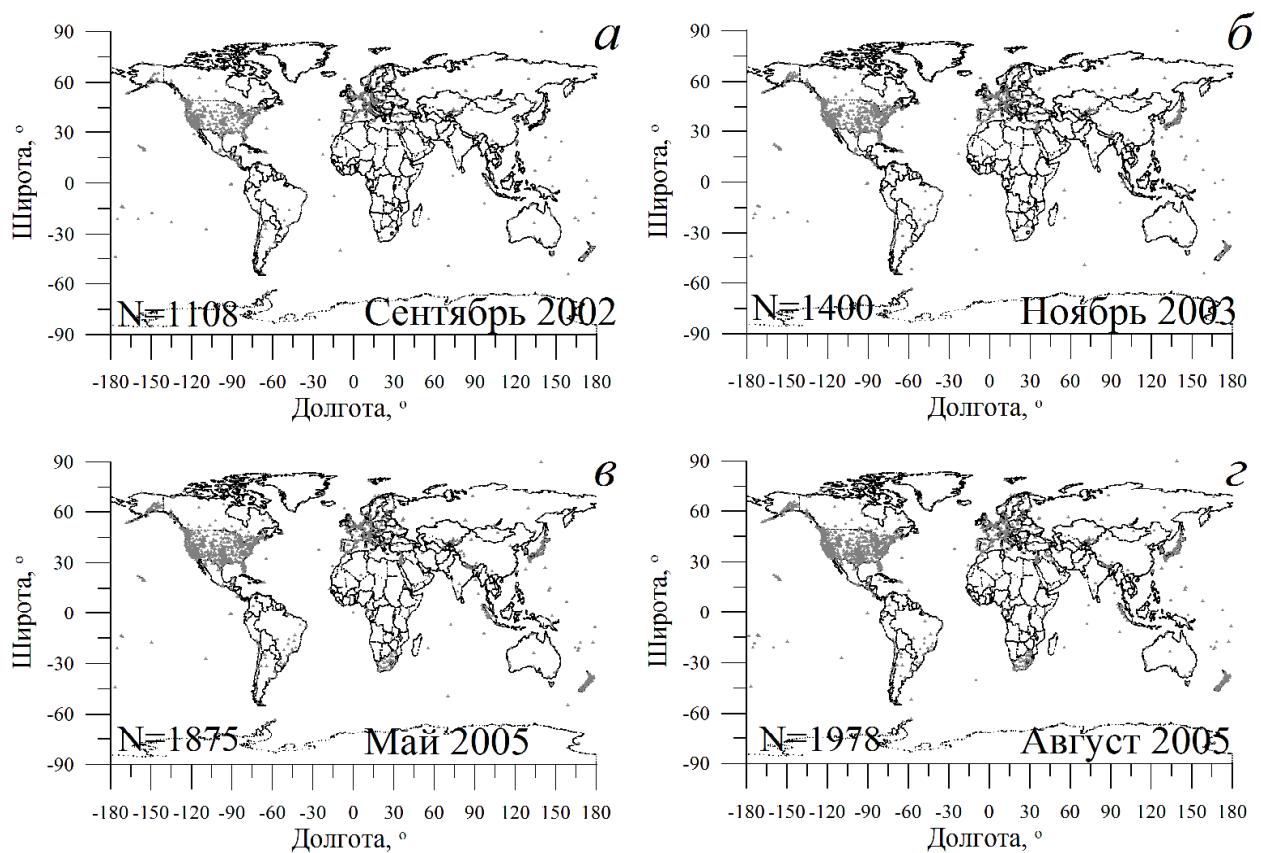


Рисунок 5.3. Геометрия эксперимента. Серые точки отмечают положение приемников, используемых для анализа. *а* – 7 сентября 2002 г., *б* – 20 ноября 2003 г., *в* – 15 мая 2005 г., *г* – 24 августа 2005 г. N – общее число станций.

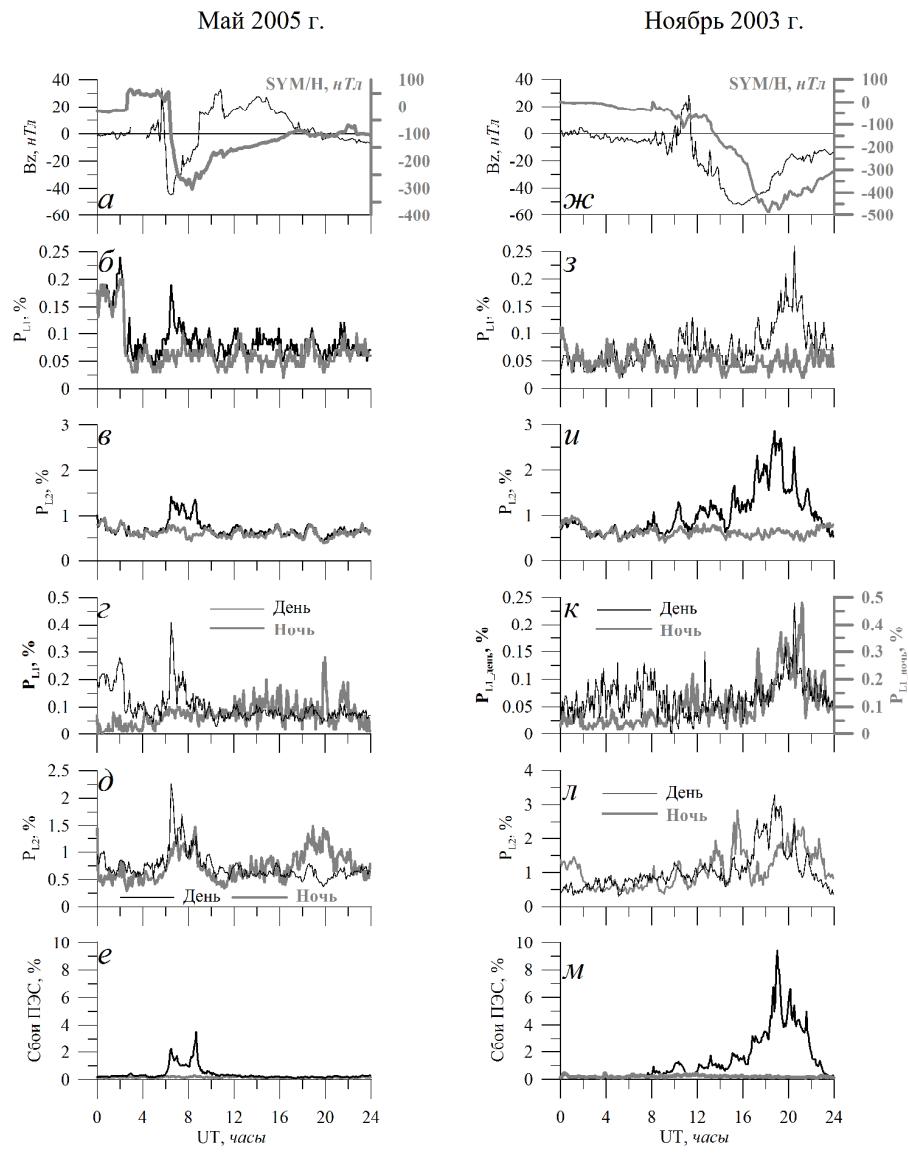


Рисунок 5.4. Изменения плотности срывов сопровождения фазы, сбоев ПЭС и индексов геомагнитной активности во время бури 15 мая 2005 г. (a–e) и супербури 20 ноября 2003 г. (жс–м). a, жс – вариации индекса геомагнитной активности  $SYM-H$  (серая кривая) и  $Bz$ -компоненты ММП (черная кривая). б, з и в, и – плотность срывов сопровождения фазы  $P$  на частотах L1 и L2 во время бурь (черная кривая) и в спокойный день (серая кривая). г, д и к, л – срывы сопровождения фазы на частотах L1 (г, к) и L2 (д, л) на дневной (черная кривая) и ночной (серая кривая) сторонах; (е, м) сбои ПЭС в периоды бурь (черная кривая) и спокойных условиях (серая кривая). В качестве спокойного дня для 2005 г. выбрано 14 мая, для 2003 г. – 19 ноября. Усреднение – 5 мин.

В качестве контрольных дней для 2005 г. рассмотрено 14 мая, для 2003 г. – 19 ноября. Аналогичные параметры для магнитной бури 24 августа 2005 г. и супербури 07 сентября 2002 г. приведены на рис. 5.5. В качестве спокойного дня для 2005 г. выбрано 23 августа, для 2002 г. – 3 сентября.

Рисунок 5.4 показывает, что магнитная буря 15 мая 2005 г. началась после изменения направления  $B_z$  на южное и резкого изменения индекса  $SYM-H$ . Минимальное значение  $SYM-H$  достигло величины  $-302$  нТл. Буру не относят к классу «супер-бурь» в связи с отсутствием суперфонтан-эффекта [Dashora et al., 2009; Ngwira et al., 2012].

Рисунки 5.4 и 5.5 показывают плотность срывов сопровождения фазы глобально ( $\delta$ ,  $z$ ,  $v$ ,  $u$ ), а также на дневной и ночной сторонах ( $z$ ,  $k$ ,  $\delta$ ,  $l$ ), и плотность сбоев ПЭС ( $e$ ,  $m$ ). Использовалось накопление за 5-минутный интервал. Для бури 15 мая 2005 г. уровень срывов сопровождения фазы в спокойных условиях не превышает 0.05–0.1 % на частоте L1 и 0.8–1 % на частоте L2. Наблюдаемое в начале суток ступенчатое увеличение срывов сопровождения фазы схоже как в возмущенных, так и в спокойных условиях. Число сбоев ПЭС в спокойных условиях составляет менее 0.5 %. Во время главной фазы бури 15 мая 2005 г. уровень сбоев достиг  $\sim 3.5$  % от общего числа наблюдений, т.е. в  $\sim 7$  раз превысил фоновый уровень. Следует отметить очевидную зависимость между резким изменением возмущенности магнитного поля и нарастанием вероятности сбоев ПЭС.

Август 2005 г.

Сентябрь 2002 г.

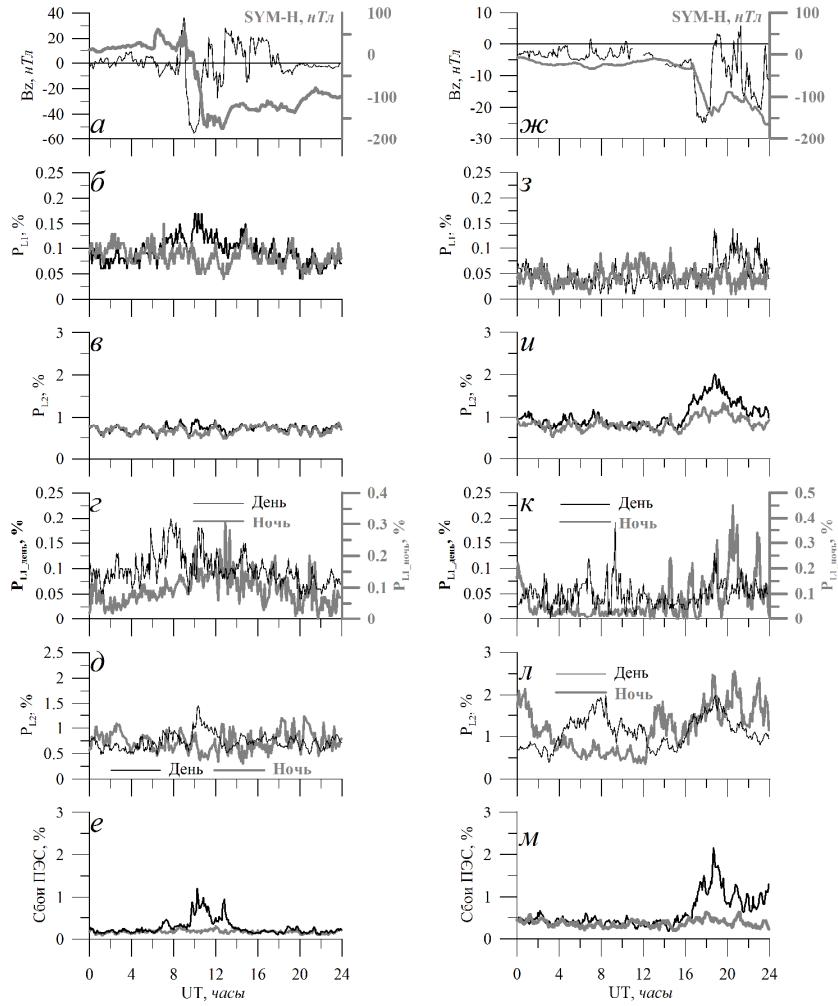


Рисунок 5.5. Изменения плотности срывов сопровождения фазы, сбоев ПЭС, а также индексов геомагнитной активности во время бури 24 августа 2005 г. (а–е) и супербури 7 сентября 2002 г. (жс–м). а, жс – вариации индекса геомагнитной активности *SYM-H* (серая кривая) и *Bz*-компоненты ММП (черная кривая). б, з и в, и – плотность срывов сопровождения фазы *P* на частотах L1 и L2 во время бурь (черная кривая) и в спокойный день (серая кривая). г, д и к, л – срывы сопровождения фазы на частотах L1 (*г, к*) и L2 (*д, л*) на дневной (черная кривая) и ночной (серая кривая) сторонах; (е, м) сбои ПЭС в периоды бурь (черная кривая) и спокойных условиях (серая кривая). В качестве спокойного дня для 2005 г. выбрано 23 августа, для 2002 г. – 3 сентября. Усреднение – 5 мин.

Супербуя 20 ноября 2003 г. была одной из наиболее сильных бурь 23-го цикла солнечной активности [Basu et al., 2007; Mannucci et al., 2008; Zhao et al., 2008]. Во время бури наблюдалось сильное изменение динамики ионосферы и появление неоднородностей различных масштабов. Как можно видеть из рисунка 5.4 перед началом бури величина  $Bz$  некоторое время характеризовалась небольшими отрицательными значениями. Падение индекса  $SYM-H$  во время главной фазы бури достигло  $-488$  нТл, а  $Bz$ -компоненты ММП –  $-52$  нТл. В области экваториальной аномалии в результате суперфонтан-эффекта ПЭС достигало  $160\text{--}180$  TECU, а смещение гребней аномалии составило около  $10^\circ$  [Manucci et al., 2014].

Из рисунка 5.4 можно видеть, что во время супербури 20 ноября 2003 г. плотность срывов сопровождения фазы достигла  $0.25\%$  на частоте L1, и  $\sim 3\%$  на частоте L2. Вклад в общее число срывов сопровождения фазы дали как ночная, так и дневная стороны, в отличие от бури 15 мая 2005 г., где основной дополнительный вклад внесла только дневная сторона (рис. 5.4 *г, д, к, л*). Число сбоев ПЭС также начало значительно расти, превысив фоновый уровень в 50 раз и достигнув  $\sim 9\%$ . Такой рост скорее связан с генерацией мощных неоднородностей [Basu et al., 2007; Mannucci et al., 2008; Zhao et al., 2008] и может иметь естественную причину.

Буря 7 сентября 2002 г. началась с резкого понижения  $Bz$ -компоненты ММП до  $-23$  нТл за 15 мин и далее достижением минимума в  $-26$  нТл. Индекс  $SYM-H$  индекс упал до  $-144$  нТл. После начала восстановления в 19:30 UT произошло еще одно понижение величины  $Bz$ -компоненты ММП, а главная фаза бури продолжалась до  $\sim 01$  UT 8 сентября. Данная буря характеризовалась небольшими величинами  $SYM-H$ , однако суперфонтан-эффект был зарегистрирован [Astafyeva, 2009; de Abreu et al., 2010].

Число срывов сопровождения фазы для спокойных условий 3 сентября не превышало  $0.05\text{--}0.08\%$  на частоте L1 GPS и  $0.8\text{--}1\%$  на L2 GPS (рис. 5.5, *з, и*). Во время бури число срывов выросло до  $0.15\%$  и  $2\%$  для частот L1 и

L2 GPS, соответственно. Значительный вклад обеспечила ночная сторона, что, по-видимому, связано с развитием неоднородностей в ночном экваториальном и среднеширотном секторах [e.g., Basu et al., 2007]. Число сбоев ПЭС увеличилось в 4–5 раз относительно фонового уровня и достигло ~2 %.

Чтобы прояснить какие регионы вносят вклад в общую картину, в диссертационном исследовании был проведен анализ глобального пространственного распределения срывов сопровождения фазы и сбоев ПЭС. Рис. 5.6 показывает глобальное распределение срывов сопровождения фазы сигнала GPS на частотах L1 и L2, а также сбоев ПЭС во время супербури 20 ноября 2003 г. в 18:50 UT.

Можно видеть, что качество приема сигнала на частоте L1 GPS было хуже на высоких широтах, в то же время отдельные срывы наблюдались для сигнала L2 в более широком широтном диапазоне. При этом срывы сопровождения сигнала на частоте L2 наблюдались практически во всех долготных секторах. Максимальное число сбоев ПЭС регистрируется в авроральной и среднеширотной областях в американском секторе. Увеличение сбоев ПЭС хорошо прослеживается в Северном полушарии, хотя и в Южном выявляется их рост, в том числе и на средних широтах.

Рисунок 5.7 показывает широтно-временную динамику приращения плотности срывов сопровождения фазы сигналов GPS (увеличения вероятности) в возмущенный день 20 ноября 2003 г. относительно спокойного дня 19 ноября 2003 г. Для расчета данной картины проводилось вычисление широтно-временной динамики для каждого из дней, а затем вычислялось приращение. В качестве пространственной координаты использовались значения ионосферных точек. Размер бина по времени – 1 ч, по широте – 1°. Штриховые линии показывают начало бури (SSC) – 8:05 UT, 10:45 UT (когда *SYM-H* впервые достиг 100 нТл), а также 18:15 UT (минимум *SYM-H*).

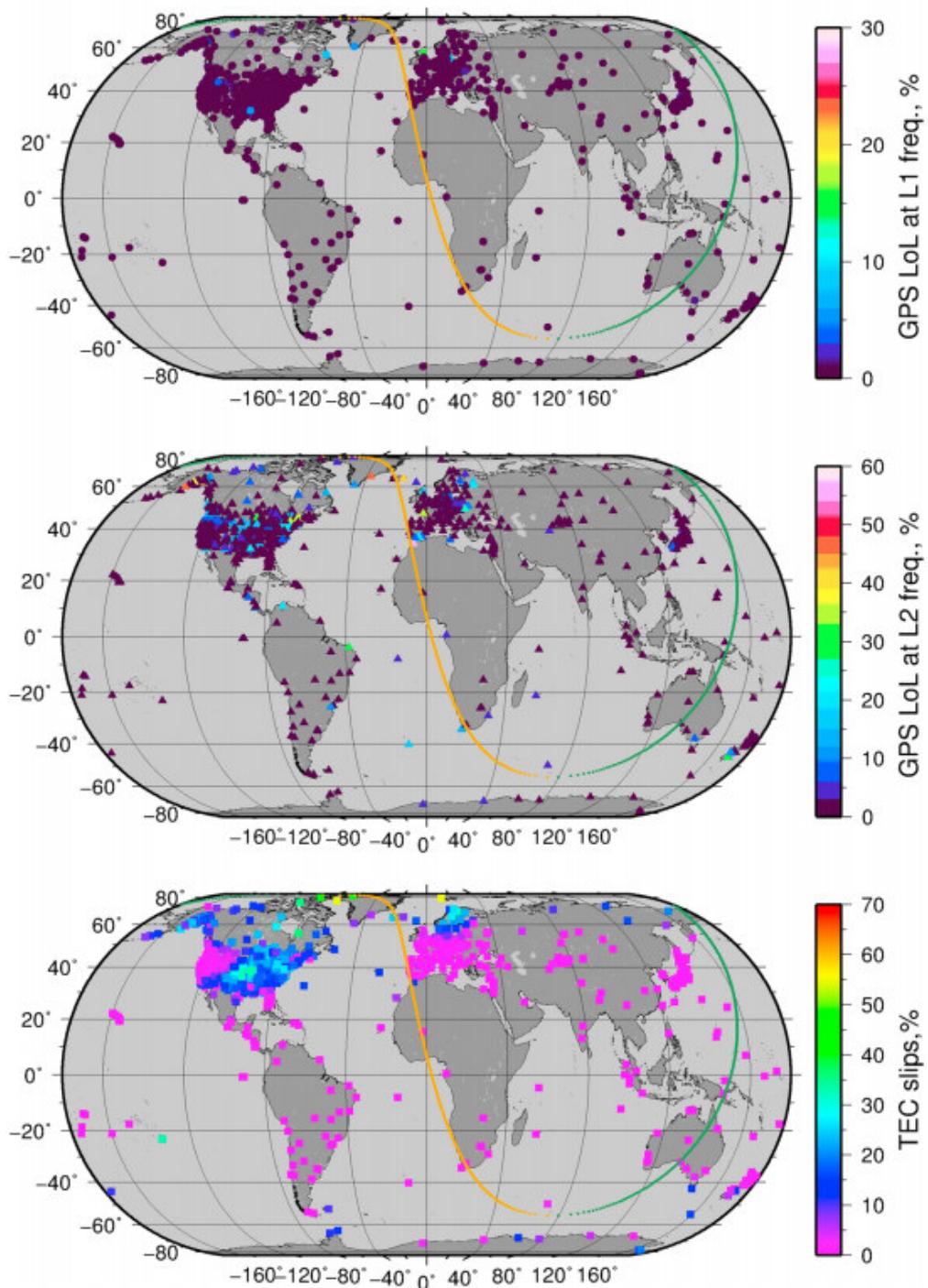


Рисунок 5.6. Пространственное распределение срывов сопровождения фазы на частотах L1 (верхняя панель) и L2 (средняя панель), а также сбоев ПЭС (нижняя панель) для различных станций во время супербури 20 ноября 2003 года в 18:50 UT. Усреднение для каждой станции проводилось по всем спутникам за 10-минутный интервал. Зеленая и оранжевая линия отмечают восходный и заходный солнечный терминатор соответственно.

Ноябрь 2003 г.

День

Ночь

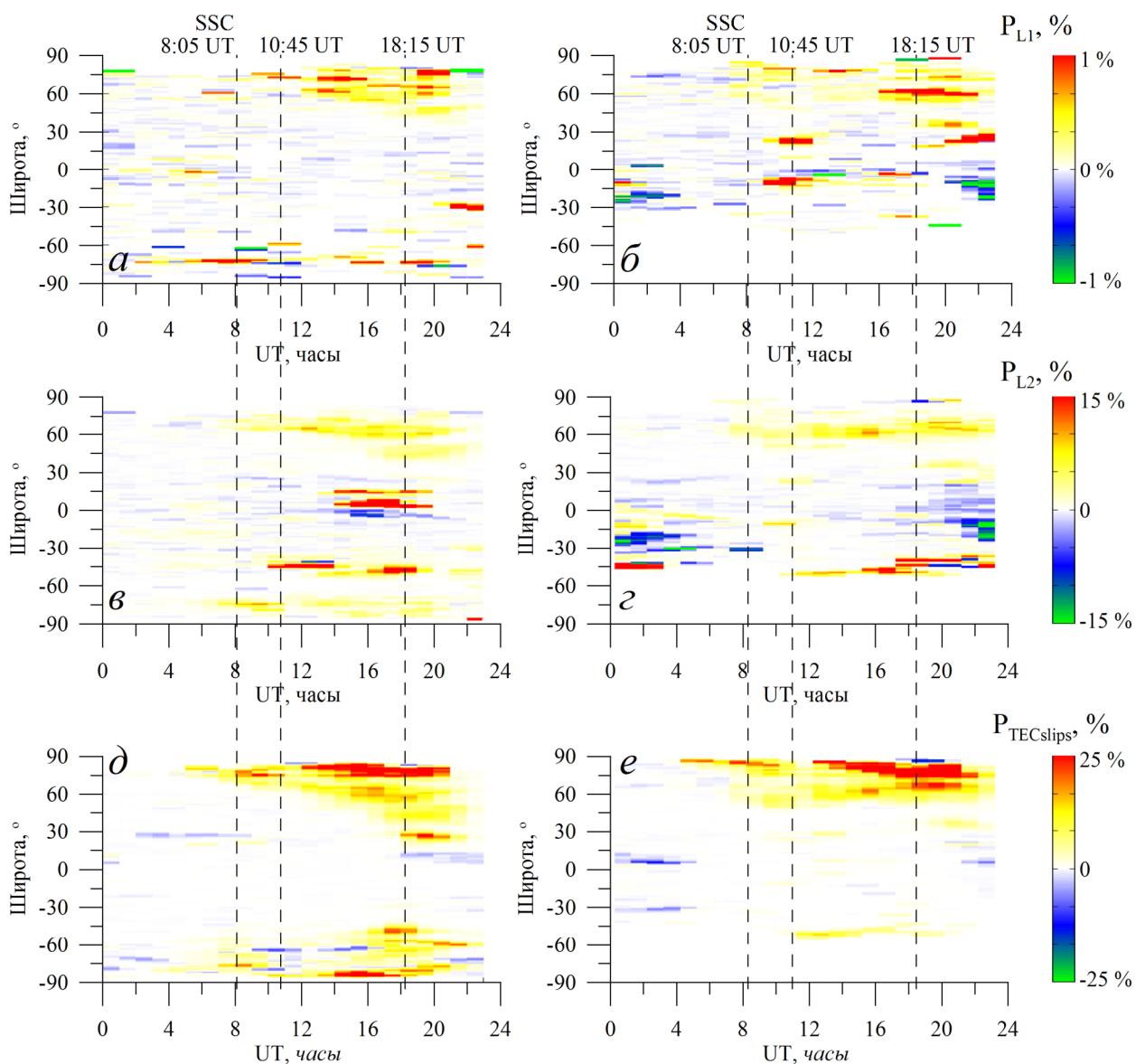


Рисунок 5.7. Приращение плотности срывов сопровождения фазы на частотах L1 (*a, б*) и L2 (*в, г*), а также сбоев ПЭС (*д, е*) в возмущенный день 20 ноября 2003 г. относительно спокойного дня 19 ноября 2003 г. Штриховые линии показывают начало бури (SSC) – 8:05 UT, 10:45 UT, 18:15 UT.

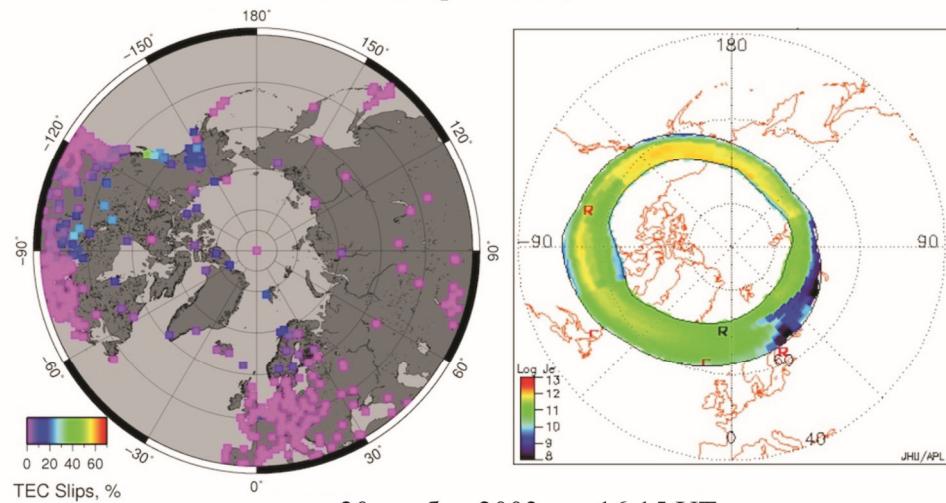
Увеличение плотности срывов сопровождения фазы сигнала на частоте L1 (рис. 5.7, *a*) начинается с 12–13 UT и продолжается до 21–22 UT, согласуясь с главной фазой магнитной бури. При этом можно видеть смещение области увеличения плотности срывов сопровождения фазы на средние широты вплоть до 30° N. На ночной стороне также имеется значительное увеличение плотности срывов сопровождения фазы, хотя эффект выражен не так сильно, и сосредоточен на более высоких широтах.

Пространственные распределения сбоев ПЭС и энергии, поступающей в магнитосферу, представлены на рис. 5.8 (для бури 20 ноября 2003 г.) и рис. 5.9 (для бури 15 мая 2005 г.). Поток энергии оценивался на основе данных ассимиляционной модели OVATION (<http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/>). Можно видеть, что в 10:15 UT на начальной фазе супербури 20 ноября 2003 г. (рис. 5.8, *a*) положение аврорального овала соотносится с областью, в которой наблюдаются повышенные значения сбоев ПЭС. В районе 20:45 UT граница аврорального овала достигла ~60° N в европейском секторе и ~50° N в североамериканском секторе. Также наблюдается расширение области сбоев ПЭС, а в американском секторе область значительного увеличения сбоев ПЭС доходит до 40° N.

Возможны несколько причин несоответствия области аврорального овала и области сбоев ПЭС. Первая заключается в том, что модель OVATION не всегда может учитывать все особенности динамики магнитной бури. Вторая состоит в том, что источником сбоев ПЭС могут быть ионосферные неоднородности, напрямую не связанные с положением овала, например плюмы [Foster, Rideout, 2005] или крупномасштабные перемещающимися ионосферные возмущения, приводящие к генерации мелкомасштабных неоднородностей [Astafyeva et al., 2008; Nishioka et al., 2009].

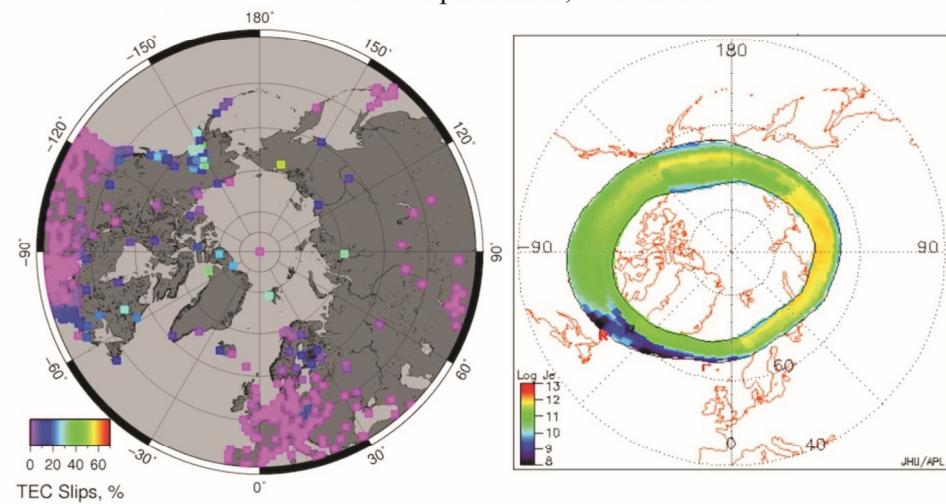
20 ноября 2003 г., ~10:15 UT

*a*



20 ноября 2003 г., ~16:15 UT

*b*



20 ноября 2003 г., ~20:45 UT

*c*

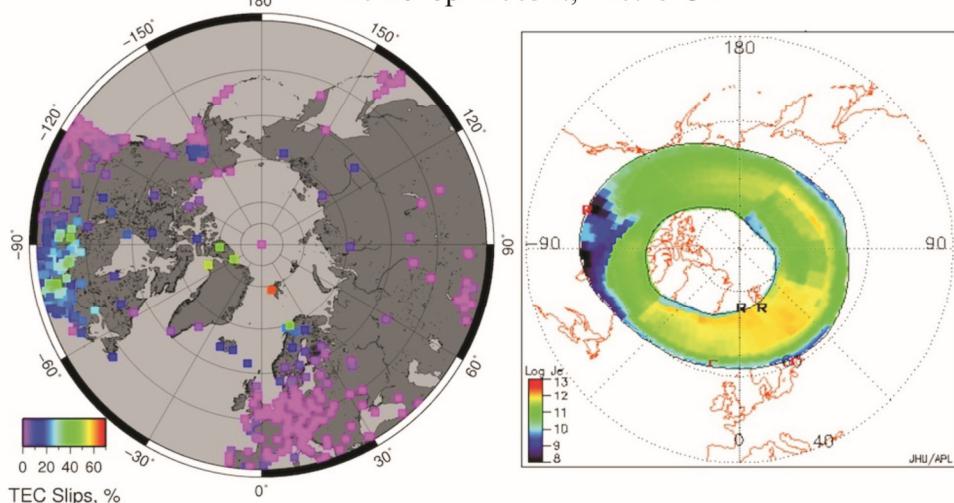
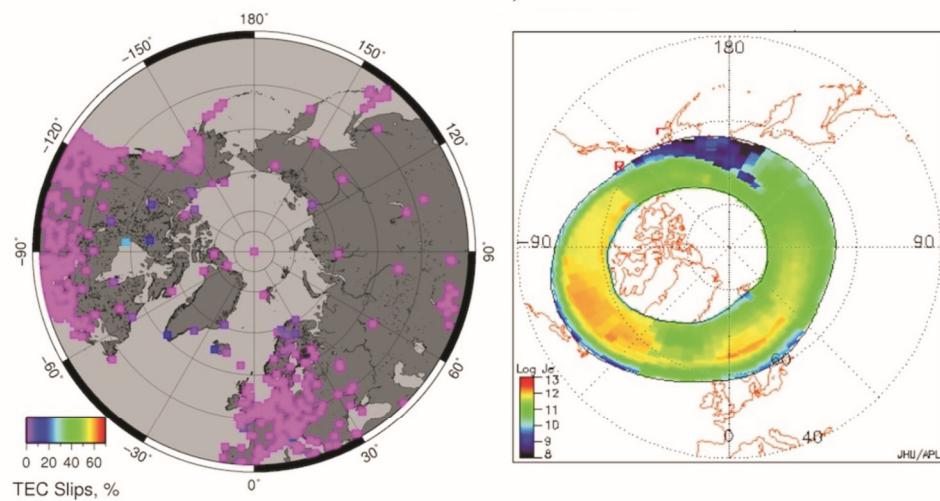


Рисунок 5.8. Пространственное распределение сбоев ПЭС (слева) и поток энергии, поступающей в магнитосферу (справа) во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. в ~10:15 (*a*), ~16:15 (*b*), ~20:45 UT (*c*).

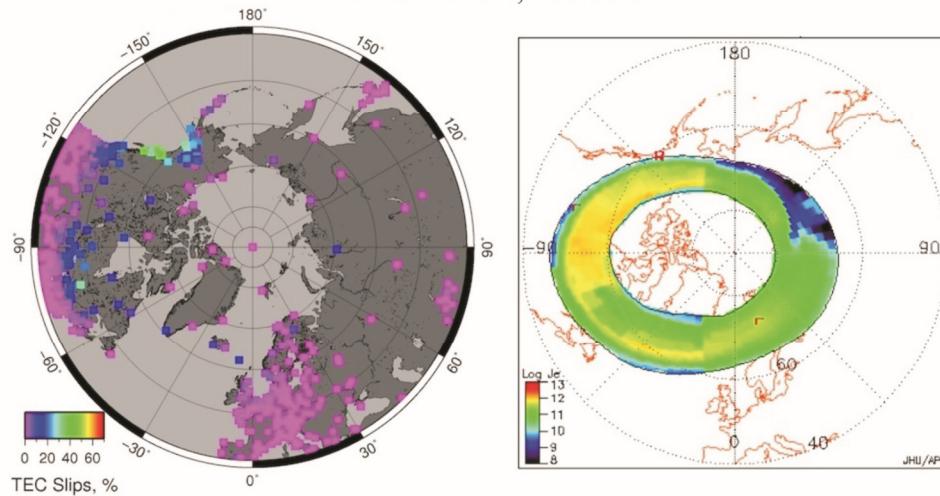
15 мая 2005 г., ~02:45 UT

*а*



15 мая 2005 г., ~06:00 UT

*б*



15 мая 2005 г., ~08:15 UT

*в*

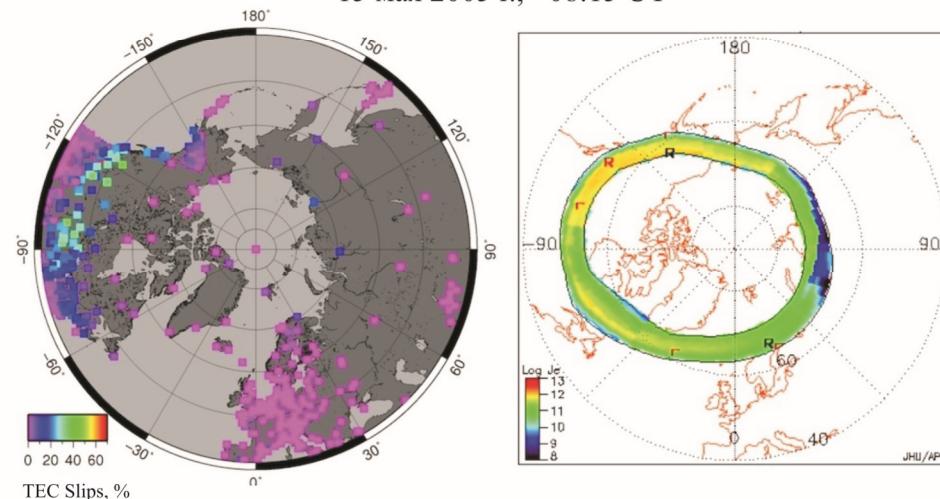


Рисунок 5.9. Пространственное распределение сбоев ПЭС (слева) и поток энергии, поступающей в магнитосферу (справа) во время магнитной бури 15 мая 2005 г. в ~02:45 (*а*), ~06:00 (*б*) и ~08:15 UT (*в*).

Вероятность срыва сопровождения фазы как на основной, так и на вспомогательной частотах во время магнитных бурь увеличивается и может достигать нескольких процентов (на вспомогательной частоте) во время супербури. Можно отметить, что срывы сопровождения фазы сигнала и сбои ПЭС происходят в основном в области аврорального овала, а их вероятность, за исключением случаев сильных магнитных бурь, не превышает нескольких процентов. В работе [Kozyreva et al., 2017] для бури 5 апреля 2010 г. было подтверждено, что основная часть сбоев ПЭС (до  $\sim 70\%$ ) происходит в области аврорального овала. В работах [Черноус и др., 2016, 2018] подтверждается, что овал возмущений и овал сияний пространственно достаточно близки, а во время возмущений сбои в работе аппаратуры ГНСС на авроральных и субавроральных станциях увеличиваются.

### **5.1.2. Супербури 24-го цикла солнечной активности**

24-й цикл солнечной активности был гораздо слабее предыдущего 23-го цикла. В то же время в 2015 г. произошел ряд мощных магнитных бурь, которые явились серьезным испытанием для надежности работы ГНСС. В настоящем параграфе проведен анализ срывов сопровождения фазы и сбоев ПЭС во время магнитной бури 17 марта 2015 г. [Astafyeva et al., 2015; Borries et al., 2016] и бури 22–23 июня 2015 г. [Astafyeva et al. 2016; Reiff et al., 2016]. Обе бури имели и общие черты, и принципиальные различия: время начала и сезон, что существенно сказалось на их развитии [Kashcheyev et al., 2018]. Обе бури развивались на фоне спокойной магнитосферной обстановки [Kashcheyev et al., 2018]. Динамика индексов, характеризующих состояние ОКП во время бурь, приведена на рисунке 5.10: *a*, *b* – 17–18 марта 2015 г.; *b*, *c* – 22–23 июня 2015 г. На панелях *a* и *b* приведена динамика индекса возмущенности горизонтальной компоненты геомагнитного поля *SYM-H* (черная кривая) и *Bz*-компоненты ММП (серая кривая); *b* и *c* – плотность потока протонов.

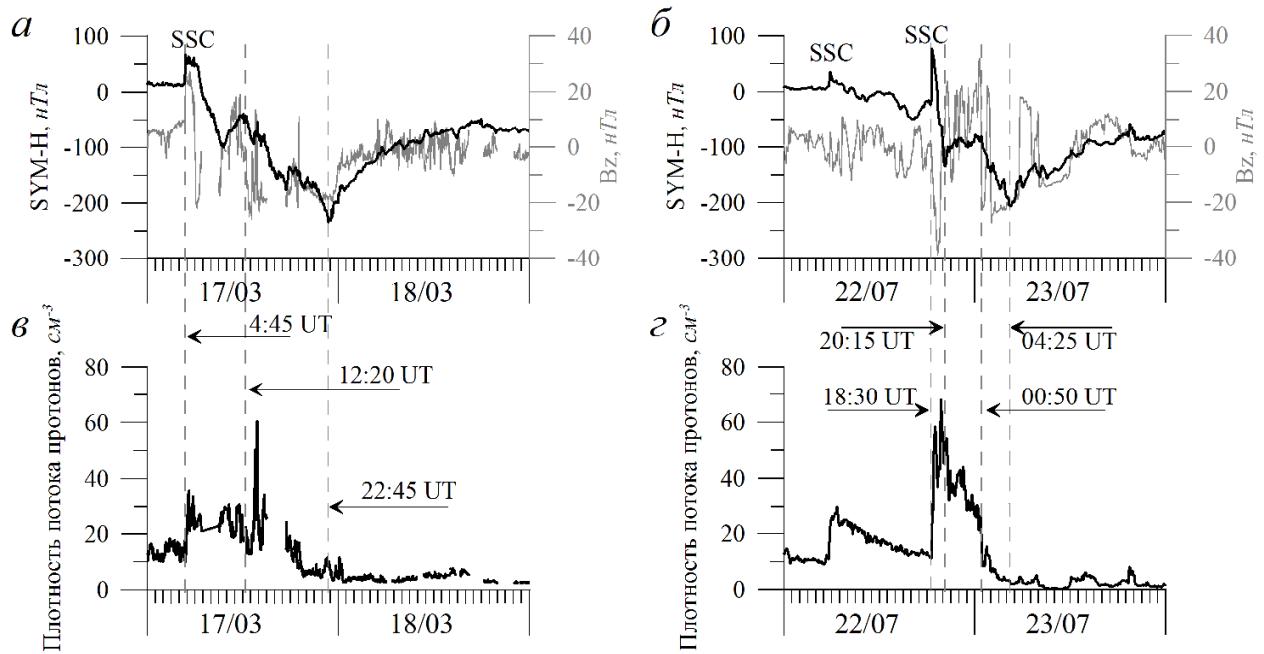


Рисунок 5.10. Индексы состояния околоземного космического пространства. *а*, *б* – *SYM-H* (черная кривая) и *B<sub>Z</sub>*-компоненты ММП (серая кривая); *в*, *г* – плотность потока протонов. Данные представлены для бурь 17–18 марта 2015 г. (*а*, *в*) и 22 июня 2015 г. (*б*, *г*).

Хотя буря 17 марта 2015 г. не сопровождалась значительной вспышкой X или M класса [Kamide and Kusano 2015], индекс *SYM-H* достиг значения  $-233$  нТл, что сделало эту бурю мощнейшей в 24-м цикле солнечной активности. Приход ударной волны был зарегистрирован в 04:45 UT, после чего последовало его быстрое падение [Astafyeva et al., 2015]. В высоких широтах наблюдалась интенсивная дискретная аврора [Blagoveshchensky and Sergeeva, 2016]. Магнитная буря вызвала ряд эффектов в ионосфере, включая увеличение электронного содержания выше 520 км до 100–150 % [Astafyeva et al., 2015]. В высоких широтах, наоборот, наблюдался отрицательный эффект в электронной концентрации во всех долготных секторах. Polekh et al. [2017] зарегистрировали смещение главного ионосферного провала в экваториальном направлении.

Borries et al. [2016] зарегистрировали крупномасштабные ионосферные возмущения (КМПИВ) в европейском и африканском секторах. Ими выделены три типа возмущений: синхронное возмущение ПЭС; КМПИВ с длиной волны  $\lambda \sim 3600$  км, периодом  $T \sim 120$  мин, скоростью  $V \sim 500$  м/с; набор КМПИВ с  $\lambda \sim 2000$  км,  $T \sim 60$  мин,  $V \sim 600$  м/с. На основе данных GPS и ГЛОНАСС Zakharenkova et al. [2016] наблюдали КМПИВ в глобальном масштабе, в том числе в противоположных полушариях, авторы также зарегистрировали супер-КМПИВ с длиной волнового фронта  $\sim 10000$  км и  $\lambda \sim 1200\text{--}2500$  км. Kil et al. [2016] зарегистрировали расширение широтной области генерации экваториальных пузырей.

Carter et al. [2016] показали, что если в постзакатном секторе на всех долготах происходило подавление генерации экваториальных пузырей, то в постполуночном секторе имело место значительное усиление. Jacobsen and Andalsvik [2016] обнаружили увеличение ошибки позиционирования (в режимах RTK и PPP) в европейском секторе в несколько раз.

Магнитная буря 22–23 июня 2015 г. была идентифицирована в реальном времени и получила «красный уровень опасности» (“red alert”) [Reiff et al.,

2016]. Возмущение геомагнитного поля по индексу *SYM-H* достигло  $-207$  нТл. Буря началась с прихода трех межпланетных ударных волн [Astafyeva et al. 2017]: в 16:45 UT 21 июня, 5:45 UT 22 июня, 18:30 UT 22 июня. Основная часть бури началась с приходом второй ударной волны [Astafyeva et al., 2017]. В 18:38 UT 22 июня 2015 г. была зарегистрирована интенсификация у-компоненты электрического поля в экваториальном регионе, и  $E \times B$ -дрейфа на дневной стороне. При этом основную роль играло быстрое проникновение электрического поля (prompt penetration electric field). Быстрое проникновение электрического поля [Astafyeva et al., 2016] привело к генерации ионосферного «суперпузыря», достигшего в европейском регионе средних широт [Cherniak and Zakharenkova, 2016] и повлиявшего на точность работы GPS и EGNOS в Европе [Cherniak and Zakharenkova, 2016].

Чтобы провести анализ устойчивости навигационных систем 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. (рис. 5.11) и 22 июня 2015 г. (рис. 5.12). Чёрные кривые – данные для магнитной бури, серые – для контрольного дня (16 марта и 21 июня, соответственно). Срывы сопровождения фазы сигнала GPS представлены на панелях *a*, *d*, *u*, *n*, ГЛОНАСС – *b*, *e*, *k*, *o*, Galileo – *v*, *жс*, *л*, *n*, SBAS – *г*, *з*, *м*, *p*. Панели *a*–*г*, *d*–*з*, *u*–*м* – срывы сопровождения фазы на частотах L1, L2 и L5, соответственно; *n*–*p* – отсутствие приема любых сигналов.

Увеличение числа срывов сопровождения фазы относительно фонового уровня не отмечается. Для обеих бурь наблюдается увеличение числа пропусков измерений на вспомогательной частоте L5 Galileo (рис. 5.11, *n*; 5.12, *n*).

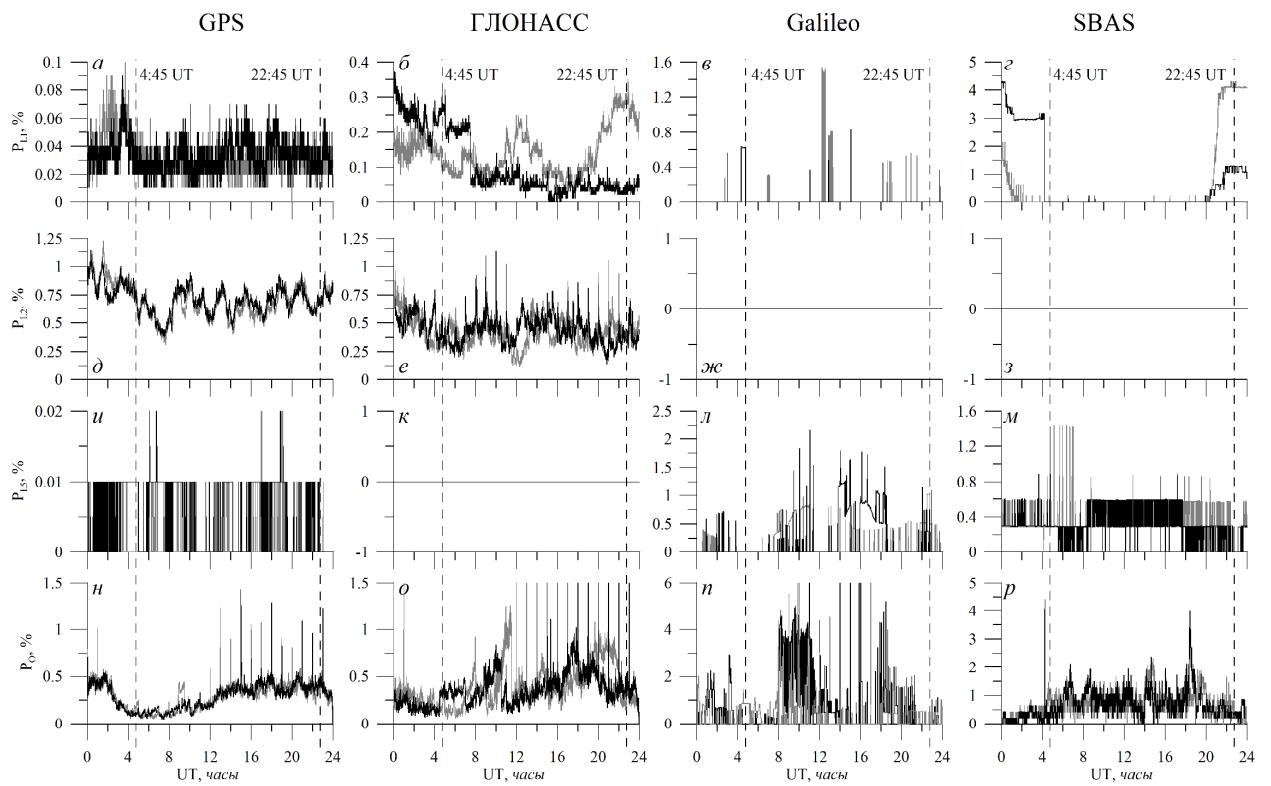


Рисунок 5.11. Срывы сопровождения фазы сигнала GPS (*a, д, u, н*), ГЛОНАСС (*б, е, к, о*), Galileo (*в, жс, л, н*), SBAS (*г, з, м, п*) во время магнитной бури 17 марта 2015 г. (черная кривая) и контрольного дня – 16 марта 2015 г. (серая кривая). Панели *a–г*, *д–з*, *u–м* – срывы сопровождения фазы L1, L2, L5, соответственно; *н–п* – отсутствие приема любых сигналов.

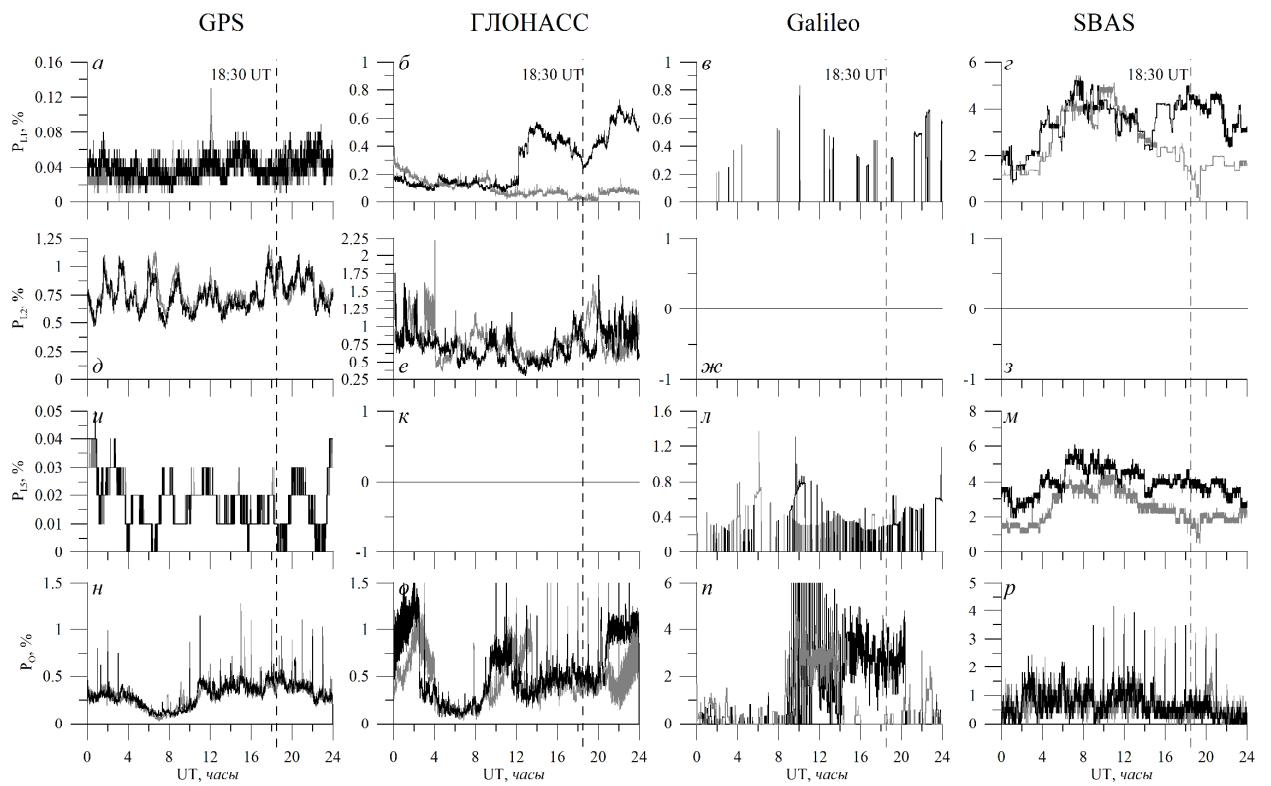


Рисунок 5.12. Срывы сопровождения фазы сигнала GPS (*a, д, и, н*), ГЛОНАСС (*б, е, к, о*), Galileo (*в, ж, л, н*), SBAS (*г, з, м, п*) во время магнитной бури 22 июня 2015 г. (черная кривая) и контрольного дня – 21 июня 2015 г. (серая кривая). Панели *a–г*, *д–з*, *и–м* – срывы сопровождения фазы L1, L2, L5, соответственно; *н–п* – отсутствие приема любых сигналов.

Для 17 марта 2015 г. реакция непосредственно на начало бури не проявляется, но регистрируется повышенный уровень срывов сопровождения фазы на частоте L5 в возмущенный день. Повышение начинается задолго до минимума Dst и совпадает по времени с увеличением в контрольный день, однако превосходит его по амплитуде. Похожая картина имеет место и 22 июня 2015 г. В данных ГЛОНАСС для первой ударной волны 22 июня 2015 г. наблюдается повышение плотности пропусков данных, однако оно не превосходит регулярные суточные изменения.

Таким образом, для обеих исследуемых бурь 24-го цикла следует отметить высокую стабильность измерений и низкую корреляцию с фазой бури. При этом, как правило, в возмущенный день общий уровень срывов сопровождения сигнала для навигационных систем выше. Для GPS срывы сопровождения фазы на основной частоте не превышали 0.1 %, на L2 – 1 %, на L5 – как правило, 0.01 %. Как в спокойных, так и в возмущенных условиях теряется ~ 0.02–0.5 % измерений (пропуски отсчетов).

Уровень сбоев ПЭС (рис. 5.13) характеризуется значительным ростом (до 10 раз) во время главной фазы бурь. Следует отметить, что максимальное число сбоев наблюдается в минимуме *SYM-H*, а на фазе восстановления их количество снижается, несмотря на достаточно большие отрицательные значения индекса *SYM-H*. При этом для обеих бурь число сбоев ПЭС в целом не превосходит 1 %.

## 5.2. Срывы сопровождения фазы и сбои ПЭС в высоких широтах

Для анализа особенностей измерений ПЭС в высокоширотном регионе в рамках диссертационного исследования были обработаны данные шести станций, три из которых расположены в высокоширотном регионе: BAKE ( $263.9^{\circ}$  E,  $64.3^{\circ}$  N), NYA1 ( $11.9^{\circ}$  E,  $78.9^{\circ}$  N), TIXI ( $128.9^{\circ}$  E,  $71.6^{\circ}$  N), и три – в среднеширотном: AVCH ( $158.7^{\circ}$  E,  $53.2^{\circ}$  N), LIST ( $104.9^{\circ}$  E,  $51.8^{\circ}$  N); VIS0 ( $18.4^{\circ}$  E,  $57.6^{\circ}$  N).

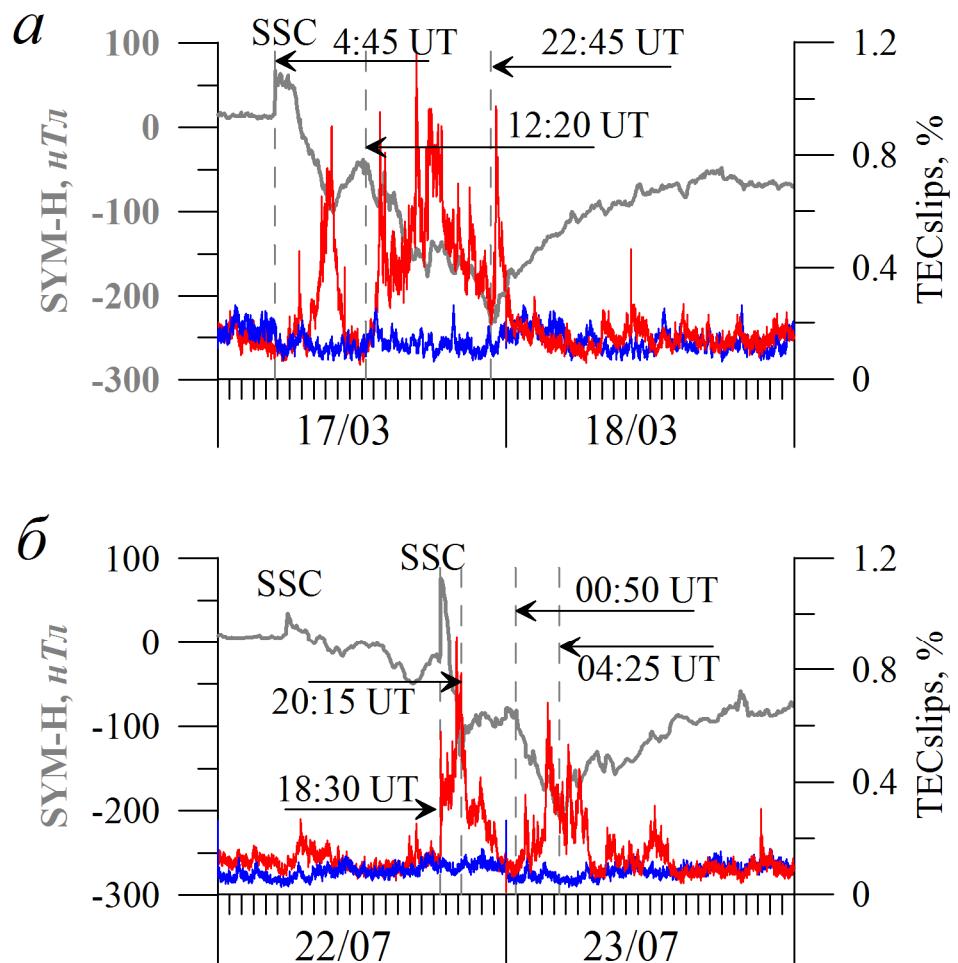


Рисунок 5.13. Сбои ПЭС для 17–18 марта 2015 г. (а) и 22–23 июня 2015 г. (б). Красная кривая возмущенные дни (17–18 марта и 22–23 июня, соответственно), синяя кривая – контрольные дни (16 марта и 21 июня). Серая кривая – индекс  $SYM-H$ .

Станция LIST входит в сеть ГНСС-приемников ИСЗФ СО РАН, AVCH – в Камчатскую сеть KamNet, остальные станции – в международную сеть IGS. Для анализа использовались данные за ноябрь 2014 г. – июль 2015 г. Здесь за сбой ПЭС принимался скачок между двумя соседними измерениями ПЭС, превышающий 1 ТЕСУ/мин с целью более чувствительной регистрации эффектов. Для выявления сезонной зависимости проводилось разделение на летний и зимний периоды. Период выбирался как  $\pm 30$  дней относительно соответствующего солнцестояния.

Рисунок 5.14 показывает гистограммы распределений средних за час плотностей сбоев ПЭС (*б*, *г*) и срывов измерения псевдодальности на основной частоте Р1 (*а*, *в*). Данные приведены для среднеширотной станции LIST и высокоширотной станции TIXI. На средних широтах число случаев, когда плотность срывов измерения Р1 превышает 1 % для системы ГЛОНАСС выше, чем для GPS. Однако число таких случаев невелико. Для GPS средняя плотность срывов измерений в большинстве случаев не превышает 1 %. На высоких широтах картина меняется. На одном приемнике для GPS число срывов измерений Р1 может достигать 5 %, в то время как для ГЛОНАСС – меньше 1 %. Более высокая стабильность ГЛОНАСС по сравнению с GPS, по-видимому, обусловлена более высоким наклонением орбиты и соответственно более высокими углами места на спутники и большей мощностью принимаемого сигнала.

В таблице 5.1 приведены параметры линейной регрессии, коэффициенты корреляции (*r*) между плотностью сбоев ПЭС  $N_1$  ТЕСУ/мин и индексом авроральной активности AE, а также стандартная ошибка  $\sigma/\sqrt{n}$ . Отдельно были рассчитаны параметры линейной регрессии для спокойных ( $AE < 600$  нТл) и возмущённых ( $AE > 600$  нТл) геомагнитных условий. Из таблицы следует, что коэффициент корреляции на высоких широтах больше, чем на средних. Для высокоширотных станций корреляция для спокойных условиях выше, чем для возмущённых.

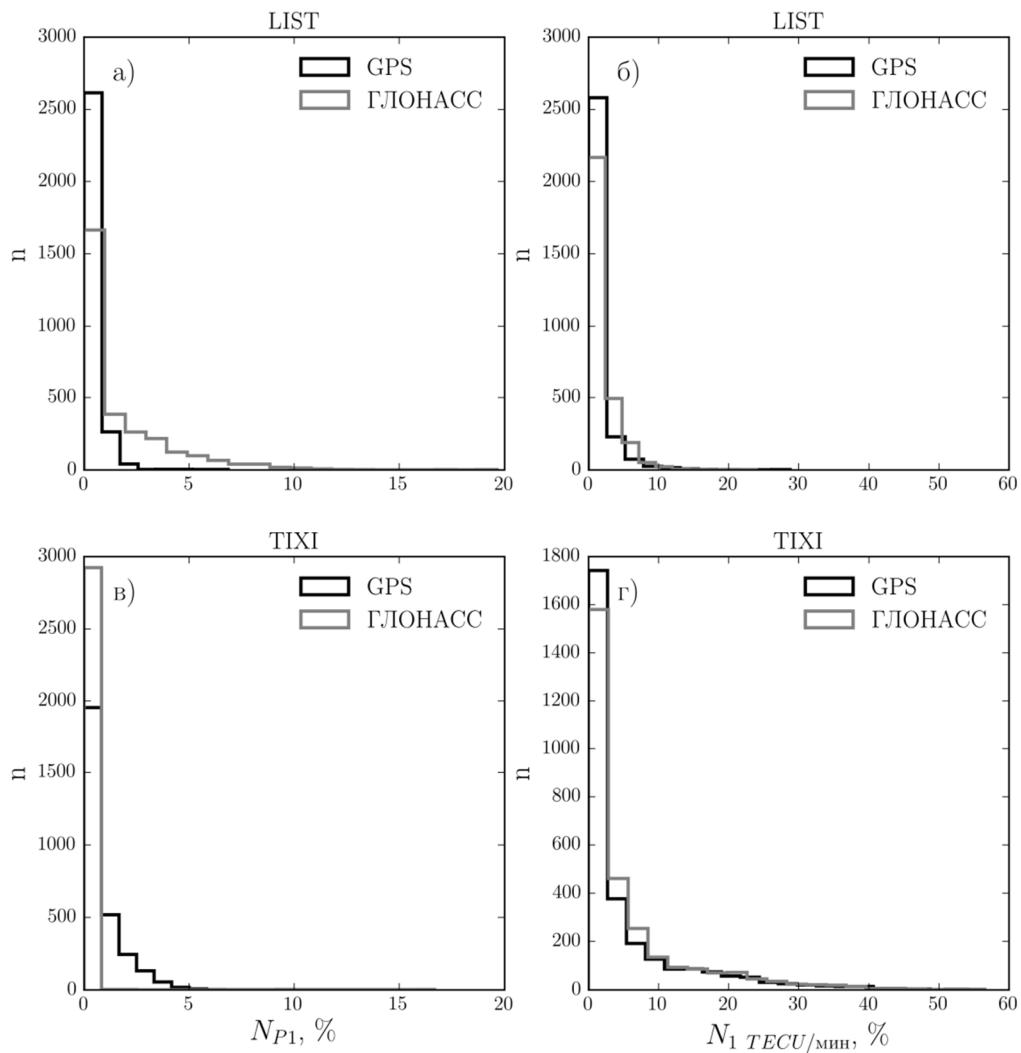


Рисунок 5.14. Гистограммы распределения (n) средних за час плотности срывов измерения  $P1$  (левая колонка) и плотности сбоев ПЭС (правая колонка) для ГЛОНАСС и GPS в среднеширотном ( $\alpha, \beta$ ) и высокоширотном ( $\gamma, \delta$ ) регионах.

Таблица 5.1. Параметры линейной регрессии и коэффициенты корреляции плотности сбоев ПЭС  $N_1$  TECU/мин и индекса AE

Средние широты												
	AVCH				LIST				VIS0			
	Лето		Зима		Лето		Зима		Лето		Зима	
	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600
a	0.0009	0.0013	-0.0005	0.0004	0.0011	-0.0005	-0.0010	0.0044	0.0008	0.0085	0.0039	0.0139
b	0.9984	0.6618	1.6970	1.9852	1.5075	2.8724	2.0913	-0.6113	0.3569	-4.4484	1.1304	-6.4008
r	0.0898	0.1146	-0.0245	0.0216	0.0827	-0.0396	-0.0532	0.1490	0.1194	0.3798	0.1999	0.5300
$\sigma/\sqrt{n}$	0.0003	0.0012	0.0005	0.0032	0.0004	0.0013	0.0005	0.0046	0.0002	0.0023	0.0005	0.0035
Высокие широты												
	BAKE				NYA1				TIXI			
	Лето		Зима		Лето		Зима		Лето		Зима	
	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600	AE≤600	AE>600
a	0.0237	0.0167	0.0527	-0.0029	0.0176	0.0036	0.0352	0.0250	0.0150	0.0210	0.0436	0.0269
b	0.7611	3.0009	6.4944	41.9049	2.1952	7.9540	10.4186	16.8782	-0.3185	-3.7805	1.2802	14.1928
r	0.5957	0.3525	0.5394	-0.0344	0.4870	0.0873	0.4079	0.2340	0.5046	0.4446	0.6313	0.4106
$\sigma/\sqrt{n}$	0.0009	0.0048	0.0022	0.0133	0.0008	0.0044	0.0021	0.0164	0.0007	0.0046	0.0014	0.0095

Для среднеширотных станций имеет место обратная картина. Это может объясняться смещением области аврорального овала в период геомагнитных возмущений в направлении средних широт.

Плотность сбоев ПЭС на средних широтах практически не зависит от индекса AE (а также Kp) и, как правило, не превышает 12 % в данных без усреднения. Анализ данных 200 высокоширотных станций [Захаров и др., 2016] подтвердил рост срывов сопровождения фазы и сбоев ПЭС в высокоширотном регионе во время геоэффективных событий.

### 5.3. Повышение стабильности ГНСС-измерений

#### 5.3.1. Повышение порога устойчивости измерения фазы во время радиовспышек

Солнечное радиоизлучение, являясь дополнительным шумом на входе приемника, оказывает значительно влияние на качество навигации методами ГНСС. Как указывалось выше, более ранние исследования показывали

уменьшение порога устойчивости сопровождения навигационного сигнала от 200 000 до 40 000 с.е.п. [Klobuchar et al., 1999] и даже до 4000 с.е.п. [Afraimovich et al., 2008c; Афраймович и др., 2009].

В минувшее десятилетие ГНСС претерпела существенную модернизацию как орбитального сегмента, так и аппаратуры пользователей. Данная модернизация была проведена в том числе и с учетом негативного действия космической погоды. В диссертационном исследовании проведен анализ качества работы ГНСС с учетом современного состояния. Ключевой вопрос – насколько проведенные меры оказались эффективными для повышения устойчивости работы аппаратуры пользователя ГНСС в условиях экстремальных факторов космической погоды.

В работе проанализированы две вспышки X-класса 6 сентября 2017 г. (249 день года – DOY, day of year). В этот день произошло несколько вспышек M-класса и две вспышки X-класса. Первая вспышка, имевшая класс X2.2, началась в 8:57 UT и достигла максимума по рентгеновскому излучению в 09:10 UT. Вторая вспышка имела класс X9.3 и была мощнейшей вспышкой 24 цикла солнечной активности. Она началась в 11:53 UT и достигла максимума в 12:02 UT. Вспышка X9.3 сопровождалась интенсивным радиоизлучением, длящимся  $\sim 1.5$  ч и достигшим 19604 с.е.п. ( $10^{-22}$  Вт·м $^{-2}$ ) на частоте 1415 МГц. Интенсивность вспышки превысила минимальный порог, который был установлен в работах [Afraimovich et al. 2008a; Афраймович и др., 2009]. При этом геомагнитная обстановка была спокойная: индекс *SYM-H* варьировался в диапазоне 6–10 нТл.

На рисунке 5.15 представлена динамика срывов сопровождения фазы на основных рабочих частотах GPS (левая колонка), ГЛОНАСС (средняя колонка), Galileo (правая колонка). Красная кривая – данные для возмущенного дня (249 DOY), серая кривая – для контрольного (248 DOY). Черная кривая – солнечное радиоизлучение на частоте 1415 МГц по данным радиоспектрометра SanVito.

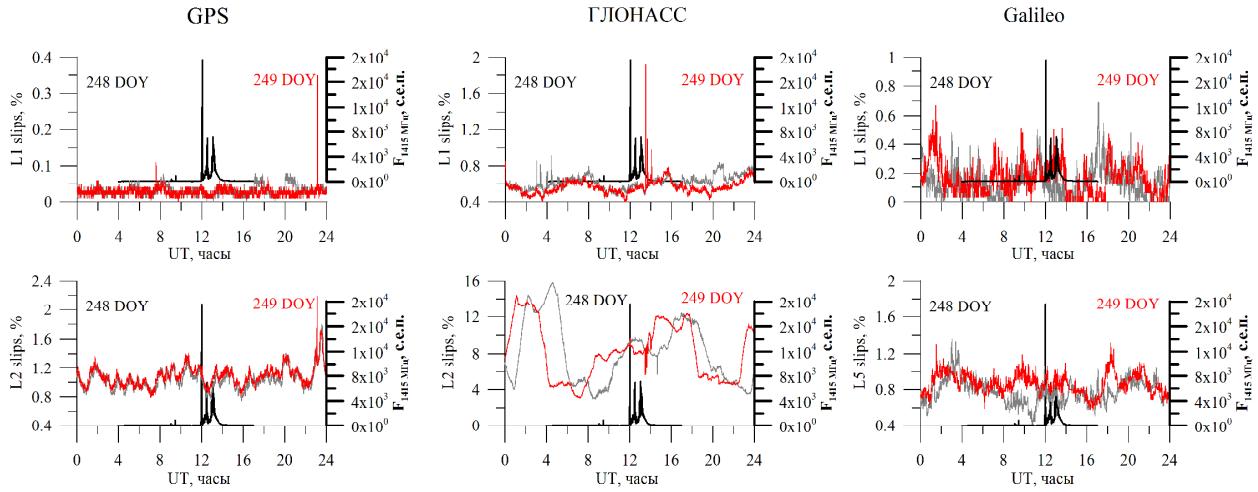


Рисунок 5.15. Динамика срывов сопровождения фазы на основных рабочих частотах GPS (левая колонка), ГЛОНАСС (средняя колонка), Galileo (правая колонка). Красная кривая – 6 сентября 2017 г. (249 DOY), серая кривая – 5 сентября (248 DOY), черная кривая – поток солнечного радиоизлучения по данным радиоспектрометра SanVito (1415 МГц).

Для GPS и ГЛОНАСС представлены данные на частотах L1 (верхние панели), L2 (нижние панели), для Galileo – L1 и L5.

В глобальном масштабе значительного увеличения вероятности срывов сопровождения фазы сигнала как на основных, так и на вспомогательных частотах не наблюдается. Это входит в противоречие с полученными в более ранних исследованиях результатами, предполагающими, что увеличение уровня шума на входе приемника до 4000–12000 с.е.п. является угрозой стабильности навигационных систем. Хотя (см. ниже) непосредственно в подсолнечной области эффекты вспышки наблюдаются.

Следует отметить, что срывы измерения радионавигационных параметров, как правило, наблюдаются на вспомогательной частоте L2. Причина этого заключается в том числе в меньшей мощности спутникового сигнала на частоте L2, а для GPS – и в снижении эффективного значения сигнал/шум вследствие полукодовой обработки закрытого сигнала. Другой причиной могло явиться возросшее качество развернутого наземного оборудования (как сами приемники, так и антенны).

Другим важным параметром, как уже обсуждалось выше, является плотность сбоев ПЭС. Динамика сбоев ПЭС (порог аналогичен используемому в 5.1.1) 6 сентября 2017 г. во время вспышки X9.3 показана на рис. 5.16 красной кривой. На верхней панели черной кривой приведена динамика сбоев ПЭС в контрольный спокойный день 5 сентября (248 DOY). Можно видеть, что общий фоновый уровень достаточно близок, но во время вспышки наблюдается резкий узкий пик в плотности сбоев.

На нижней панели в большем масштабе в дополнение к данным рентгеновского излучения (зеленая кривая), приведены поток солнечного радиоизлучения по данным радиоспектрографа SanVito на частоте 1415 МГц (черная кривая) и УФ-излучение Солнца на длине волн 0.1–50 нм по данным SOHO/SEM (синяя кривая).

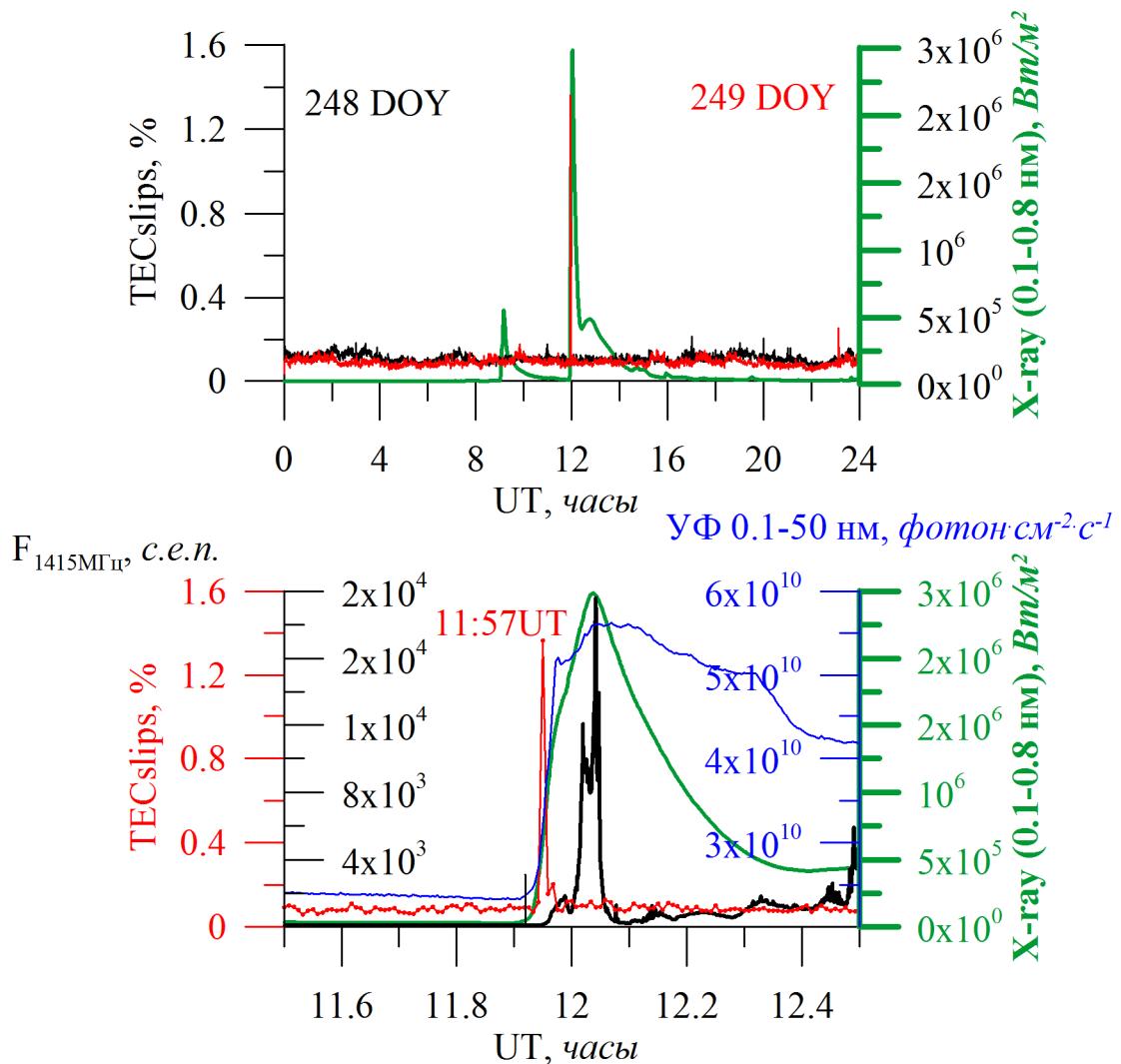


Рисунок 5.16. Динамика сбоев ПЭС 6 сентября 2017 г. (красная кривая) и рентгеновского излучения 0.1–0.8 нм по данным GOES-13 (зеленая кривая). Черная кривая на верхней панели – динамика сбоев ПЭС 5 сентября (248 DOY). На нижней панели черная кривая – поток солнечного радиоизлучения по данным радиоспектрометра SanVito (1415 МГц), синяя кривая – динамика УФ-излучения Солнца на длине 0.1–50 нм по данным SOHO/SEM.

Увеличение плотности сбоев достигло 1.36 %, что в целом меньше, чем во время супербурь 23-го цикла солнечной активности, и соотносится с уровнем сбоев ПЭС во время супербурь 24-го цикла. Следует отметить, что пик сбоев ПЭС в 11:57 не соответствует по времени всплеску солнечного радиоизлучения. При этом он согласуется с началом вспышки в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах и может быть связан с внезапным увеличением ПЭС вследствие повышенной ионизации. При этом, как показано в [Yasyukevich et al., 2018], средняя производная ПЭС не достигала 1.5 TECU/мин даже в экваториальной (подсолнечной) области. На низких углах места в подсолнечной области порог регистрации сбоев ПЭС 3 TECU/30 с мог быть превышен. Однако следует отметить, что в экваториальной области было достаточно мало станций и их вклад составлял существенно меньше 1.3 % от общего количества измерений. Данный факт указывает на то, что наблюдаемый рост плотности сбоев ПЭС связан не только с внезапным резким возрастанием ПЭС, но и с внешним воздействием.

Результаты диссертационного исследования указывают на повышение порога устойчивости измерения фазы на современном этапе развития ГНСС.

### **5.3.2. Повышение мощности принимаемого навигационного сигнала GPS**

Одним из определяющих факторов, влияющих на качество оценки параметров принимаемого сигнала, является мощность излучаемого спутниками радиосигнала. Снижение уровня сигнала на входе приемника ГНСС во время солнечных радиовспышек было показано в [Klobuchar et al., 1999]. Как было неоднократно показано [Демьянов и Ярюкевич, 2014; Захаров и др., 2016], срывы сопровождения фазы навигационного сигнала происходят в основном на вспомогательной частоте L2 вследствие двух факторов: меньшая мощность передатчика на этой частоте и неизвестная

структурой кода (GPS). Согласно интерфейсному контрольному документу GPS [IS-GPS-200J, 2018], мощность излучаемого сигнала в системе на новых спутниках, начиная с блока IIR-M, была увеличена таким образом, чтобы повысить требования на минимально принимаемую мощность на наземном приемнике. Минимальная требуемая мощность на наземном приемнике для различных блоков GPS представлена в Таблице 5.2. Можно видеть, что начиная с блоков IIR-M, минимальная гарантируемая системой мощность сигнала на вспомогательной частоте возросла 3–5 дБ-Вт. В данном разделе представлен проведенный в диссертационном исследовании анализ изменения мощности сигнала в приемной аппаратуре и повышение устойчивости ГНСС в условиях воздействия солнечных вспышек.

Таблица 5.2. Минимальная мощность принимаемого на наземном приемнике сигнала (полоса 20.46 МГц). Таблица 3-Va из [IS-GPS-200J, 2018]

Блок GPS	Канал	Сигнал	
		P(Y)	C/A or L2 C
IIA/IIR	L1	−161.5 dBW	−158.5 dBW
	L2	−164.5 dBW	
IIR-M/IIF	L1	−161.5 dBW	−158.5 dBW
	L2	−161.5 dBW	−160.0 dBW
III	L1	−161.5 dBW	−158.5 dBW
	L2	−161.5 dBW	−158.5 dBW

Данные ГНСС в формате RINEX, содержат параметр  $S$  [Pestana, 2015], который в соответствии со спецификацией RINEX 3.03 (<ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>) представляет отношение удельной мощности несущей к шуму (C/N0) или (здесь и далее) мощность принимаемого необработанного сигнала. Расписание смены спутников GPS

представлено в архиве международной службы IGS (International GNSS service) на сайте <ftp://igs.org/pub/station/general/igs08.atx>.

Для спутника GPS PRN10 смена блока ПА на блок IIF произошла в период с 3 августа по 31 октября 2015 г. Рисунок 5.17 показывает регистрируемую мощность сигналов на частотах L1 (S1) и L2 (S2), принимаемых на станции ZIM2 международной службы IGS (International GNSS Service) [Dow et al., 2009] 29 апреля 2015 г. (черные точки) и 27 декабря 2015 г. (синие точки). Даты были выбраны вне интервала замены спутника PRN10. Следует отметить, что в рассматриваемые дни не производилось замен аппаратуры приемника. Согласно официальной информации IGS (<http://www.igs.org/>), в это время станция ZIM2 была оснащена приемником Trimble NETR9 и антенной TRM59800.00.

Файлы в формате Rinex 3 содержат данные о мощности принимаемого сигнала на частоте L1 для открытого гражданского C/A кода (измерения S1C), а также на частоте L2 для закрытого P(Y) кода при полукодовой обработке сигнала на основе технологии z-tracking (измерения S2W).

Мы можем сравнить мощность принимаемого сигнала L2 при использовании закрытого P(Y) кода для спутниковых блоков GPS IIA и GPS IIF. Мы также можем оценить, как изменяется мощность принимаемого сигнала при использовании нового гражданского открытого кода L2C (измерения S2X), который излучают спутники нового поколения, в том числе за счет исключения потерь на полукодовую обработку для P(Y) кода.

Из рисунка 5.17 следует, что при замене спутникового блока на модернизированный произошло повышение принимаемой мощности на частоте L1 (S1C) на  $\sim 1.5\text{--}2.5$  дБ-Гц. В то же время увеличение мощности принимаемого сигнала на частоте L2 было более существенным – до 3–4.5 дБ-Гц для P(Y) кода (S2W). Мощность сигнала L2 наиболее заметно возросла, до 8.5–20 дБ-Гц при обработке нового открытого кода L2C (S2X).

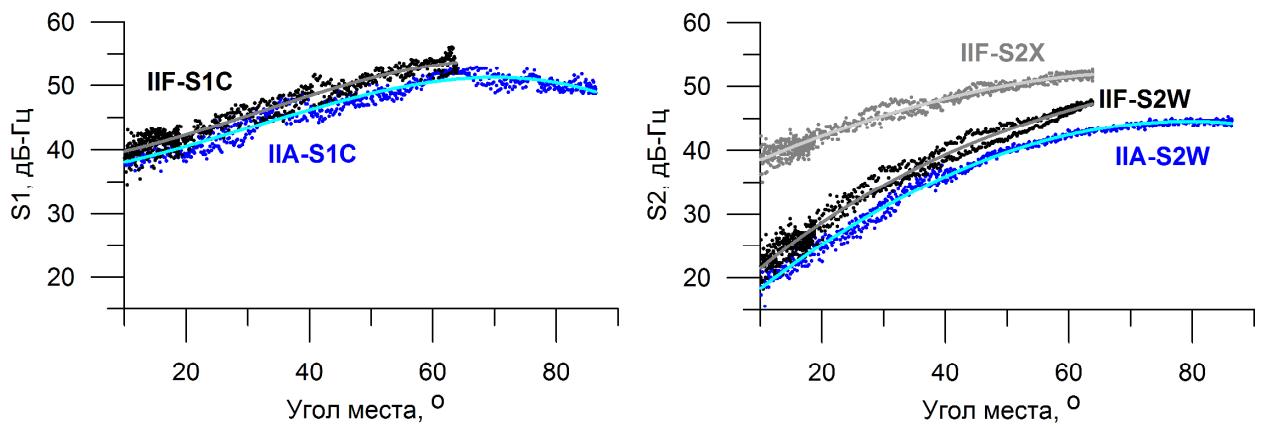


Рисунок 5.17. Зависимость мощности принимаемого сигнала на частотах L1 (левая панель) и L2 (правая панель) от угла места для спутника PRN10 29 апреля 2015 г. (синие точки) и 27 декабря 2015 г. (черные и серые точки) на станции ZIM2. Синие точки – для ПА S1C (левая панель) и S2W (правая панель), черные точки – для IIF S1C (левая панель) и S2W (правая панель), серые точки – для IIF S2X. Линии показывают соответствующие аппроксимации полиномом третьего порядка.

Чтобы выявить возможный эффект подобного увеличения мощности сигнала на помехоустойчивость аппаратуры пользователей, можно проанализировать поведение мощности сигнала во время различных радиовспышек близкой интенсивности для одного и того же спутника. Такой подход затруднителен, так как мощные радиовспышки происходят редко. Huang et al. [2018], проанализировав данные за последние двадцать лет, получили, что за это время произошло только 2384 вспышки в L-диапазоне, из которых только 17 можно отнести к классу опасных (severe,  $10000 \text{ с.е.п.} < \text{поток радиоизлучения} \leq 100000 \text{ с.е.п.}$ ) и 4 – к классу экстремальных (extreme, поток  $> 100000 \text{ с.е.п.}$ ) событий. Поэтому был реализован другой подход: анализировалась мощность принимаемого сигнала для некоторой вспышки на отдельной станции, регистрирующей сигналы со спутников разных поколений. Были выбраны радиовспышки 24 сентября 2011 г. [Sreeja et al., 2013] и 6 сентября 2017 г. [Yasyukevich et al., 2018; Berdermann et al., 2018], относящиеся по классификации [Huang et al., 2018] к экстремальным и опасным соответственно. Для каждой вспышки изучалась динамика мощности принимаемого сигнала на основной L1 и вспомогательных частотах (L2, L5) GPS на станции ZIM2.

Анализ проводился для спутниковых блоков разных поколений. Использовались измерения S1C и S2W, которые могут быть получены как для блоков старого поколения (IA/IIR-A), так и для модернизированных (IIR-M/IIF) блоков GPS. Также использовались измерения S2X (для оценки преимущества использования новых открытых кодов L2C) и S5X (для анализа принимаемой мощности сигнала на частоте L5). В период первой вспышки на станции ZIM2 был установлен приемник Trimble NETR5, а после 27 апреля 2015 г. он был заменен на Trimble NETR9.

Для анализа потока радиоизлучения использовались данные спектрографа Sagamore Hill, входящего в международную сеть RSTN (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar->

radio/rstn-1-second/sagamore-hill/). В соответствии с данными Sagamore Hill 24 сентября 2011 г. интенсивность потока радиоизлучения на частоте 1415 МГц начала нарастать примерно в 12:32 UT и достигла максимального значения 114144 с.е.п. в 13:04:46 UT (рис. 5.18, *a*, *b*, красная кривая). Во время радиовспышки 6 сентября 2017 г., сопровождавшей мощнейшую вспышку 24-го цикла солнечной активности X9.3, максимальное значение потока радиоизлучения по данным радиоспектрографа San Vito, входящего в сеть RSTN достигло 19604 с.е.п. Динамика потока радиоизлучения приведена на рис. 5.18, *c*, *г* (красная кривая).

На рисунке 5.18 показана динамика принимаемой мощности сигналов во время рассматриваемых радиовспышек: синие кривые – для L1 (S1C) и L2 (S2W) со «старого» блока IIA/IIR-A; черные кривые – для L1 (S1C) и L2 (S2W) с нового блока IIR-M/IIF, серые кривые – для нового гражданского кода L2C (S2X) со спутника IIR-M/IIF. Согласно спецификации RINEX 3.03 порог мощности для удовлетворительного качества отслеживания сигнала составляет 30–35 дБ-Гц. Для сигнала L1 пороговое значение сигнал/шум на входе следящего измерителя фазы, когда может произойти потеря синхронизации, составляет около 28 дБ-Гц [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. Специальные процедуры постобработки сигнала могут снизить это значение примерно до 20 дБ-Гц [Psiaki, 2001]. Таким образом, в качестве порога мощности сигнала для удовлетворительного приема возьмем значение 20 дБ-Гц. Этот уровень отмечен на рисунке 5.18 оранжевой штриховой линией.

Вспышка 6 сентября 2017 г. не повлияла на измеряемую мощность сигнала на основной частоте L1, но привела к падению мощности сигнала на вспомогательной частоте L2 на  $\sim 8$  дБ-Гц. Этот результат соответствует полученному в [Sato et al., 2019], авторы показали снижение уровня сигналов L1, L2, L5 до 10 дБ-Гц в европейском регионе. Снижение мощности сигнала L2 при использовании гражданского кода L2C (S2X) оказалось несколько меньше – около 7 дБ-Гц.

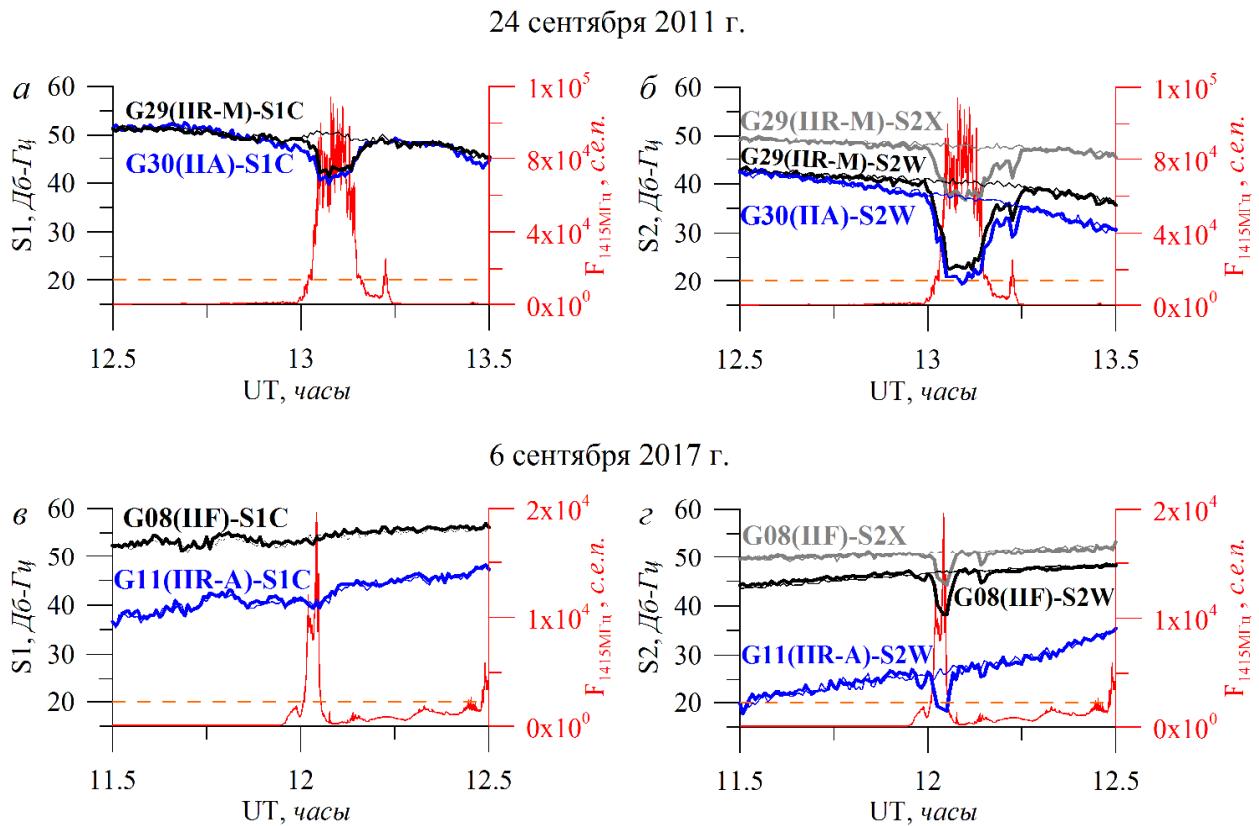


Рисунок 5.18. Динамика солнечного радиоизлучения на частоте 1415 МГц по данным радиоспектрографа Sagamore Hill (красная кривая) во время радиовспышки и мощности принимаемого сигнала GPS (жирные линии) на частотах L1 (левая панель) и L2 (правая панель) станцией ZIM2 24 сентября 2011 г. (а, б) и 6 сентября 2017 г. (в, г). Синяя кривая – S1C и S2W для спутника старого поколения ПА/IIR-A; черная и серая кривые – S1C/S2W и S2X для спутника нового поколения IIR-M/IIF. Тонкими линиями показаны мощности соответствующих сигналов в предыдущий день (23 сентября / 5 сентября). Оранжевая штриховая линия отмечает уровень 20 дБ-Гц. Наименования спутников, блоков и измеряемого параметра даны на панелях.

Радиовспышка 24 сентября 2011 г. сопровождается понижением мощности принимаемого сигнала как на частоте L1, так и на частоте L2. На частоте L1 принимаемые мощности для обоих спутников практически совпадают, в то время как на частоте L2 мощность сигнала для блока ПА существенно меньше. В максимуме вспышки мощность принимаемого сигнала L2 блока ПА падает ниже 20 дБ-Гц, в то время как для блока IIR-M минимальные значения на  $\sim 5$  дБ-Гц выше.

В связи с тем, что спутники находились на разных углах места, более корректным является сравнение зависимости мощности сигнала от угла места (аналогично рис. 5.17). Такие распределения приведены на рисунке 5.19 для частот L1 (слева) и L2 (справа). Синими точками приведены данные для измерений S1C и S2W со старых блоков ПА/IIR-A, черными – для S1C и S2W с новых блоков IIR-M/IIF, серыми – мощность сигнала нового открытого гражданского кода L2C (S2X) со спутника PRN29. Панели *a*, *b* – данные для 24 сентября 2011 г., *c*, *e* – для 6 сентября 2017 г.

Для радиовспышки 24 сентября 2011 г. зависимости мощности на частоте L1 от угла места для двух блоков практически сходные. Во время вспышки наблюдается резкое снижение уровня мощности сигнала на частоте L1 (S1C) примерно на 7.5 дБ-Гц. Такое падение происходит на разных спутниках при близких углах возвышения, но в целом уровень мощности принимаемого сигнала остается достаточно высоким. Для L2 можно увидеть разницу между мощностями сигнала для двух блоков: для более старого блока ПА уровень мощности принятого сигнала ниже на всех углах места. Во время вспышки наблюдается уменьшение уровня принимаемого сигнала L2 более чем на 17 дБ-Гц для обоих блоков. Ввиду изначально более низкой мощности сигнала минимальное значение для блока ПА оказывается ниже порога 20 дБ-Гц, что потенциально приводит к большей вероятности срыва сопровождения сигнала. Между тем, уменьшение мощности для нового открытого кода L2C (S2X) составляет около 10 дБ-Гц.

Таким образом, во время радиовспышки 24 сентября 2011 г. обнаружено резкое падение мощности сигнала примерно на 7.5 дБ-Гц на частоте L1 и примерно на 17 дБ-Гц на частоте L2 при использовании закрытого кода P(Y). Однако из-за изначально более высокой мощности сигнала L2 на спутниках нового типа во время вспышки мощность сигнала с «нового» спутника не опускается ниже порогового уровня. Это потенциально приводит к более стабильной навигации. Вызванное вспышкой падение мощности сигнала на частоте L2 при использовании нового гражданского кода меньше и сопоставимо с падением на частоте L1 (около 10 дБ-Гц).

Для вспышки 7 сентября 2017 г. не удалось найти спутники разных типов на близких углах места. Это связано с особенностями созвездия. Однако можно увидеть существенные различия в динамике мощности на частоте L2 (рис. 5.19, б, в). Эффект солнечной вспышки проявляется в резком уменьшении мощности принимаемого сигнала L2.

Сигнал от спутника PRN11 (IIR-A) имеет изначально более низкие значения мощности сигнала L2 (S2W, рис. 5.19, в), а во время вспышки мощность сигнала упала ниже порогового уровня 20 дБ-Гц. Обратим внимание на то, что для спутника PRN08 (IIF) эффект радиовсплеска был зарегистрирован при более высоком угле возвышения, что делает прямое сравнение мощности сигнала от этих спутников во время вспышки некорректным. Однако отметим, что вызванное вспышкой уменьшение общей мощности сигнала L2 (S2W) для обоих спутников сравнимо по амплитуде и составляет около 8 дБ-Гц вне зависимости от угла места.

Если бы радиовспышка произошла для спутника PRN08 при том же малом угле места, что и для PRN11, минимальный порог не был бы достигнут из-за изначально более высокой мощности сигнала L2, принимаемого со спутника PRN08. Уровень сигнала для L2 при обработке нового кода L2X на PRN08 выше, особенно при малых углах возвышения, и эффект, связанный со вспышкой, для этого сигнала слабее.

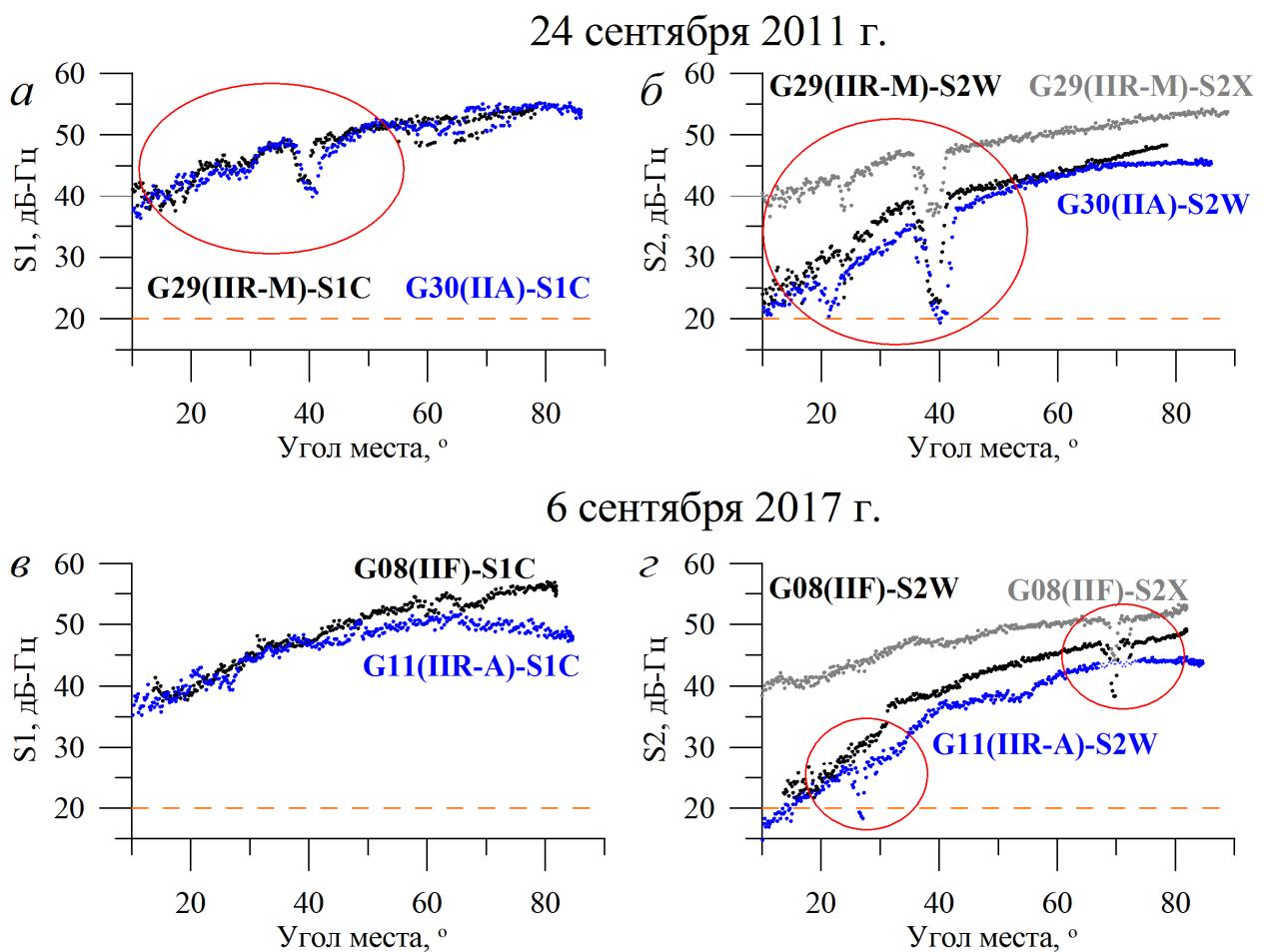


Рисунок 5.19. Динамика мощности сигнала GPS, принимаемого станцией ZIM2 на частотах L1 (слева) и L2 (справа) во время радиовспышек 24 сентября 2011 г. (а, б) и 6 сентября 2017 г. (в, г). Синие точки – данные для старых блоков IIА/IIR-A, черные и серые точки – данные новых блоков IIR-M/IIF, серые кривые – мощность сигнала открытого кода L2C (S2X). Оранжевая штриховая линия отмечает порог 20 дБ-Гц. Наименования спутников, блоков и измеряемого параметра даны на панелях.

Таким образом, увеличение мощности сигнала L2, излучаемого спутником, может улучшить устойчивость системы против угроз солнечных радиовспышек. При этом использование нового открытого гражданского кода еще больше способствует повышению стабильности системы.

Блок GPS IIF оснащен передатчиком, излучающим сигнал на частоте L5. Это позволяет проанализировать влияние вспышки на различные частоты для какого-то одного спутника. Рис. 5.20 показывает динамику мощности сигналов GPS на частотах L1 (черная кривая), L2 (серая кривая), L5 (синяя кривая). Левая панель – данные для радиовспышки 24 сентября 2011 г., правая панель – для 6 сентября 2017 г. Красная кривая – изменение мощности солнечного радиоизлучения в периоды солнечных вспышек. Так же, как и на рис. 5.18, используются данные радиоспектрометров Sagamore Hill (24 сентября 2011 г.) и San Vito (6 сентября 2017 г.). Использовались данные для станции ZIM2, за исключением данных для сигнала L5 в 2011 г., поскольку станция ZIM2 не проводила измерения сигнала L5 в 2011 г. В этой связи для 2011 г. использовались измерения на частоте L5 на станции WTZR ( $49.14^{\circ}$  N,  $12.87^{\circ}$  E). В 2011 году на станции WTZR был установлен GNSS-приемник Leica GRX1200+ с антенной LEIAR25.R3 LEIT. Отметим, однако, что данные WTZR имеются только в формате Rinex2, поэтому у нас нет подробной информации о коде, по которому осуществлялось измерение мощности, и соответственно конкретном типе измеряемой мощности (S5Q, S5I или S5X).

В 2011 г. в группировке GPS было два спутника IIF. PRN01 не наблюдался во время вспышки в исследуемом регионе, а PRN25 находился на небольшом угле возвышения,  $\sim 15^{\circ}$ . Были использованы измерения мощности на частотах L1 (S1C) и L2 (S2W, S2X) со спутника PRN29 (IIR-M) и скорректированные измерения мощности на частоте L5 (S5) со спутника PRN25 (IIF), находившегося на малом угле возвышения.

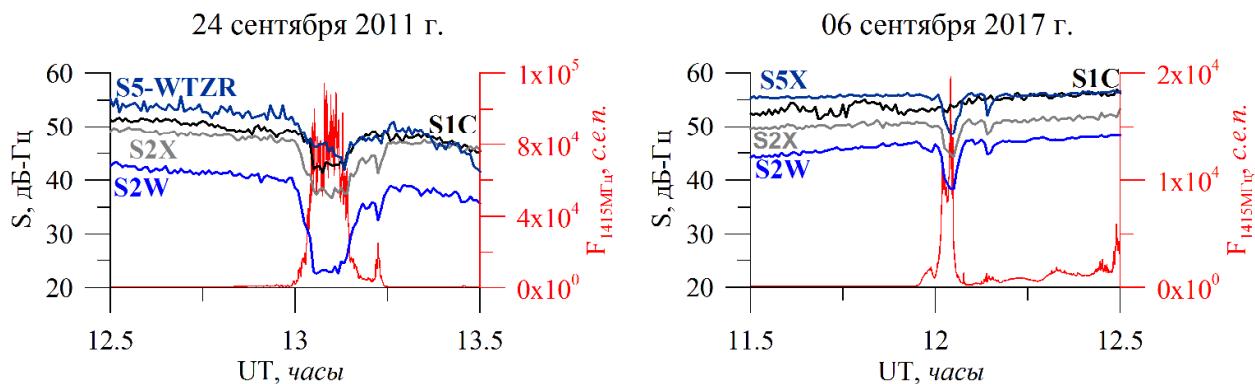


Рисунок 5.20. Динамика мощности сигнала GPS на частотах L1 (черная кривая), L2 (голубая (S2W) и серая (S2X) кривые), L5 (синяя кривая) на станции ZIM2, а также интенсивности солнечного радиоизлучения (красная кривая) для солнечных вспышек 24 сентября 2011 г. (левая панель) и 6 сентября 2017 г. (правая панель). На левой панели даны измерения сигнала L5 на станции WTZR.

Чтобы скорректировать измерения на частоте L5, все измерения по коду S со спутника PRN25 были увеличены на 5 дБ-Гц таким образом, чтобы измерения на частоте L1 (S1C) со спутников PRN29 и PRN25 соответствовали по мощности.

На рис. 5.20 показано, что уровень мощности сигнала L5 находится на уровне мощности L1. При этом, если 6 сентября 2017 г. на частоте L1 не наблюдается снижение мощности сигнала, то для L5 наблюдалось падение мощности примерно на 7.5 дБ-Гц, что сопоставимо (хотя и меньше) с потерей мощности на частоте L2. Этот результат согласуется с выводами [Sato et al., 2019], которые показали, что воздействие солнечной радиовспышки 6 сентября 2017 г. было обнаружено на частотах GPS L2 и L5, но не на частоте L1. Тем не менее, использование кодовой обработки открытых сигналов (L5 и L2C) позволяет уменьшить падение мощности на приеме по сравнению с полукодовой обработкой закрытого сигнала P(Y). Во время радиовспышки 24 сентября 2011 г. падение уровня сигнала L5 (S5) составило около 9 дБ-Гц. Из рассмотренных примеров видно, что сигнал L2 детектируемый при использовании полукодовой обработки имеет наименьшую общую мощность и, следовательно, наихудшую стабильность во время солнечных радиовспышек.

Таким образом, 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). Во время солнечных радиовспышек мощность принимаемого навигационного сигнала уменьшалась на частотах L2 и L5 как при полукодовой обработке (S2W), так и при использовании открытого кода (S2X, S5X). При этом сигнал L2 при полукодовом слежении (z-tracking) характеризовался наименьшей

общей мощностью и соответственно наихудшей стабильностью во время радиовспышек. Кроме того, именно для этого сигнала зарегистрировано максимальное падение мощности. Во время вспышек в 2011 г./2017 г. падение мощности сигнала составило (в дБ-Гц): 7.5/0 для L1 (S1C), 10/7 для L2C (S2X), 9/7.5 для L5 (S5/S5X), и 17/8 для L2 (S2W).

Достаточно неожиданной оказалась слабая зависимость амплитуды изменения мощности от интенсивности вспышки. Отличие потока в 5.5 раз привело к примерно 20–50 % отличию падения мощности сигнала.

### **5.3.3. Плотность срывов сопровождения фазы сигнала спутников разных поколений в периоды радиовспышек**

Падение мощности принимаемого сигнала во время солнечных радиовспышек потенциально приводит к большей вероятности срыва сопровождения фазы сигнала [Afraimovich et al., 2009c]. Для оценки влияния увеличения мощности излучаемого сигнала на спутниках нового поколения на общую стабильность работы системы во время солнечных радиовсплесков выполнен анализ изменения плотности срывов сопровождения фазы сигнала GPS для частот L1 и L2 в периоды рассмотренных выше вспышек.

Для анализа динамики плотности в периоды вспышек срывов сопровождения фазы была рассчитана средняя плотность отдельно для модернизированных и «старых» спутников. Для расчета использовались данные глобальной сети ГНСС, включающей около 5000 приемников (4659 в 2011 г. и 4939 в 2017 г., рис. 5.21). Использовались данные со станций, находившихся в момент вспышки в подсолнечной области: в расчет включались только те ионосферные точки, для которых зенитный угол Солнца был меньше  $60^\circ$  (угол возвышения Солнца  $> 30^\circ$ ). Области расчета ограничены на рис. 5.21 оранжевой линией. При этом учитывались только те измерения, угол места которых превышал  $10^\circ$ . В каждый момент времени в статистику входило более 3000 измерений.

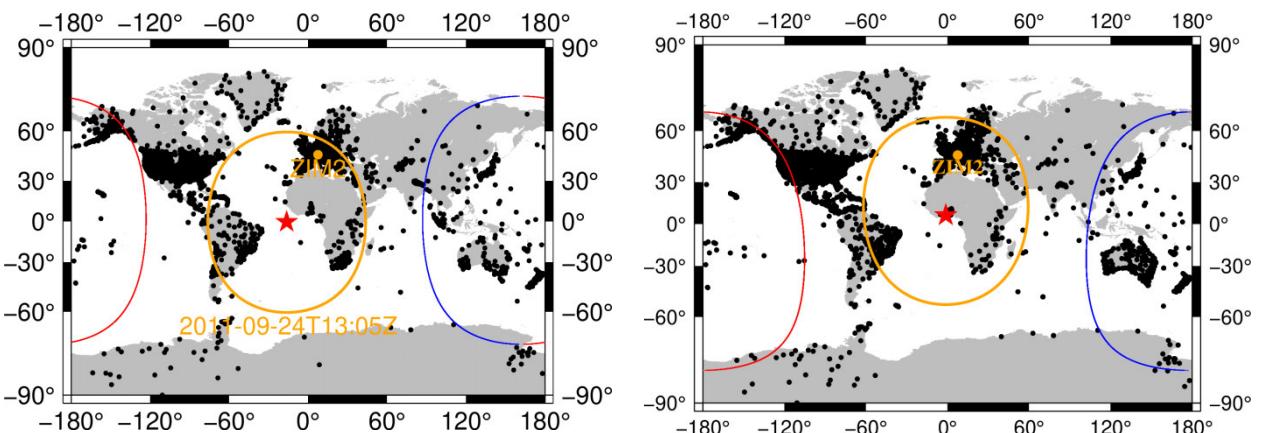


Рисунок 5.21 Распределение приемников ГНСС, используемых для анализа плотности срывов сопровождения фазы навигационного сигнала в периоды радиовспышек 24 сентября 2011 г. (слева) и 6 сентября 2017 г. (справа). Красной звездой на панелях отмечено положение подсолнечной точки в максимуме, оранжевой линией ограничена область с зенитным углом Солнца менее  $60^{\circ}$  (угол возвышения  $>30^{\circ}$ ). Красные и синие линии показывают положение восходного и закатного солнечного терминатора соответственно.

На рис. 5.22 показана динамика средней плотности срывов 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). На верхних панелях представлена динамика для модернизированных спутников (IIR-M, IIF), на нижних – для «старых» спутников (IA, IIR-A, IIR-B). Серыми кривыми показаны соответствующие распределения за предыдущие (спокойные) дни.

Ожидаемо, что для спутников всех типов во время вспышек плотность срывов сопровождения фазы на частоте L2 значительно выше, чем на частоте L1. В обоих случаях в динамике срывов по сравнению со спокойным днем регистрируются резкие пики, совпадающие по времени с моментом максимумов радиовспышек (вертикальные штриховые линии).

Во время экстремальной вспышки 2011 г. увеличение плотности срывов сопровождения фазы на частоте в L2 достигало 30 % от общего количества измерений на «старых» спутниках (рис. 5.22, внизу слева). На модернизированных спутниках максимальное значение плотности срывов сопровождения фазы на L2 составило около 10 % (рис. 5.22, вверху слева), то есть на 20 % ниже, чем для «старых» спутников. На частоте L1 максимальная плотность срывов сопровождения фазы во время вспышки составила около 0.6 % для обновленных спутников и более 1 % для «старых». Таким образом, можно констатировать существенное ухудшение качества работы системы во время данной экстремальной радиовспышки. Однако увеличение мощности сигналов на обновленных спутниках привело к повышению устойчивости сервиса относительно угрозы радиовспышки.

На рисунке 5.22 (справа) видно, что во время вспышки 6 сентября 2017 г. также произошло увеличение плотности срывов сопровождения фазы, однако в меньшей степени, чем в 2011 г. Прежде всего это связано с меньшей интенсивностью самой вспышки.

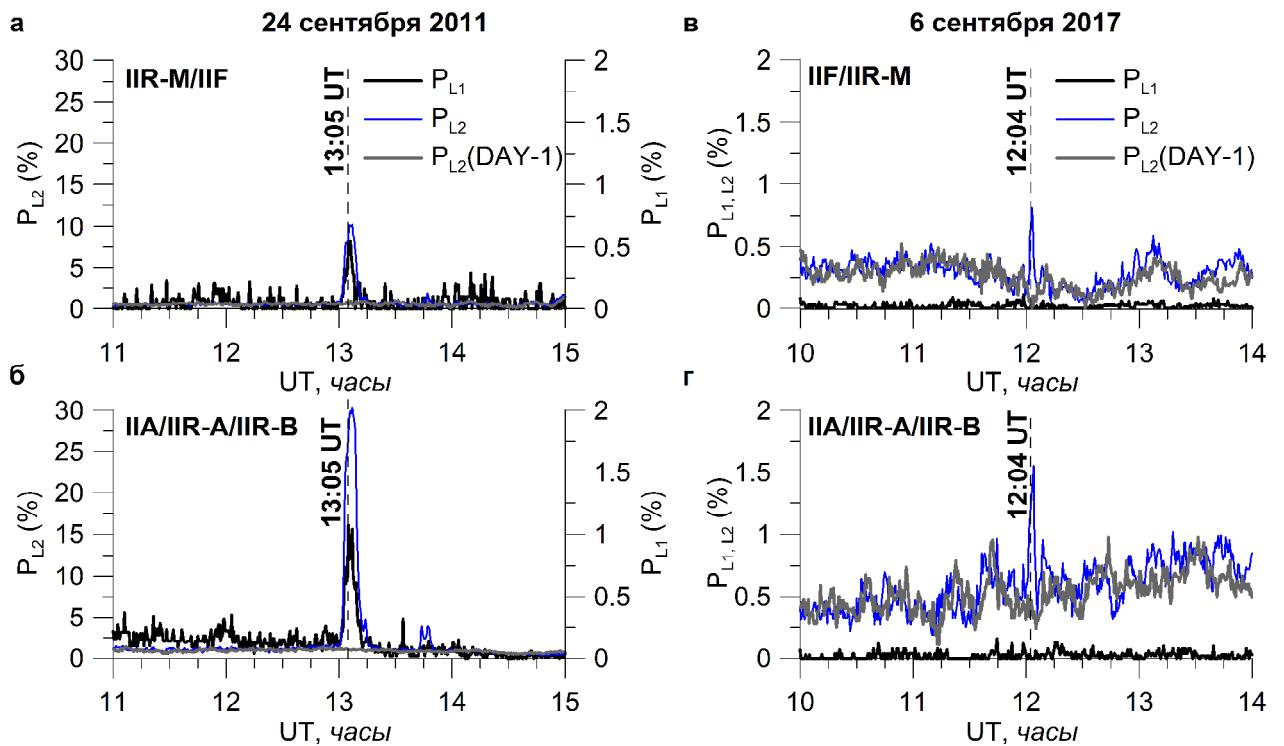


Рисунок 5.22. Динамика средней плотности срывов сопровождения фазы на частотах L1 (черная кривая) и L2 (синяя кривая) в подсолнечной области во время солнечных радиовспышек 24 сентября 2011 г. (слева) и 6 сентября 2017 г. (справа) для модернизированных (вверху) и «старых» (внизу) спутников. Серые линии показывают динамику плотности сбоев L2 в контрольные дни. Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты максимума радиовспышек.

Максимальные значения плотности срывов сопровождения фазы на частоте L2 во время вспышки достигли  $\sim 1.6\%$  на «старых» спутниках (рис. 5.22 справа внизу) и  $\sim 0.8\%$  для обновленных спутников (рис. 5.22 справа вверху). Выраженного влияния на сопровождение фазы на частоте L1 для этой вспышки не наблюдалось.

Динамика срывов сопровождения фазы во время вспышки 6 сентября 2017 г. для европейского региона изучена в [Berdermann et al., 2018]. Авторы сделали вывод, что данная вспышка не вызвала изменений плотности срывов сопровождения фазы на частотах GPS. Отсутствие эффектов в глобальном масштабе во время этой вспышки также было получено и в работе [Yasyukevich et al., 2018] (см. рис. 5.15). Причина отличия представленных здесь результатов от предыдущих работ связана с выбором набора станций для анализа. Основным достижением использованного в данном разделе подхода является введение ограничения на зенитный угол Солнца. Из рис. 5.21 видно, что в периоды вспышек в Европе и Америке большое число станций находились на освещенной части Земли, однако для большинства этих углов возвышения Солнца ( $< 30^\circ$ ) был мал и эффект вспышки на этих станциях мог не наблюдаваться. Таким образом, включение станций с малым возвышением может «скрыть» эффект в общей статистике, что, по всей вероятности, и произошло в предыдущих исследованиях. Предложенный в работе новый подход позволил выявить эффект.

Таким образом, для обеих рассмотренных вспышек показано, что плотность срывов сопровождения фазы на частоте L2 уменьшилась более чем в два раза для сигналов с обновленных спутников по сравнению со «старыми». Следовательно, можно сделать вывод, что увеличение мощности излучаемого сигнала на обновленных спутниках позволило улучшить стабильность системы в отношении угроз как сильных, так и экстремальных солнечных радиовспышек.

## **5.4. Выводы по Главе 5**

Проведенный в исследовании анализ показал, что срывы измерения параметров радиосигнала не превышают нескольких процентов, в том числе и в возмущенных условиях, а уровень срывов значительно сократился с развитием приемного и передающего оборудования. Срывы измерений радиотехнических параметров проявляются наиболее значимо в высокоширотной области. Основное число срывов измерений ПЭС проявляется в условиях максимального развития геомагнитных бурь.

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. Таким образом, ключевой вывод состоит в повышении стабильности измерений ПЭС с использованием данных GPS и ГЛОНАСС в условиях неблагоприятных гелиогеофизических условий. Введение в строй новых спутников GPS (можно экстраполировать на новые спутники ГЛОНАСС) снижает подверженность ГНСС влиянию негативных факторов космической погоды.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Глобальные навигационные спутниковые системы являются эффективным средством мониторинга состояния ионосферы, в том числе оценки абсолютного полного электронного содержания в различных гелиогеофизических условиях. В рамках настоящей работы были получены следующие ключевые результаты.

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 получать заведомо неотрицательное абсолютное ПЭС в двухчастотном и одночастотном режимах: в двухчастотном режиме – для наклонного и вертикального ПЭС, в одночастотном режиме – для вертикального ПЭС. Получено, что при оценке вертикального ПЭС использование ограничений на неотрицательность ПЭС приводит к коррекции более чем на 1 ТЕСУ ~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 ТЕСУ, карт CODE и разработанного в настоящей работе метода – 1.7 ТЕСУ, метода IONOLAB и метода, разработанного в настоящей работе – 2.1 ТЕСУ. Анализ выявил существенные недостатки метода

Seemala, а также в регионах с малым числом станций (например, Сибири) широко используемой технологии ионосферных карт Madrigal (MIT).

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 развернут 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 часов 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 основные метода коррекции: использование измерений на отдельных лучах спутник-приемник; корректировка глобальной/региональной ионосферной модели по обобщенному параметру с использованием отдельных лучей «спутник – приёмник»; корректировка глобальной ионосферной модели по локальным параметрам на основе полученных с использованием ГНСС вертикального ПЭС и его пространственных градиентов. Указаны недостатки и преимущества данных методов. Серди принципиальных положительных сторон использования ГНСС для задач коррекции ионосферных ошибок отмечены большое число и стабильность измерений ГНСС (в т.ч. 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, влияние градиентов, влияние 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  $\sim 3.5$  TECU на 4-х часовом горизонте, линейная регрессия на оптимальные параметры –  $\sim 4.5$  TECU, простая модель неизменной ионосферы или линейного изменения ПЭС –  $\sim 9\text{--}17$  TECU.

6. Проведен ряд экспериментальных работ по использованию абсолютного полного электронного содержания для решения задач распространения радиоволн в ионосфере Земли. Данные экспериментальных наблюдений и моделирования показали, что на основе данных абсолютного ПЭС может быть скорректировано значительное искажение профиля линейнополяризованного радиосигнала при распространении сигнала в ионосфере. 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 с развитием 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.

## **Благодарности**

Автору хотелось бы выразить глубокую благодарность безвременно ушедшему проф. Э.Л. Афраймовичу за увлечение в этот интересный мир ГНСС-исследований, за плотное сотрудничество в 2006–2009 гг., когда стали понятны ключевые задачи будущей диссертации. Хотелось бы вспомнить также уже ушедших, к сожалению, проф. В.Б. Иванова, подтолкнувшего к работам по использованию одночастотных измерений, проф. Ю.Я. Ружина, с которым начинались работы по ионосферному искажению радиосигналов, проф. В.Е. Куницына давшего ряд ценных советов по исследованию, чл.-корр. РАН А.П. Потехина, всегда с интересом следившего за ходом данного диссертационного исследования, и профессоров Н.К. Душутина и В.А. Мазура, являвшихся образцами человеческих и научных качеств.

Большая благодарность А.А. Мыльниковой и А.М. Веснину за их огромную помощь как в рамках данного исследования, так и в других областях; Н.П. Переваловой и В.В. Демьянову за полезные рекомендации по структуре диссертации и внимательному прочтению текста; Р.А. Пилив и М.В. Никоновой за помощь в техническом оформлении. Автор хотел бы выразить признательность Э.И. Астафьевой, О.И. Бернгардту, С.В. Воейкову, В.В. Демьянову, И.К. Едемскому, А.В. Жукову, В.И. Захарову, М.В. Клименко, Д.С. Котовой, В.И. Куркину, В.П. Лебедеву, В.Б. Оводенко, А.В. Ойнацу, К.Г. Ратовскому, Д.Н. Сидорову, вместе с которыми вместе последние 15 лет проводилась тесная работа и было получено много результатов, в том числе и в рамках настоящего исследования. Глубокая благодарность руководству Института академику Г.А. Жеребцову и чл.-корр. РАН А.В. Медведеву, за создание комфортной рабочей атмосферы; а также коллективу ИСЗФ СО РАН и физического факультета ИГУ за ценные советы и обсуждения на семинарах.

Особая благодарность моей супруге, Анне Ярюкевич, за внимательную вычитку настоящего текста и совместные научные изыскания, но еще в большей степени за организацию надежного тыла.

## **Список литературы**

1. Аджемов, С. С. Методы и алгоритмы компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолиний связи / С. С. Аджемов, Е. М. Лобов, Н. А. Кандауров, Е. О. Лобова // XIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». Сборник трудов. – Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 25-27 ноября 2019 г. – С. 282–287.
2. Алешин, И. М. Опыт создания оперативной службы сбора данных сети наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем / И. М. Алешин, В. В. Алпатов, А. Е. Васильев, С. С. Бургучев, К. И. Холодков, Ф. В. Передерин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – Т. 1. – Вып. № 25. – С. 99–103.
3. Афраймович, Э. Л. Геомагнитные возмущения и сбои фазовых измерений навигационной системы GPS / Э. Л. Афраймович, С. В. Воейков, О. С. Лесюта, И. И. Ушаков // Радиолокация, навигация, связь: тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2001. – Т. 3. – С. 1548–1559.
4. Афраймович, Э. Л. Геомагнитные возмущения и функционирование навигационной системы GPS / Э. Л. Афраймович, О. С. Лесюта, И. И. Ушаков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 2. – С. 220–227.
5. Афраймович, Э. Л. Исследование качества функционирования двухчастотных GPS приемников во время геомагнитных бурь [Электронный ресурс] / Э. Л. Афраймович, В. В. Демьянин, Т. Н. Кондакова // Исследовано в России : электрон. журн. – 2004. – № 6. – С. 164–173. – URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/016.pdf>.
6. Афраймович, Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова // Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСИЦ СО РАМН. – 2006. – 480 с.
7. Афраймович, Э. Л. Генерация ионосферных неоднородностей при распространении уединенной внутренней гравитационной волны во время

мощной магнитной бури 29-31.10.2003 г. / Э. Л. Афраймович, Э. И. Астафьева, С. В. Воейков // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2006. – Т.49, №2. – С. 89-104.

8. 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.

9. 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.

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

11. Афраймович, Э. Л. Глобальное электронное содержание в 23-м цикле солнечной активности / Э. Л. Афраймович, Э. И. Астафьева, И. В. Живетьев, А. В. Ойнац, Ю. В. Ясюкевич // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008б. – Т. 48, № 2. – С. 195–208.

12. Афраймович, Э. Л. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением Солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. / Э. Л. Афраймович, Н. С. Гаврилюк, В. В. Демьянов, Г. Я. Смольков, А. Б. Ишин // Космические исследования. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 146–157.

13. Бернгардт, О. И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 40–60. – DOI: 10.12737/szf.-33201705.

14. Борисова, Т. Д. Прогнозирование условий распространения декаметровых радиоволн в арктическом регионе / Т. Д. Борисова, Н. Ф.

Благовещенская, А. С. Калишин // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – Т. 3, № 113. – С. 78–87. – DOI: 10.30758/0555-2648-2017-0-3-78-86.

15. 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.

16. Воейков, С. В. Использование индекса возмущенности вертикальных вариаций ПЭС при исследовании ионосферных эффектов челябинского метеорита / С. В. Воейков, О. И. Бернгардт, Н. В. Шестаков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56, № 2. – С. 234.

17. Гавриленко, Д. Влияние расстояний между базовыми станциями и спутниковым приемником на точность координатных определений в RTK-режиме / Д. Гавриленко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2016. – Вип. 2. – С. 63–69. – [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn\\_2016\\_2\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sdgn_2016_2_13).

18. Голубков, Г. В. Химическая физика верхней атмосферы / Г. В. Голубков, М. И. Манжелий, И. В. Карпов // Химическая физика. – 2011. – Т. 30, № 5. – С. 1–6.

19. Горбачев, О. А. Статистика фазовых сбоев сигналов GPS по измерениям на одночастотных приемниках / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, П. В. Рябков, Д. В. Хазанов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2010. – № 159. – С. 27–31.

20. ГОСТ 25645.103-84. Условия физические космического пространства. Термины и определения (с Изменением N 1) / ГОСТ от 12 января 1984 г. № 25645.103-84.

21. Гришин, Ю. П. Радиотехнические системы: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. / Под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высш. шк. – 1990. – 496 с.
22. Дёминов М. Г. ИОНОСФЕРА // Большая российская энциклопедия. Т. 11. – Москва. – 2008. – С. 559.
23. Демьянов, В. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем: монография / В. В. Демьянов, Ю. В. Ярюкович. – Иркутск: Изд-во ИГУ. (Солнечно-земная физика). ISBN 978-5-9624-1098-2. – 2014. – 349 с.
24. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис // М: Мир. – 1973. – 502 с.
25. Евстафьев, О. В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / Под ред. В.В. Грошева. – М.: ООО «Издательство «Проспект». – 2009. – 48 с.
26. Жеребцов, Г. Я. Физические процессы в полярной ионосфере / Г. А. Жеребцов, Ю. Г. Мизун, В. С. Мингалев. – М.: Наука. – 1988. – 232 с.
27. 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. Ярюкович // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 263–272. – DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-263-272.
28. Захаров, В. И. Влияние магнитных бурь и суббурь на сбои навигационной системы GPS в высоких широтах / В. И. Захаров, Ю. В. Ярюкович, М. А. Титова // Космические исследования. – 2016. – Т. 54, № 1. – С. 23–33. – DOI: 10.7868/S0023420616010143.
29. ИКД-ГЛОНАСС. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. – Редакция 5.1. – М.: РНИИ КП. – 2008.

30. ИКД-ГЛОНАСС. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0. – Москва. – 2016. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD.-Obshh.-opis.-Red.-1.0-2016.pdf>.

31. Ильин, Н. В. Оперативный прогноз МПЧ радиотрасс по текущим данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом / Н. В. Ильин, Т. В. Бубнова, В. П. Гроздов, М. С. Пензин, С. Н. Пономарчук // Солнечно-земная физика. – 2018. – №. 3. – С. 103–113.

32. Казанцев, М.Ю. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS / М.Ю. Казанцев, Ю.Л. Фатеев // Журнал радиоэлектроники, N 12, 2002.

33. Каракецов, А. М. Основные астрометеофизические факторы, определяющие точность координатно-временных измерений средств системы контроля космического пространства. Пути достижения требуемой точности / А. М. Каракецов, В. П. Зинин, Н. Г. Кривоносов, В. А. Пригоцкий, В. А. Сорокин, В. В. Сосульников, А. Д. Шиманский // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 2. – С. 34–38.

34. Котова, Д. С. Коррекция эмпирических ионосферных моделей IRI-Plas и NeQuick в высокоширотном регионе с использованием данных удаленных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / Д. С. Котова, В. Б. Овденко, Ю. В. Ярюкевич, 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.

35. Котович, Г. В. Определение критической частоты  $f_0F2$  в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита / Г. В. Котович, А. Г. Ким, С. Я. Михайлов, В. П. Гроздов, Я. С. Михайлов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46, № 4. – С. 547–551.

36. Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. – М.: Наука. – 1980. – 304 с.

37. Крюковский, А. С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме / А. С. Крюковский, Д. С. Лукин, К. С. Кирьянова // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 9. – С. 1028–1034.
38. Куницын, В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит. – 2007. – 255с.
39. Курикша, А. А. Исследование эффективности использования модели IRI-2012 для внесения поправок в радиолокационные измерения координат спутников / А. А. Курикша, А. Л. Липкин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18, № 5. – С. 21–26.
40. Куркин, В. И. Оперативный прогноз МПЧ при наклонном зондировании ионосферы / В. И. Куркин, Н. М. Полех, Л. В. Чистякова // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – Издательство СО РАН. – 1997. – Вып. 105. – С. 168–174.
41. 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. Ясюкович // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: труды II Всероссийской научной конференции. – Санкт-Петербург. – 2012. – Т. 2. – С. 231–236.
42. Логовский, А. С. Особенности автоматической обработки радиолокационной информации с целью компенсации негативного влияния ионосферы на работу РЛС дальнего обнаружения / А. С. Логовский, А. В. Дмитриевская // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 46–51.
43. Манчестер, Р. Пульсары / Р. Манчестер, Дж. Тейлор. – М.: Мир. – 1980. – 296 с.
44. Маслов, О. Н. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. Приложение к журналу

«Инфокоммуникационные технологии» / О. Н. Маслов, В. П. Пашинцев. – Самара, ПГАТИ. – 2006. – Вып. 4. – 357 с.

45. Мищенко, Ю. А. Загоризонтная радиолокация / Ю. А. Мищенко. – М.: Воениздат. – 1972. – 96 с.

46. Мыльникова, А. А. Восстановление абсолютного значения, пространственных градиентов и временной производной полного электронного содержания по данным GPS/ГЛОНАСС: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.03 / Мыльникова Анна Александровна. – Иркутск. – 2017. – 98 с.

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

48. 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. Ярюкевич. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661849. Правообладатель: ФГБУ науки Институт солнечно-земной физики СО РАН. – 2016.

49. Новиков, А. В. Оценка вертикального интегрального электронного содержания ионосферы по данным спутникового радиопросвещивания: автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук / А. В. Новиков. – Москва. – 2010. – 23 с.

50. Оводенко, В. Б. Исследование эффективности компенсации влияния среды на работу радиолокационной станции / В. Б. Оводенко, В. В. Трёкин // Труды МАИ. – – 2016. – – Вып. 88. – –  
[https://mai.ru/upload/iblock/635/ovodenko\\_trekin\\_rus.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/635/ovodenko_trekin_rus.pdf).

51. Перевалова, Н. П. Динамика возмущенности полного электронного содержания в высоких и средних широтах по данным GPS / Н. П. Перевалова, И. К. Едемский, О. В. Тимофеева, Д. Д. Каташевцева, А. С. Полякова // Солнечно-земная физика. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 36–43. – DOI: 10.12737/13831.
52. Перов, А. И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / А. И. Перов, В. Н. Харисов. – М.: Радиотехника. – 2005. – 688 с.
53. Поляков, В. М. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В. М. Поляков, В. Е. Суходольская, М. К. Ивельская, Г. Е. Сутырина и др. – М.: МЦД-Б. – 1986. – 136 с.
54. Порайко, Н. К. Измерение меры фарадеевского вращения у пульсаров с помощью телескопа LoFAR: ионосфера против межзвездной среды / Н. К. Порайко, А. Нутсос, Й. Фербист, К. Тибурци, А. Хонеффер, Й. Кюнсмёллер // Труды БШФФ-2019. – Иркутск. – 2019. – С. 104–106. – <http://bsfp.iszf.irk.ru/sites/default/files/school/2019/materials/104-106.pdf>.
55. Ратовский, К. Г. Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности / К. Г. Ратовский, А. П. Потехин, А. В. Медведев, В. И. Куркин // Солнечно-земная физика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2004. – Вып. 5, № 118. – С. 102–104.
56. РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.531-8. Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем. – 2005. – [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-8-200503-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-8-200503-S!!PDF-R.pdf).
57. Служивый, М. Н. Адаптивные системы радиосвязи / М. Н. Служивый // Вестник УлГТУ. – 2000. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnye-sistemy-radiosvyazi>.
58. 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.

59. Смирнов, В. М. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС / В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 6. – 0421000114\0025.

60. Смирнов, В. М. Метод радиопросвещивания ионосферы Земли и его практическая реализация / В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова // Материалы Всероссийской научной конференции «VII всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – 2017. – С. 129–139. – [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/rmdzs-2017/pdf/S2\\_8.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2017/rmdzs-2017/pdf/S2_8.pdf).

61. Смирнов, В. М., Смирнова. Зондирование ионосферы Земли над морскими акваториями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 327-335. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335.

62. Смирнова, Е. В. Мониторинг состояния ионосферы в режиме реального времени / Е. В. Смирнова, В. М. Смирнов, В. Н. Скобелкин, С. И. Тынянкин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, №4. – С. 136-141.

63. Соколов, К. С. Метод оперативного учета влияния среды на траекторные измерения / К. С. Соколов, В. В. Трекин, В. Б. Оводенко, Е. С. Патронова // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 2. – С. 17–21.

64. Соловьев, Ю. А. Системы спутниковой навигации / Ю. А. Соловьев. – М. Ж Эко-Трендз. – 2000. – 267 с.

65. Сорокин, А. А. Организация работы с данными глобальных навигационных спутниковых систем для комплексного исследования современных геодинамических процессов на юге Дальнего Востока России / А. А. Сорокин, С. П. Королев, Н. В. Шестаков, С. И. Мальковский, Г. И. Цой,

В. В. Пупатенко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 158–172. – DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172.

66. Терещенко, Е. Д. Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС / Е. Д. Терещенко, А. Н. Миличенко, М. В. Швец, С. М. Черняков, И. В. Кораблева // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2015. – Т. 1. – С. 32–43.

67. Титов, А. А. Ассимиляционная модель ионосфера на основе независимой оценки аппаратных дифференциальных задержек: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 25.00.29 / Титов Антон Александрович. – 2016. – 182 с.

68. Ткачёв, Г. Н. Проблема оперативного обеспечения современных средств дальней радиолокации геофизическими данными / Г. Н. Ткачёв // Тезисы докладов Байкальской школы по фундаментальной физике. – 2017. – С. 7–9. – <http://bsfp.iszf.irk.ru/sites/default/files/school/2017/Theses/Abstracts-BSFP2017.pdf>.

69. Ульянов, О. М. Обнаружение индивидуальных импульсов пульсаров B0809+74; B0834+06; B0943+10; B0950+08; B1133+16 в декаметровом диапазоне волн / О. М. Ульянов, В. В. Захаренко, А. А. Коноваленко, А. Лекашо, К. Розолен, Х. О. Рукер // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 113–133.

70. Ушаков, И. И. Сбои при измерениях фазового и группового запаздывания сигналов GPS во время геомагнитных возмущений: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.03. – Иркутск. – 2004. – 170 с.

71. Харгривс, Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи / Дж. К. Харгривс. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1982. – 351 с.

72. Черноус, С. А. Навигация GPS/ГЛОНАСС в Арктике и полярные сияния / С. С. Черноус, И. И. Шагимуратов, Б. А. Вульфович, Н. В.

Калитенков // Журнал: Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2016. – Т. 19, вып. 4. – С. 806–812. – IDR: 14294956, DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-806-812.

73. Черноус, С. А. Авроральные возмущения как индикатор воздействия ионосферы на навигационные сигналы / С. А. Черноус, И. И. Шагимуратов, И. Б. Иевенко, М. В. Филатов, И. И. Ефишов, М. В. Швец, Н. В. Калитенков // Химическая физика. – 2018. – Т. 37, № 5. – С. 77–83. – DOI: 10.7868/s0207401x18050102.

74. Чистяков, С. П. Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – №1. – С. 117-136.

75. 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.

76. Шагимуратов, И. И. Использование карт полного электронного содержания для анализа пространственно-временной структуры ионосферы / И. И. Шагимуратов, Ю. В. Черняк, И. Е. Захаренкова, Г. А. Якимова // Журнал физической химии. – 2013. – Т. 32, № 9. – С. 81–88.

77. Шагимуратов, И. И. Исследования по физике ионосферы в Западном отделении ИЗМИРАН / И. И. Шагимуратов, И. В. Карпов, Ю. Н. Кореньков, Ю. В. Черняк // Электромагнитные и плазменные процессы от недр солнца до недр земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН–75. – Москва. – 2015. – С. 444–460.

78. Шагимуратов, И. И. Интернет-сервис по созданию GPS/ГЛОНАСС карт полного электронного содержания ионосферы для Европейского региона / И. И. Шагимуратов, Ю. В. Черняк, И. Е. Захаренкова, Г. А. Якимова, Н. Ю. Тепеницина, И. И. Ефишов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 197–209. – DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-197-209.

79. Шлюпкин, А. С. Исследование эффективности применения международной модели ионосферы IRI-2001 для прогнозирования характеристик ВЧ радиосвязи: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шлюпкин Александр Сергеевич. – Ростов-на-Дону. – 2006. – 145 с.
80. Харисов, В. Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / В. Н. Харисов, А. И. Перов, В. А. Болдин. – М.: ИПРЖР. –1998. – 400 с.
81. Шиманов, С. Н. Адаптивная система радиосвязи / С. Н. Шиманов, А. В. Порсев, В. А. Цимбал, А. Д. Белов, С. А. Коваль, Д. А. Потягов, М. М. Нечаев, В. П. Пашинцев, А. М. Ерёмин, В. Н. Киселев // Патент №2474960. 10.02.2013.
82. Ярюкевич, Ю. В. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 / Ю. В. Ярюкевич, 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. – 2013а. – Т. 19, № 3.
83. Ярюкевич, Ю. В. Исследование околоземного космического пространства с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ярюкевич, Н. П. Перевалова, В. В. Демьянов, И. К. Едемский, А. А. Маркидонова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2013б. – Т. 52, вып. 6. – С. 93–100.
84. Ярюкевич, Ю. В. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы / Ю. В. Ярюкевич, А. А. Мыльникова, В. Е. Куницын, А. М. Падохин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015а. – Т. 55, № 6. – С. 790–796. – DOI: 10.7868/S0016794015060176.

85. Ярюкевич, 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. Ярюкевич, Э. И. Астафьев, И. В. Живетьев, А. П. Максиков // Солнечно-земная физика. – 2015б. – Т. 1, № 4. – С. 58–64. – DOI: 10.12737/13459.
86. Ярюкевич, Ю. В. Определение абсолютного полного электронного содержания по одночастотным спутниковым радионавигационным данным GPS/ГЛОНАСС / Ю. В. Ярюкевич, А. А. Мыльникова, В. Б. Иванов // Солнечно-земная физика. – 2017а. – Т. 3, № 1. – С. 97–103. – DOI: 10.12737/23509.
87. Ярюкевич, Ю. В. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС / Ю. В. Ярюкевич, 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. – 2017б. – Т. 34, № 2. – С. 19–31. – DOI: 10.15350/2306-2819.2017.1.19.
88. Ярюкевич, Ю. В. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ярюкевич, И. В. Живетьев, А. С. Ярюкевич, С. В. Воейков, В. И. Захаров, Н. П. Перевалова, Н. Н. Титков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017в. – Т. 14, № 1. – С. 88–98. – DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-88-98.
89. Ярюкевич, Ю. В. Сибирская сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet: текущее состояние / Ю. В. Ярюкевич, А. М. Веснин, Н. П. Перевалова // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – С. 82–94. – DOI: 10.12737/stp-44201809.
90. Ярюкевич, Ю. В. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство коррекции ионосферной ошибки радиотехнических средств:

проблемы и перспективы / Ю. В. Ярюкович, А. М. Веснин, В. И. Куркин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 195-209.

91. Ю.В. Ярюкович, А.С. Ярюкович. «Программа для расчета числа сбоев сопровождения фазы навигационного сигнала ГНСС» 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.

92. Aarons, J. GPS phase fluctuations in the equatorial region during the MISETA 1994 campaign / J. Aarons, M. Mendillo, R. Yantosca, E. Kudeki //J. Geophys. Res. – 1996. – V. 101, A12. – P. 26851–26862. – DOI: 10.1029/96JA00981.

93. Aarons, J. Global morphology of ionospheric scintillations / J. Aarons // Proc. of the IEEE. – 1982. – V. 70, N 4. – P. 360.

94. Abdi, H. Least Squares. In: Lewis-Beck M., Bryman, A., Futing T. (Eds.) Encyclopedia of Social Sciences. Research Methods. Thousand Oaks (CA): Sage. – 2003.

95. De Abreu, A. J. Hemispheric asymmetries in the ionospheric response observed in the American sector during an intense geomagnetic storm / A. J. de Abreu, P. R. Fagundes, Y. Sahai, R. de Jesus, J. A. Bittencourt, C. Brunini, M. Gende, V. G. Pillat, W. L. C. Lima, J. R. Abalde, A. A. Pimenta // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115. – A12312. – DOI: 10.1029/2010JA015661.

96. Abdullah, M. TEC determination over single GPS receiver station using PPP Technique / M. Abdullah, S. A. Bahari, B. Yatim // International Symposium on GPS/GNSS 2008, November 11-14. – Tokyo. – 2008.

97. Afraimovich, E. L. Cepstral analysis of broad-band radio emission. New possibilities in radio astronomy / E. L. Afraimovich // Astron. Astrophys. – 1981. – V. 97, N. 2. – P. 366–372.

98. Afraimovich, E. L. Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals / E. L. Afraimovich, O. S. Lesyuta, I. I. Ushakov, S. V. Voeykov // Annals of Geophysics. – 2002. – V. 45, N 1. – P. 55–71. – DOI: 10.4401/ag-3494.
99. Afraimovich, E. L. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips at the auroral oval boundary / E. L. Afraimovich, E. I. Astafieva, O. I. Berngardt, O. S. Lesyuta, V. V. Demyanov, T. N. Kondakova, B. G. Shpynev // Radiophys. Quantum Electron. – 2004. V. 47, N 7. – P. 453–468.
100. 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. – DOI: 10.1016/j.jastp.2008.05.006.
101. Afraimovich, E. L. Global electron content: a new conception to track solar activity / E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, A. V. Oinats, Yu. V. Yasukevich, I. V. Zhivetiev // Ann. Geophys. – 2008a. – V. 26. – P. 335–344. – DOI: 10.5194/angeo-26-335-2008.
102. Afraimovich, E. L. Relative amplitude of the total electron content variations depending on geomagnetic activity / E. L. Afraimovich, N. P. Perevalova, I. V. Zhivetiev // Advances in Space Research. – 2008b. – V. 42. – P. 1231–1237. – DOI: 10.1016/j.asr.2007.09.003.
103. Afraimovich, E. L. Powerful radiobursts as a global and free tool for testing satellite broadband systems, including GPS-GLONASS-GALILEO / E. L. Afraimovich, V. V. Demyanov, A. B. Ishin, G. Y. Smolkov // J. Atmos. Solar – Terr. Phys. – 2008c. – V. 70, N 15. – P. 1985–1994. – DOI: 10.1016/j.jastp.2008.09.008.
104. 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. – DOI: 10.1016/j.asr.2008.02.003.

105. Afraimovich, E. L. MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator / E. L. Afraimovich, I. K. Edemskiy, A. S. Leonovich, L. A. Leonovich, S. V. Voeykov, Y. V. Yasyukevich // Geophys. Res. Lett. – 2009a. – V. 36. – L15106. – DOI: 10.1029/2009GL039803.
106. Afraimovich, E. L. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips / E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, V. V. Demyanov, I. F. Gamayunov // Advances in Space Research. – 2009b. – V.43, N 6. – P. 964-972. – DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.015.
107. Afraimovich, E. L. The total failures of GPS functioning caused by the powerful solar radio burst on December 13, 2006. / E. L. Afraimovich, V. V. Demyanov, G. Y. Smolkov // Earth Planets and Space. – 2009c. – V. 61. – P. 637–641. – DOI: 10.1186/BF03352940.
108. Afraimovich, E. L. First evidence of anisotropy of GPS phase slips caused by the mid-latitude field-aligned ionospheric irregularities / E. L. Afraimovich, A. B. Ishin, M. V. Tinin, Yu. V. Yasyukevich, S. G. Jin // Advances in Space Research. – 2011. – V. 47. – P. 1674–1680. – DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.015.
109. Afraimovich, E. L. Review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena / E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, V. V. Demyanov, I. K. Edemskiy, N. S. Gavrilyuk, A. B. Ishin, E. A. Kosogorov, L. A. Leonovich, O. S. Lesyuta, K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova, A. S. Polyakova, G. Y. Smolkov, S. V. Voeykov, Yu. V. Yasyukevich, I. V. Zhivetiev // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2013. – V. 3. – A27. – DOI: 10.1051/swsc/2013049.
110. Allen, R. S. Considerations Relative to Adapting TRANSIT Observations to Predicting Radar Range Correction / R. S. Allen // Air force surveys in geophysics. – 1977a. – N. 357. – Report number AFGL-TR-77-0004.

111. Allen, R. Correction for ionospheric refraction for COBRA DANE. AFGL-TR-77-0257 / R. Allen, D. Donatelli, M. Picardi // Air Force Geophysics Laboratory. – 1977b. – Hanscom AFB MA. – 18 p.
112. Asche, G. P. USCG 1972. Omega system of global navigation / G. P. Asche // International Hydrographic Review. – 1972. – V. 50, N 1. – P. 87–99.
113. Astafyeva, E. I. Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling / E. I. Astafyeva, E. L. Afraimovich, S. V. Voeykov // Adv. Space Res. – 2008. – V. 41, N 9. – P. 1459–1462. – DOI: 10.1016/j.asr.2007.03.059.
114. Astafyeva, E. Effects of strong IMF Bz southward events on the equatorial and mid-latitude ionosphere / E. Astafyeva // Ann. Geophys. – 2009. – V. 27. – P. 1175–1187. – DOI: 10.5194/angeo-27-1175-2009.
115. 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. – DOI: 10.1002/2014SW001072.
116. Astafyeva, E. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: a global multi-instrumental overview / E. Astafyeva, I. Zakharenkova, M. Foerster // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2015. – V. 120, N 10. – P. 9023–9037. – DOI: 10.1002/2015JA021629.
117. Astafyeva, E. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation / E. Astafyeva, I. Zakharenkova, P. Alken // Earth, Planets and Space. – 2016. – V. 68, N 152. – P. 1–12. – DOI: 10.1186/s40623-016-0526-x.
118. Astafyeva, E. Global Ionospheric and Thermospheric Effects of the June 2015 Geomagnetic Disturbances: Multi-Instrumental Observations and Modeling / E. Astafyeva, I. Zakharenkova, J. D. Huba, E. Doornbos, J. van den IJssel // Journal of geophysical research. Space physics. – 2017. – V. 122, N 11. – P. 11716–11742. – DOI: 10.1002/2017JA024174.

119. Arikan, F. Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data / F. Arikan, C. B. Erol, O. Arikan // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108, N A12. – 1469. – DOI: 10.1029/2002JA009605.
120. Arikan, F. Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period / F. Arikan, C. B. Erol, O. Arikan // Radio Sci. – 2004. – V. 39. – RS6012. – DOI: 10.1029/2004RS003061.
121. Arikan, F. Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude 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. – DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.082.
122. Barabashov, B. Nearly real time IRI correction by TEC-GPS data / B. Barabashov, O. Maltseva, O. Pelevin // Abstracts of 35th COSPAR Scientific Assembly. – 2004. – V. 35. - P. 403.
123. Basu, S. Large magnetic storm-induced nighttime ionospheric flows at midlatitudes and their impacts on GPS-based navigation systems / S. Basu, J. J. Makela, E. MacKenzie, P. Doherty, J. W. Wright, F. Rich, M. J. Keskinen, R. E. Sheehan, A. J. Coster // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113. – A00A06. – DOI: 10.1029/2008JA013076.
124. Berdermann, J. Ionospheric response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and its implication for navigation services over Europe / J. Berdermann, M. Kriegel, D. Banys, F. Heymann, M. N. Hoque, V. Wilken, C. Borries, A. Heßelbarth, N. Jakowski // Space Weather. – 2018. – V. 16. – P. 1604–1615. – DOI: 10.1029/2018SW001933.
125. Berngardt, O. I. Bistatic sounding of high-latitude ionospheric irregularities using a decameter EKB radar and an UTR-2 radio telescope: first results / O. I. Berngardt, K. A. Kutelev, V. I. Kurkin, K. V. Grkovich, Yu. M. Yampolsky, A. S. Kashcheyev, S. B. Kashcheyev, V. G. Galushko, S. A. Grigorieva, O. A. Kusonsky // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2015b. – V. 58, N 6. – P. 390–408. – DOI: 10.1007/s11141-015-9614-1.

126. Bilitza, D. The International Reference Ionosphere 2012 - a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlik, P. Richards, L.-A. McKinnell, B. Reinisch // J. Space Weather Space Clim. – 2014. – V. 4, A07. – P. 1–12. – DOI: 10.1051/swsc/2014004.
127. Bilitza, D. IRI the International Standard for the Ionosphere / D. Bilitza // Adv. Radio Sci. – 2018. – V. 16. – P. 1–11. – DOI: 10.5194/ars-16-1-2018.
128. Blagoveshchensky, D. V. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study / D.V. Blagoveshchensky, M. A. Sergeeva // Advances in Space Research. – 2019. – V 63, N 1. – P. 239–256. ISSN 0273-1177. – DOI: 10.1016/j.asr.2018.07.016.
129. Blagoveshchensky, D. V. Ionosphere dynamics in the auroral zone during the magnetic storm of March 17–18, 2015 / D.V. Blagoveshchensky, M.A. Sergeeva // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2016. – V. 149. – P. 151–160. – DOI: 10.1016/j.jastp.2016.06.016.
130. Borries, C. Multiple ionospheric perturbations during the Saint Patrick's Day storm 2015 in the European-African sector / C. Borries, A. M. Mahrouss, N. M. Ellahouny, R. Badeke // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – V. 121, N 11. – 2016. – P. 11333–11345. – 2016. – DOI: 10.1002/2016JA023178.
131. Boteler, D. H. Chapter 26 - Dealing With Space Weather: The Canadian Experience, Editor(s): Natalia Buzulukova / D. H. Boteler // Extreme Events in Geospace, Elsevier. – 2018. – P. 635–656. – ISBN 9780128127001. – DOI: 10.1016/B978-0-12-812700-1.00026-1.
132. Blewitt, G. An automatic editing algorithm for GPS data / G. Blewitt // Geophys. Res. Lett. – 1990. – V. 17. – P. 483–492. – DOI: 10.1029/GL017i003p00199.
133. Breiman, L. Random forests / L. Breiman // Machine learning. – 2001. – V. 45, N 1. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:101093340.
134. Carter, B. A. Global equatorial plasma bubble occurrence during the 2015 St. Patrick's Day Storm / B. A. Carter, E. Yizengaw, R. Pradipta, J. M.

Retterer, K. Groves, C. Valladares, R. Caton, C. Bridgwood, R. Norman, K. Zhang. // J. Geophys. Res.: Space Phys. – 2016. – V. 121, N 1. – 894-905. – DOI: 10.1002/2015JA022194.

135. Chen, Y.W. Combining SVMs with various feature selection strategies // In: Guyon I., Nikravesh M., Gunn S., Zadeh L.A. (eds) / Y. W. Chen, C. J. Lin // Feature Extraction. Studies in Fuzziness and Soft Computing. – 2006. – V. 207. – Springer. Berlin. – DOI: 10.1007/978-3-540-35488-8\_13.

136. Chen, Z. Evaluation of solar radio bursts' effect on GPS receiver signal tracking within International GPS Service network / Z. Chen, Y. Gao, Z. Liu // Radio Sci. – 2005. – V. 40. – RS3012. – DOI:10.1029/2004RS003066.

137. Cherniak, I. First observations of super plasma bubbles in Europe / I. Cherniak, I. Zakharenkova // Geophys. Res. Lett. – 2016. –V. 43. – P. 11,137–11,145. – DOI: 10.1002/2016GL071421.

138. Chisham, G. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions / G. Chisham, M. Lester, S. E. Milan, M. P. Freeman, W. A. Bristow, A. Grocott, et al. // Surv Geophys. – 2007. – V. 28. – P. 33–109. – DOI: 10.1007/s10712-007-9017-8.

139. Choi, B.-K. The influence of grounding on GPS receiver differential code biases / B.-K. Choi, S. J. Lee // Advances in Space Research. – 2018. – V. 62, N 2. – P. 457–463. – DOI: 10.1016/j.asr.2018.04.033.

140. Ciraolo, L. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS / L. Ciraolo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, S.M. Radicella // J. Geod. – 2007. – V. 81. – P. 111–120. – DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1.

141. CCIR. Comité Consultatif International des Radiocommunications. CCIR Atlas of ionospheric characteristics // Rep. 340, Int. Telecommun. Union. – Geneva. – 1967.

142. Conker, R. S. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System availability / R. S. Conker, M. B. El Arini, C. J. Hegarty, T. Hsiao // Radio Sci. – 2003. – V. 38, N 1. – 1001.
143. Datta, A. The effects of the ionosphere on ground-based detection of the global 21 cm signal from the cosmic dawn and the dark ages / A. Datta, R. Bradley, J. O. Burns, G. Harker, A. Komjathy, T. J. W. Lazio // Astrophysical Journal. – 2016. – V. 831, N 6. – 16 p. – DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/6.
144. Daniell, R. A computer code for calculating tropospheric and ionospheric refraction effects on radar systems / R. Daniell, C. S. Carrano, G. Fishman, N. Bonito // In: Proceedings of the 2007 IEEE Radar Conference, Waltham, MA. – 2007. – P. 17–20. – DOI: 10.1109/RADAR.2007.374398.
145. Dashora, N. Large enhancements in low latitude total electron content during 15 May 2005 geomagnetic storm in Indian zone / N. Dashora, S. Sharma, R. S. Dabas, S. Alex, R. Pandey // Ann. Geophys. – 2009. – V. 27. – P. 1803–1820. – DOI: 10.5194/angeo-27-1803-2009.
146. De la Luz, V. First joint observations of space weather events over Mexico / V. De la Luz, A. Gonzalez-Esparza, M. Sergeeva, P. Corona-Romero, L. González, J. Mejia-Ambriz, J. Valdes, et al. // Annales Geophysicae. – 2018. – V. 36. – P. 1347–1360. – DOI: 10.5194/angeo-36-1347-2018.
147. 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.
148. 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. DOI: 10.1007/978-3-031-15874-2.

149. Dow, J. M. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems / J. M. Dow, R. E. Neilan, C. Rizos // J. Geodesy. – 2009. – V. 83. – P. 191–198. – DOI: 10.1007/s0019000803003.
150. Durmaz, M. Regional vertical total electron content (VTEC) modeling together with satellite and receiver differential code biases (DCBs) using semi-parametric multivariate adaptive regression B-splines (SP-BMARS) / M. Durmaz, M. O. Karslioglu // Journal of Geodesy. – 2014. – V. 89, N 4. – P. 347–360. – DOI: 10.1007/s00190-014-0779-8.
151. EC European GNSS (Galileo) Open Service. Ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users. – European Commission. – 2016. – Issue 1.2.
152. El-naggar, A.M. Artificial neural network as a model for ionospheric TEC map to serve the single frequency receiver / A. M. El-naggar // Alexandria Engineering Journal. – 2013. – V. 52, N 3. – P. 425–432. – DOI: 10.1016/j.aej.2013.05.007.
153. EMR-2021. Ericson mobility report. 2021. Ed. by Patrik Cerwall Available at <https://www.ericsson.com/>. Дата доступа: 11.10.2021.
154. Ellis, G. R. A. Radioastronomy through an artificial ionospheric window Spacelab 2 observations / G. R. A. Ellis, A. Klekociuk, G. T. Goldstone, M. Medillo // Astronomical Society of Australia, Proceedings (ISSN 0066-9997). – 1986. – V. 6, N 3. – P. 331–333.
155. Fan, L. BeiDou satellite's differential code biases estimation based on uncombined precise point positioning with triple-frequency observable / L. Fan, L. Min, C. Wang, C. Shi // Advances in Space Research. – 2017. – V. 59, Issue 3. – DOI: 10.1016/j.asr.2016.07.014.
156. Feltens, J. Development of a new three-dimensional mathematical ionosphere model at European Space Agency/European Space Operations Centre / J. Feltens // Space Weather. – 2007. – V. 5, N 12. – P. 1–17. – DOI: 10.1029/2006SW000294.

157. Foster, J. C. Mid-latitude TEC enhancements during the October 2005 superstorm / J. C. Foster, W. Rideout // Geophys. Res. Lett. – 2005. – V. 32. – L12S04. – DOI: 10.1029/2004GL021719.
158. Fox, M. W. Ionospheric equivalent slab thickness and its modeling applications / M. W. Fox, M. Mendillo, J. A. Klobuchar // Radio Sci. – 1991. – V. 26, N 2. – P. 429–438. – DOI: 10.1029/90RS02624.
159. Freeman, R. L. Radio System Design for Telecommunications / R. L. Freeman // Third Edition. New York: Wiley. – 2006. – 880 p. – ISBN: 978-0-471-75713-9.
160. Fu, W. Real-time ionospheric scintillation monitoring / W. Fu, S. Han, C. Rizos, M. Knight, A. Finn // Proc. ION GPS, Nashville, TN. – 1999.
161. De Gasperin, F. The effect of the ionosphere on ultra-low-frequency radio-interferometric observations? / F. de Gasperin, M. Mevius, D. A. Rafferty, H. T. Intema, R. A. Fallows // Astronomy&Astrophysics. – 2018. – V. 615. – A179. – DOI: 10.1051/0004-6361/201833012.
162. Gerzen, T. Reconstruction of F2 layer peak electron density based on operational vertical total electron content maps / T. Gerzen, N. Jakowski, V. Wilken, M. M. Hoque // Ann. Geophys. – 2013. – V. 31. – P. 1241–1249. – DOI: 10.5194/angeo-31-1241-2013.
163. Ghoddousi-Fard, R. GPS ionospheric mapping at Natural Resources Canada / R. Ghoddousi-Fard // IGS workshop, Pasadena.– 2014. – <http://igs.org/resources>.
164. Gillies, R. G. Improvement of HF coherent radar line-of-sight velocities by estimating the refractive index in the scattering volume using radar frequency shifting / R. G. Gillies, G. C. Hussey, G. J. Sofko, P. V. Ponomarenko, K. A. McWilliams // J. Geophys. Res. – 2011. – V. 116. – A01302. – DOI: 10.1029/2010JA016043.
165. Gonzalez-Esparza, J. A. Space weather events, hurricanes, and earthquakes in Mexico in September 2017 / J. A. Gonzalez-Esparza, M. A.

Sergeeva, P. Corona-Romero, J. C. Mejia-Ambriz, L. X. Gonzalez, V. De la Luz, et al. // Space Weather. – 2018. Gallagher V. 16. – P. 2038–2051. – DOI: 10.1029/2018SW001995.

166. Goodman, J. Ionospheric Effects on Modern Electronic System / J. Goodman, J. Aarons // Proceedings of the IEEE. – 1990. – V. 78. P. 512–528. – DOI: 10.1109/5.52228.

167. GREIS. GNSS Receiver External Interface Specification. Reflects Firmware Version 4.1.00. Last revised: March 31, 2021. Available from: [https://download.javad.com/manuals/GREIS/GREIS\\_Reference\\_Guide.pdf](https://download.javad.com/manuals/GREIS/GREIS_Reference_Guide.pdf). Дата доступа: 30 сентября 2021 г.

168. Gulyaeva, T. L. Variations of the half-width of the topside ionosphere according to the observations by space ionosondes ISIS 1, ISIS 2, and IK 19 // T. L. Gulyaeva // Geom. Aeronomy. - 2003. – V. 4, N 3. – P. 201–207.

169. Gulyaeva, T. L. Comparison of two IRI electron-density Plasmasphere extensions with GPS-TEC observations / T. L. Gulyaeva, D. L. Gallagher // Adv. Space Res. – 2007. – V. 39, N 5. – P. 744–749. – DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.064.

170. Gulyaeva, T. Towards an ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model / T. Gulyaeva, D. Bilitza // New Developments in the Standard Model, (R.J. Larsen ed.). NOVA, Hauppauge. – New York. – 2012. – P. 1–39.

171. Gulyaeva, T. L. Derivation of a planetary ionospheric storm index / T. L. Gulyaeva, I. Stanislawska // Ann. Geophys. – 2008. – V. 26. 2645–2648. – DOI: 10.5194/angeo-26-2645-2008.

172. Gurtner, W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.12 / W. Gurtner, L. Estey // Available from: <http://ftp.aiub.unibe.ch/rinex/rinex212.txt>. Дата доступа 21.11.2018.

173. Hernández-Pajares, M. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data / M. Hernández-Pajares, J. Juan, J. Sanz // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 1999. – V. 61, N 16. – P. 1237–1247.

174. 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. García-Rigo, J. Feltens, A. Komjathy, S. C. Komjathy, A. Krankowski // *J. Geod.* – 2009. – V. 83. – P. 263–275. – DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
175. Hernandez-Pajares, M. Precise ionospheric electron content monitoring from single-frequency GPS receivers / M. Hernández-Pajares, D. Roma, M. Garcia-Fernández, R. Orús Pérez , A. García-Rigo // *GPS Solutions*. – 2018. – V. 22. – 102. – DOI: 10.1007/s10291-018-0767-1.
176. Hochegger, G. A family of ionospheric models for different uses / G. Hochegger, B. Nava, S. M. Radicella, R. Leitinger // *Phys Chem Earth Part (C)*. – 2000. – V. 25, N 4. – P. 307–310. – DOI: 10.1016/S1464-1917(00)00022-2.
177. Hofmann-Wellenhof, B. GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle // Springer, Vienna. – 2008. – DOI: 10.1007/978-3-211-73017-1.
178. Hong, C.-K. Efficient GPS receiver DCB estimation for ionosphere modeling using satellite-receiver geometry changes / C.-K. Hong, D. A. Grejner-Brzezinska, J. H. Kwon // *Earth Planets Space*. – 2008. – V. 60. – P. e25–e28. – DOI: 10.1186/BF03353138.
179. Huang, X. Vertical electron content from ionograms in real time / X. Huang, B. W. Reinisch // *Radio Science*. – 2001. – V. 36, N 2. – P. 335–342. – DOI: 10.1029/1999RS002409.
180. Huang, Z. Ionospheric single-station TEC short-term forecast using RBF neural network / Z. Huang, H. Yuan // *Radio Sci.* – 2014. V. 49. – P. 283–292. – DOI: 10.1002/2013RS005247.
181. Huang, W. Statistical study of GNSS L-band solar radio bursts / W. Huang, E. Aa, H. Shen, S. Liu // *GPS Solutions*. – 2018. – V. 22. – 114. – DOI: 10.1007/s10291-018-0780-4.

182. Hunt, S.M. Equatorial atmospheric and ionospheric modeling at Kwajalein missile range / S. M. Hunt, S. Close, A. J. Coster, E. Stevens, L. M. Schuett, A. Vardaro // Lincoln Lab. J. – 2000. – V. 12, N 1. P. 45–64. ICD-BDS. BeiDou Navigation Satellite System signal in space. Interface control document. Open Service Signal (Version 2.1). November 2016. Available online – <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/201806/P020180608525875134604.pdf>. Дата обращения 14.11.2018.
183. ICD-Galileo European GNSS (Galileo) open service NAVIGATION SOLUTIONS POWERED BY EUROPE signal-in-space interface control document. OS SIS ICD. – 2016. – Issue 1.3.
184. IS-GPS-200J. Global positioning systems directorate. Systems engineering & integration interface specification IS-GPS-200. 25 April 2018. Available online: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf>. Дата обращения 14.11.2018.
185. Ivanov, D. Dispersive distortions of system characteristics of broadband transitionospheric radio channels / D. Ivanov, V. Ivanov, N. Ryabova, M. Ryabova, A. Kislytsin, A. Chernov, N. Konkin // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – V. 15, br. 4. – P. 550–555. – DOI: 10.5937/jaes15-11784.
186. Ivanov, D. Method of diagnosing frequency dispersion parameters for transitionospheric propagation of wideband signals using GLONASS/GPS technologies / D. Ivanov, A. Kislytsin, M. Ryabova // ITM Web of Conferences. – 2019. – V. 30. – 15008. – DOI: 10.1051/itmconf/20193015008.
187. Ivanov, V.B. Global Empirical Modeling of the Total Electron Content of the Ionosphere for Satellite Radio Navigation Systems / V. B. Ivanov, G. D. Gefan, O. A. Gorbachev // J. Atmos. Sol.–Terr. Phys. – 2011. – V. 73. – P. 1703–1707. – DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.010.
188. Jacobsen, K. S. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway / K.S. Jacobsen, Y.L.

Andalsvik // J. Space Weather Space Clim. – 2016. – V. 6, A9. – DOI: 10.1051/swsc/2016004.

189. Jakowski, N. Space weather effects on transitionospheric radio wave propagation on 6 April 2000 / N. Jakowski, A. Wehrenpfennig, S. Heise, I. Kutiev // Acta Geod. Geophys. Hung. – 2002. – V. 37, N 2-3. – P. 213–220. – DOI: 10/1556/ageod.37.2002.2-3.10.

190. Jakowski, N. Introducing a Disturbance Ionosphere Index (DIX) / N. Jakowski, C. Borries, V. Wilken // Radio Sci. – 2012. – V. 47. – RS0L14. – DOI: 10.1029/2011RS004939.

191. Januszewski, J. How the Ionosphere Affects Positioning Solution Using Terrestrial and Satellite Navigation Systems? / J. Januszewski // In: Mikulski J. (Ed.) Telematics in the Transport Environment. TST 2012. Communications in Computer and Information Science. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2012. – V. 329. – P. 249–257.

192. Jayachandran, P. T. The Canadian high arctic ionospheric network (CHAIN), / P. T. Jayachandran, R. B. Langley, J. W. MacDougall, S. C. Mushini, D. Pokhotelov, A. M. Hamza, et al. // Radio Sci. – 2009. – V. 44. – RS0A03. – DOI: 10.1029/2008RS004046.

193. Jiang, H. Influence of spatial gradients on ionospheric mapping using thin layer models / H. Jiang, Z. Wang, J. An, J. Liu, N. Wang, H. Li // GPS Solutions. – 2018. – V. 22. – 2. – DOI: 10.1007/s10291-017-0671-0.

194. Jiao, Y. Comparison of the effect of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation on GPS signals during the maximum of solar cycle 24 / Y. Jiao, Y.T. Morton // Radio Sci. – 2015. – V. 50, N. 9. – P. 886-903. – DOI: 10.1002/2015RS005719.

195. Jin, R. M \_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases / R. Jin, S. Jin, G. Feng // GPS Solutions. – 2012. – V. 6, N 4. – P. 541–548. – DOI: 10.1007/s10291-012-0279-3.

196. Juan, J. M. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements / J. M. Juan, J. Sanz, A. Rovira-Garcia, G. González-Casado, D. Ibáñez, R. Perez // J Space Weather Space Climate. – 2018. – V. 8. – A14. – DOI: 10.1051/swsc/2017044.
197. Jull, G. Origin of Non-reciprocity on High-frequency Ionospheric Paths / G. Jull, G. Pettersen // Nature. – 1964. – V. 201. – P. 483–484. – DOI: 10.1038/201483a0.
198. Kamide, Y. No major solar flares but the largest geomagnetic storm in the present solar cycle, / Y. Kamide, K. Kusano // Space Weather. – 2015. – V. 13. – P. 365–367. – DOI: 10.1002/2015SW001213.
199. Kashcheyev, A. Multivariable comprehensive analysis of two great geomagnetic storms of 2015 / A. Kashcheyev, Y. Migoya-Orué, C. Amory-Mazaudier, R. Fleury, B. Nava, K. Alazo-Cuartas, S. M. Radicella // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2018. – V. 123. – P. 5000– 5018. – DOI: 10.1029/2017JA024900.
200. Kelley, M. The Earth's Ionosphere, Vю 96. 2nd Edition. Plasma Physics and Electrodynamics / M. Kelley // Academic Press. – 2009. – 576 p. – ISBN: 9780120884254.
201. Kennelly, A. E. On the Elevation of the Electrically-Conducting Strata of the Earth's Atmosphere / A. E. Kennelly // Electrical World and Engineer, March 15<sup>th</sup>. –1902.
202. Kil, H. Equatorial broad plasma depletions associated with the evening prereversal enhancement and plasma bubbles during the 17 March 2015 storm / H. Kil, W. K. Lee, L. J. Paxton, M. R. Hairston, G. Jee // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – V. 121. – P. 10209–10219. – DOI: 10.1002/2016JA023335.
203. Kintner, P. M. The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems / P. M. Kintner, B. M. Ledvina // Advances in Space Research. – 2005. – V. 35, N 5. – P 788–811. – ISSN 0273-1177. – DOI: 10.1016/j.asr.2004.12.076.

204. Kintner, P. M. GPS and ionospheric scintillations / P. M. Kintner, B. M. Ledvina, E. R. de Paula // Space Weather. – 2007. – V. 5. – S09003. – DOI: 10.1029/2006SW000260.
205. Kintner, J. GNSS and Ionospheric Scintillation: How to Survive the Next Solar Maximum / J. Kintner, T. Humphreys, J. Hinks // Inside GNSS. – 2009. – V. 4, N. 4. – P. 22–30.
206. Klobuchar, J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users / J. A. Klobuchar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. – 1987. – V. 23, N 3. – P. 325–331. – DOI: 10.1109/TAES.1987.310829.
207. Klobuchar, J. A. Eye on the ionosphere: potential solar radio burst effects on GPS signal to noise / J. A. Klobuchar, J. M. Kunches, A. J. Van Dierendonck // GPS Solutions. – 1999. – V. 3, N 2. – P. 69–71. – DOI: 10.1007/PL00012794.
208. Komesaroff, M. M. Ionospheric Refraction in Radio Astronomy. I. Theory / M. M. Komesaroff // Australian Journal of Physics. – 1960. – V. 13. – P. 153–167. – DOI: 10.1071/PH600153.
209. Komjathy, A. Ingesting GPS-derived TEC data into the International Reference Ionosphere for single frequency radar altimeter ionospheric delay corrections / A. Komjathy, R.B. Langley, D. Bilitza // Advances in Space Research. – 1998. – V. 22, N 6. – P. 793-801. – DOI: 10.1016/S0273-1177(98)00100-8.
210. Komjathy, A. Automated daily processing of more than 1000 ground-based GPS receivers for studying intense ionospheric storms / A. Komjathy, L. Sparks, B. D. Wilson, A. J. Mannucci // Radio Science. – 2005. – V. 40, RS6006. – DOI: 10.1029/2005RS003279.
211. 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 – DOI: 10.1007/s10291-019-0936-x.

212. Koval, A. Traveling ionospheric disturbances as huge natural lenses: Solar radio emission focusing effect / A. Koval, Y. Chen, A. Stanislavsky, Q. H. Zhang // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2017. – V. 122. – P. 9092–9101. – DOI: 10.1002/2017JA024080.
213. Kozyreva, O. V. GPS-TEC response to the substorm onset during April 5, 2010, magnetic storm / O. V. Kozyreva, V. A. Pilipenko, V. I. Zakharov, M. J. Engebretson // GPS Solutions. – 2017. – V. 21, N 3. – P. 927–936. – DOI: 10.1007/s10291-016-0581-6.
214. 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. – DOI: 10.5772/54589. Available from: <https://www.intechopen.com/books/geodetic-sciences-observations-modeling-and-applications/ionospheric-sounding-and-tomography-by-gnss>.
215. Lanyi, G.E. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations / G. E. Lanyi, T. Roth // Radio Science. – 1988. – V. 23, N 4. – P. 483–492. – DOI: 10.1029/RS023i004p00483.
216. Lee, S.-W. Real-time volcano monitoring using GNSS single-frequency receivers / S.-W. Lee, S.-H. Yun, D. H. Kim, D. Lee, Y. J. Lee, B. E. Schutz // J. Geophys. Res. Solid Earth. – 2015. – V. 120. – P. 8551–8569. – DOI: 10.1002/2014JB011648.
217. Ledvina, B. M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude, Geophys / B. M. Ledvina, J. J. Makela, P. M. Kintner // Geophys. Res. Lett. – 2002. – V. 29, N 14. – DOI: 10.1029/2002GL014770.
218. Li, Z. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites / Z. Li, Y. Yuan, H. Li, J. Ou, X. Hou // J. Geodesy. – 2012. – V. 86, N 11. – P. 1059–1076. – DOI: 10.1007/s00190-012-0565-4.

219. Li, Z. SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions / Z. Li, Y. Yuan, N. Wang, M. Hernandez-Pajares, X. Huo // J. Geodesy. – 2015. – V. 89, N 4. – P. 331–345. – DOI: 10.1007/s00190-014-0778-9.
220. Li, M. Single-frequency precise point positioning (PPP) for retrieving ionospheric TEC from BDS B1 data / M. Li, B. Zhang, Y. Yuan, C. Zhao // GPS Solutions. – 2019. – V. 23, art. num. 18. – DOI: 10.1007/s10291-018-0810-2.
221. Llewellyn, S. K. Documentation and description of the Bent ionospheric model / S. K. Llewellyn, R. B. Bent // Technical Report AFCRL-TR-73-0657. – 1973. AD. 772733.
222. McCready, L. L. Solar radiation at radio frequencies and its relation to sunspots / L. L. McCready, J. L. Pawsey, R. Payne-Scott, D. Rivett // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1947. – V. 190, Issue 1022. – DOI: 10.1098/rspa.1947.0081.
223. Lovell, A. C. B. Radio Astronomical Measurements from Earth Satellites / A. C. B. Lovell // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1959. – V. 253, N 1275. – P. 494-500. – DOI: 10.1098/rspa.1959.0212.
224. Lyu, H. The Barcelona ionospheric mapping function (BIMF) and its application to northern mid-latitudes / H. Lyu, M. Hernández-Pajares, M. Nohutcu, A. García-Rigo, H. Zhang, J. Liu // GPS Solut. – 2018. – V. 22. – 67. – DOI: 10.1007/s10291-018-0731-0.
225. Ma, G. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan / G. Ma, T. Maruyama // Ann. Geophys. – 2003. – V. 21. – P. 2083–2093. – DOI: 10.5194/angeo-21-2083-2003.
226. Ma, X. Determination of GPS receiver differential biases by neural network parameter estimation method / X. Ma, T. Maruyama, G. Ma, T. Takeda // Radio Sci. – 2005. – V. 40, N 1. – RS1002. – DOI: 10.1029/2004 RS003072.
227. Magsi, H. Real-Time Monitoring and Logging of Ionospheric Scintillation and Total Electron Content / H. Magsi, A. Ahmed, A. Hussain // 2019

Sixth International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE) – 2019. – 19514429. – DOI: 10.1109/icase48783.2019.9059198

228. Maltseva, O. Obtaining Ionospheric Conditions according to Data of Navigation Satellites / O. Maltseva, N. Mozhaeva // International Journal of Antennas and Propagation. – 2015. – 804791. – DOI:10.1155/2015/804791.
229. Maltseva, O. Use of TEC to determine foF2: differences and similarities at high and low latitudes / O. Maltseva. – 2018. – P. 65-72. – DOI:10.1145/3278161.3278172.
230. Maltseva, O. Features of behaviour and connection of critical frequency Fof2 and total electron content TEC of the ionosphere in auroral zones of two hemispheres / O. Maltseva // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2019. – N 31. – P. 6-10.
231. Mannucci, A. J. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements / A. J. Mannucci, B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister, T. F. Runge // Radio Science. – 1998. – V. 33, N 3. – P. 565-582. – DOI: 10.1029/97RS02707.
232. Mannucci, A. J. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween Storms” / A. J. Mannucci, B. T. Tsurutani, B. A. Iijima, A. Komjathy, A. Saito, W. D. Gonzalez, F. L. Guarnieri, J. U. Kozyra, R. Skoug // Geophys. Res. Lett. – 2005. – V. 32. – L12S02. – DOI: 10.1029/2004GL021467.
233. Mannucci, A. J. Super-posed epoch analysis of the dayside ionospheric response to four intense geomagnetic storms / A. J. Mannucci, B. T. Tsurutani, M. A. Abdu, W. D. Gonzalez, A. Komjathy, E. Echer, B. A. Iijima, G. Crowley, D. Anderson // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113. – A00A02. – DOI: 10.1029/2007JA012732.
234. Mannucci, A. J. Inter-planetary magnetic field by control of prompt total electron content increases during superstorms / A. J. Mannucci, G. Crowley, B. T.

Tsurutani, O. P. Verkhoglyadova, A. Komjathy, P. Stephens.// J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 2014. – V. 115–116. – P. 7–16. – DOI: 10.106/j.jastp. 2014. 01.001.

235. Maus, S. The 10th-Generation International Geomagnetic Reference Field / S. Maus, S. Macmillan, T. Chernova, S. Choi, D. Dater, V. Golovkov, V. Lesur, F. Lowes, H. Lühr, W. Mai, S. McLean, N. Olsen, M. Rother, T. Sabaka, A. Thomson, T. Zvereva // Geophysical Journal International. – 2005. – V. 161, Issue 3. – P. 561–565. – <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02641.x>

236. Mayer, C. Ionosphere monitoring and interfrequency bias determination using Galileo: First results and future prospects / C. Mayer, C. Becker, N. Jakowski, M. Meurer // Adv. Space Res. – 2011. – V. 47, N 5. – P. 859–866. – DOI: 10.1016/j.asr.2010.12.006.

237. McClure, J. P. Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere / J. P. McClure, W. B. Hanson, J. H. Hoffman // J. Geophys. Res. – 1977. – V. 82, N 19. – P. 2650–2656. – DOI: 10.1029/JA082i019p02650.

238. Mendillo, M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content / M. Mendillo // Rev. Geophys. – 2006. – V. 44. – RG4001. – DOI: 10.1029/2005RG000193.

239. Mendoza, L. P. O. A multi-GNSS, multifrequency, and near-real-time ionospheric TEC monitoring system for South America / L. P. O. Mendoza, , A. M. Meza, J. M. Aragón Paz // Space Weather. – V. 17. – P. 654–661. – DOI: 10.1029/2019SW002187.

240. MIL-STD-188-110D. Departament of Defence interface standard. Interoperability and performance standards for data modems. US Department of Defense. – 29 December 2017.

241. Montenbruck, O. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps / O. Montenbruck, A. Hauschild, P. Steigenberger // J. Inst. Navig. – 2014. – V. 61. – P. 191–201. – DOI: 10.1002/navi.64.

242. Morton, Y. T. Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements / Y.T. Morton, Q. Zhou, F. van Graas // Radio science. – 2009. – V. 44. – RS1002. – DOI: 10.1029/2008RS003888.
243. 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. – DOI: 10.1016/j.rinp.2014.11.002.
244. 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. – 2017a. – V. 10466. – 104667I. – DOI:10.1117/12.2288688.
245. 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. – 2017b. – P. 3036–3040. – DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262276.
246. Nava, B. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model / B. Nava, P. Coïsson, S.M. Radicella // J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 2008. – V. 70, Issue 15. – P. 1856–1862. – DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.
247. Nesterov, I. A. Ionospheric perturbation indices based on the low- and high-orbiting satellite radio tomography data / I. A. Nesterov, E. S. Andreeva, A. M. Padokhin, Yu. S. Tumanova, M. O. Nazarenko // GPS Solutions. – 2017. – V. 21, N 4. – P. 1679–1694. – DOI: 10.1007/s10291-017-0646-1.
248. Ngwira, C.M. An investigation of ionospheric disturbances over South Africa during the magnetic storm on 15 May 2005 / C. M. Ngwira, L.-A. McKinnell, P. J. Cilliers, E. Yizangaw // Adv. Space Res. – 2012. – V. 49, N 2. – P. 327–335. – DOI: 10.1016/j.asr.2011.09.035.
249. Nishioka, M. Super-medium-scale traveling ionospheric disturbance observed at mid-latitude during the geomagnetic storm on 10 November 2004 / M.

Nishioka, A. Saito, T. Tsugawa // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – A07310. – DOI: 10.1029/2008 JA013581.

250. 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. – DOI: 10.1109/RWP.2019.8810327.

251. Ovodenko, V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results / V. B. Ovodenko, V. V. Trekin, N. A. Korenkova, M. V. Klimenko // Adv. Space Res. – 2015. – V. 56, N 5. – P. 900–906. – DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.017.

252. Ou, J. Atmosphere and its efects on GPS surveying. LGRSeries 14. / J. Ou // Delft Geodetic Computing Center, Delft. – 1996.

253. Parkinson, B. W. Global Positioning System: Theory and Applications V. 1. / B. W. Parkinson, J. J. Spilker // Progress in astronautics and aeronautics. – 1996. – 812 p.

254. Papagiannis, M.D. Low frequency radio astronomy through an artificially created ionospheric window / M. D. Papagiannis, M. Mendillo // Nature. – 1975. – V. 255. – P. 42–44.

255. Patyh, N. B. Near real time ionospheric monitoring system over Malaysia using GPS Data: My-Iono Service / N. B. Pathy, T. A. Musa, M. F. Asillam, W. A. W. Aris, S. S. Khamdan // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1152. – 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1152/1/012016.

256. Payne-Scott, R. Ionospheric effects noted during dawn observations on solar noise / R. Payne-Scott, L. L. McCready // Terr. Magn. Atmos. Electr. – 1948. – V. 53, N 4. – P. 429–432. – DOI: 10.1029/TE053i004p00429.

257. Perevalova, N. P. Parameters of large-scale TEC disturbances during the strong magnetic storm on 29 October 2003 / N. P. Perevalova, E. L. Afraimovich,

S. V. Voeykov, I. V. Zhivetiev // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2008. – V. 113. – A00A13. – DOI:10.1029/2008JA013137.

258. Pestana, A. Technical Report: Reading RINEX 2.11 Observation Data Files. – 2015. – DOI: 10.13140/RG.2.1.4888.4087.

259. Pi, X. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network / X. Pi, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, C. M. Ho // Geophys. Res. Lett. – 1997. – V. 24, N 18. – P. 2283–2286. – DOI: 10.1029/97GL02273.

260. Pignalberi, A. Effective Solar Indices for Ionospheric Modeling: A Review and a Proposal for a Real-Time Regional IRI / A. Pignalberi, M. Pezzopane, R. Rizzi, I. Galkin // Surv. Geophys. – 2017. – V. 39. – P. 125–167. – DOI: 10.1007/s10712-017-9438-y.

261. Polekh, N. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia / N. Polekh, N. Zolotukhina, V. Kurkin, G. Zherebtsov, J. Shi, G. Wang, Z. Wang // Advances in Space Research. – 2017. – V. 60, Issue 11. – P. 2464–2476. – DOI: 10.1016/j.asr.2017.09.030.

262. Porayko, N. K. Testing the accuracy of the ionospheric Faraday rotation corrections through LOFAR observations of bright northern pulsars / N. K. Porayko, A. Noutsos, C. Tiburzi, J. P. W. Verbiest, A. Horneffer, J. Künsemöller, S. Osłowski, M. Kramer, D. H. F. M. Schnitzeler, J. M. Anderson, M. Brüggen, J. - M. Grießmeier, M. Hoeft, D. J. Schwarz, M. Serylak, O. Wucknitz // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2019. – V. 483, N 3. – P. 4100–4113. – DOI: 10.1093/mnras/sty3324.

263. Price, R. A Communication Technique for Multipath Channels / R. Price, P. E. Green // Proc. IRE. – 1958. – V. 46. – P. 555–570. – DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286870.

264. Psiaki, M. L. Block acquisition of weak GPS signals in a software receiver / M. L. Psiaki // ION GPS, Salt Lake City, UT. – 2001. P. 2838–2850.

265. Raab, F. HF, VHF, and UHF systems and technology / F. Raab, R. Caverly, R. Campbell, M. Eron, J. Hecht, A. Mediano, D. Myer, J. Walker // IEEE

Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – V. 50. – P. 888–899. – DOI: 10.1109/22.989972.

266. Rama Rao, P.V.S. Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from the Indian GPS network of receivers during the low solar activity period of 2004–2005 / P.V.S. Rama Rao, G. Seemala, K. Niranjan, D. Prasad // Annales Geophysicae. – 2006. – V. 24. – DOI: 10.5194/angeo-24-3279-2006.

267. Rama Rao, P. V. S. Geomagnetic storm effects on GPS based navigation / P.V.S. Rama Rao, G. Seemala, J. Vara Prasad, S. N. V. S. Prasad, D. Prasad, K. Niranjan // Ann. Geophys. – 2009. – V. 27. – P. 2101–2110. – DOI: 10.5194/angeo-27-2101-2009.

268. Reiff, P.H. Multispacecraft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm / P. H. Reiff, A. G. Daou, S. Y. Sazykin, R. Nakamura, M. R. Hairston, V. Coffey, M. O. Chandler, B. J. Anderson, C. T. Russell, D. Welling, S. A. Fuselier, K. J. Genestreti // Geophys. Res. Lett. – 2016. – V. 43, N 14. – P. 7311–7318. – DOI: 10.1002/2016GL069154.

269. Reber, G. Cosmic radio-frequency radiation near one megacycle / G. Reber, G. R. Ellis // Journal of Geophysical Research. – 1956. – V. 61, N 1. – P. 1–10. – DOI: 10.1029/JZ061i001p00001.

270. Reussner, N. GLONASS Inter-frequency Biases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution / N. Reussner, L. Wanninger // 24th International technical meeting of the satellite division of the Institute of navigation, Portland OR, September 19-23, 2011. – 2012. – P. 712–716.

271. 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. DOI: 10.1007/s10291-006-0029-5.

272. Roma-Dollase, D. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle / D. Roma-Dollase, M. Hernandez-Pajares, A. Krankowski, K. Kotulak, R. Ghoddousi-Fard, Y. Yuan, Z.

Li, et al. // Journal of Geodesy. – 2018. – V. 92, N 6. – P. 691–706. – DOI: 10.1007/s00190-017-1088-9.

273. Rui, T. On ionosphere-delay processing methods for single-frequency precise-point positioning / T. Rui, Z. Qin, H. Guanwen, Z. Hong // Geodesy and Geodynamics. – 2011. – P. 71–76. – DOI: 10.3724/SP.j.1246.2011.00071.
274. Ryle, M. The Effects of the Terrestrial Ionosphere on the Radio Waves from Discrete Sources in the Galaxy / M. Ryle, A. Hewish // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1950. – V. 110, Issue 4. – P. 381–394. DOI: 10.1093/mnras/110.4.381.
275. Saeys, Y. Robust feature selection using ensemble feature selection techniques / Y. Saeys, T. Abeel, Y. Van de Peer // Proceedings of the 2008th European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases - Volume Part II (ECMLPKDD'08), Walter Daelemans, Bart Goethals, and Katharina Morik (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. – 2008. – V. Part II. – P. 313–325. – DOI: 10.1007/978-3-540-87481-2\_21.
276. Sahai, Y. Effects of the major geomagnetic storms of October 2003 on the equatorial and low-latitude F region in two longitudinal sectors / Y. Sahai, P. R. Fagundes, F. Becker-Guedes, M. J. A. Bolzan, J. R. Abalde, V. G. Pillat, R. de Jesus, W. L. C. Lima, et al. // J. Geophys. Res. – 2005. – V. 110. – A12S91. – DOI: 10.1029/2004JA010999.
277. Sardón, E. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations / E. Sardón, A. Rius, N. Zarraoa // Radio Sci. – 1994. – V. 29, N 3. – P. 577–586. – DOI: 10.1029/94RS00449.
278. Sato, H. Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies / H. Sato, N. Jakowski , J. Berdermann, K. Jiricka, A. Heßelbarth, D. Banyś, V. Wilken // Space Weather. – 2019. – V. 17. – P. 816–826. – DOI: 10.1029/2019SW002198.

279. Schaer, S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system: Doctoral dissertation / S. Schaer; Univ. Bern, Switzerland. – 1999.
280. Schaer, S. IONEX: The ionosphere map exchange format Version 1 / S. Schaer, W. Gurtner, J. Feltens // Proc. IGS AC Workshop. – Darmstadt, Germany. – 1998a. – P. 233–247.
281. Schaer, S. Mapping and predicting the ionosphere / S. Schaer, G. Beutler, M. Rothacher // Proc. IGS AC Workshop. – Darmstadt, Germany, February 9–11. – 1998b. – P. 307–320.
282. Seemala, G. GPS-TEC analysis software / G. Seemala. – 2012. <http://seemala.blogspot.com/>.
283. Sergeeva, M. A. Features of TEC behaviour over the low-latitude North-American region during the period of medium solar activity / M. A. Sergeeva, O. A. Maltseva, J. A. Gonzalez-Esparza, V. De la Luz, P. Corona-Romero // Adv. Space Res. – 2017. – V. 60, Issue 8. – P. 1594–1605. – DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.021.
284. Sergeeva, M. TEC behavior over the Mexican region / M. Sergeeva, O. Maltseva, A. Gonzalez-Esparza, J. Mejia-Ambriz, V. De la Luz, P. Corona-Romero, L. Gonzalez, V. Gatica Acevedo, E. Romero-Hernandez, M. Rodriguez-Martinez, E. Aguilar-Rodriguez // Ann. of Geophysics. – 2018. – V. 61. – GM104. – DOI: 10.4401/ag-7465.
285. She, C. Estimation of Ionospheric Total Electron Content From a Multi-GNSS Station in China / C. She, X. Yue, L. Hu, F. Zhang // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2019. V. 58, N2. – P. 852 - 860. – DOI: 10.1109/TGRS.2019.2941049.
286. Smith, F. G. Ionospheric refraction of 81.5 Mc/s radio waves from radio stars / F. G. Smith // J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 1952. – V. 2, Issue 6. – P. 350–355. – DOI: 10.1016/0021-9169(52)90075-5.

287. Smith, D. A. Computing unambiguous TEC and ionospheric delays using only carrier phase data from NOAA's CORS network / D. A. Smith // PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556), Monterey, CA, USA. – 2004. – P. 527–537. – DOI: 10.1109/PLANS.2004.1309038.
288. 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. – <https://www.stat.berkeley.edu/~stark/Preprints/bvls.pdf>.
289. Spaceflight now. Recap story: Last GPS satellite of its generation arrives in space. February 7, 2016. – <https://spaceflightnow.com/2016/02/07/recap-story-last-gps-satellite-of-its-generation-arrives-in-space/>. Дата обращения 14.11.2018.
290. Spoelstra, T.A.T. The influence of ionospheric refraction on radio astronomy interferometry / T.A.T. Spoelstra // Astronomy and Astrophysics. – 1983. – V. 120, N 2. – P. 313–321. – DOI: 10.1007/978-94-009-7846-1\_127.
291. Sreeja, V. Impact of the 24 September 2011 solar radio burst on the performance of GNSS receivers / V. Sreeja, M. Aquino, K. Long // Space Weather. – 2013. – V. 11. – P. 306–312. – DOI: 10.1002/swe.20057.
292. Teunissen, P. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / P. Teunissen, O. Montenbruck. Switzerland: Springer. – 2017. – 1327 p. ISBN 978-3-319-42926-7. – DOI: 10.1007/978-3-319-52928-1.
293. Themens, D. R. Determining receiver biases in GPS-derived total electron content in the auroraloval and polar cap region using ionosonde measurements / D. R. Themens, P. T. Jayachandran, R. B. Langley, J. W. Mac Dougall, M. J. Nicolls // GPS Solut. – 2013. – V. 17, N 3. – P. 357–369. – DOI: 10.1007/s10291-012-0284-6.
294. Themens, D. R. The nature of GPS differential receiver bias variability: An examination in the polar cap region / D. R. Themens, P. T. Jayachandran, R. B. Langley // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2015. – V. 120. – P. 8155–8175. – DOI: 10.1002/2015JA021639.

295. Themens, D. R. The Empirical Canadian High Arctic Ionospheric Model (E-CHAIM): NmF2 and hmF2 / D. R. Themens, P. T. Jayachandran, I. Galkin, C. Hall // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2017. – V. 122. – P. 9015–9031. – DOI: 10.1002/2017JA024398.
296. Titov, A. A. Real-time monitoring of the ionospheric state with the use of a 3D assimilation model / A. A. Titov, D. V. Solomentsev, V. U. Khattatov // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. V. 58, N 6. – P. 509-516. DOI: 10.1134/S1064226913030121.
297. Tsurutani, B. Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields / B. Tsurutani, A. Mannucci, B. Iijima, M. A. Abdu, H. A. Sobral, W. Gonzalez, F. Guarneri, T. Tsuda et al. // J. Geophys. Res. – 2004. – V. 109, A08302. – DOI: 10.1029/2003JA010342, 2004.
298. Tulunay, E. Development of algorithms and software for forecasting, nowcasting and variability of TEC / E. Tulunay, E. T. Senalp, L. R. Cander, Y. K. Tulunay, A. H. Bilge, E. Mizrahi, S. S. Kouris, N. Jakowski // Annals of Geophysics. – 2004. – V. 47. N 2-3 Sup. – P. 1201–1214. – DOI: 10.4401/ag-3294.
299. Vapnik, V. Statistical Learning Theory. John Wiley and Sons, Inc., New York. 1998. – p. 768.
300. Vedantham, H. K. Chromatic effects in the 21cm global signal from the cosmic dawn / H. K. Vedantham, L. V. E. Koopmans, A. G. de Bruyn, S. J. Wijnholds, B. Ciardi, M. A. Brentjens // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2014. – V. 437, Issue 2. – P. 1056–1069. DOI: 10.1093/mnras/stt1878.
301. Wang, N. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations / N. Wang, Y. Yuan, Z. Li, O. Montenbruck, B. Tan // J. Geod. – 2016. – V. 90. – P. 209–228. – DOI: 10.1007/s00190-015-0867-4.
302. Waterman, M. S. A restricted least squares problem / M. S. Waterman // Technometrics. – 1974. – V. 16, N 1. – P. 135–136.

303. Warrington, E. M. Near real-time input to a propagation model for nowcasting of HF communications with aircraft on polar routes / E. M. Warrington, A. J. Stocker, D. R. Siddle, J. Hallam, H. A. H. Al-Behadili, N. Y. Zaalov, F. Honary, N. C. Rogers, D. H. Boteler, D. W. Danskin // Radio Sci. – 2016. – V. 51. – P. 1048–1059. – DOI: 10.1002/2015RS005880.
304. Wild, J. P. An Investigation of the Speed of the Solar Disturbances Responsible for Type III Radio Bursts. Australian / J. P. Wild, K. V. Sheridan, A. A. Neylan // Journal of Physics. – 1959. – V. 12. – P. 369–398.
305. Wilken, V. An ionospheric index suitable for estimating the degree of ionospheric perturbations / V. Wilken, M. Kriegel, N. Jakowski, J. Berdermann // J. Space Weather Space Climate. – 2018. – V. 8. – A19. – DOI: 10.1051/swsc/2018008.
306. Xiang, Y. Carrier phase-based ionospheric observables using PPP models / Y. Xiang, Y. Gao, J. Shi, C. Xu // Geodesy and Geodynamics. – 2017. – V. 8, N 1. – P. 17–23. – DOI: 10.1016/j.geog.2017.01.006.
307. Yan, W. M. Polarization observations of 20 millisecond pulsars / W. M. Yan, R. N. Manchester, W. van Straten, J. E. Reynolds, G. Hobbs, N. Wang, et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2011. – V. 414, Issue 3. – P. 2087–2100. – DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18522.x.
308. 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. – 2015a. – V. 5. – P. 32-33. –DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
309. 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 – 2015b. G12–4. – DOI: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303136.
310. 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 – 2015c. G12-5. – DOI: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303137.

311. 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. – 2015d. – P. 2548–2552.

312. 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. – DOI: 10.1029/2018SW001932.

313. 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. – DOI: 10.3390/s20195702.

314. 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. – DOI: 10.1007/s10291-021-01091-5.

315. 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. – DOI: 10.3390/universe8020098.

316. Yeh, K. C. Radio wave scintillations in the ionosphere / K. C. Yeh, C. H. Liu // Proc. IEEE. – 1982. – V. 70, N 4. – P. 24–64. – DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.

317. Yue, X. The effect of solar radio bursts on the GNSS radio occultation signals / X. Yue, W. S. Schreiner, Y. H. Kuo, B. Zhao, W. Wan, Z. Ren, et al. // Journal of Geophysical Research Space Physics. – 2013. – V. 118. – P. 5906–5918. – DOI: 10.1002/jgra.50525.
318. Yue, X. The effect of solar radio bursts on GNSS signals / X. Yue, W. Wan, L. Yan, W. Sun, L. Lu, W. S. Schreiner // Extreme Events in Geospace, Origins, Predictability, and Consequences. – 2018. – P. 541–554. – DOI: 10.1016/B978-0-12-812700-1.00022-4.
319. Zakharenkova, I. GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm / I. Zakharenkova, E. Astafyeva, I. Cherniak // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2016. – V. 121. – P. 12138–12156. – DOI: 10.1002/2016JA023332.
320. Zhang, B. Three methods to retrieve slant total electron content measurements from ground-based GPS receivers and performance assessment / B. Zhang // Radio Sci. – 2016. – V. 51. – P. 972–988. – DOI: 10.1002/2015RS005916.
321. Zhang, H. Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares / H. Zhang, P. Xu, W. Han, M. Ge, C. Shi // Adv. Space Res. – 2013. – V. 1, N 6. – P. 988–1000. – DOI: 10.1016/j.asr.2012.06.026.
322. Zhang, D. The variation of the estimated GPS instrumental bias and its possible connection with ionospheric variability / D. Zhang, H. Shi, Y. Jin, W. Zhang, Y. Hao, Z. Xiao // Sci. China. – 2014. – V. 57. – P. 67–79. DOI: 10.1007/s11431-013-5419-7.
323. Zhao, B. Ionosphere disturbances observed throughout Sout-East Asia of the superstorm of 20–22 November 2003 / B. Zhao, W. Wan, K. Tschu, K. Igarashi, T. Kikuchi, K. Nozaki, et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2008. – V. 113. – A00A04. – DOI: 10.1029/2008JA013054.

324. Zhong, J. Assessment of vertical TEC mapping functions for space-based GNSS observations / J. Zhong, J. Lei, X. Dou, X. Yue // GPS solutions. – 2016a. – V. 20. – P. 353–362. – DOI: 10.1007/s10291-015-0444-6.
325. Zhong, J. Is the long-term variation of the estimated GPS differential code biases associated with ionospheric variability? / J. Zhong, J. Lei, X. Dou, X. Yue // GPS Solut. – 2016b. V. 20. – P. 313–319. – DOI: 10.1007/s10291-015-0437-5, 2016b.
326. 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.
327. 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. – 2018b. – P. 1–3. – DOI:10.23919/URSI-AT-RASC.2018.8471588.
328. Zolesi, B. Simplified ionospheric regional model for telecommunication applications / B. Zolesi, L. R. Cander, G. D. Franceschi // Radio Sci. – 1993. – V. 28, N 4. – P. 603–612. – DOI: 10.1029/93RS00276.
329. Zolesi, B. Real-time updating of the Simplified Ionospheric Regional Model for operational applications / B. Zolesi, A. Belehaki, I. Tsagouri, L. R. Cander // Radio Sci. –2004. –V. 39, N 2. RS2011. – DOI: 10.1029/2003RS002936.
330. Zolesi, B. Ionospheric prediction and forecasting / B. Zolesi, L. Cander // Springer Geophysics. – 2014. – 240 p. – DOI: 10.1007/978-3-642-38430-1\_1.
331. Zolesi, B. SWING: A European project for a new application of an ionospheric network / B. Zolesi, C. Bianchi, A. Meloni, J. A. Baskaradas, A. Belehaki, D. Altadill, E. Dalle Mese // Radio Sci. – 2016. – V. 51. – P. 421–428. – DOI: 10.1002/2016RS006037.