

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)

На правах рукописи

Холмогоров Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ИНФОРМАТИВНОСТИ СПУТНИКОВОЙ
РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ**

01.04.03 – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
профессор Иванов Всеволод Борисович

Иркутск – 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Повышение точности позиционирования спутниковой радионавигации при использовании модели полного электронного содержания GEMTEC.....	14
1.1 Ионосфера и ее влияние на работу систем спутниковой радионавигации	14
1.2 Модель Клобучара	21
1.3 Модель NTSM_GL.....	24
1.4 Модель GEMTEC	29
1.5 Тестирование модели GEMTEC на регистрационных стендах ИГУ/ИФ МГТУ ГА.....	44
1.6 Тестирование модели GEMTEC по данным станций системы IGS	48
1.7 Выводы по главе	53
Глава 2. Дифференциально-временной режим для спутниковых радионавигационных систем.....	55
2.1 Повторяемость суточного хода ошибки позиционирования.....	55
2.2 Дифференциально-временной режим GPS.....	65
2.3 Дифференциально-временной режим для ГЛОНАСС и GPS+ГЛОНАСС	71
2.4 Альтернативный дифференциально-временной режим	73
2.5 Выводы по главе	76
Глава 3. Использование одночастотных приемников для регистрации нерегулярных событий в ионосфере.....	77
3.1 Двухчастотные и одночастотные измерения полного электронного содержания ионосферы.....	77
3.2 Регистрация ионосферного эффекта солнечных затмений на примере события 20 марта 2015.....	79

3.3	Регистрация ионосферных эффектов мощных землетрясений на примере землетрясений в Японии 11 марта 2011 и Чили 27 февраля 2010.....	85
3.4	Регистрация ионосферного эффекта взрыва Челябинского метеороида 15 февраля 2016.....	95
3.5	Выводы по главе	102
	Заключение.....	103
	Литература.....	104

Введение

Актуальность темы

Задолго до запуска первого искусственного спутника земли было обнаружено существование вокруг Земли среды, влияющей на распространение радиосигналов - ионосферы. Ее исследовали с помощью множества различных средств диагностики, таких, как ионозонды, радары некогерентного рассеяния и т.п. Во время запуска первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 было также обнаружено, что сигнал, идущий от спутника к наземному приемнику через атмосферу, претерпевает некоторые изменения, обусловленные состоянием среды распространения. В дальнейшем данные свойства привели к созданию различных средств зондирования, с помощью искусственных спутников земли, например, трансionoсферное зондирование [1, 2]. Новые аспекты ионосферных исследований появились в связи с созданием спутниковых радионавигационных систем. При создании глобальных спутниковых систем навигации (ГНСС) ионосферные искажения сигнала являются нежелательными, и поэтому их стараются максимально устранить. Хотя полностью нивелировать влияние среды распространения не удается.

Основной вклад из всех частей атмосферы на распространение сигнала оказывает ионосфера [3]. В настоящее время существует ряд способов борьбы с ее влиянием, такие, как использование моделей ионосферы в одночастотном режиме, дифференциальный режим работы, для которого требуется приемник с уже известными координатами, использование двухчастотных приемников спутниковой навигации.

Самым популярным и простым способом борьбы с влиянием ионосферы на ошибку позиционирования одночастотных приемников ГНСС является использование моделей полного электронного содержания ионосферы. В американской спутниковой навигационной системе GPS, первый спутник которой был запущен в феврале 1978 года [4], используется так называемая модель ионосферы Клобучара [5]. Данная модель была создана около 30-ти лет назад и по

сей день используется как основная в системе GPS. Однако поскольку модель создавалась достаточно давно, когда технологии создания процессоров были еще слабо развиты, то к модели выдвигались весьма жесткие требования по минимизации затрачиваемых ресурсов на ее работу. Поэтому модель была теоретической и максимально весьма упрощенной. Но вместе с тем она позволяет снизить ошибку позиционирования из-за влияния ионосферы на величину около 50-ти процентов [5].

Микропроцессорные технологии не стояли на месте и позволили использовать более сложные модели в плане производительности и ресурсоемкости. Но спутниковые системы тоже развивались, строилось все больше станций наблюдения, на основе которых были получены карты ионосферы с некоторым расширением по пространственной сетке, которые затем легли в основу эмпирических моделей ПЭС. В настоящее время существуют, по меньшей мере, две такие модели: NTCM_GL [6], созданная в Европе, и модель GEMTEC [7], созданная в Иркутском Государственном Университете (ИГУ) и Иркутском филиале Московского технического университета гражданской авиации (ИФ МГТУ ГА). Стоит отметить, что представлены они были в один и тот же год – 2011. Автор данной диссертации не принимал участие в создании первого варианта модели GEMTEC. Он присоединился к работе над данной моделью на этапе модернизации и тестирования.

В Иркутском университете под руководством профессора Полякова В. М. активно развивалось направление математического моделирования различных параметров ионосферы с использованием полуэмпирического подхода. На основе данного подхода была создана полуэмпирическая модель ионосферы ПЭМИ [8], «идеология» которой легла в основу эмпирической модели GEMTEC. Проведенное тестирование показало, что данные эмпирические модели показывают лучший результат по сравнению с использованием модели Клобучара, причем GEMTEC показала несколько лучший результат, чем модель NTCM_GL, компенсируя около 80% ошибки ионосферы, обусловленной вкладом ионосферы в дополнительное запаздывание радиосигналов [9].

Как упоминалось выше, еще одним способом уменьшения ошибки позиционирования является использование дифференциального режима работы. Метод заключается в следующем. На некотором расстоянии друг от друга работают 2 приемника ГНСС, включенные в данный режим. Причем один из них имеет известные координаты, и на их основе вычисляются ошибки позиционирования, которые должен учесть второй приемник с неизвестными координатами для уменьшения своей ошибки позиционирования и передает их по специальным каналам связи.

Автор совместно с научным руководителем предложили и протестировали дифференциально-временной режим (ДВР) для различных ГНСС. В основу ДВР была положена обнаруженная особенность поведения суточного хода ошибки позиционирования. Данная особенность заключается в повторяемости временного хода ошибки позиционирования в соседних сутках для приемников, разнесенных на весьма значительные расстояния. Как было показано, причина заключается в повторяемости погрешности расчетов эфемерид спутников (положение спутников) в соседних сутках. Поэтому ограничением на использование дифференциально-временного режима является то, что приемники должны использовать для решения своей навигационной задачи одни и те же или почти одни и те же спутники. Принцип работы ДВР похож на обычный дифференциальный режим, но записываемые ошибки позиционирования на приемнике с известными координатами передаются не в тот же момент на второй приемник, а на следующие сутки, например, через интернет. Данный подход проще, потому что для его работы не нужно использовать специализированные средства для связи приемников. ДВР показал свою эффективность в сравнении с режимом без его использования, но данный режим все-таки уступает по точности штатному дифференциальному режиму позиционирования.

В настоящее время для диагностики ионосферы с использованием ГНСС применяется двухчастотный режим, заключающийся в приеме сигналов на двух различных частотах (L_1 , L_2). Данный метод получил значительное развитие под руководством профессора Э.Л. Айфрамovichа и его учеников (институт солнечно-

земной физики СО РАН). В частности, использование ГНСС для диагностики ионосферы подробно описано в [10]. Также значительное развитие подобной диагностики было достигнуто из-за популярности GPS (а впоследствии и ГЛОНАСС) и значительного развития ГНСС, а именно, создания обширной сети станций слежения. Благодаря данному режиму и были созданы карты ПЭС, упомянутые ранее.

Вместе с тем был незаслуженно, с нашей точки зрения, отодвинут на задний план способ диагностики ионосферы посредством одночастотных спутниковых наблюдений. Именно этому методу в данной работе было уделено внимание в последней главе. Тестирование показало, что одночастотный режим, хотя и имеет меньшую точность по сравнению с двухчастотным режимом, но также, как и двухчастотный позволяет диагностировать такие явления, как солнечное затмение, мощные землетрясения и взрывы больших метеороидов.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является исследование способов уменьшения ошибок позиционирования при использовании одночастотной аппаратуры спутниковых радионавигационных систем и изучение возможностей применения одночастотных приемников для диагностики ионосферы.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ существующих методов уменьшения ошибок позиционирования и подробное рассмотрение существующих моделей полного электронного содержания ионосферы.
2. Модернизация и тестирование модели ПЭС GEMTEC в сравнении с моделями Клобучара и NTCM_GL.
3. Разработка нового дифференциально-временного режима позиционирования для глобальных навигационных спутниковых систем.
4. Тестирование созданного метода ДВР для различных навигационных систем (GPS и ГЛОНАСС).
5. Анализ возможности использования одночастотных приемников для

диагностики ионосферы.

6. Сравнение данных диагностики ионосферы по одночастотным и двухчастотным измерениям.

Научная новизна

1. Впервые была произведена модернизация начального варианта модели полного электронного содержания GEMTEC, которая позволила улучшить показатели по остаточной ошибке позиционирования и объему требуемой базы данных. Впервые было произведено сравнение остаточной ошибки позиционирования при использовании трех моделей: GEMTEC, NTSM_GL и Клобучара, в результате которого модель GEMTEC показала лучший результат.

2. Предложен новый дифференциально-временной режим позиционирования в глобальных спутниковых навигационных. Данный режим на основе проведенных тестов показал свою эффективность.

3. Впервые подробно исследована возможность регистрации нерегулярных явлений в ионосфере посредством одночастотной спутниковой радионавигационной аппаратуры. Результаты диагностики сравнивались с широко используемым методом двухчастотной диагностики ионосферы на примере следующих событий: солнечное затмение, мощные землетрясения, падение Челябинского метеороида.

Научная и практическая ценность работы

Научная значимость работы обусловлена, в первую очередь, демонстрацией возможностей диагностики ионосферы с использованием широко распространенной одночастотной радионавигационной аппаратуры.

Практическая ценность диссертации заключается в разработке методик повышения точности позиционирования в спутниковых радионавигационных системах в сравнении с методиками, используемыми штатно в настоящее время.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в данной работе, обусловлена использованием физически обоснованных методов и большой статистикой наблюдений. Также полученные результаты не противоречат работам других авторов и подтверждаются данными, полученными иными методами.

Апробация работы

Основные результаты и выводы докладывались автором на следующих научных мероприятиях: XV, XIV и XIII Байкальские Международные школы по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2017 г., 2015 г. и 2013 г.), XX Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники». (Красноярск, 2017 г.), XII Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника (г. Томск, 2016г.), V International Conference "Atmosphere, Ionosphere, Safety" (Калининград, 2016г.), два доклада на XVII Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 2015), где один из них был удостоен 3 степени, XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн" (Иркутск, 2014 г.), а также на научных семинарах кафедры радиофизики и радиоэлектроники физического факультета ИГУ.

Личный вклад автора

Основные результаты работы получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в модернизации модели GEMTES, ее тестировании и обработке измерений для диагностики ионосферы. Совместно с научным руководителем разрабатывалась концепция дифференциально-временного режима позиционирования. Автору принадлежит разработка алгоритмов и программ, а также сбор и обработка статистических данных. Анализ и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем.

Защищаемые положения

1. Использование модели полного электронного содержания GEMTEC существенно уменьшает среднюю ошибку позиционирования, в среднем примерно вдвое, в сравнении с широко применяемой в настоящее время стандартной методикой на основе модели Клобучара.

2. Решение навигационной задачи с использованием модели GEMTEC, внедренной в опытных образцах серийных отечественных навигационных приемников МНП-М7 и МНП-М9 производства Ижевского радиозавода, демонстрирует практическую применимость модели и заметное повышение точности позиционирования.

3. Разработанный, физически обоснованный и протестированный метод дифференциально-временной коррекции для спутниковых радионавигационных систем обеспечивает повышение точности позиционирования.

4. Показана возможность использования одночастотной спутниковой радионавигационной аппаратуры для регистрации нерегулярных эффектов в ионосфере на примерах анализа реакции полного электронного содержания на солнечное затмение, мощные землетрясения, падение крупного метеороида.

Публикации

Полученные результаты опубликованы в 24-х печатных работах, 7 из которых входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК, для публикации материалов диссертаций - журналы «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», «Геомагнетизм и аэрономия», «Солнечно-земная физика», «Гироскопия и навигация», «Космические исследования», «Научный вестник МГТУ ГА».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения и списка литературы, содержащего 86 наименования. Общий объем диссертации – 114 страниц, включая 39-ти рисунков, 18-ти таблиц.

Во Введении представлена общая информация о работе, поставлены задачи и рассмотрены актуальность и научная новизна темы исследования. Приведен список конференций, где была представлена данная работа и дано её краткое содержание.

Первая глава посвящена введению в область исследования и рассмотрению моделей полного электронного содержания ионосферы.

В пункте 1.1. представлена основная информация об ионосфере как о среде распространения радиосигналов. Подробно рассмотрено, как именно ионосфера влияет на прохождения сигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем (ГНСС). Приведены основные источники ошибок позиционирования приемников ГНСС помимо ионосферы. Рассматриваются особенности коррекции ионосферной задержки в одночастотной аппаратуре.

В пункте 1.2. рассмотрена штатная модель полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) - модель Клобучара. Излагается принцип ее работы и особенности функционирования.

В пункте 1.3. рассмотрена эмпирическая модель ионосферы NTCM_GL. Рассмотрен принцип ее построения и основные результаты ее тестирования.

В пункте 1.4. подробно рассмотрена эмпирическая модель ионосферы GEMTEC, созданная на физическом факультете ИГУ и в ИФ МГТУ ГА. Детально представлен математический аппарат модели, история создания и тестирования. Также описано, как производилась оптимизация данной модели с целью уменьшения объема требуемой информации и улучшения точности позиционирования.

В пункте 1.5. представлена информация о тестировании модели GEMTEC в сравнении с моделью Клобучара на собственных наблюдательных пунктах в ИГУ и ИФ МГТУ ГА. Описаны свойства приемника МНП-М7 производства Ижевского завода. Представлены сами результаты тестирования.

В пункте 1.6. приведена информация о тестировании указанных трех моделей ПЭС по данным сети международных станций IGS (International GNSS Service). Сравнивалась воспроизводимость ПЭС моделями в сравнении с ПЭС

определенным по глобальным картам GIM. В данном разделе приведены основные результаты тестирования остаточной ошибки позиционирования.

В пункте 1.7. сделаны основные выводы по данной главе.

Вторая глава посвящена дифференциально-временному режиму для спутниковой радионавигационной аппаратуры.

В пункте 2.1 описаны физические основы дифференциально-временного режима (ДВР), а именно особенность суточного хода ошибки позиционирования, связанная повторяемостью ошибки орбит.

В пункте 2.2. приведен принцип работы ДВР и результаты его тестирования ДВР на собственных наблюдательных пунктах и станциях сети IGS, разнесенных на расстояние до 100 км, для спутниковой системы GPS. Показана эффективность сглаживания корректирующих данных и эффективность ДВР.

В пункте 2.3. приведен результат работы ДВР для спутниковой системы ГЛОНАСС и совместном использовании ГЛОНАСС и GPS. Показано, что для системы ГЛОНАСС ДВР работает менее эффективно, чем для системы GPS. Вместе с тем эффективность ДВР при совместном использовании GPS и ГЛОНАСС сохраняется на достаточно высоком уровне.

В пункте 2.4. представлен альтернативный дифференциально-временной режим, отличие которого от ДВР заключается в том, что корректировке подвергается не остаточная ошибка позиционирования, а псевдодальность для спутника. В результате предварительного тестирования показана его эффективность в сравнении с режимами: без коррекции, с использованием моделей Клобучара и GEMTEC, а также в сравнении с ДВР и двухчастотным режимом коррекции.

В пункте 2.5. сделаны основные выводы по второй главе.

Третья глава посвящена изучению возможностей использования одночастотных приемников для диагностики ионосферы.

В пункте 3.1. описаны принципы восстановления ПЭС по данным одночастотных и двухчастотных измерений.

В пункте 3.2 рассмотрен эффект солнечного затмения 20 марта 2015г по

данным одночастотных и двухчастотных измерений. Показана возможность регистрации столь мощного эффекта одночастотными приемниками. Показано, что при сглаживании одночастотных измерений получаем хорошее согласование с данными двухчастотных измерений.

В пункте 3.3. рассмотрены ионосферные эффекты землетрясений на примере событий в Японии 11 марта 2011 года и Чили 27 февраля 2010 года. Наряду с эффектом квазипериодических флуктуаций рассмотрены эффекты иного характера – излома на временном ходе ПЭС. Рассчитано время и скорость возмущений, формирующих первичный отклик ПЭС. Показана возможность использования более точного Р-кода для диагностики ионосферных эффектов.

В пункте 3.4. рассмотрены ионосферные эффекты падения Челябинского метеороида. Дано описание ионосферных эффектов падения Челябинского метеороида по данным радара некогерентного рассеяния, ионозондов и двухчастотной спутниковой навигационной аппаратуры. Показана возможность использования одночастотной спутниковой аппаратуры для регистрации данных эффектов. Рассчитано время и скорость возмущений, формирующих первичный отклик ПЭС.

В пункте 3.5. сделаны основные выводы по третьей главе.

В Заключении представлены основные результаты исследования.

Глава 1. Повышение точности позиционирования спутниковой радионавигации при использовании модели полного электронного содержания GEMTEC

В данной главе представлена информация об ионосфере как среде распространения радиоволн [11, 12] и её влиянии на сигналы спутниковых радионавигационных систем. Одной из возможностей уменьшения влияния ионосферы является использование двухчастотных приемников спутниковых сигналов, но такие приемники ограничены в применении из-за довольно высокой стоимости. Поэтому массовый потребитель использует одночастотную аппаратуру. Основным способом коррекции ионосферного запаздывания в ионосфере в одночастотных приемниках является использование различных моделей полного электронного содержания ионосферы (ПЭС). В настоящее время известны, по меньшей мере, три модели ПЭС, которые могут быть использованы для коррекции дополнительного ионосферного запаздывания: модель Клобучара, модель NTSM_GL и модель GEMTEC. В данной главе каждая из трех указанных моделей подробно описана. Представлены результаты модификации и оптимизации исходного варианта модели GEMTEC, выполненные непосредственно диссертантом. В завершении главы приведены результаты тестирования, заключающегося в сравнении эффективности моделей ПЭС между собой и в сравнении с двухчастотным режимом позиционирования, также выполненные диссертантом.

1.1 Ионосфера и ее влияние на работу систем спутниковой радионавигации

Ионосфера представляет собой сложную среду, состоящую в основном из слабо ионизированной плазмы, в которой протекает множество разнообразных явлений и процессов. Существует большое количество факторов, от которых зависит концентрация электронов в ионосфере и, как будет более подробно описано далее, ее влияние на прохождение радиосигналов, в частности

спутниковых радионавигационных систем. Среди наиболее важных факторов, определяющих состояние ионосферы, следует указать географическое положение ионосферной точки – ее широта и долгота, местное время, сезон года и интенсивность солнечного ультрафиолетового ионизирующего излучения. Учет этих факторов и является основной целью моделирования ионосферы, в том числе и для задач спутниковой радионавигации.

Со времен запуска первого искусственного спутника обнаруживается тот факт, что ионосфера вносит свои коррективы в распространение радиосигнала от спутника до приемника. И при проектировании первых спутниковых радионавигационных систем необходимо было учесть влияние ионосферы на работу систем спутниковой навигации. Далее в диссертации подлежат рассмотрению две полностью функционирующие в настоящее время системы – это американская система GPS, группировка спутников которой на конец 2017 года насчитывала 31 работающих спутников разных поколений, и российская ГЛОНАСС, располагающая на конец 2017 года – 24 спутниковыми аппаратами на орбите.

Все спутники системы GPS передают непрерывные сигналы как обычно на двух основных несущих частотах L1 и L2, которые кодируются различными цифровыми ортогональными последовательностями при помощи фазовой манипуляции. Существуют коды двух видов: C/A – код, длительность которого составляет 1 мс и частота повторений - 1,023 МГц, что дает длину импульса или кода в 300 м; P - код, защищенный код, повторяющийся через 267 суток и частотой 10,23 МГц, что дает длину импульса в 30 м. Спутники GPS вращаются по почти круговой орбите на высоте около 20 000 км, из чего следует, что время обращения спутника вокруг Земли составляет 11 часов 58 минут.

В отличие от системы GPS в спутниковой системе ГЛОНАСС используется (в основном) частотное разделение навигационных сигналов от спутников. Каждый спутник передает сигналы также как минимум на двух частотах в диапазонах L1 и L2 и двух видов: стандартной точности – для гражданского использования, и повышенной точности – для военных нужд. Спутники

ГЛОНАСС также вращаются почти по круговой орбите, но на несколько меньшей высоте, что дает время обращения в 11 часов 15 минут.

Одним из самых значимых факторов, усложняющих использования всех спутниковых систем, является среда распространения. Следует разделять влияние среды распространения на влияние ионосферы и влияние тропосферы.

Тропосфера в отличие от ионосферы является недиспергирующей средой – скорость распространения радиоволн не зависит от частоты [13]. Влияние тропосферы на всем пути распространения радиосигнала от спутника S до приемника R можно записать как [14]

$$T_S^R = \int_S^R c(n_T - 1)dt \quad (1.1)$$

Где интегрирование происходит на пути от спутника до приемника, T_S^R – тропосферная задержка в метрах, c – скорость света, n_T – показатель преломления.

Показатель преломления зависит от состояния атмосферы, то есть от давления P, температуры T и влажности e:

$$n = n(T, P, e) \quad (1.2)$$

Таким образом, атмосфера заметно меняется от точки к точке наблюдения.

Наиболее известной функцией, описывающей связь показателя преломления с параметрами атмосферы, является уравнение Смита и Вейнтрауба [13-15]:

$$n = 1 + \frac{77.6 \cdot 10^{-6}}{T} \left(P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right) \quad (1.3)$$

Первый и второй слагаемые в скобках уравнения часто называют сухим и влажным компонентами показателя преломления.

В реальности не всегда имеется возможность измерять поведение параметров тропосферы на пути распространения радиосигналов. Поэтому широко используются различные модели атмосферы. В большинстве моделей атмосфера подчиняется законам идеального газа. Одной из таких моделей является Международная Стандартная Атмосфера (International Standard Atmosphere, ISA) [14]. Помимо этого существует еще целый ряд моделей

тропосферы, поэтому в настоящее время коррекция дополнительного тропосферного запаздывания может быть выполнена достаточно точно.

Скорость распространения радиоволн в ионосфере зависит от количества свободных электронов на пути распространения сигнала. Эта величина называется TEC (Total Electron Content) или ПЭС (Полное Электронное Содержание) и вычисляется как интеграл от концентрации электронов в столбе с поперечным сечением 1 м^2 ($n_e(s)$) на пути следования сигнала от спутника S до приемника R и измеряется в TEC units (TECU) = 10^{16} м^{-2} [16]

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds \quad (1.4)$$

Ионизированный газ представляет собой диспергирующую среду, то есть среду, в которой скорость распространения радиоволн зависит от частоты. Для волн с частотой f диэлектрическая проницаемость, выраженная через фазовый показатель преломления, в первом приближении (без учета влияния геомагнитного поля) может быть вычислен как

$$n_\varphi \approx 1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \quad (1.5)$$

Тогда ионосферная задержка, умноженная на скорость света и выраженная в метрах вычисляется как

$$I_\varphi = \int_S^R (n_\varphi(s) - 1) ds = - \int_S^R \frac{40.3n_e(s)}{f^2} ds = - \frac{40.3 TEC}{f^2} \quad (1.6)$$

Фазовая и групповая скорости радиоволн связаны соотношением

$$V_g = V_\varphi - \lambda \frac{dV_\varphi}{d\lambda} \quad (1.7)$$

где λ – длина волны, V_g – групповая скорость, V_φ – фазовая скорость. С учетом связи между фазовой и групповой скоростями с показателем преломления

$$V_g = \frac{c}{n_g}, V_\varphi = \frac{c}{n_\varphi} \quad (1.8)$$

где c – скорость света в вакууме. Получаем групповой показатель преломления в виде

$$n_g = 1 + \frac{40.3 TEC}{f^2} \quad (1.9)$$

Тогда ионосферная задержка для группового запаздывания может быть

найдена как

$$I_p = \frac{40.3 \text{ TEC}}{f^2} \quad (1.10)$$

Типичные значения дополнительного ионосферного пути сигнала составляют от 2 до 10 метров, что является существенным фактором при определении точных координат потребителя.

Для определения координат приемника требуется решить так называемую навигационную задачу, т. е. решить систему уравнений:

$$B_A^i = \rho_A^i + b_A + b^i + b_A^i + v_A^i \quad (1.11)$$

где ρ_A^i - геометрическое расстояние между станцией А в момент выхода сигнала до спутника с номером i в момент прихода сигнала, B_A^i - результат измерений приемника, то есть псевдодальность и/или фаза несущей, выраженная в метрах, b^i - поправки, зависящие от спутника, b_A - поправки, зависящие от станции, b_A^i - поправки, зависящие от наблюдений, и v_A^i - ошибка измерений (шум). Шум измерений в псевдодальности примерно на 2-3 порядка выше, чем для фазовых данных. То есть фазовые измерения значительно точнее.

Итак, зная информацию о положении и времени спутника, которую он передает в навигационном сообщении, и расстоянии до него, можно с некоторой точностью определить местоположение приемника, а точнее, положение фазового центра приемной антенны.

Исходя из (1.11), псевдодальность можно вычислить как разность между временем, определяемым часами приемника t_A в момент приема сигнала t и временем, определяемым часами спутника t^i в момент передачи сигнала $t - \tau_A^i$, умноженной на номинальную скорость света в вакууме c :

$$P_A^i(t) = c[t_A(t) - t^i(t - \tau_A^i)] + e_A^i \quad (1.12)$$

где τ_A^i - время прохождения сигнала от генератора сигналов на спутнике до коррелятора сигналов в приемнике, e_A^i - ошибка измерения псевдодальности. Преобразовав данное уравнение и учтя различные поправки, вносимые средой распространения, можно получить соотношение [17]:

$$P_A^i = \rho_A^i(t, t - \tau_A^i) + I_A^i + T_A^i + dm_A^i + c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + c[d_A(t) - d^i(t - \tau_A^i)] + e_A^i \quad (1.14)$$

В правой части уравнения содержатся: геометрическое расстояние между передающей и приемной антенной $\rho_A^i(t, t - \tau_A^i)$, поправки за счет влияния ионосферы I_A^i и тропосферы T_A^i , многолучевость сигналов dm_A^i , поправки часов спутника и приемника $c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)]$, задержки в оборудовании приемника и спутника $c[d_A(t) - d^i(t - \tau_A^i)]$ и ошибка измерений e_A^i .

Фаза несущей равна разности фаз между сигналами, созданными в приемнике в момент приема и в спутнике в момент передачи. Однако при измерениях фазы несущей неизвестно количество полных циклов, укладывающихся на пути распространения между спутником и приемником, то есть данные измерения сопровождаются неоднозначностью фазы. Чтобы перевести измерения фазы в метры, фазу, измеренную в циклах, умножают на длину волны. С учетом всех поправок на распространение сигнала, фаза несущей может быть выражена как [17]:

$$\Phi_A^i = \rho_A^i(t, t - \tau_A^i) - I_A^i + T_A^i + \delta m_A^i + c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + c[\delta_A(t) - \delta^i(t - \tau_A^i)] + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda N_A^i + \lambda \varepsilon_A^i \quad (1.13)$$

Здесь, также как и в псевдодальности присутствует геометрическое расстояние между приемной и передающей антеннами $\rho_A^i(t, t - \tau_A^i)$, поправки часов спутника $c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)]$, тропосферная задержка T_A^i , вклад ионосферы с противоположным знаком I_A^i , многолучевости фазы δm_A^i , запаздывание в оборудовании для фазы несущей $c[\delta_A(t) - \delta^i(t - \tau_A^i)]$, а также член, отвечающий за отличие от нуля начальных фаз генераторов $\lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)]$, вклад неоднозначности фазы λN_A^i и ошибка измерения $\lambda \varepsilon_A^i$.

Во всех измерениях присутствуют члены, связанные с прохождением сигнала через среду. Остановимся на коррекции ионосферного запаздывания, так как ионосфера вносит одну из наибольших ошибок в точность позиционирования. В работах [3, 18] были определены вклады различных источников погрешности. В

таблице 1 приведены значения среднеквадратичной погрешности в метрах, обусловленные соответствующими факторами.

Таблица 1. Значение среднеквадратичной ошибки в метрах, обусловленной различными факторами.

Источник погрешности	Среднеквадратичное значение погрешности, м.
Нестабильность работы генератора	6,5
Задержка в бортовой аппаратуре	1,0
Неопределенность пространственного положения спутника	2,0
Другие погрешности космического сегмента	1,0
Неточность эфемерид	8,2
Ионосферная задержка	4,5
Тропосферная задержка	3,9
Шумовая ошибка приемника	2,9
Многолучевость	2,4
Другие ошибки сегмента пользования	1,0
Суммарная погрешность	13,1

В силу диспергирующих свойств ионосферы при наблюдениях на двух частотах имеется возможность устранить вклад ионосферной ошибки в первом приближении. Для целей данной работы нет необходимости в описании вкладов более высоких порядков, но исследования в данной области проводились [19]. При двухчастотных наблюдениях псевдодальности можно вычислить ионосферную поправку, например, для частоты $L1$

$$I_{L1} = \frac{A}{f_{L1}^2} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (P_{L2} - P_{L1}) \quad (1.14)$$

где $A=40,3\text{ТЕС}$, P_{L2} и P_{L1} – псевдодальности на соответствующих частотах, а f_{L2} и f_{L1} – значения частот. При данном подходе получается абсолютное

значение ионосферной задержки. Однако шум на измерениях псевдодальностей значительно больше, чем для измерений фазы несущей. С другой стороны, измерения фазы несущей не свободны от неоднозначности фазы. То есть имеется возможность наблюдать только эволюцию ТЕС относительно некоего первоначального значения

$$I_{L1} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (\lambda_{L1}(\Phi_{L1} - N_{L1}) - \lambda_{L2}(\Phi_{L2} - N_{L2})) \quad (1.15)$$

Поэтому широко используется метод сглаживания ионосферной задержки псевдодальности по измерениям фазы несущей.

Однако в диссертации в первую очередь рассматривается коррекция ионосферного запаздывания посредством применения ионосферных моделей, как основная возможность для улучшения позиционирования для одночастотной аппаратуры.

1.2 Модель Клобучара

Модель Клобучара - одна из первых моделей, предназначенных для моделирования ТЕС и устранения ошибки позиционирования, обусловленной наличием ионосферы для одночастотных спутниковых навигационных приемников, работающих либо на частоте L1, либо на частоте L2. Данная модель была создана в 80-х годах прошлого века, но до сих пор не потеряла своей актуальности и весьма успешно выполняет поставленную перед ней задачу. Однако сам разработчик модели указывает на то, что его модель устраняет только около 50 процентов ошибки ионосферного запаздывания [5]. Тем не менее, именно данная модель рекомендована к использованию с 1984 года интерфейсным контрольным документом GPS [20]. И именно поэтому спутники GPS до сих пор передают информацию, необходимую для функционирования данной модели.

Данный инструмент представляет собой весьма упрощенную модель поведения ионосферы. Например, в ночное значение ТЕС задается константой,

равной 9,2 TECU. Дневное поведение ионосферы моделируется следующей формулой [5]:

$$T_{IONO} = F * [5 * 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \Phi_m * (1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24})] \quad (1.16)$$

где T_{IONO} – дополнительное ионосферное запаздывание, выраженное в единицах времени, F – фактор наклона, зависящий от угла места в направлении спутника, Φ_m – текущая широта, $x = \frac{2\pi(t-50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \Phi_m}$, t – локальное время, α_n и β_n – коэффициенты, передаваемые в спутниковом навигационном сообщении, необходимые для функционирования модели. Эти вычисления справедливы для частоты L1. Для вычисления ионосферной задержки на частоте L2 полученное значение необходимо умножить на коэффициент 1,65.

На рис. 1. представлено моделирование усредненного за месяц значения задержки радиосигнала на Ямайке в сентябре 1970г. [5]. Сплошной линией изображены данные экспериментальных измерений, штриховой – результат моделирования. По оси X отложены значения локального времени. По оси Y – величина дополнительного ионосферного запаздывания, выраженная в наносекундах.

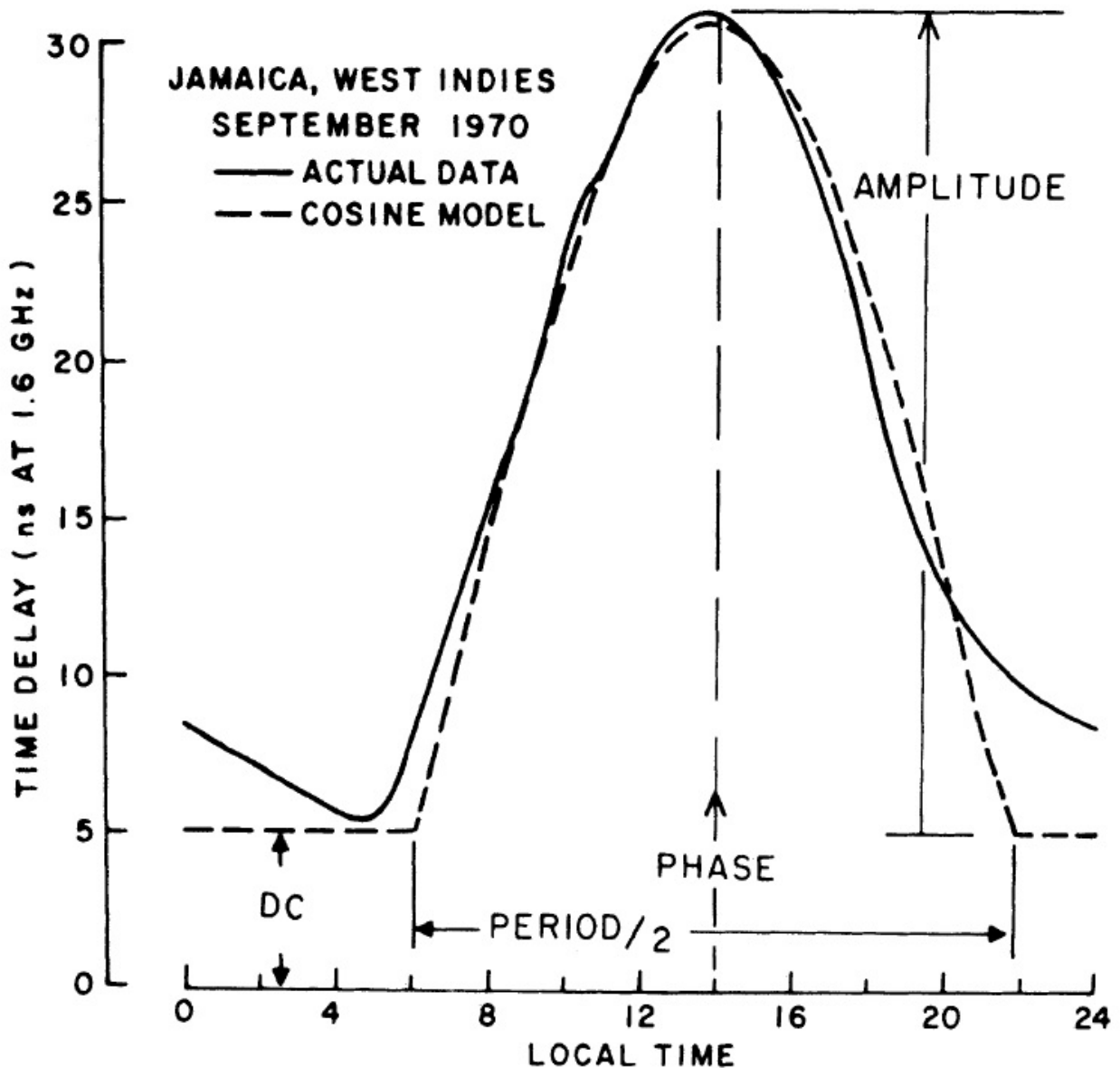


Рис. 1. Усредненные за месяц данные ПЭС в сравнении с модельными данными. Сплошной линией – реальные данные, штриховая линия - данные моделирования. [5]

Из рисунка видно расхождение модельных и реальных данных, которое особенно существенно в вечерний и ночной периоды. Также из самой структуры модели видно, что для успешного функционирования требуется получение дополнительной информации, а именно, восьми коэффициентов, от спутниковой системы, которые определяют ширину и амплитуду данной функции. Данные коэффициенты рассчитываются с определенной периодичностью наземным

сегментом системы GPS. Кроме того, погрешность этих коэффициентов тем выше, чем ниже плотность станций мониторинга системы IGS, на которых производится слежение за спутниковым сегментом GPS.

В результате развития микропроцессорных технологий, снизивших требования к простоте моделей, и развития систем мониторинга ионосферы начали разрабатываться модели, способные заменить модель Клобучара и пригодные к внедрению в массовой аппаратуре потребителя.

На замену модели Клобучара было в один и тот же год предложено две модели полного электронного содержания ионосферы – это расширенная версия Европейской модели NTCM (Neustrelitz TEC Model) [21, 22] – NTCM_GL (Global Neustrelitz TEC Model) [6] и модель GEMTEC (Global Empirical Model of the Total Electron Content) [7], в модернизации и тестировании которой автор принимал непосредственное участие.

1.3 Модель NTCM_GL

Модель NTCM_GL представляет собой эмпирическую модель ионосферы, основанную на экспериментальных данных измерений TEC за 1998 - 2007 года, поставляемых Европейским центром CODE (the Center for Orbit Determination in Europe) [23]. Данный центр является одним из поставщиков карт GIM (Global Ionospheric Map) [24-26]. В этих картах содержится информация о TEC с шагом по времени в 2 часа (в последние годы - с шагом в 1 час) и с шагом в 2,5 градуса по широте и 5 градусов по долготе. Информация собирается с сети станций IGS, обрабатывается при помощи двухчастотного приема, а затем производится интерполяция на всю земную поверхность. Существует целый ряд аналогичных центров, представляющих подобную информацию в виде так называемых IONEX-файлов. В каждом из центров используется свой математический аппарат для выполнения операции интерполяции. Но особенность одна и та же – чем больше станций IGS, расположенных недалеко друг от друга, тем точнее получается

воспроизведение ПЭС. Данные карты доступны и могут быть загружены, например, с адреса <http://gpspp.sakura.ne.jp/gmap/igsnet.htm>.

Модель NTCM_GL аппроксимирует значения ТЕС как функцию текущих координат, времени наблюдения и значения индекса солнечной активности ($F_{10.7}$). Само значение вертикального ТЕС вычисляется по формуле

$$TEC_{NTCM-GL}^{vert} = F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 \quad (1.17)$$

Где F_1 реакция ионосферы на солнечное ионизирующее излучение в зависимости от текущего времени и дня в месяце, F_2 – сезонные вариации, F_3 – вариации геомагнитного поля, F_4 - вклад геомагнитных северной и южной экваториальных аномалий, F_5 - влияние солнечной активности на земле, не зависящей от текущего положения и времени приемника.

Коэффициент, отвечающий за ежедневные солнечные вариации, определяется формулой:

$$F_1 = \cos\chi^{***} + (c_1 \cos(V_D) + c_2 \cos(V_{SD}) + c_3 \cos(V_{SD}) + c_4 \cos(V_{TD}) + c_5 \cos(V_{TD})) \cos\chi^{**} \quad (1.18)$$

Где $V_D = 2\pi \frac{LT-LT_D}{24}$, $V_{SD} = 2\pi \frac{LT}{12}$ – отвечают за суточные и полусуточные вариации относительно локального времени LT, а $V_{TD} = 2\pi \frac{LT}{8}$ – четверть суточные вариации. LT_D - задержка, обусловленная запаздыванием отклика ионосферы, принятая в 14 часов. Коэффициенты, отвечающие за положение приемника относительно Солнца, определяются как

$$\begin{aligned} \cos\chi^* &= \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \\ \cos\chi^{**} &= \cos\chi^* - \frac{2\pi}{\varphi} \sin(\delta) \end{aligned} \quad (1.19)$$

$$\cos\chi^{***} = \sqrt{\cos\chi^* + P_{F1}}$$

Здесь φ - географическая широта, δ - склонение Солнца, P_{F1} – фиксированная величина для получения оптимальных результатов

Коэффициент, отвечающий за сезонные вариации:

$$F_2 = 1 + c_6 \cos(V_A) + c_7 \cos(V_{SA}) \quad (1.20)$$

где $V_A = 2\pi \frac{doy-doy_A}{365.25}$, $V_{SA} = 4\pi \frac{doy-doy_{SA}}{365.25}$ отвечают за годовые и

полугодовые вариации, $doy_A=18$, $doy_{SA} = 6$ установленные сдвиги по отношению к началу года [6, 27], doy – текущий день.

Коэффициент, отвечающий за геомагнитное поле:

$$F_3 = 1 + c_8 \cos(\varphi_m) \quad (1.21)$$

Здесь φ_m – геомагнитная широта.

Коэффициент, отвечающий за геомагнитные северную и южную экваториальные аномалии,

$$F_4 = 1 + c_9 \cos(EC_1) + c_{10} \cos(EC_2) \quad (1.22)$$

Здесь $EC_1 = -\frac{(\varphi_m - \varphi_1)^2}{2\sigma_1^2}$ – северный крест и $EC_2 = -\frac{(\varphi_m - \varphi_2)^2}{2\sigma_2^2}$ – южный крест, φ_1, φ_2 – соответственно широты данных аномалий и σ_1, σ_2 – ширина соответствующих аномалий.

И наконец самый значимый коэффициент, отвечающий за солнечную активность,

$$F_5 = c_{11} + c_{12}F10.7 \quad (1.23)$$

Неизвестные коэффициенты были подобраны эмпирически. И они принимают следующие значения с их доверительным интервалом (таблица 2).

Таблица 2. Значения коэффициентов модели NTCM_GL и их доверительный интервал.

Коэффициент	Значение	95% доверительный интервал
c_1	0,89656	$\pm 0,001081$
c_2	0,16984	$\pm 0,000985$
c_3	-0,02166	$\pm 0,000965$
c_4	0,05928	$\pm 0,000975$
c_5	0,00738	$\pm 0,000976$
c_6	0,13912	$\pm 0,000652$
c_7	-0,17593	$\pm 0,000615$
c_8	-0,34545	$\pm 0,004341$
c_9	1,1167	$\pm 0,007428$
c_{10}	1,1573	$\pm 0,00833$
c_{10}	-4,3356	$\pm 0,035044$
c_{11}	0,17775	$\pm 0,000596$

В оригинальной статье [6] были показаны некоторые результаты моделирования. На рис. 2 изображен суточный ход ПЭС для зимы – 6-й день в году и лета – 195-й день в году для высокоширотных и низкоширотных точек. На всех графиках сплошной линией изображены данные моделирования, точками изображены реальные данные на основе карт GIM. По оси X отложено локальное время, по оси Y значение ТЕС, выраженное в единицах ТЕСU.

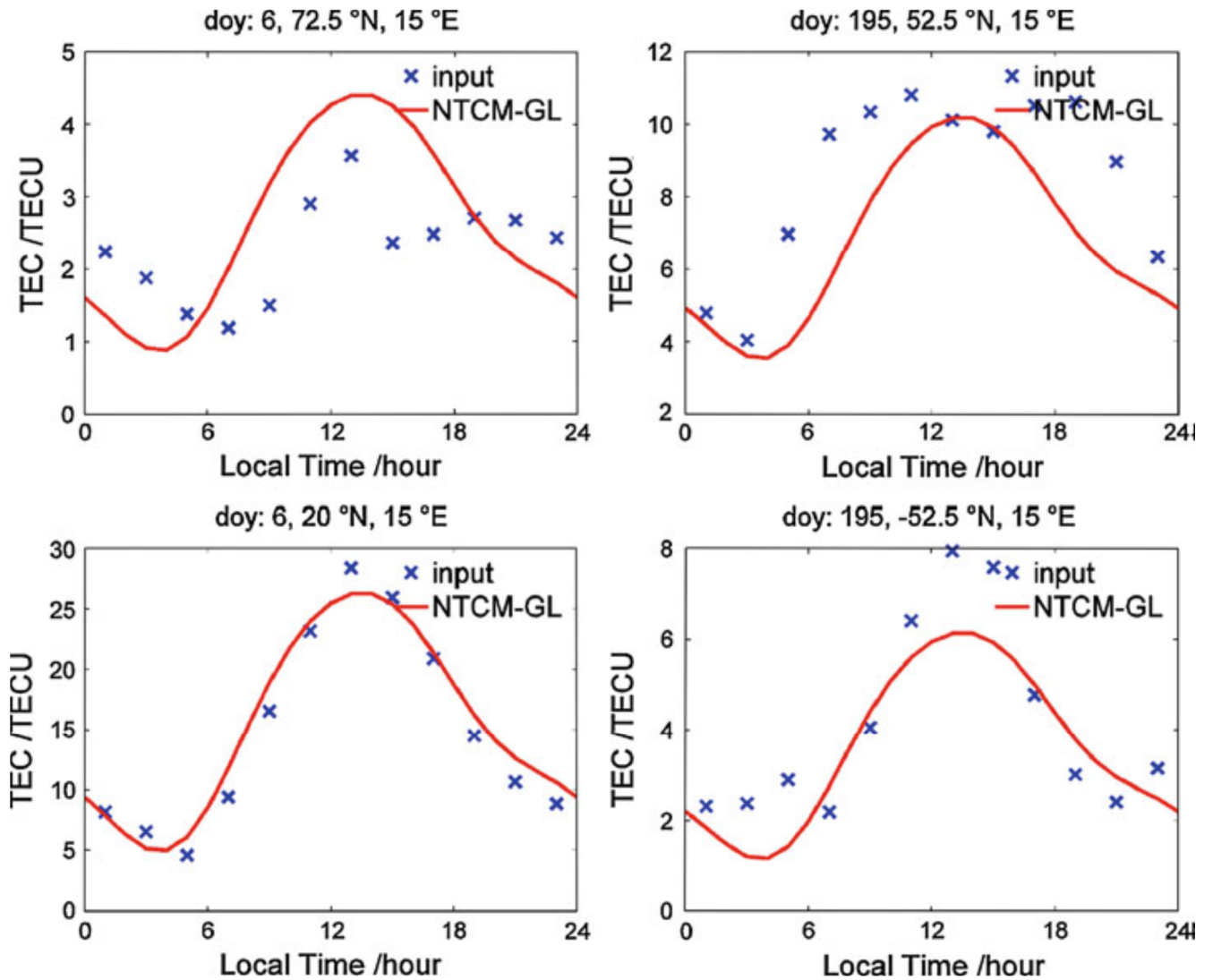


Рис. 2. Моделирование суточного хода ПЭС для высокоширотных и низкоширотных станций в летний и зимний периоды. Точками изображено реальное значение ТЕС, сплошной линией – результат моделирования [6].

На рис. 3 показан сезонный ход ПЭС для низкоширотной точки, находящейся в северном полушарии, и среднеширотной точки, находящейся в южном полушарии. Моделирование проводилось для нулевого меридиана и 13 часов по локальному времени. Сплошной линией изображены данные моделирования. Точками изображены реальные данные на основе карт GIM.

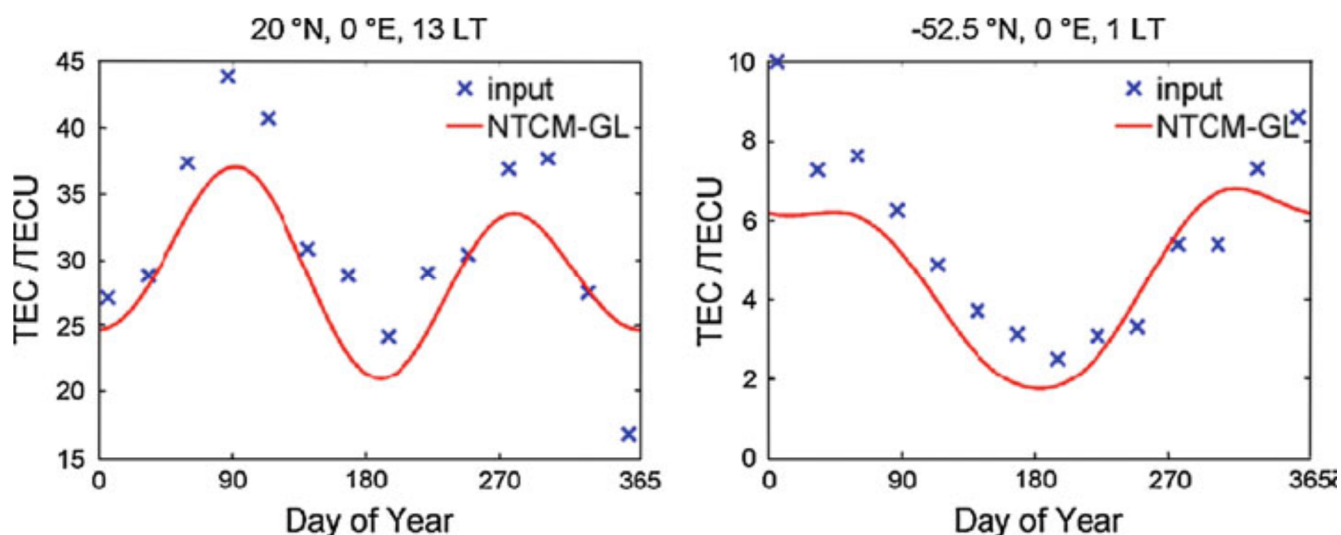


Рис. 3. Сезонный ход ПЭС для высокоширотной и низкоширотной станции. Точками изображено реальное значение ТЕС, сплошной линией – результат моделирования [6]

Так как в статье была предоставлена вся необходимая информация для воссоздания данной модели, то данная модель была нами воспроизведена в виде компьютерной программы, и в дальнейшем сравнивалась с другой моделью, опубликованной в тот же самый год – моделью собственной разработки GEMTEC.

1.4 Модель GEMTEC

Другой моделью ТЕС, представленной практически одновременно с моделью NTCM_GL была модель GEMTEC, в оптимизации и тестировании которой автор работы принимал непосредственное участие. Модель GEMTEC, как и модель NTCM_GL является эмпирической моделью, но на этом все сходства заканчиваются. Основное различие заключается в способе использования исходных данных. Как описывалось выше, в модели NTCM_GL используются представления вариаций ТЕС посредством тригонометрических функций, в то время как в модели GEMTEC используется метод разложения исходных данных по естественным ортогональным функциям.

Модель GEMTES разрабатывалась в Иркутском государственном университете (ИГУ), где давно и активно развивались исследования, посвященные разработке математических моделей различных параметров ионосферы. Ведущая роль в этих разработках принадлежит профессору В. М. Полякову. Именно под его началом был разработан полуэмпирический подход к ионосферному моделированию. Именно такой подход лежит в основе международной справочной модели ионосферы IRI [28]. С помощью такого же подхода в ИГУ была создана полуэмпирическая модель ионосферы (ПЭМИ) [8]. Данная модель сравнима по точности с моделью IRI. Именно данную модель было решено первоначально заложить в основу глобальной модели ПЭС [29].

ПЭМИ позволяет прогнозировать значения критических частот областей E, F_1 , F_2 ионосферы, а также приведенных высот ионосферных максимумов при следующих входных параметрах: координаты, месяц года и индекс солнечной активности.

В работах [29, 30] были исследованы зависимости ПЭС от основных ионосферных параметров. В первой работе была, в частности, установлена следующая связь между величиной, контролирующей ПЭС с ионосферными параметрами,

$$y = (f_0F_2)^2 * h_mF_2 + (f_0F_1)^2 * h_mF_1 + (f_0E)^2 * 50 \quad (1.24)$$

где f_0F_2 , f_0F_1 , f_0E – критические частоты F_2 , F_1 , E слоев. Коэффициенты h_mF_2 , h_mF_1 , 50 следует интерпретировать не как физические высоты соответствующих максимумов, а как величины, пропорциональные характерным толщинам слоев. Так как модель ПЭМИ не воспроизводит толщину E-слоя, то для нее эмпирически было подобрано значение в 50 км.

Величина y не воспроизводит само ПЭС, так как не учитывает некоторые особенности вертикального профиля распределения электронной концентрации в ионосфере. Однако данная величина имеет размерность ПЭС.

Далее было сделано главное предположение о том, что величина ПЭС может быть представлена линейной зависимостью от величины y :

$$TEC = ay + b \quad (1.25)$$

где коэффициенты a и b эмпирически вычисляются из реальных данных. В качестве таких данных были использованы карты GIM. Был выбран массив данных из 192 значений TEC для точки с координатами 50 градусов северной широты на нулевом меридиане. Затем методом наименьших квадратов была минимизирована относительная квадратичная невязка:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - ay_i - b}{x_i} \right)^2 \rightarrow \min \quad (1.26)$$

где суммирование производится по всему массиву значений TEC, x_i – реальные данные по картам GIM.

В результате данной минимизации были найдены коэффициенты a и b :

$$TEC = 0.84y + 1.9 \quad (1.27)$$

Затем полученные результаты (MOD) были подвергнуты сравнению с моделью Клобучара (KLO) и исходными числовыми последовательностями (ION) для исходного массива TEC - рис. 4. На рисунке по оси X отложено 16 последовательных дней, для которых производилось сравнение. По оси Y значения ПЕС в единицах TECU [29].

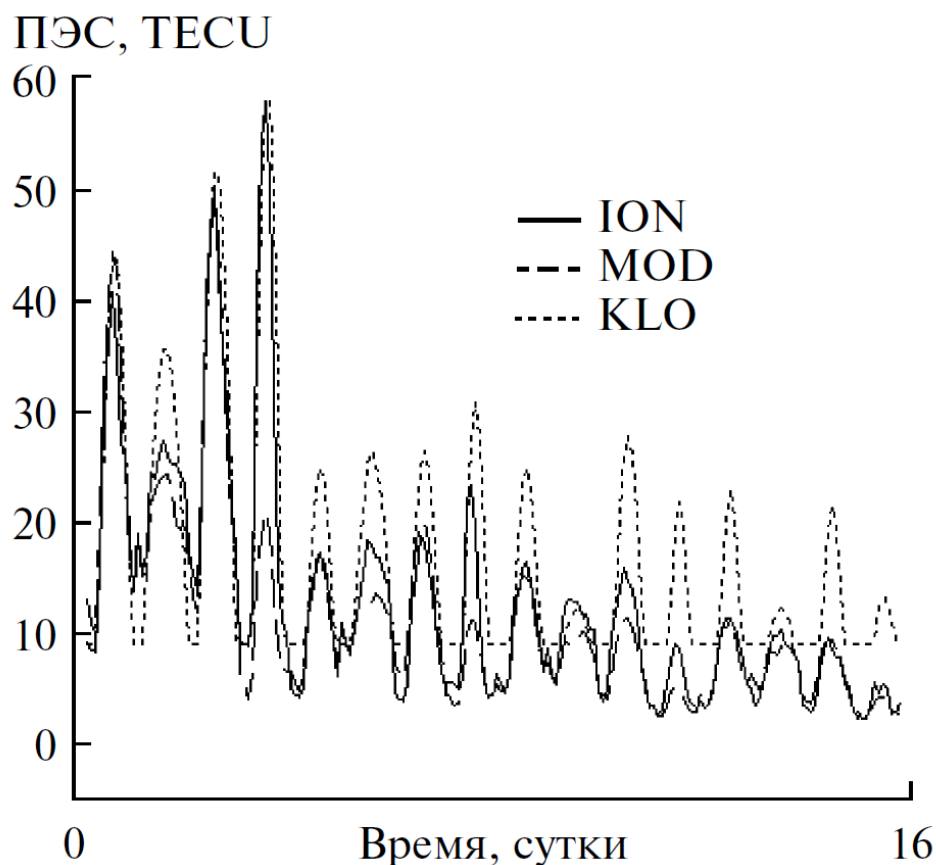


Рис.4. Сравнение полученных результатов моделирования (MOD), данных по модели Клобучара (KLO) и реальных значений (ION) [29]

Из рисунка видно, лучшее воспроизведение суточного хода ПЭС получается предложенным способом моделирования на основе модели ПЭМИ по сравнению с моделью Клобучара.

Интереснее было провести сравнение с данными вне диапазона базовой последовательности. Такие сравнения были проведены для тестирования долготного хода на 40, 50, 60 градусах северной широты (горизонтальная ось) для 00:00 UT - рис. 5. По вертикальной оси отложены значения ПЭС в единицах TECU.

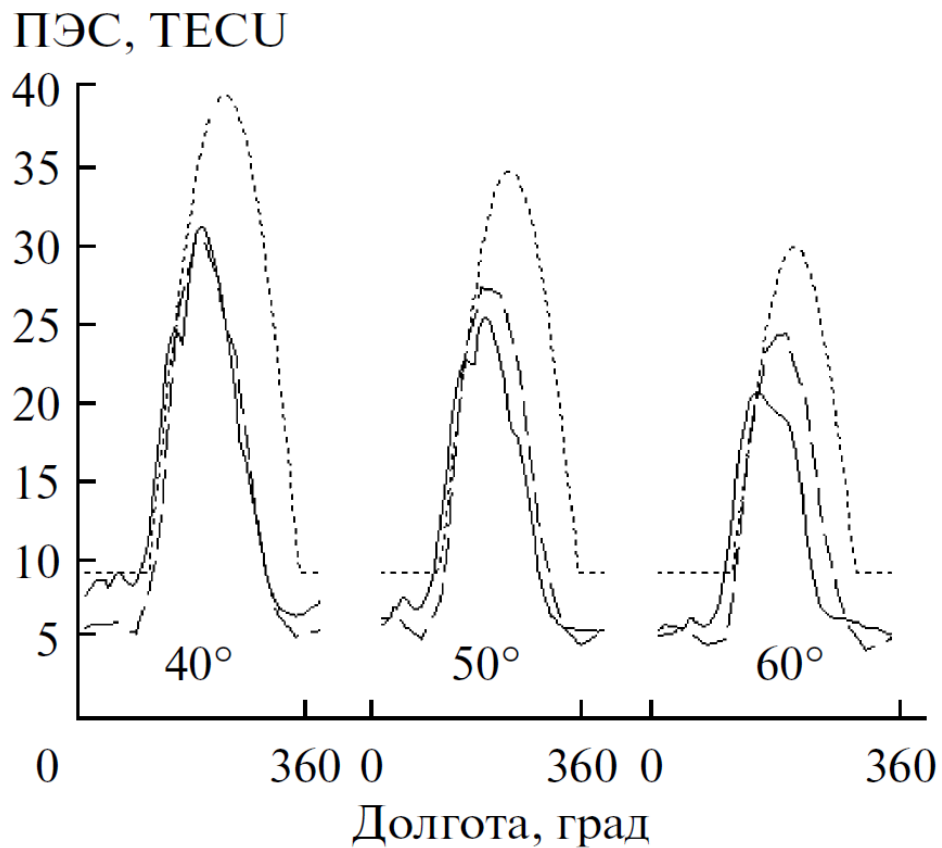


Рис. 5. Тестирование долготного хода ПЭС полученного в результате моделирования (MOD, крупный пунктир) в сравнении с моделью Клобучара (KLO, мелкий пунктир), и реальными значениями (ION, сплошная) [29]

Также был протестирован широтный ход от 70 градусов южной широты до 70 градусов северной широты (горизонтальная ось) для 60 градусов западной долготы (рис. 6). По вертикальной оси отложены значения ПЭС в единицах TECU.

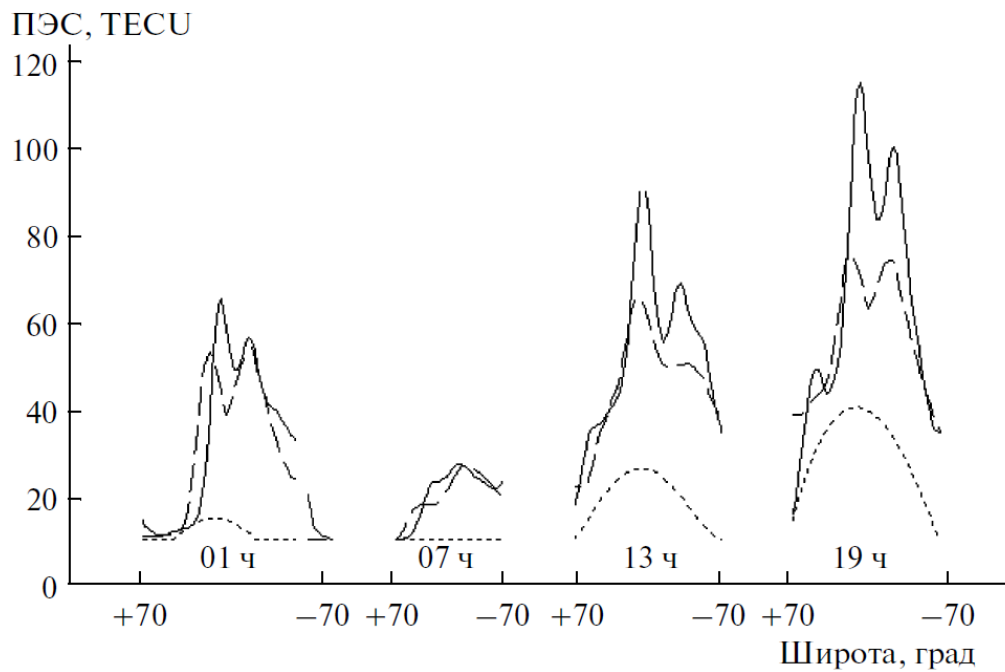


Рис. 6. Тестирование широтного хода ПЭС полученного в результате моделирования (MOD, крупный пунктир) в сравнении с моделью Клобучара (KLO, мелкий пунктир), и реальными значениями (ION, сплошная) [29]

Далее был проанализирован суточный ход для 8 дней подряд (горизонтальная ось) с 07.09.2005 для точки с координатами 50 градусов северной широты на гринвичском меридиане (рис. 7). По вертикальной оси отложены значения ПЭС в единицах TECU.

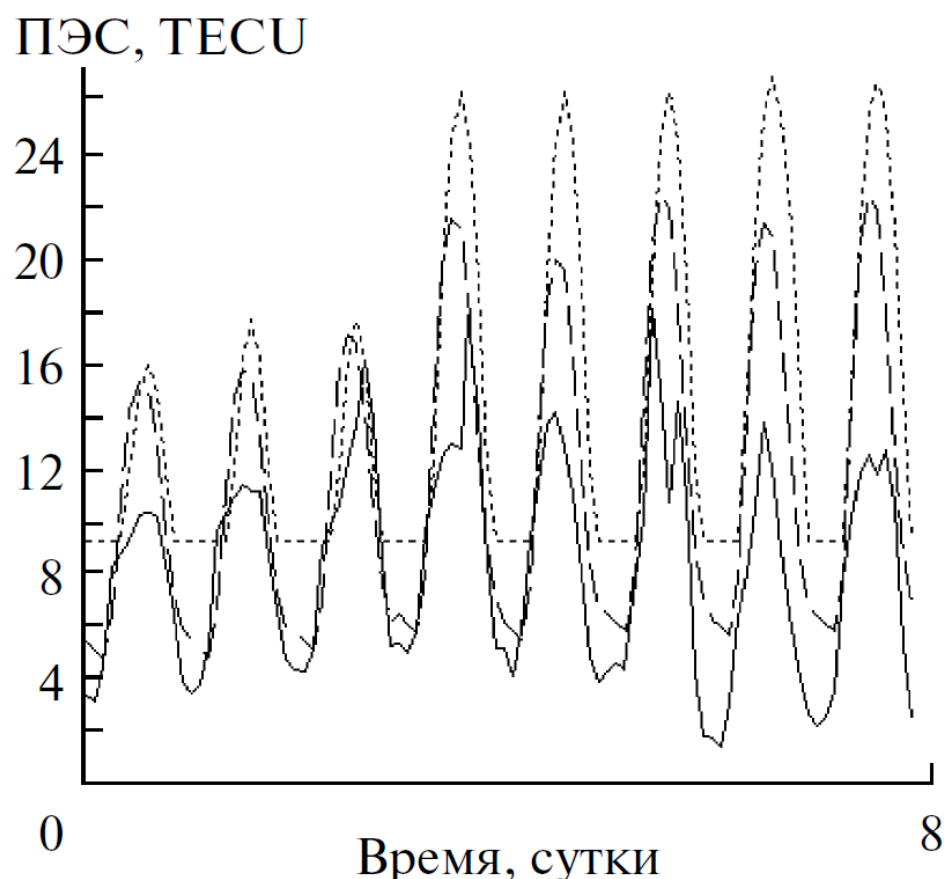


Рис. 7. Тестирование суточного хода ПЭС, полученного в результате моделирования (MOD, крупный пунктир) в сравнении с моделью Клобучара (KLO, мелкий пунктир) и реальными значениями (ION, сплошная) [29]

Из графиков на рисунках 5, 6, 7 видно, что предлагаемая модель гораздо лучше воспроизводит реальные данные ПЭС, чем модель Клобучара, и должна приводить к уменьшению ошибки позиционирования.

Таким образом, была продемонстрирована эффективность подхода моделирования ПЭС на основе разложения экспериментальных данных по естественным ортогональным функциям, что и инициировало создание модели GEMTEC.

В модель GEMTEC перешла основная идеология и математический аппарат, разработанный, отлаженный и протестированный в модели ПЭМИ. А именно применена концепция разложения экспериментальных данных по естественным ортогональным функциям (ЕОФ).

Сам метод заключается в следующем. Пусть имеется N измерений величины $f(n, x)$, которая зависит от фактора x и от других факторов $n = \overline{1, N}$, свойственных каждому измерению. Тогда искомая величина может быть записана как

$$f^n(x) = \sum_{i=1}^{i_0} b_i^n y_i(x) \quad (1.28)$$

где y_i – естественные ортогональные функции, зависящие только от фактора x , а b_i^n – коэффициенты, зависящие от набора данных и не зависящие от фактора x . Если рассматривается весь ряд целиком, то получается точное значение функции f . Если же удерживается только несколько членов ряда, то разложение воспроизводит исходные данные приближенно.

Коэффициенты b_i^n можно вычислить из условия ортогональности функций y_i [31]

$$b_i^n = \sum_{k=1}^{k_0} f^n(x_k) y_i(x_k) \quad (1.29)$$

В работе [32] было показано, что система естественных ортогональных функций может быть найдена из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$A y_i = \lambda_i y_i \quad (1.30)$$

где λ_i – собственные значения автокорреляционной симметричной функции A

$$A = \{A_{kp}\} = \left\{ \sum_{n=1}^N f_k^n f_p^n \right\} = \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N f_1^n f_1^n & \sum_{n=1}^N f_1^n f_2^n & \dots & \sum_{n=1}^N f_1^n f_{k_0}^n \\ \sum_{n=1}^N f_2^n f_1^n & \sum_{n=1}^N f_2^n f_2^n & \dots & \sum_{n=1}^N f_2^n f_{k_0}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{n=1}^N f_{k_0}^n f_1^n & \sum_{n=1}^N f_{k_0}^n f_2^n & \dots & \sum_{n=1}^N f_{k_0}^n f_{k_0}^n \end{pmatrix} \quad (1.31)$$

и k_0 – число точек по переменной x .

Наибольший вклад в разложения будут вносить ЕОФ с наибольшими собственными значениями.

Для моделирования ТЕС первоначально были использованы данные карт GIM от центра CODE, которые были выбраны авторами независимо от авторов модели NTCM_GL.

Поведение ТЕС представляется функцией, зависящей от местного времени, месяца, широты, долготы и солнечной активности.

$$f = f(t, s, F, \varphi, \lambda) \quad (1.32)$$

Данная функция представляется через естественные ортогональные функции $X_i(t)$ – местного времени t , $Y_{ij}(s)$ – месяца s , $\Phi_{ijk}(\varphi)$ – широты φ , $Z_{ijkm}(F)$ – уровня солнечной активности F , а $L_{ijkm}(\lambda)$ – коэффициенты разложения, зависящие от долготы λ .

$$f(t, s, F, \varphi, \lambda) = \sum_i^{l_1} \sum_j^{l_2} \sum_k^{l_3} \sum_m^{l_4} X_i(t) Y_{ij}(s) \Phi_{ijk}(\varphi) Z_{ijkm}(F) L_{ijkm}(\lambda) \quad (1.33)$$

Нахождение естественных ортогональных функций происходит поэтапно. Вначале находятся ЕОФ местного времени, считая все остальные ЕОФ коэффициентами разложения, т. е.

$$f(t, s, F, \varphi, \lambda) = \sum_{i=1}^{p_0} W_i(s, F, \varphi, \lambda) X_i(t) \quad (1.34)$$

В связи со свойствами ортогональности функции $X_i(t)$ можно найти коэффициенты как

$$W_i(s, F, \varphi, \lambda) = \sum_{p=1}^{p_0} f(t_p, s, F, \varphi, \lambda) X_i(t_p) \quad (1.35)$$

Далее таким же способом можно найти последовательно ЕОФ месяца, широты, уровня солнечной активности, а также коэффициенты разложения, зависящие от долготы.

$$\begin{aligned} W_i(s, F, \varphi, \lambda) &= \sum_{j=1}^{l_2} U_{ij}(F, \varphi, \lambda) Y_{ij}(s) \\ U_{ij}(F, \varphi, \lambda) &= \sum_{p=1}^{p_0} W_i(s_p, F, \varphi, \lambda) Y_{ij}(s_p) \\ U_{ij}(F, \varphi, \lambda) &= \sum_{k=1}^{l_3} Q_{ijk}(F, \lambda) \Phi_{ijk}(\varphi) \\ Q_{ijk}(F, \lambda) &= \sum_{p=1}^{p_0} U_{ij}(F, \varphi_p, \lambda) \Phi_{ijk}(\varphi_p) \\ Q_{ijk}(F, \lambda) &= \sum_{m=1}^{l_4} L_{ijkm}(\lambda) Z_{ijkm}(F) \\ L_{ijkm}(\lambda) &= \sum_{p=1}^{p_0} Q_{ijk}(F_p, \lambda) Z_{ijkm}(F_p) \end{aligned} \quad (1.36)$$

Разложение каждой ортогональной функции определяет точность воспроизведения исходных данных. Использование в разложении не всех, а только наиболее весомых ортогональных функций позволяет с одной стороны существенно уменьшить объем числовых данных представления модели (сжатие

данных) и с другой стороны отфильтровать высокочастотные случайные вариации (удаление шума).

В первоначальном варианте модели GEMTEC [7, 33] был выбран шаг по времени в суточном ходе в 2 часа, с такой же дискретностью, как и данные в картах GIM. Далее из всех данных был сформирован набор ЕОФ, из которого было принято решение из двенадцати собственных функций времени оставить лишь пять. То есть суточный ход представлялся набором пяти функций. Для анализа сезонного хода брались среднемесячные данные, т. е. сезонный ход представлялся с дискретностью в один месяц, и для построения модели использовались только четыре ЕОФ из двенадцати с наибольшим вкладом. Долготная сетка была представлена четырьмя ЕОФ из двенадцати с дискретностью в 30 градусов. Широтная сетка бралась в пределах низких, средних и умеренно высоких широт от 70 градусов южной широты до 70 градусов северной широты с шагом в 10 градусов. Приполярные широты были опущены из-за низкой точности данных карт GIM, так как в приполярной области находится малое количество станций системы мониторинга IGS. В итоге для широтной сетки было оставлено пять ЕОФ из пятнадцати.

Для построения самой важной части модели – естественных ортогональных функций солнечной активности были выбраны среднемесячные значения с 2000 до 2009 года. Индекс солнечной активности в эти годы менялся в пределах от 68,2 до 179,8 единиц $F_{10.7}$. Для моделирования более низких значений солнечной активности использовалась линейная экстраполяция. Для значений, превышающих верхнюю границу, как показали тесты, линейная экстраполяция не дала хороших результатов. Лучший результат показали тесты, в которых превышающие значения заменялись максимальным значением 179,8. Как было предположено авторами [7], влияние солнечной активности испытывает некое насыщение. Для точек вне узлов выбранной сетки значения ПЭС определялись линейной интерполяцией по близлежащим узлам.

Представленные далее оценки качества первоначального варианта модели GEMTEC цитируются из работы [7]. Первоначальное тестирование модели было

произведено путем сравнения данных между моделями Клобучара и GEMTEC и данных карты GIM, которые принимались в качестве эталонных. На рис. 8 показан типичный временной ход изменения вертикального ПЭС $I(t)$ в фиксированной среднеширотной точке. Изображен интервал времени t длительностью 120 часов (горизонтальная ось). По вертикальной оси отложены значения $I(t)$ в единицах TECU. Для частоты L1 значение в 6 TECU примерно соответствует 1 метру поправки к псевдодальности. Черным цветом изображен ход значений из карт ПЭС. Красная кривая – расчет по предлагаемой модели. Синяя кривая – модель Клобучара.

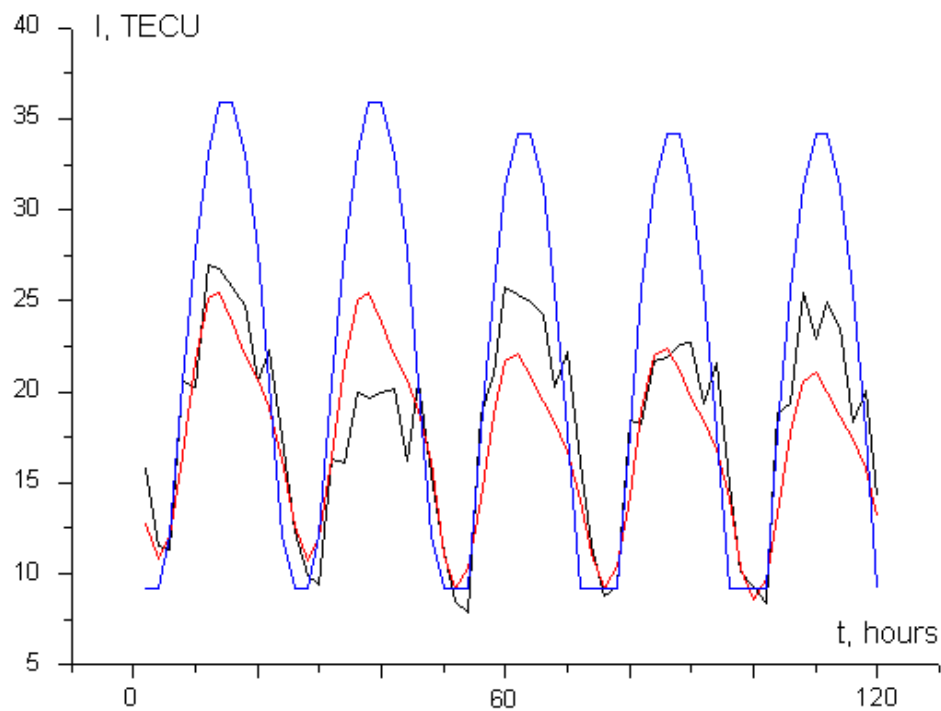


Рис. 8. Изменения во времени в течение 5 суток ПЭС по модели Клобучара (синяя кривая), по модели GEMTEC (красная кривая) и по данным карт GIM (черная кривая). [7]

Из графика видна лучшая воспроизводимость реальных значений моделью GEMTEC по сравнению с моделью Клобучара. На рис. 9 показан типичный широтный ход вертикального ПЭС (вертикальная ось) в диапазоне широт от 70 градусов до -50 градусов (горизонтальная ось).

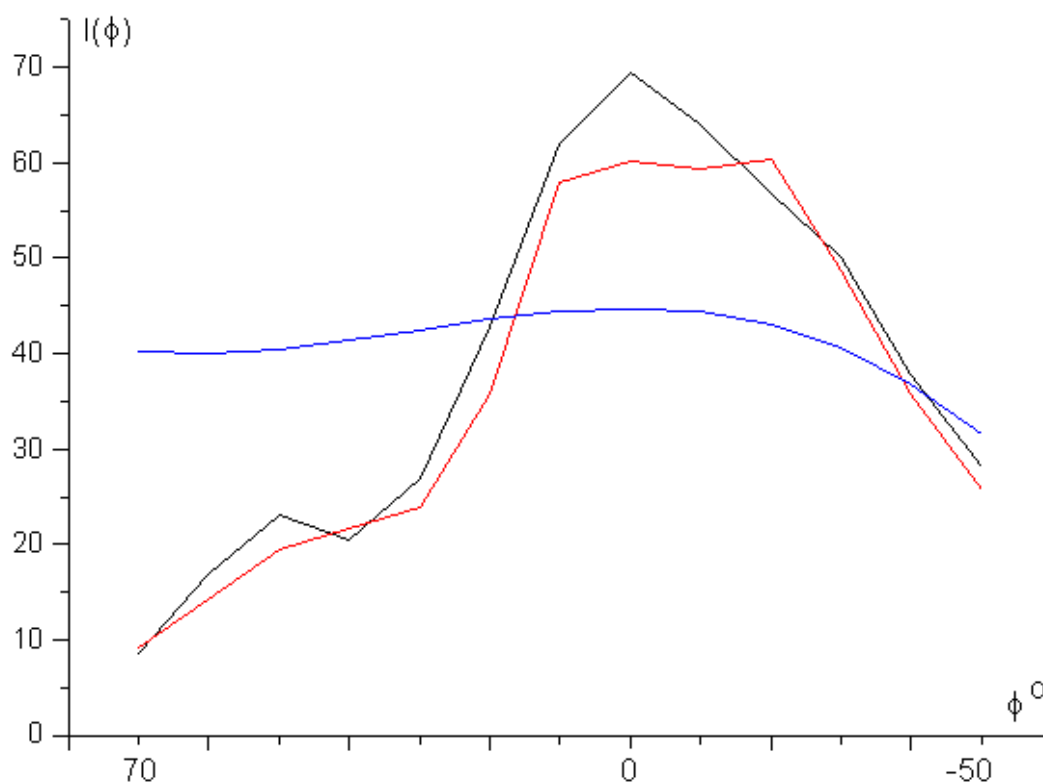


Рис. 9. Изменения ПЭС по широте вдоль нулевого меридиана по модели Клобучара (синяя кривая), по модели GEMTEC (красная кривая) и по данным карт GIM (черная кривая). [7]

Из графика видно, что модель GEMTEC также воспроизводит широтный ход ПЭС значительно лучше модели Клобучара.

Для дальнейшего тестирования был выбран массив данных с 1998 по 2010 годы, по 4 дня в каждом году (весеннее и осеннее равноденствие, летнее и зимнее солнцестояние) в момент времени 4 UTC на долготах 0, 90, 180, 270 градусов, вдоль меридиана с шагом в 10 градусов от 50 градусов южной широты до 70 градусов северной широты. Сравнение проводилось также с картами GIM от центра CODE. В итоге средний модуль относительной ошибки вертикального ПЭС по модели GEMTEC составил 19,6%.

Далее были проанализированы ошибки на основе распределения вероятности. На рис. 10 представлены гистограммы частот появления ошибки со знаком (слева) и абсолютной ошибки (справа). По горизонтальной оси отложены значения ошибки ΔI в единицах TECU. По вертикальной оси N – количество

тестов, попавших в соответствующий диапазон шириной 1 TECU.

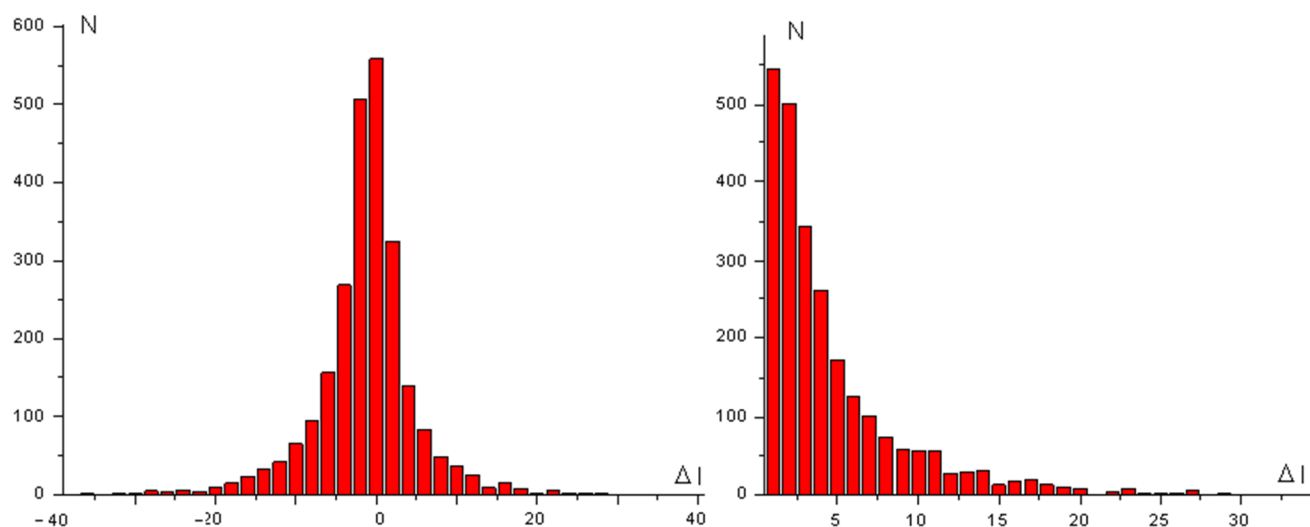


Рис. 10. Распределение ошибок моделирования ПЭС по величине отклонения от экспериментальных значений с учетом знака (слева) и по абсолютной величине (справа). [7]

Из первой гистограммы видно, что ошибка близка по распределению к нормальному закону с нулевым математическим ожиданием. Из второй гистограммы можно установить, что с вероятностью 0,95 доверительный интервал ошибки моделирования ПЭС составляет 13 TECU. Для частоты L1 это составляет величину около 2 метров поправки к псевдодальности.

Весь материал, представленный далее в диссертации, получен при непосредственном участии соискателя.

Наибольший интерес представляет исследование работы модели GEMTEC в системах спутниковой навигации. Необходимо было выяснить, насколько уменьшится остаточная ошибка позиционирования при моделировании ионосферы в одночастотном режиме спутниковых наблюдений.

Для тестирования модели на реальных данных был использован пакет программ GPS ToolKit [34, 35] и конкретно программа RINEXPVT. Данная программа решает навигационную задачу, то есть позволяет вычислять текущие координаты по данным из RINEX-файлов, генерируемых станциями системы IGS.

Программа имеет множество опций. Например, имеется возможность включать и отключать ионосферную и тропосферную коррекции, использовать одночастотный или двухчастотные режимы наблюдений. Следует отметить, что данный пакет предоставляется с открытым кодом, написанным на языке C/C++. По умолчанию в программу встроена модель Клобучара. Благодаря открытости кода имеется возможность вставлять и использовать любые модели для коррекции ионосферы. Таким образом, помимо модели Клобучара в программу была встроена модель GEMTEC.

Тестирование первоначальной версии модели было произведено [36, 37] для данных сети станций системы IGS и показало хороший результат, представленный в таблице 3. Расчеты проводились для 22-го дня каждого месяца с 2002 по 2010 года. В первом столбце указано название станции, во втором - её координаты, в третьем - усредненные результаты остаточной ошибки позиционирования без коррекции в одночастотном режиме наблюдений, в четвертом – с коррекцией по модели Клобучара, в пятом – с коррекцией по модели GEMTEC, в шестом – усредненная остаточная ошибка по двухчастотным наблюдениям, которые устраняют ионосферную ошибку за счет использования разных частот. Представлены усредненные за сутки абсолютные значения полной (3D) ошибки. Все результаты в таблице приведены в метрах. В последней строке таблицы представлены данные, усредненные по всем станциям.

Таблица 3. Сравнение остаточной ошибки позиционирования

Station	Coordinates of station	Error without correction	Error on Klobuchar model	Error on GEMTEC model	Error on two-frequency method
Chat	43.6° S, 176.2° E	3.67	1.09	0.52	0.13
Kely	66.6° N, 50.6° W	3.17	1.06	0.46	0.61
Nrc1	45.2° N, 75.4° W	3.18	1.22	0.26	0.12
Ohi3	63.2° S, 57.5° W	2.17	2.26	0.72	0.20
Tidb	35.2° S, 148.6° E	3.22	1.53	0.44	0.57
Usno	39.8° N, 77.0° W	3.51	1.00	0.37	0.13
Average		3.15	1.36	0.46	0.29

Из таблицы видно, что модели GEMTEC и Клобучара уменьшают остаточную ошибку позиционирования. Модель Клобучара устраняет около 50% процентов остаточной ошибки позиционирования, как и заявлялось в оригинальной статье [5]. При использовании модели GEMTEC остаточная ошибка позиционирования оказалась сопоставимой с остаточной ошибкой наблюдений на двух частотах и существенно меньшей по сравнению с использованием модели Клобучара.

Однако при проведении дальнейших исследований было решено оптимизировать модель. Целью оптимизации явилось максимально возможное уменьшение размера блока числовых данных модели без заметного ухудшения точности модели. Выбор оптимальных параметров определялся эмпирическим путем. Оптимизация заключалась в следующем:

- 1) Был увеличен набор входных данных с 2000 по 2012 г., в отличие от изначального 2009 г.
- 2) Изменилось число ЕОФ суточного хода. Оно было сокращено до 3-х от изначального 5-ти.

3) Для восстановления сезонного хода было решено отказаться от усреднения за месяц в пользу выбора 1 дня в месяц без изменения количества ЕОФ, которые оставили равным 4-м.

4) Долготная и широтная сетка остались без изменения.

5) Так как для сезонного хода было решено перейти к выбору одного дня в месяц, то и индекс солнечной активности $F_{10.7}$ брался для того же дня в месяце.

Также был проведен сравнительный анализ эффективности модели GEMTEC при использовании входных данных от различных центров представления карт GIM, а именно центров CODE, JPL, IGS. Было обнаружено, что наилучшие результаты показывает модель, построенная на картах от центра CODE.

Для финального варианта модели был проведен целый комплекс тестовых испытаний, описанный далее [9].

1.5 Тестирование модели GEMTEC на регистрационных стендах ИГУ/ИФ МГТУ ГА

Для тестирования модели GEMTEC, а также для решения других смежных задач, на базе физического факультета ИГУ и Иркутского филиала Московского государственного технического университета гражданской авиации (ИФ МГТУ ГА) были созданы 2 наблюдательных стенда. Они были оснащены одночастотными отечественными приемниками производства Ижевского радиозавода МНП-М7, в которые помимо стандартной модели Клобучара, по нашему предложению, разработчиками приемника была встроена модель GEMTEC. Данные приемники позволяют включать и отключать большое количество разнообразных опций, например, коррекцию дополнительного запаздывания в ионосфере и тропосфере, возможность применения калмановской фильтрации, сглаживание флуктуаций псевдодальности по фазе несущей, а также генерировать Rinex-файлы, подобные тем, что создаются приемниками наблюдательной сети станций системы IGS.

Сам модуль приемник МНП-М7 – это одна из последних (на конец 2014 года) разработок завода. Приемник представляет собой одночастотное устройство, регистрирующее сигналы спутников GPS и ГЛОНАСС на частотах диапазона L1. Устройство может работать как в режиме приема сигналов только одной из указанных систем, так и при совместном приеме и обработке данных GPS и ГЛОНАСС параллельно.

Приемник МНП-М7 является 24-х канальным, позволяющим одновременно принимать и обрабатывать сигналы 24-х спутников GPS или ГЛОНАСС. Также он способен протоколировать решения навигационной задачи в формате протокола NMEA, с частотой до 10 Гц. Данный протокол позволяет записывать в файл всю необходимую информацию: долготу, широту, высоту над земным эллипсоидом, количество спутников и т. д.

Для проведения всех возможных измерений была произведена калибровка положения антенны на уровне средней квадратичной погрешности, не превышающей $\pm 0,6$ м при 95-ти процентном уровне доверительной вероятности. Калибровка производилась с использованием текущих приемников МНП-М7 и приемников геодезического класса, установленных на пунктах системы IGS IRKT и IRKJ. Использовались данные с приемников МНП-М7 в формате Rinex и двух приемников IGS, взятые с ресурса: [«ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/2014/»](ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/data/daily/2014/). Затем данные были совместно обработаны с помощью программного комплекса Trimble Business Center v2.95. В результате данной обработки была сформирована геодезическая сеть с двух точно известными координатами приемников IGS и третьей неизвестной точкой. Координаты третьей точки благодаря устранению неоднозначности фазы были достаточно точно определены, с погрешностью единицы веса в 16 мм. Координаты пунктов IGS в системе ITRF2008 брались с ресурса <http://itrf.ign.fr/ITRF-solutions/2008/>.

Благодаря созданию данных стантов было произведено тестирование модели GEMTEC в сравнении с моделью Клобучара. Тестирование с моделью NTCM_GL не проводилось из-за отсутствия приемника, способного работать с данной моделью.

Для сравнения работы моделей GEMTEC и Клобучара сигнал с одной антенны при помощи сплиттера поступал на два приемника, в которых на частоте L1 вычислялось текущее положение фазового центра антенны. В одном из приемников использовалась стандартная модель Клобучара, в другом - модель GEMTEC. Необходимый для функционирования модели индекс солнечной активности вводился вручную из командной строки программы управления приемником NAVI. Было произведено 50 сеансов в весенне-летний период 2014 года длительностью около 24 часов каждый. Индекс солнечной активности в данный период изменялся от 95 до 170 единиц, что охватывает диапазон от умеренно низких до умеренно высоких значений солнечной активности.

По 50-ти сеансам была проведена статистическая обработка (таблица 4), в которой были вычислены средние за сутки (со знаком) значения отклонения координат, вычисленных приемником, от истинных координат фазовых центров антенн по долготе, широте и высоте, а также их 95-ти процентный доверительный интервал. Значение всех ошибок приводится в метрах.

Таблица 4. Средние значения отклонения координат, вычисленных приемником, от истинных координат фазовых центров антенн.

Измеряемый параметр		Значения измеряемого параметра, м	
		По модели Клобучара	По модели GEMTEC
Среднее значение ошибки	Высота	1.19	0.23
	Широта	0.65	-0.04
	Долгота	0.90	0.92
	Горизонтальная	1.15	0.95
	Полная	1.72	1.20
Доверительный интервал, P=0.95	Высота	6.8	5.7
	Широта	3.3	3.0
	Долгота	3.2	2.6
	Горизонтальная	4.0	3.8
	Полная	7.6	6.2

Из приведенных результатов очевидно значительное уменьшение средней ошибки позиционирования по высоте, широте в модели GEMTEC по сравнению с моделью Клобучара. К сожалению, значительной остается ошибка по долготе. Однако, поскольку ее значения практически одинаковы и для модели Клобучара, и для модели GEMTEC, то можно сделать вывод, что ее величина не связана с коррекцией ионосферного запаздывания и требует дальнейшего анализа. Из-за значительности ошибки по долготе не так хорошо проявляют себя средняя ошибка в горизонтали и полная ошибка.

Значительный вклад модель GEMTEC делает в уменьшение доверительного интервала отклонения измеренных координат от истинного положения фазового центра антенн и по высоте, и по долготе, и по широте, а также горизонтальной и полной составляющих.

Для дальнейшего подтверждения эффективности работы модели GEMTEC по сравнению с моделью Клобучара, а также с моделью NTCM_GL было

произведено тестирование на данных сети станций IGS.

1.6 Тестирование модели GEMTEC по данным станций системы IGS

В предыдущем разделе тестирование модели GEMTEC выполнялось по собственным данным, полученным с наблюдательных станций с модифицированными приемниками МНП – М7. Далее представлены результаты аналогичного тестирования по данным ряда станций сети IGS [38 - 41].

Были использованы карты GIM (IONEX-файлы), поставляемые европейским центром CODE. Для тестирования использовались массивы из 360 дневных (14 часов UTC) и ночных (2 часа UTC) значений TEC для точки с координатами 52.5° северной широты и 0° долготы, т. е. средние широты с наиболее предсказуемой и стабильной ионосферой. Брались 5-е, 15-е, 25-е числа каждого месяца в промежутке от 2003 до 2012 года включительно. Для более удобного графического представления для каждого месяца было произведено усреднение. Итого, получаем 120 точек для дневных (рис. 11) и ночных (рис. 12) условий, соответственно. В отличие от предыдущего раздела на данном этапе также производилось сравнение и с моделью NTCM_GL.

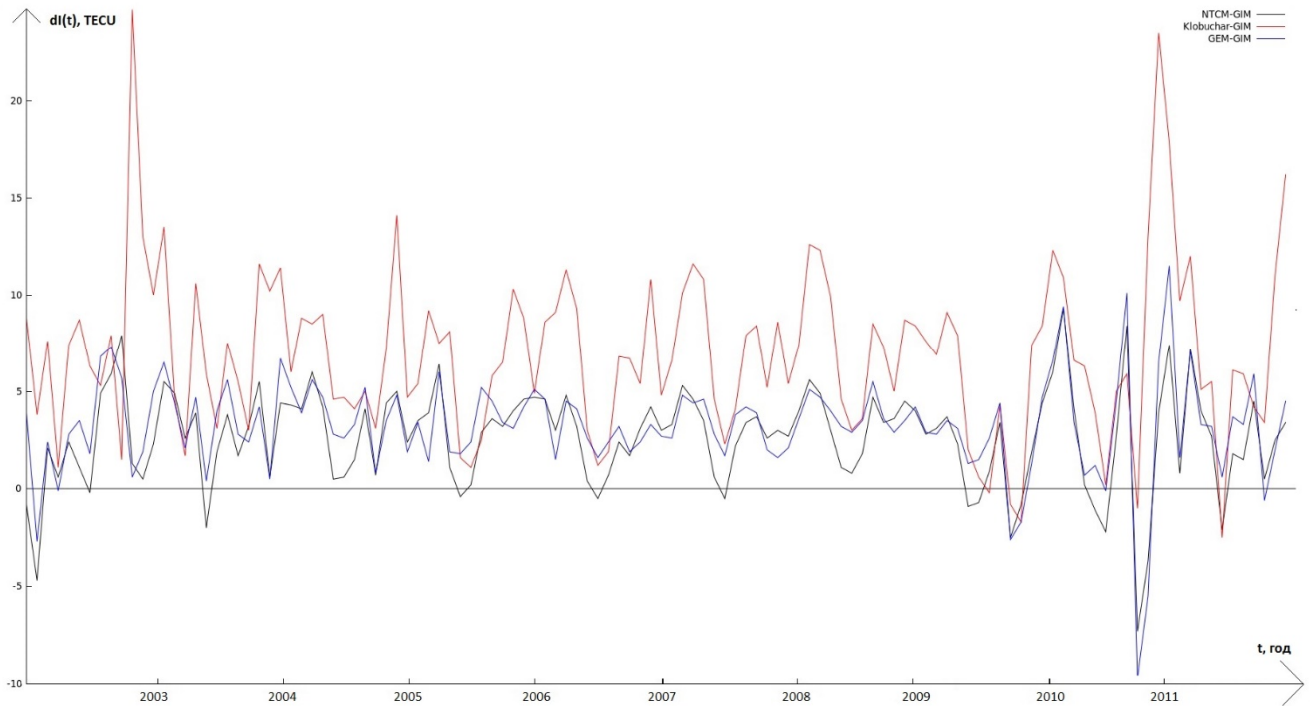


Рис. 11 Отклонение моделируемых TEC от реальных (из карт GIM) значений для дневных условий для моделей Клубучара, GEMTEC и NTCM_GL

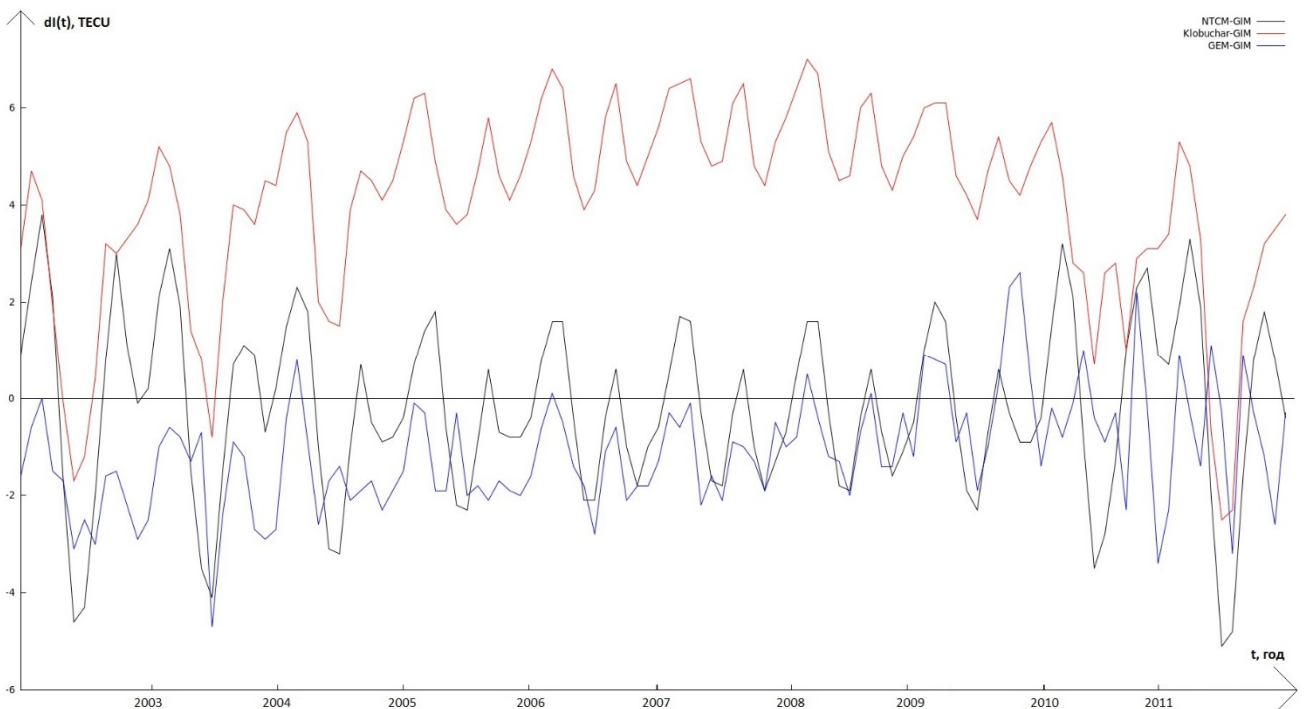


Рис.12 Отклонение TEC от реальных значений для ночных условий для моделей Клубучара, GEMTEC и NTCM_GL

На двух последних рисунках черная линия – отклонение TEC

моделируемые NTCM_GL от данным карт GIM, красная - Клобучара и GIM, и синяя – GEMTEC и GIM. Из графиков видно, что и модели NTCM_GL и GEMTEC, безусловно, показывают результат лучше, чем модель Клобучара.

Для статистического анализа зависимости между модельными и реальными данными использовался коэффициент парных корреляций Пирсона R_{xy} и среднеквадратичная ошибка σ . Так как ночное значение ионосферы по модели Клобучара является константой, то коэффициент корреляций Пирсона для ночных значений по модели Клобучара рассчитан быть не может.

$$R_{xy} = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1.37)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (1.38)$$

Здесь в качестве X фигурирует последовательность значений ПЭС, вычисленных по модели GEMTEC, Клобучара или NTCM_GL, Y – последовательность ПЭС по картам GIM. Статистические показатели представлены в таблице 5.

Таблица 5. Статистические показатели сравнения моделей GEMTEC, Клобучара, NTCM_GL в сравнении с данными карт GIM.

	$R_{\text{день}}$	$R_{\text{ночь}}$	$\sigma_{\text{день}}$	$\sigma_{\text{ночь}}$
Клобучар	0.69	-	9.2	5.6
NTCM_GL	0.83	0.47	4.5	2.3
GEMTEC	0.83	0.73	4.8	2.0

Из данной таблицы отчетливо видно преимущество моделей NTCM_GL и GEMTEC по сравнению с моделью Клобучара. Если сравнивать модели GEMTEC и NTCM_GL между собой, то для дневных условий модели практически одинаково хорошо воспроизводят данные, в то время как для ночных условий лучше работает модель GEMTEC.

Главным показателем эффективности работы моделей является то,

насколько уменьшилась ошибка позиционирования при использовании в одночастотной аппаратуре модельной коррекции дополнительного ионосферного запаздывания. Также было принято решение сравнить три модели с более точным двухчастотным режимом позиционирования, который исключает влияние ионосферы.

В результате для тестирования были произвольно выбраны 5 станций сети IGS, расположенных в умеренно низких, средних и умеренно высоких географических широтах. Были использованы данные 22 числа каждого месяца с 2001 по 2011 годы включительно. Использовались пары наблюдательных (.obs) и навигационных (.nav) RINEX-файлов. В наблюдательных файлах находится информация об измеренной псевдодалности до каждого видимого приемником спутника для всех поддерживаемых приемником типов наблюдений. В навигационных файлах находятся текущие данные, необходимые для решения навигационной задачи. Структура общедоступного наблюдательного RINEX-файла такова, что в них представлены данные с 30-секундным шагом по времени. Затем эти данные усредняются за сутки, а далее и по всем представленным суткам.

В таблице 6 представлены усредненные за весь период абсолютные остаточные ошибки позиционирования для тестируемых станций, и их координатами. В конце таблицы представлены данные усредненные по всем станциям. Все значения указаны в метрах.

Таблица 6. Сравнение эффективности моделей по полной (3D) остаточной ошибке позиционирования

Станция	Координаты	Без коррекции	Модель Клобучара	Модель NTCM_GL	Модель GEMTEC	Двухчастотная коррекция
Chat	43.6 ⁰ S, 176.2 ⁰ E	3.67	0.87	0.90	0.49	0.16
Nrc1	45.2 ⁰ N, 75.4 ⁰ W	3.18	1.01	0.84	0.40	0.17
Tidb	35.2 ⁰ S, 148.6 ⁰ E	3.22	1.42	1.05	0.87	0.58
Usno	39.8 ⁰ N, 77.0 ⁰ W	3.51	1.16	0.82	0.62	0.11
Invk	68.3 ⁰ N, 133.5 ⁰ W	3.18	1.32	0.60	0.24	0.23
Сред.		3.35	1.16	0.84	0.52	0.25

Численные результаты свидетельствуют об эффективности использования всех представленных моделей. Модель Клобучара, как и было заявлено разработчиком, удаляет в среднем около 50-ти процентов ионосферной ошибки. Модели GEMTEC и NTCM_GL показали себя более эффективно, чем модель Клобучара. Модель GEMTEC работает лучше, чем модель NTCM_GL, но, как и ожидалось, хуже, чем двухчастотный режим коррекции ионосферного запаздывания.

Представленные выше результаты относятся к полному циклу солнечной активности 2001 ÷ 2011 годов. К настоящему времени прошла половина нового солнечного цикла. Поэтому можно провести анализ эффективности модели GEMTEC с учетом последних 5 лет. Снова были взяты указанные выше станции системы IGS, за исключением станции CHAT, для которой полный набор данных отсутствует. Для остальных четырех станций обрабатывались данные за 22-е число каждого месяца 2012 – 2016 годов. Получены полные (3D) ошибки позиционирования для решения навигационной задачи с использованием моделей Клобучара и GEMTEC. Результаты объединены с аналогичными данными за предыдущий солнечный цикл. Таким образом, в таблице 7 представлены

усредненные за 16 лет ошибки для каждой из станций и усредненные ошибки по всем станциям.

Таблица 7. Средние значения полной (3D) ошибки позиционирования для станций системы IGS с расширением на 2001 – 2016 годы.

Станция	Значения полной (3D) ошибки, м	
	По модели Клобучара	По модели GEMTEC
Nrc1	0.84	0.45
Tidb	1.26	0.72
Usno	1.01	0.83
Invk	1.01	0.36
Среднее	1.03	0.59

Сравнение расчетов из таблиц 6 и 7 показывает, что с учетом последних пяти лет эффективность модели GEMTEC немного снизилась, но осталась по-прежнему более высокой, чем эффективность модели Клобучара.

Если сравнивать между собой модели GEMTEC и NTCM_GL, то можно отметить, что в модели GEMTEC, в отличие от NTCM_GL, для вычисления ионосферной задержки не используются никаких ресурсоемких математических операций вычисления тригонометрических функций, но в модели GEMTEC используются довольно большие, по сравнению с NTCM_GL, численные массивы. При этом, как уже отмечалось, на практике продемонстрирована возможность включения модели GEMTEC в программное обеспечение штатного одночастотного навигационного приемника.

1.7 Выводы по главе

Выполнена модификация исходной версии модели GEMTEC, направленная на оптимизацию ее программной реализации в плане экономии вычислительных ресурсов навигационного приемника.

Продемонстрирована возможность реализации коррекции ионосферного запаздывания с использованием модели GEMTEC на отечественном навигационном устройстве МНП-М7 Ижевского радиозавода.

Проведено сравнение качества воспроизведения карт GIM моделями Клобучара, NTCM_GL и GEMTEC. Показано, что использование двух последних моделей обеспечивает существенно более высокую точность воспроизведения регулярных вариаций полного электронного содержания по сравнению с моделью Клобучара.

Проведено массовое сравнительное тестирование трех указанных моделей в плане уменьшения ошибок позиционирования при решении навигационной задачи с реальными входными данными. Показано, что модель GEMTEC обеспечивает наиболее точное позиционирование. Средняя ошибка определения координат уменьшается примерно вдвое по сравнению с использованием модели Клобучара.

Глава 2. Дифференциально-временной режим для спутниковых радионавигационных систем

В данной главе рассматривается новая возможность повышения точности позиционирования для глобальных спутниковых навигационных систем. Данный метод разработан при непосредственном участии автора и основывается на особенности поведения суточного хода ошибки позиционирования, заключающейся в ее повторяемости в соседних сутках на двух разнесенных в пространстве приемниках. Предлагаемый метод в результате тестирования показал свою эффективность в сравнении со стандартным режимом позиционирования.

2.1 Повторяемость суточного хода ошибки позиционирования

В данном разделе будет рассмотрена особенность суточного хода ошибки позиционирования, на которой базируется предлагаемый к использованию дифференциально-временной режим. Эта особенность заключается в повторяемости суточного хода погрешностей определения координат навигационного приемника в соседних сутках.

Для исследования указанной особенности привлекались как собственные данные, полученные на доступных нам одночастотных навигационных приемниках, так и данные со станций слежения международной сети IGS.

На рис. 13 изображен типичный временной ход высоты фазового центра антенны, определяемой навигационным приемником, в двух соседних сутках. Измерения изображенный на данной рисунке были сняты с наблюдательного пункта Иркутского филиала МГТУ ГА, описанного в первой главе. На всех рисунках данного раздела по вертикальной оси отображены измеряемые высоты антенн h . Так как для данной задачи важны только относительные вариации высот антенн, то по их оси нанесен масштаб единиц измерений. Для большей наглядности, суточных ход высот в соседних сутках, изображен один под другим

с некоторым смещением по вертикали. По горизонтальной оси отображено мировое время UTC в сеансах наблюдений соседних суток.

Во временном ходе, как можно заметить, заметны флуктуации различных временных масштабов: интенсивные длиннопериодические вариации с характерными временами порядка сотен - тысяч секунд и менее интенсивные короткопериодические флуктуации длительностью в десятки секунд.

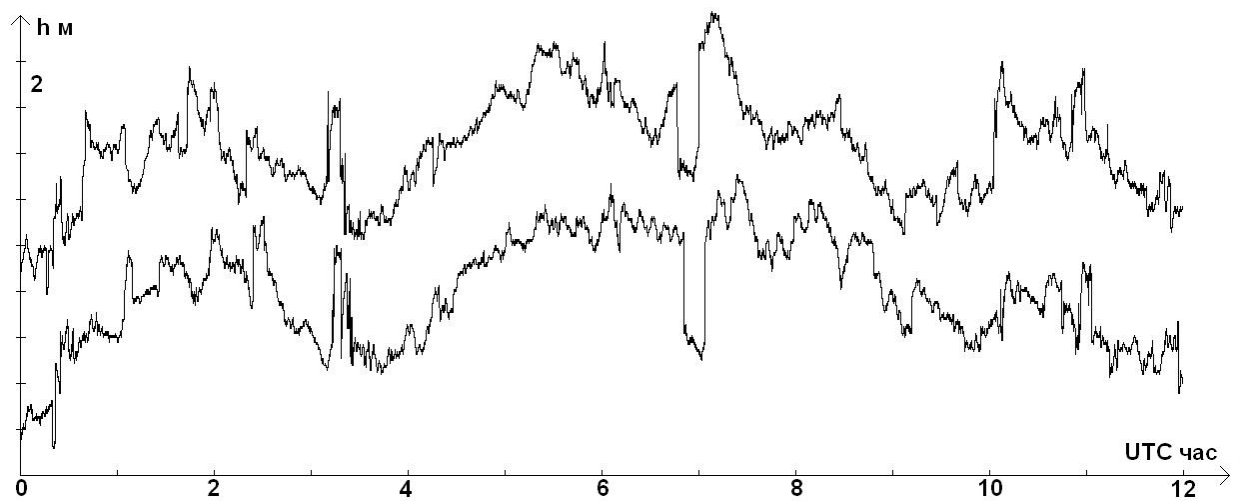


Рис. 13. Временной ход высоты центра антенны в соседних сутках

Дальнейший анализ выявил важное свойство короткопериодических флуктуаций, а именно, что существует сдвиг по времени повторяемости в соседних сутках, равный 4-м минутам. На рис. 14 представлены в увеличенном масштабе времени фрагменты временных вариаций в соседних сутках с определенным сдвигом во высоте. На горизонтальной оси изображено время t в минутах относительно начала сеансов. Как упоминалось ранее, период обращения спутников GPS составляет 11 часов 58 минут, поэтому указанный сдвиг связан со сдвигом повторяемости расположения созвездия наблюдаемых спутников.

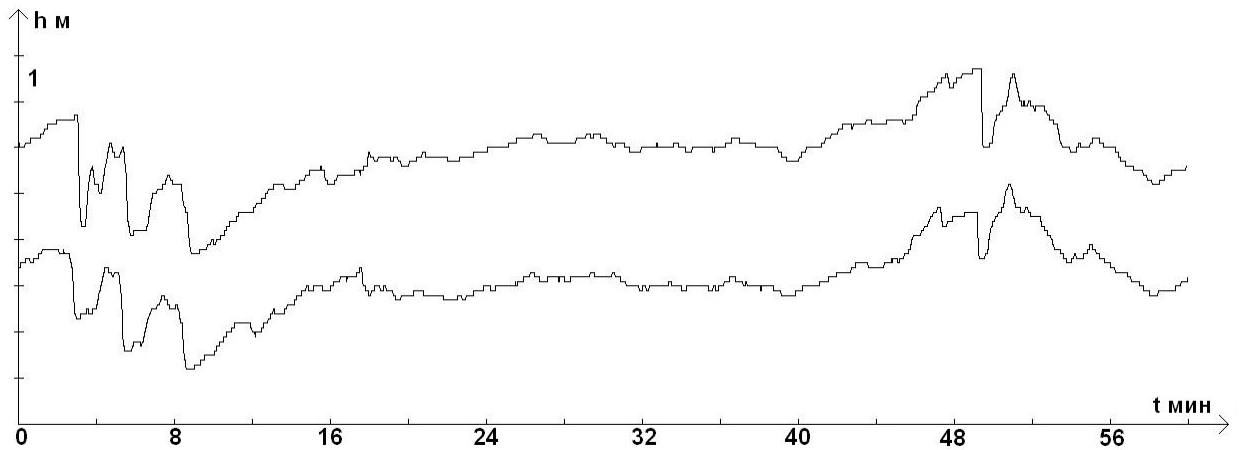


Рис. 14. Фрагмент временного хода высоты антенны в соседних сутках со сдвигом в 4 минуты

Изначально повторяемость флуктуаций интерпретировалась как проявление многолучевости, при отражении спутниковых сигналов от объектов окружающего ближнего ландшафта. Действительно, условия возникновения многолучевости при стационарном окружении зависят от конфигурации созвездия спутников, и повторяемость в соседних сутках должна иметь временной сдвиг в 4 минуты. Однако после проведения синхронных измерений в двух пространственно-разнесенных наблюдательных пунктах, данная интерпретация как единственная была отвергнута. Временные вариации определяемых высот антенн двух наблюдательных пунктах, разнесенных на расстоянии около 4-х километров представлены на рис. 15. Данным разнесом удалось добиться совершенно разной окружающей обстановки на наблюдательных пунктах. В результате чего стало заметно, что имеется хорошая корреляция длиннопериодических вариаций высот антенн, однако корреляция между короткопериодическими флуктуациями отсутствуют. Можно сделать вывод, что короткие и менее интенсивные флуктуации высот антенн действительно обусловлены многолучевостью, в то время как вариации с характерными временами в сотни и тысячи секунд с многолучевостью не связаны.

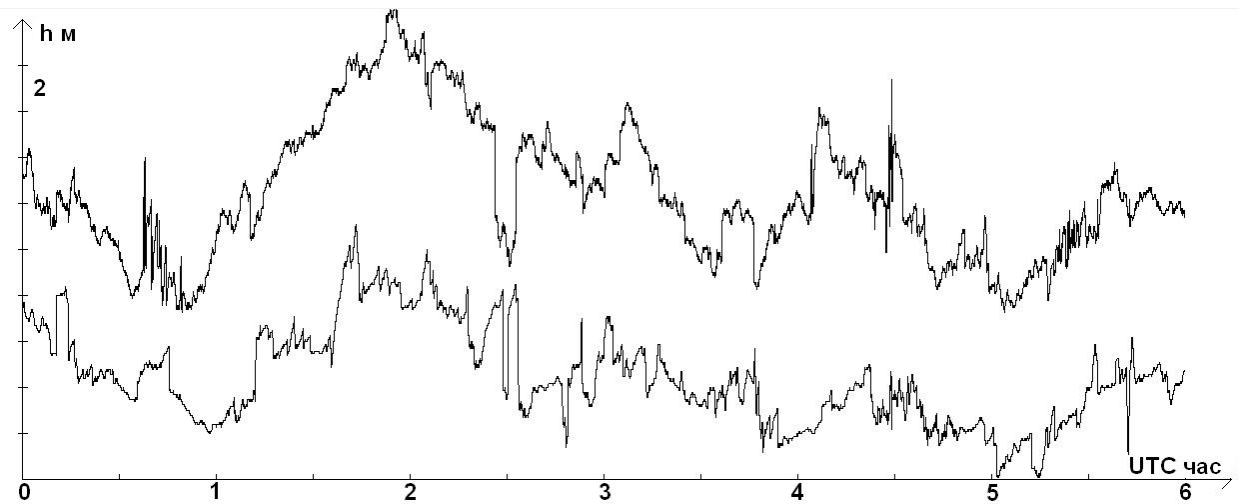


Рис. 15. Временные вариации высот антенн двух наблюдательных пунктов, разнесенных на расстоянии около 4 километров

Следующим этапом был анализ временной хода измеряемой высоты антенны на одной из станций слежения системы IGS. Рис. 16 сформирован аналогично рис. 13 для среднеширотной станции сети IGS. На рис. 16 отчетливо заметна повторяемость временных вариаций высоты антенны в соседних сутках. В результате чего можно считать доказанным, что описываемая особенность имеет глобальный характер, а не локальный.

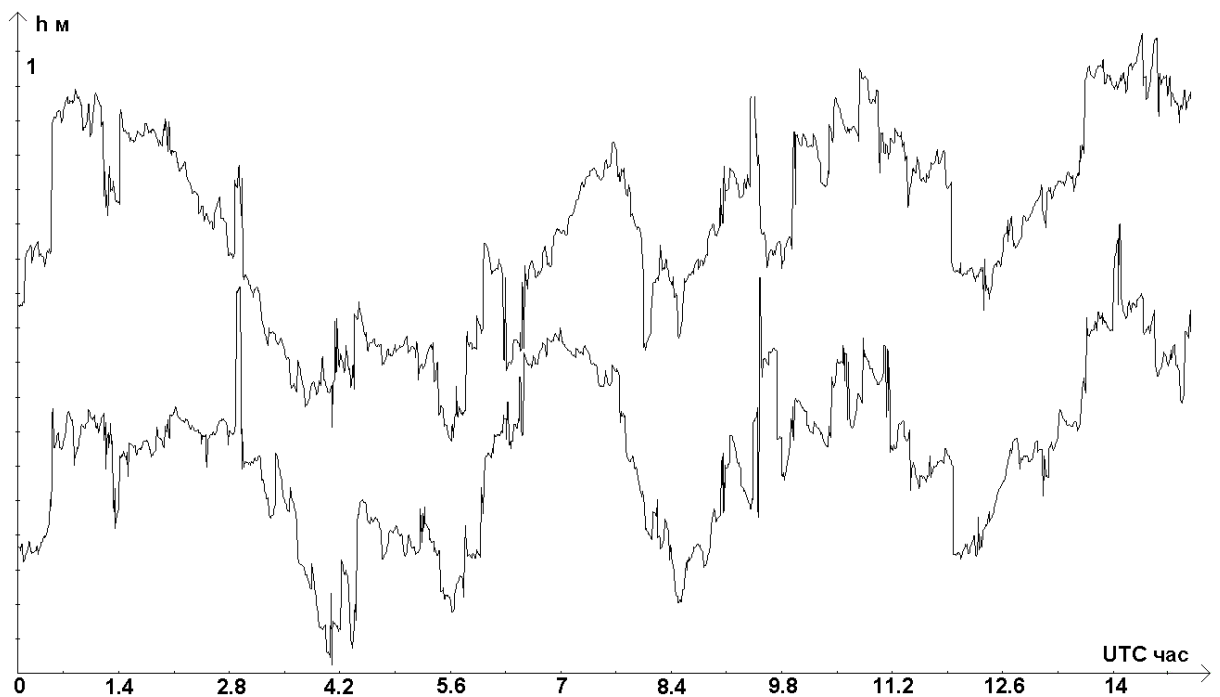


Рис. 16. Временной ход высоты в соседних сутках, станция IGS

Так как сеть IGS хорошо развита, то существует возможность проанализировать повторяемость ошибок позиционирования для различных пунктов наблюдений, в том числе разнесенных на значительные расстояния. Проанализированные временные вариации высот антенн на рис. 17 представлены для двух среднеширотных станций сети IGS. Данные станции разнесены по долготе примерно на 7° (около 600 км). Заметно, что повторяемость длиннопериодических ошибок позиционирования существует, причем без значительного временного сдвига.

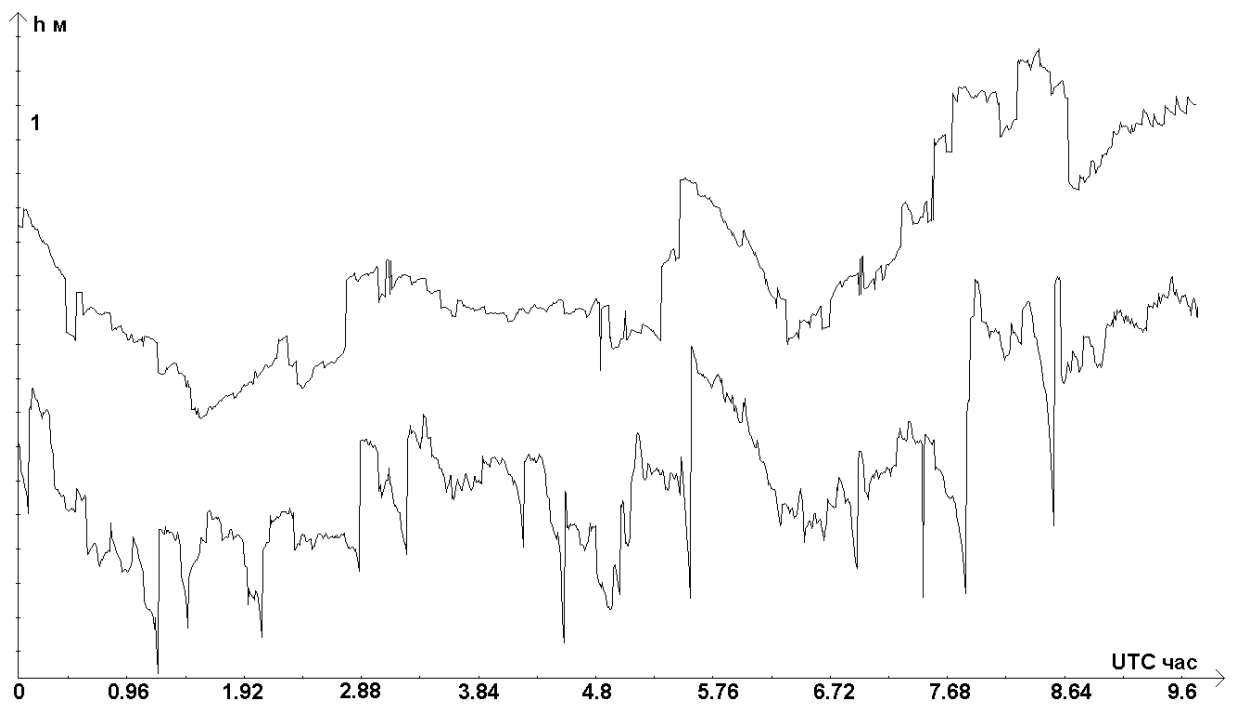


Рис. 17. Временны вариации высоты для двух IGS станций, разнесенных по долготе

Такие же результаты получены для двух разнесенных по широте среднеширотных станций IGS. Расстояние между станциями также равнялось примерно 7° . Результат представлен на рис. 18.

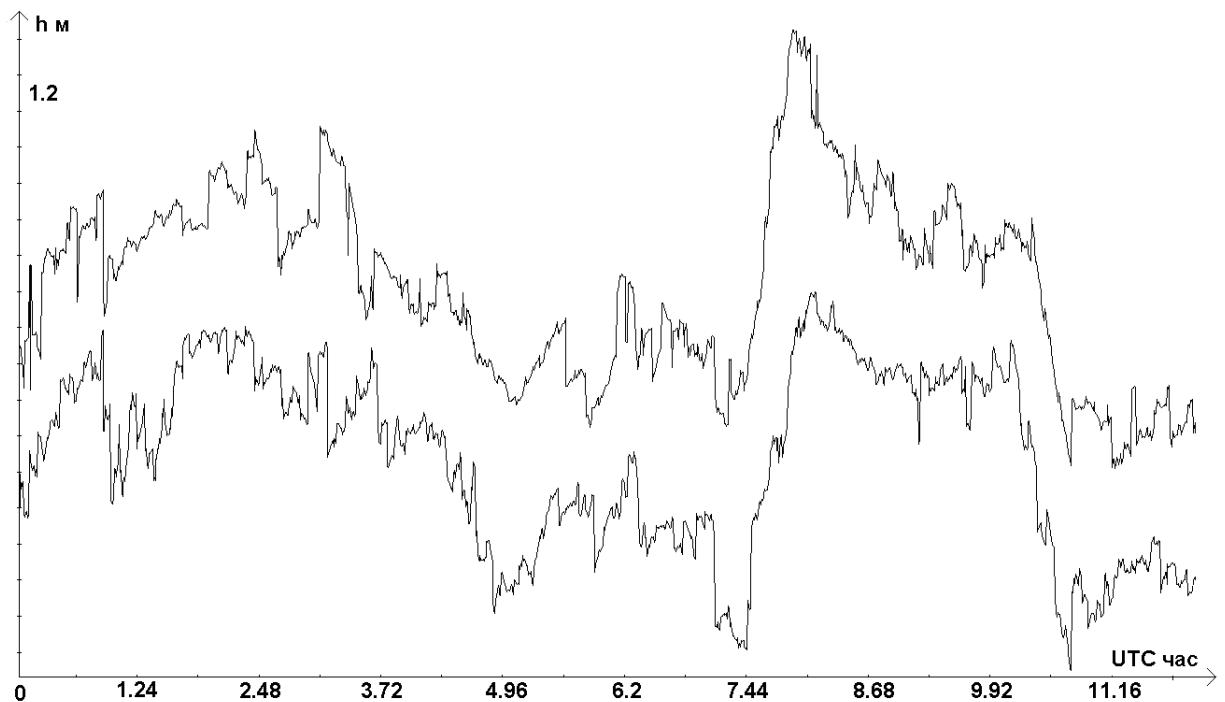


Рис. 18. Временные вариации высоты для двух IGS станций, разнесенных по широте

Если учесть радиус Земли в соотношении с высотами орбит спутников, можно предположить, что приемники станций IGS, задействованные в этом исследовании, используют одинаковое (или почти одинаковое) созвездие навигационных спутников для решения навигационной задачи. Данное умозаключение позволяет предположить наличие связи между вариациями ошибок позиционирования и конфигурацией созвездия навигационных спутников, участвующих в решении навигационной задачи.

Для практических задач использования данной особенности является важным вопрос о том, как долго сохраняется рассматриваемая повторяемость. Ответ на него был получен при анализе непрерывного сеанса наблюдений на среднеширотной станции IGS в течение 7 суток - 192 часов. На рис. 19 изображены временные вариации определяемой высоты антенн в последовательных сутках (сверху вниз). Нетрудно заметить, что по крайней мере, в данном интервале наблюдений повторяемость стабильно сохраняется. Кроме того, при более детальном рассмотрении из рисунка можно заметить смещение на

4 минуты вперед каждые сутки [42].

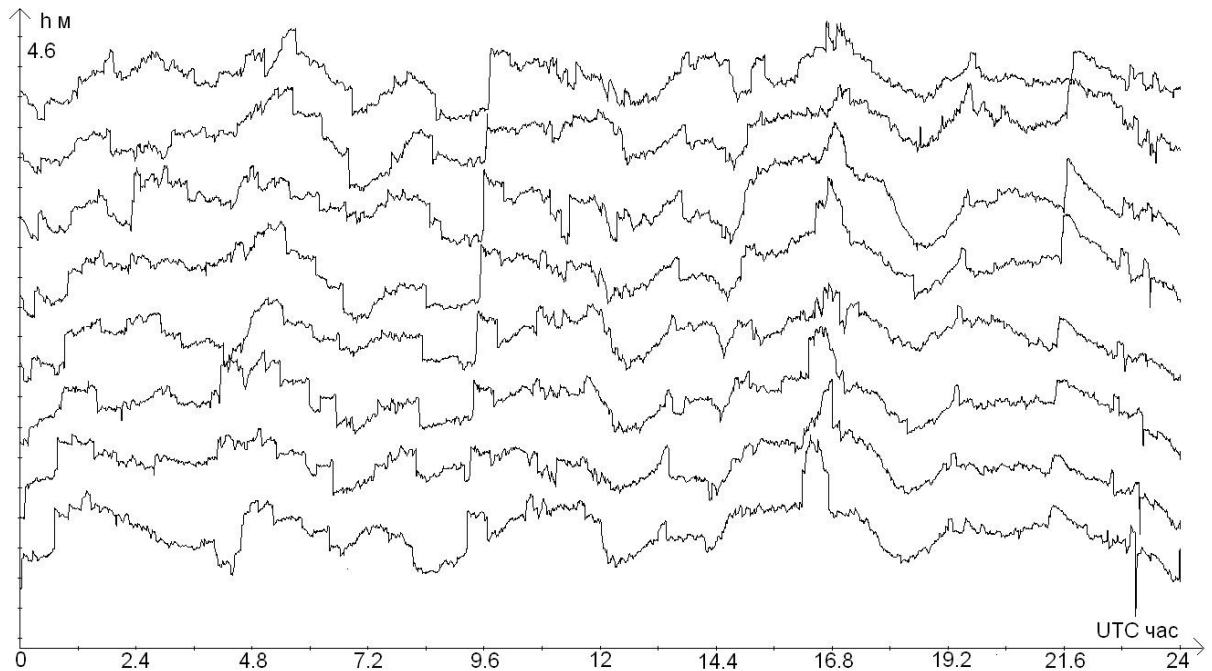


Рис.19. Временная вариация высоты станции IGS в течение 8 суток

Для решения вопроса о причинах длиннопериодической повторяемости, было проанализировано влияние конфигурации созвездий спутников на ошибку определения высоты антенны. Для анализа была использована программа из пакета GPStk - PRSolve. Данная программа позволяет решать навигационную задачу по конкретным спутникам. В одном из сеансов наблюдений на станции IGS проводились два расчета с различными созвездиями. Созвездия состояли из пяти спутников, четыре из которых не повторялись, а один был общим.

На рис. 20 представлен результат данных расчетов. В верхней части изображены вариации измеряемой высоты антенны в двух соседних сутках для первого созвездия, в нижней части – для второго. Стоит обратить внимание, что повторяемость в сутках также существует, однако характер повторяющихся вариаций совершенно различен для разных созвездий. [43, 44]

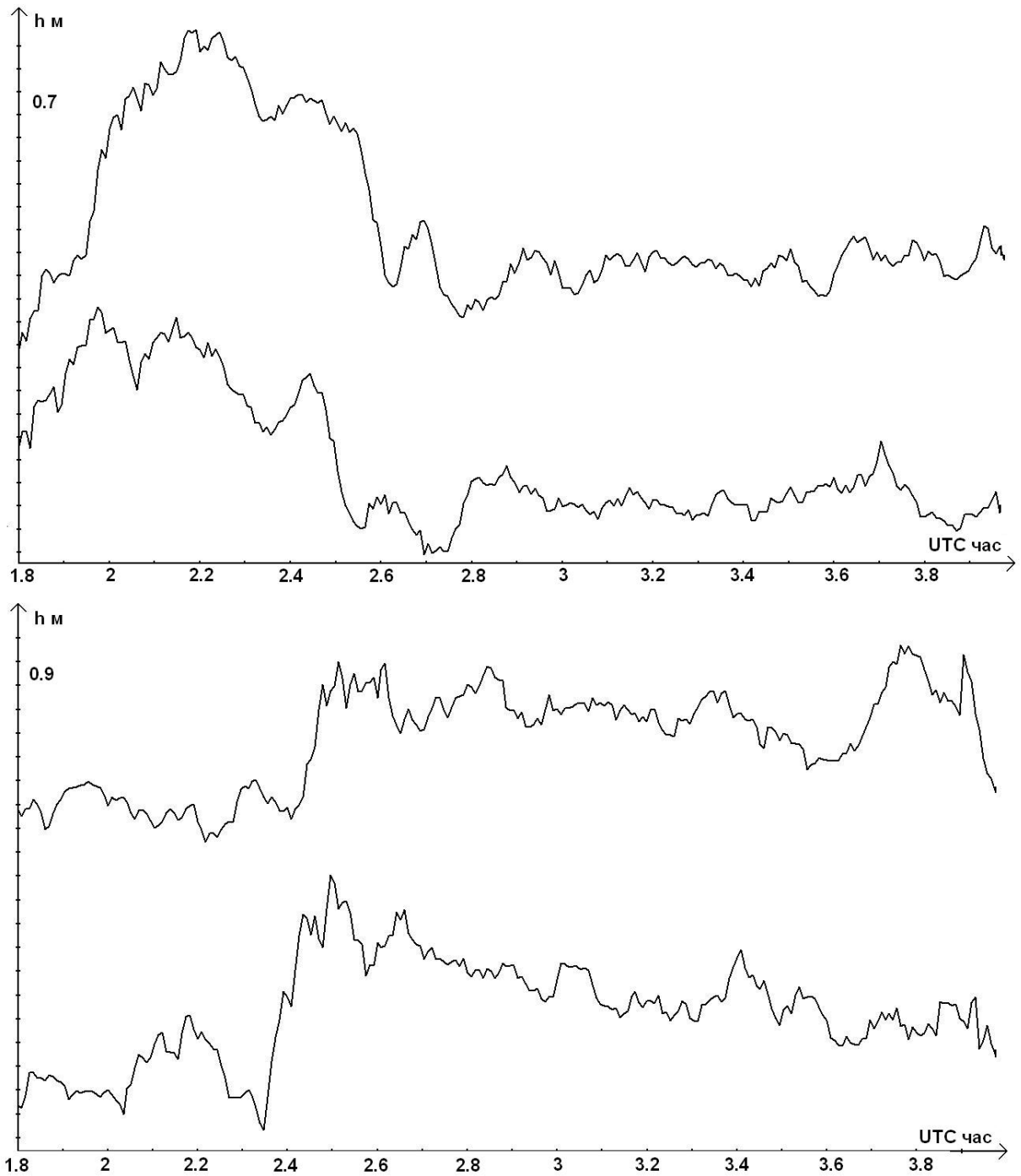


Рис. 20. Временные вариации высоты станции IGS для двух разных созвездий

Для подтверждения связи геометрии созвездий и повторяемости ошибки позиционирования было решено проверить, как ведет себя длиннопериодическая флуктуация на двух IGS станциях, расположенных на примерно одной широте, но разнесенные по долготе примерно на 180° . Это интересно тем, что через 11 часов

58 минут каждый спутники системы GPS сделают полный оборот вокруг Земли, но планета в то же время повернется на величину 180° . То есть локальное время наблюдения одних и тех же спутников на обеих станциях будет практически одинаковым. На рис. 21 представлены временные вариации высоты антенны в течение 12 часов для этих станций, сдвинутые на 12 часов относительно друг друга.

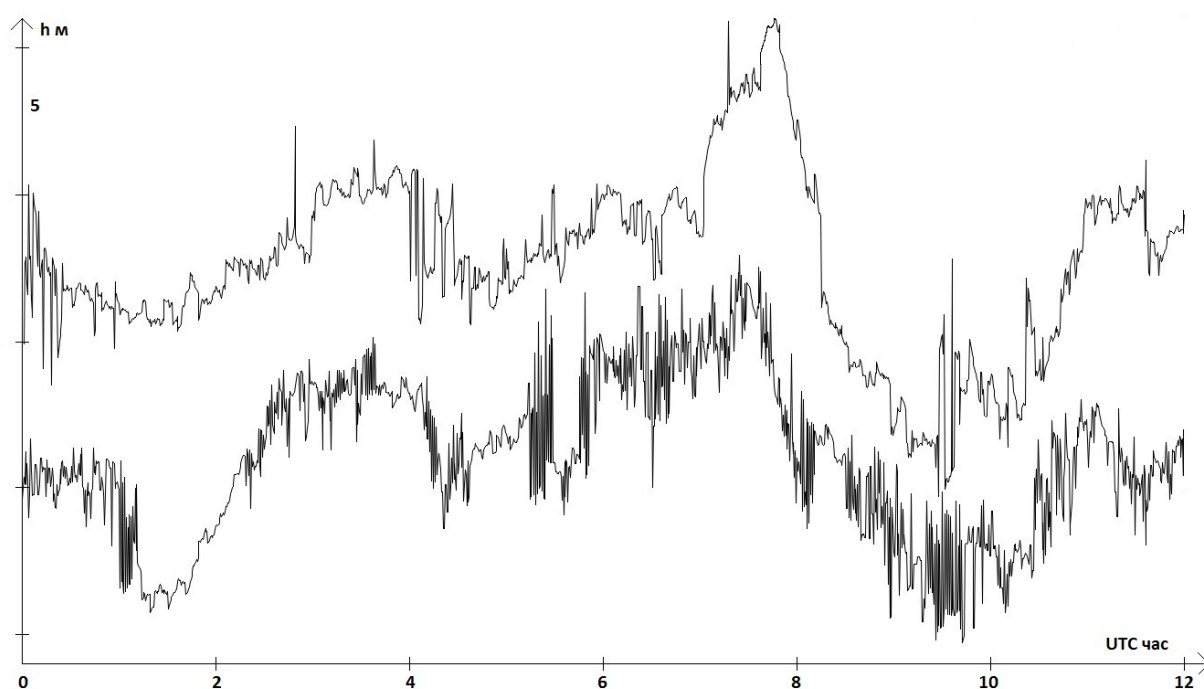


Рис. 21. Временная вариация высоты для двух IGS станций, разнесенных на $\sim 180^{\circ}$ по долготе

Рис. 21 подтверждает тот факт, что длиннопериодические флуктуации зависят от космического сегмента, так как две станции разнесены на противоположные по долготе позиции, где не может быть ни одинаковой многолучевости, ни сходных шумов приемника. И здесь было обнаружено, что данные зависимости слегка смещены относительно друг друга. Этот сдвиг равен 2 минутам, и снова объясняется тем, что графики смещены относительно друг друга на 12 часов, а время обращения спутника 11 часов 58 минут.

Наряду с ошибками позиционирования, связанными со сдвигами шкал времен и влиянием среды распространения, может проявляться и еще один тип,

связанный с космическим сегментом: ошибки определения координаты спутника. У этой ошибки должна иметь место следующая особенность: их величины и изменения во времени будут одинаково отражаться на станциях, разнесенных на достаточно большое расстояние, если с этих станций видны одни и те же спутники.

Рассмотрим поведение этой ошибки, используя файлы уточненных эфемерид (файлы типа .sp3). Данные типы файлов поставляются National Geodetic Survey, и в них хранится информация об уточненных орбитах спутников. На рис. 22 изображена разность между абсолютными значениями радиус-векторов r (по сути дела – высотами) одного из спутников GPS в соседних сутках, которые определяются обычным навигационным файлом - именно такие данные используют приемники GPS, и файлом уточненных эфемерид, который формируется позже.

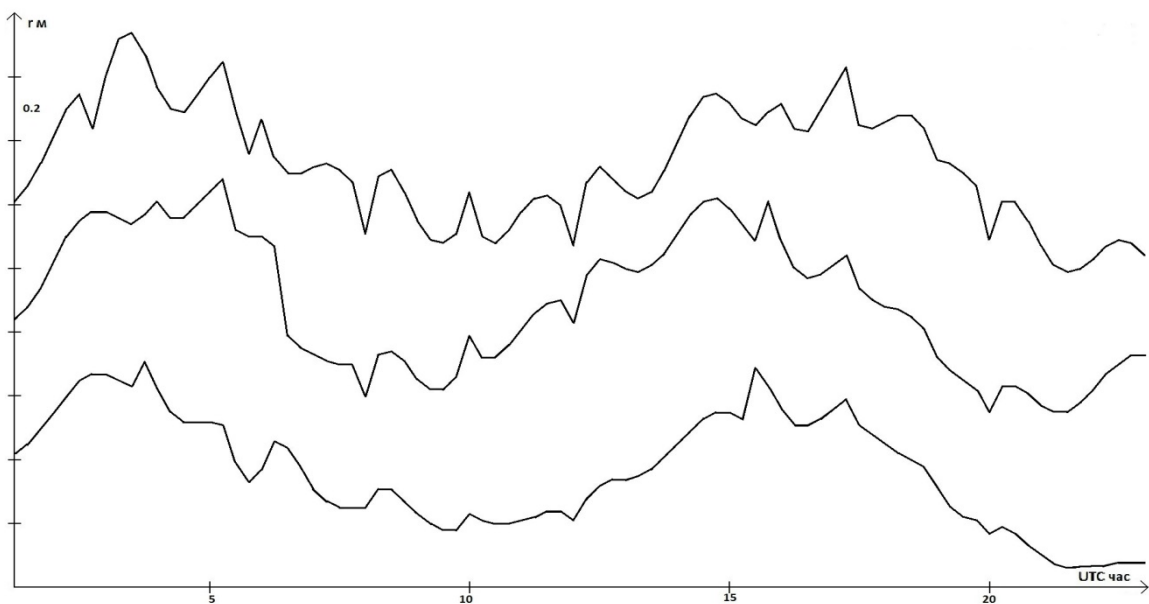


Рис. 22. Ошибка позиционирования спутника, в 3 соседних сутках

Из рис. 22 мы видим, что типичный размер флуктуации составляет величину порядка нескольких метров и имеет повторяемость в соседних сутках. Если учесть, что эти флуктуации будут давать вклад от каждого спутника и зависеть от группировки спутников, есть основания утверждать, что

рассматриваемые длиннопериодические флуктуации как раз будет определяться ошибкой в определении координат спутника. [45]

Следует также отметить, что указанная особенность суточного хода имеет место и для вариаций шорты и долготы положения приемника.

2.2 Дифференциально-временной режим GPS

Рассмотренная в разделе 2.1 особенность, может быть использована для повышения точности местоположения потребителя при использовании ГНСС, при помощи данных с реперных станций в данном регионе. Определенная аналогия имеет место с известным режимом дифференциального GPS [46, 47], который в данном случае следует называть пространственно-дифференциальным.

Пространственно-дифференциальный режим в самом простом варианте, реализуется как изображено на рис. 23. В некотором регионе существует реперный навигационный приемник с известными координатами фазового центра антенны (ККС – контрольно-корректирующая станция), который в режиме реального времени определяет текущие значения ошибок позиционирования в определённой системе координат и по специализированным каналам связи передает их потребителям. Их приемники, находящиеся в этом же регионе и включенные в дифференциальный режим, принимают эти поправки, которые в последствии вычитают из определяемых координат. Исправленные таким образом итоговые значения получаются заметно более точными по сравнению с автономными измерениями.

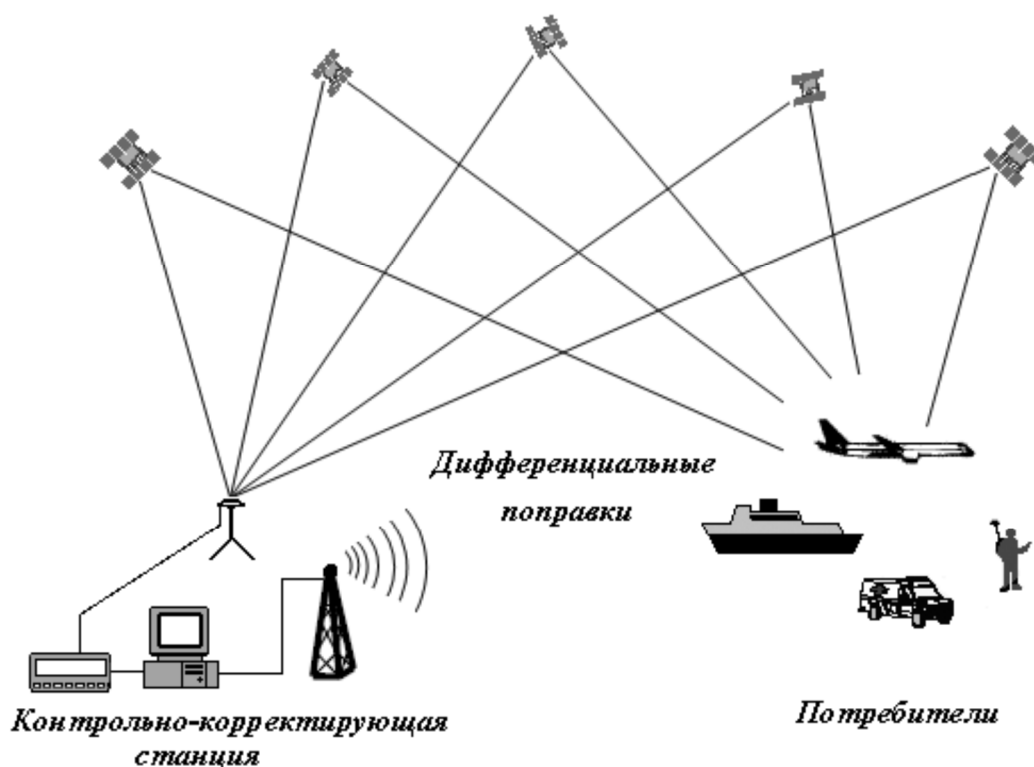


Рис. 23. Дифференциальный режим работы [48]

В дифференциально-временном режиме предлагается использовать поправки не с репера в текущий момент времени, а извлекать их из ранее записанного временного хода ошибок позиционирования ККС в предыдущие сутки [49 - 54].

Оценка эффективности предлагаемой методики была проведена путем несколько различных тестирований, результаты которых представлены ниже.

Предварительное тестирование было произведено на двух собственных наблюдательных пунктах в г. Иркутске, которые были подробно описаны в 1 главе данной диссертационной работы. Измерения проводились 5 – 6 мая 2014 года. Пункт В тестировался, пункт А являлся ККС. В таблице 8 показаны усредненные за сутки ошибки по географическим координатам. В строках таблицы отображены результаты тестирования без коррекции (строка В) и с коррекцией по указанному реперу (строка В-А). В нижней строке таблицы представлены результаты тестирования с использованием сглаживания во временном ходе ККС для удаления высокочастотных флуктуаций. Сглаживание

выполнялось путем усреднения по 20-минутным интервалам. То есть, суточный временной ход представлялся сеткой из 73 временных точек, между которыми поправки к координатам считались с использованием линейной интерполяции. Сглаживание полезно для устранения влияния случайных флуктуаций, обусловленных многолучевостью, а также для более компактного представления данных временного хода ККС.

Таблица 8. Усредненные за сутки ошибки по широте, долготе, высоте

Средняя ошибка	По широте, м	По долготе, м	По высоте, м
В	0.81	0.62	1.34
В-А	-0.22	0.31	-0.60
(В-А)~	-0.22	0.31	-0.58

Другой вариант представления результатов этого же теста представлен в таблице 9. Здесь приведены значения длины вектора ошибок между точным положением антенны и определяемыми положениями по вертикали, в горизонтальной плоскости и для полного расстояния, то есть среднее от модуля ошибки по высоте, в плоскости и полной (3D).

Таблица 9. Среднее от модуля ошибок по высоте, в плоскости и полной (3D)

Модуль средней ошибки	По высоте, м	В плоскости, м	Полная, м
В	1.34	1.04	1.70
В-А	0.60	0.38	0.71
(В-А)~	0.59	0.38	0.70

Как можно заметить из таблиц, для данного исследования выявлено существенное улучшение точности позиционирования с использованием дифференциально-временного режима, а сглаживание приводит только к некоторым дальнейшим уточнениям позиций.

Аналогичное тестирование было произведено для станций сети IGS. Использовались данные с трех станций системы IGS: A1 - blyt, A2 – jplm и B – сіс1, расположенные в Калифорнии, США. Дистанция между пунктами A1 и B около 252 км, между пунктами A2 и B – 361 км. Станции A1 и A2 использовались в качестве ККС, и на них по данным на 22 февраля 2008 года снимался суточный ход ошибок позиционирования. По данным станции B производилось тестирование. В следующие сутки 23 февраля 2008 г. определялись координаты без коррекции, с коррекцией по ККС A1, и с коррекцией по ККС A2. В таблице 10 отображены усредненные за сутки ошибки по широте, долготе и высоте при коррекции по двум различным пунктам - A1 и A2.

Таблица 10. Усредненные за сутки ошибки по широте, долготе, высоте

Средняя ошибка	По широте, м	По долготе, м	По высоте, м
B	0,77	-0,31	1,16
B-A1	-0,36	-0,23	-0,14
B-A2	-0,04	0,04	0,01

Из таблицы 10 можно сделать вывод о том, что использование дифференциально-временного режима приводит к значительному снижению средней ошибки при использовании любой из реперных точек. По всем координатам средняя ошибка снижается не менее чем вдвое.

В таблице 11 представлено среднее от модуля ошибок за сутки, аналогично таблице 9, за исключением сглаживания, для 2 реперных пунктов.

Таблица 11. Среднее от модуля ошибок по высоте, в плоскости и полная

Модуль средней ошибки	По высоте, м	В плоскости, м	Полная, м
B	1,16	0,83	1,43
B-A1	0,14	0,42	0,45
B-A2	0,01	0,05	0,05

Эффективность коррекции абсолютной ошибки немного ниже, но остается весьма существенной.

Можно сделать вывод о зависимости эффективности коррекции от положений ККС и наблюдательного пункта. В этой связи было решено провести статистический анализ работы дифференциально-временной коррекции для нескольких различных пар станций сети IGS.

Были выбраны четыре региона, в которых отобраны по две относительно близко расположенные станции IGS: Австралия – станции STR2, TIDB, Япония – станции KSMV, USUD, Европа – станции ONSA, SPT0, Северная Америка – станции ALBH, NANO. Информация о локализации станций и приблизительных расстояниях между станциями представлена в таблице 12.

Таблица 12. Информация о локализации станций

СТАНЦИЯ	ШИРОТА °	ДОЛГОТА °	РАССТОЯНИЕ км
STR2	-35.32	149.01	5
TIDB	-35.40	148.98	
KSMV	35.96	140.66	208
USUD	36.13	138.36	
ONSA	57.40	11.92	90
SPT0	57.71	12.89	
ALBH	48.39	-123.49	110
NANO	49.29	-124.09	

Для анализа использованы данные по 22 парам соседних суток за 2010 и 2013 годы. Были выбраны по 11 пар каждого года, начиная с 1 января с шагом в 10 дней. Аналогично предыдущим тестам в двух соседних сутках определялись и сохранялись в файлах временной ход высоты, широты и долготы, определяемые приемниками каждой из станций. Определялись ошибки позиционирования для

станций в первые из двух суток. Эти ошибки с временным сдвигом в 4 минуты (в соответствии с периодом обращения спутников GPS) вычитались из координат, полученных в следующие сутки для соседних станций. Далее для вторых суток рассчитывались средние (со знаком) ошибки высоты Δh , широты Δla , долготы Δlo , абсолютные ошибки в горизонтальной плоскости Δho и полные (3D) ошибки Δfu . Также вычислялись границы доверительных интервалов содержания ошибок с вероятностью 0.95. – δh , δla , δlo , δho , δfu . Сравнивались соответствующие ошибки на станции за вторые сутки, полученные без коррекции и с дифференциально-временной коррекцией за предыдущие сутки на соседней станции. В финале производилось окончательное усреднение по всем 22-суточным сеансам. Также, в усреднении участвовали варианты с коррекцией станции А по станции В и, наоборот, станции В по станции А. Результаты тестирования для четырех рассматриваемых регионов представлены в таблице 13. Здесь под штатным режимом следует понимать измерения на одной частоте без использования дифференциально-временного режима.

Таблица 13. Результат тестирования ДВР на станциях IGS

СТАНЦИИ	РЕЖИМ	$\Delta h/\delta h$ м	$\Delta la/\delta la$ м	$\Delta lo/\delta lo$ м	$\Delta ho/\delta ho$ м	$\Delta fu/\delta fu$ м
STR2-TIDB	штатный	1.1/7.2	-1.0/3.8	0.0/1.7	1.0/4.0	1.7/7.9
	ДВР	0.0/5.2	0.0/2.2	0.0/1.6	0.4/2.6	1.1/5.7
KSMV-USUD	штатный	1.4/8.6	1.2/4.5	-0.1/2.8	1.4/4.8	2.6/9.2
	ДВР	-0.1/7.1	0.0/3.1	0.0/2.8	0.9/3.8	1.9/7.5
ONSA-SPT0	штатный	-0.1/6.4	0.3/2.4	0.1/1.6	0.4/2.7	1.2/6.8
	ДВР	-0.1/4.0	0.0/1.9	0.0/1.2	0.3/2.2	1.1/4.4
ALBH-NANO	штатный	-0.4/6.3	0.1/3.3	-0.2/1.7	0.4/3.5	1.4/6.7
	ДВР	-0.1/5.5	0.0/3.0	0.0/1.6	0.3/3.2	0.6/6.3
Среднее	штатный	0.5/7.1	0.2/3.5	0.0/2.0	0.8/3.7	1.7/7.6
	ДВР	-0.1/5.4	0.1/2.6	0.0/1.8	0.5/3.0	1.2/6.0

Стоит отметить, что при тестировании дифференциально-временного режима для GPS использовалась стандартная модель для коррекции ионосферного запаздывания (модель Клобучара), заложенная в программу rinexpvt.

Как можно видеть из всех проведенных тестов, применение режима дифференциально-временной коррекции для системы GPS весьма существенно улучшает точность позиционирования.

2.3 Дифференциально-временной режим для ГЛОНАСС и GPS+ГЛОНАСС

Эффективность дифференциально-временного режима для системы ГЛОНАСС априори не очевидна по двум причинам. Во-первых, методики расчетов положений навигационных спутников при решении навигационной задачи в системах GPS и ГЛОНАСС совершенно различны, поэтому повторяемость ошибок расчетов в соседних сутках в этих системах может отличаться качественно и количественно. Во-вторых, в системе GPS период обращения спутников равен 11 часам 58 минутам, так что смещение наблюдаемых созвездий спутников в соседних сутках очень незначительно – всего 4 минуты. В системе ГЛОНАСС такое смещение существенно большее и составляет примерно полтора часа. В этой связи далее представлены результаты тестирования дифференциально-временного режима для системы ГЛОНАСС, а также при совместном использовании ГЛОНАСС и GPS.

В последние годы ряд станций сети IGS начал поставлять rinex-файлы с данными псевдодальностей и для спутников ГЛОНАСС. Таким образом, описанная выше методика может быть применена и для этой системы. Однако упомянутая программа RINEXPVT из пакета GPS Toolkit, не обеспечивает работу со спутниками ГЛОНАСС. Возможность решения навигационной задачи ГЛОНАСС предоставляется другой программой этого пакета – программой PRSolve. Правда, у этой программы есть одна немаловажная особенность: программа (в отличие от RINEXPVT) не предусматривает коррекцию

дополнительного ионосферного запаздывания в одночастотном режиме, то есть с использованием ионосферной модели. Также программа PRSolve позволяет решать навигационную задачу и при совместном использовании обеих навигационных систем.

Для проведения тестирования были выбраны данные первых 10 дней 2015 года для станций ONSA и SPT0. Использовалась коррекция в обоих направлениях – ONSA по SPT0 и наоборот. В таблице 14 (аналогично таблице 13) представлены усредненные за 10 дней результаты тестирования для ГЛОНАСС и совместно для ГЛОНАСС+GPS.

Таблица 14. Результат тестирования ДВР для ГЛОНАСС и ГЛОНАСС+GPS на станциях IGS

СИСТЕМА	РЕЖИМ	$\Delta h/\delta h$ м	$\Delta la/\delta la$ м	$\Delta lo/\delta lo$ м	$\Delta ho/\delta ho$ м	$\Delta fu/\delta fu$ м
ГЛОНАСС	штатный	1.3/11.6	0.4/1.3	0.1/1.1	0.4/1.5	2.3/11.7
	ДВР	0.0/12.6	0.0/2.0	0.0/1.5	0.2/2.2	1.0/12.7
ГЛОНАСС +GPS	штатный	3.1/8.4	0.5/1.2	0.1/0.5	0.5/1.2	3.2/8.6
	ДВР	0.1/6.1	0.0/1.1	0.0/0.4	0.1/1.1	0.9/6.2

Данные таблицы, безусловно, демонстрируют высокую эффективность режима ДВР как отдельно для ГЛОНАСС, так и при совместном использовании ГЛОНАСС и GPS. Однако следует напомнить, что решается задача без ионосферной коррекции, так что дифференциально-временной режим здесь выполняет эту коррекцию автоматически по предыдущим суткам.

Для тестирования ДВР систем ГЛОНАСС и GPS+ГЛОНАСС «в чистом виде», то есть с предварительной штатной коррекцией ионосферного запаздывания, были проведены однодневные сеансы на двух собственных наблюдательных стендах в г. Иркутске, разнесенных на расстоянии около 4 км. Результаты тестирования представлены в таблице 15.

Таблица 15. Результат тестирования ДВР для ГЛОНАСС и ГЛОНАСС+GPS на собственных наблюдательных пунктах

СИСТЕМА	РЕЖИМ	$\Delta h/\delta h$ м	$\Delta la/\delta la$ м	$\Delta lo/\delta lo$ м	$\Delta ho/\delta ho$ м	$\Delta fu/\delta fu$ м
ГЛОНАСС	штатный	-5.0/11.0	-5.6/2.0	-0.4/1.5	1.2/2.2	5.2/4.2
	ДВР	-3.4/8.2	-2.0/3.5	0.1/2.2	2.1/3.8	4.4/9.0
ГЛОНАСС +GPS	штатный	2.4/8.8	0.7/3.6	1.1/3.0	1.3/4.4	2.8/9.2
	ДВР	0.4/6.8	0.1/4.0	0.1/2.9	0.6/4.6	1.0/7.9

Как и следовало ожидать, для системы ГЛОНАСС дифференциально-временной режим при выполнении предварительной коррекции ионосферного запаздывания оказался заметно менее эффективным. В то же время при совместном использовании обеих навигационных систем ДВР обеспечивает весьма существенное, более чем в два раза, уменьшение средней ошибки позиционирования, что можно обосновать большим вкладом в ошибку позиционирования данных со спутниковой системы GPS.

2.4 Альтернативный дифференциально-временной режим

Главным отличием приведенного выше дифференциально-временного режима (ДВР) от обычного дифференциального режима (ДР) служит то, что при использовании более распространенного иного варианта последнего потребителям с базовой станции передаются поправки к псевдодальностям, а не к непосредственно координатам, как в упрощенном ДВР. Представляет интерес рассмотреть возможность в ДВР передавать поправки к псевдодальностям. Данная процедура требует больших трудозатрат, но может быть выполнена. В результате может быть организован режим, который можно назвать альтернативным дифференциально-временным.

Суть метода состоит в следующем. На базовой станции вычисляются погрешности к псевдодальности в определённый день в каждый момент времени

и для всех спутников посредством минимизации остаточной ошибки позиционирования. На следующие сутки относительно данного дня на приемнике, включенном в данный режим, данные поправки учитываются.

Целью данного небольшого раздела является предварительная оценка эффективности альтернативной дифференциально-временной коррекции в сравнении с другими методами повышения точности позиционирования.

Для сравнительного тестирования альтернативного ДВР использовались 2 среднеширотные станции системы IGS, находящиеся в Европе: ONSA (станция А), SPT0 (станция В). Для сравнения использовались 3 пары данных наблюдений для 23 и 24 чисел марта, июня и декабря 2012 г. Альтернативный ДВР применялся для взаимных корректировок А по В, и В по А с усреднением результатов. Эффективность альтернативного ДВР, представленная в таблице 9, оценивалась в сравнении с режимами: ДВР, без коррекции, с коррекцией моделями ПЭС Клобучара, GEMTEC, описанной выше, а также двухчастотным режимом. В столбцах таблицы 16 представлена средняя ошибка по широте $dlat$, долготе $dlon$, высоте dh , а также модуль среднего в горизонтальной плоскости $dhor$ и модуль усредненной полной ошибки $dfull$. Все числовые данные представлены в метрах.

Таблица 16. Результат тестирования альтернативного ДВР на станциях IGS

	$dlat$	$dlon$	dh	$dhor$	$dfull$
Без коррекции	1,47	0,52	4,25	1,56	4,53
Клобучар	1,54	0,47	0,36	1,61	1,65
GEMTEC	1,04	0,55	0,71	1,18	1,38
ДВР	0,00	0,14	-0,02	0,14	0,14
Альтернативный ДВР	-0,24	-1,35	0,64	1,37	1,51
Двухчастотный	0,52	0,43	0,63	0,67	0,92

Как и предполагалось, использование альтернативного ДВР улучшает

точность позиционирования в сравнении с автономным режимом и коррекции при помощи модели Клобучара. В данном тестировании альтернативный ДВР показал себя сопоставимым с моделью GEMTEC, но хуже ДВР и двухчастотного режима позиционирования. Стоит отметить, что в данном тестировании обычный ДВР продемонстрировал наилучший результат коррекции, даже при сопоставлении с двухчастотным режимом.

На рис. 24, как пример, изображен суточный ход ошибки позиционирования для станции ONSA 24 июня после корректировок по данным станции SPT0 за 23 июня. Данные изображены с усреднением, плавающим средним по 10-ти минутным промежуткам. Сплошной линией изображен режим работы без коррекции, длинным пунктиром показана коррекция с использованием модели Клобучара, короткий штрих – модель GEMTEC, точечная линия – обычный ДВР, длинной штрих пунктир – альтернативный ДВР и короткой штрихпунктир – двухчастотный режим.

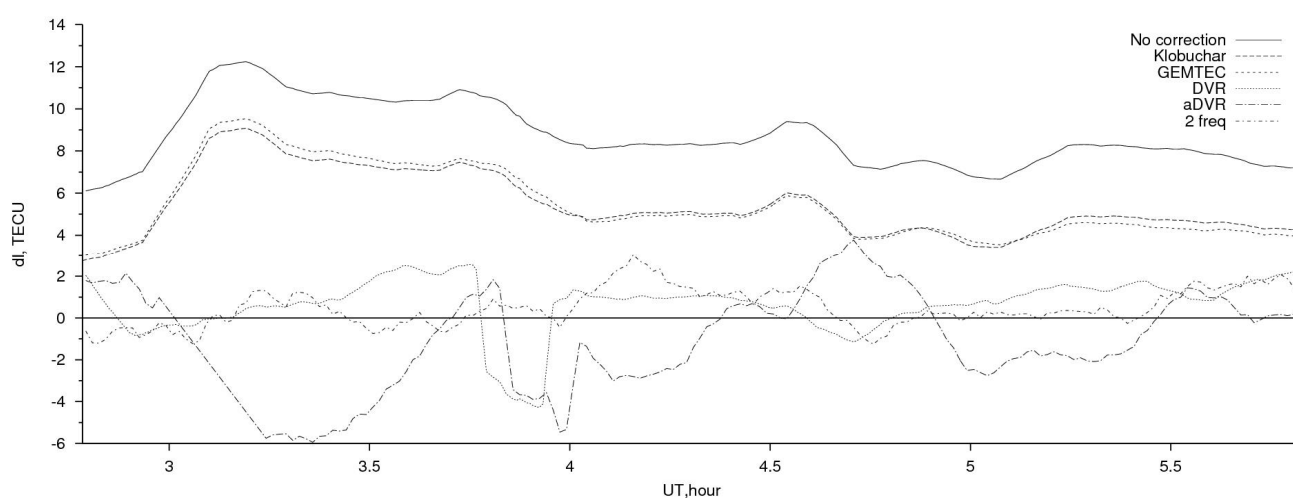


Рис. 24. Сравнение остаточной ошибки позиционирования при коррекции различными методами.

Этот отрезок данных подтверждает результаты, приведенные в таблице, а именно то, что альтернативный ДВР показывает точность сопоставимую с ДВР. А также то, что два данных режима позиционирования улучшают точность позиционирования эффективнее модели Клобучара и модели GEMTEC (в данной выборке). Как уже отмечалось, реализовать альтернативный ДВР более сложно и

поскольку не выявлено значительного выигрыша в уточнении координат, в качестве рабочего может быть рекомендован именно обычный ДВР с передачей поправок координат.

2.5 Выводы по главе

Предложен новый режим обработки данных ГНСС, основанный на обнаруженной особенности поведения суточного хода ошибки позиционирования. Данный режим представлен в двух вариантах своей реализации: корректировка самой остаточной ошибки позиционирования и корректировка псевдодальности для каждого спутника в отдельности.

Для обеих реализаций было проведено тестирование, показавшее эффективность использования данного режима корректировки по сравнению с режимом без какой-либо коррекции и использованием стандартной модели Клобучара для GPS. Показано, что эффективность реализации корректировок псевдодальностей не дает существенного улучшения точности позиционирования по сравнению с корректировкой остаточной ошибки позиционирования, но в исполнении режим корректировок псевдодальностей более трудоемкий.

Выявлена физическая сущность обнаруженной повторяемости ошибок позиционирования, обусловленная погрешностями штатных расчетов положений навигационных спутников.

Глава 3. Использование одночастотных приемников для регистрации нерегулярных событий в ионосфере

Использование спутниковых радионавигационных систем, а также их широкое распространение позволило сформировать новое направление диагностики верхней атмосферы Земли. Руководил данным направлением профессор Э.Л. Афраимович (Институт солнечно-земной физики СО РАН), в результате чего были сформированы теоретические основы [55] и проведена диагностика различных эффектов ионосферы непосредственно профессором, его коллегами и учениками (например, докторская диссертация Н.П. Переваловой [56]). Проведены исследования посредством GPS - мониторинга эффектов в земной ионосфере, связанные с солнечными затмениями [57, 58], землетрясениями [59 - 62], геомагнитными возмущениями [63 - 65], мощными тропическими циклонами [66]. Все эти результаты получены путем анализа относительных временных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, получаемых с использованием данных об изменениях фазовых путей спутниковых радиосигналов, регистрируемых двухчастотной приемной аппаратурой. Данный раздел будет посвящен возможностям использования одночастотных приемников для регистрации различных физических явлений в ионосфере [67-69], на примере событий, вызванных солнечными затмениями (событие 20 марта 2015 г) [70, 71], крупными землетрясениями (Японии 11 марта 2011 г и Чили 27 февраля 2010 г) [72] и взрывом Челябинского метеороида (15 февраля 2016 г).

3.1 Двухчастотные и одночастотные измерения полного электронного содержания ионосферы

Как известно, из-за особенностей ГНСС диагностика ионосферы проводится при помощи оценки ПЭС и его изменениях на луче спутник-приемник. При использовании сигналов ГНСС на двух различных частотах L1 и L2 существует

возможность измерения ПЭС на временных ходах фазы полученных сигналов, определенных до неизвестной аддитивной постоянной – фазовой неоднозначности [47]. При всем этом точность оценки самой фазы лежит в пределах сотых долей радиана или, если учесть длину радиоволны, в теории может составлять миллиметры.

Значение полного электронного содержания вдоль пути распространения от фазового центра антенны спутника до антенны приемника определяется известной формулой, приведенной в главе 1 данной диссертационной работы [55]:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const] \quad (3.1)$$

где f_1 и f_2 – частоты радиоволн L_1 и L_2 , $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – фазовые пути на соответствующих частотах. Фазовая неоднозначность в формуле (3.1) фигурирует в виде неизвестной константы $const$. То есть, при использовании только фазовых наблюдений существует возможность оценки не абсолютного значения ПЭС, а только его изменений со временем, начиная от первого момента регистрации. Следует помнить, что вариации ПЭС измеряются на пути распространения сигнала, и в конечной формуле фигурирует наклонное полное электронное содержание. Однако именно формула (3.1) применяется во всех двухчастотных измерениях с помощью приемников GPS/ГЛОНАСС.

Псевдодальность от передатчика спутника с номером i до приемника, измеренная по коду может быть вычислена по формуле [17]:

$$P_i = R_i + T + I_i + D_i + S \quad (3.2)$$

где R_i – геометрическая дальность между приемником и спутником, T – поправка, вызванная сдвигом часов приемника сравнительно с системным временем, I_i – поправка, вызванная распространением радиоволн в ионосфере, D_i – поправки от остальных факторов, таких как сдвиг часов спутника, влияние распространения в тропосфере, многолучевость, S – шум, вызванный аппаратными ошибками определения псевдодальности.

Фазовый путь радиосигнала вычисляется по следующей формуле [17]:

$$F_i = R_i + T - I_i + D_i + const \quad (3.3)$$

Стоит отметить, что вклад ионосферы в фазовый путь входит с противоположным относительно формулы (3.2) знаком. Погрешность фазовых измерений много меньше амплитудных и по этой причине в последнем выражении не присутствует. Константа в данной формуле связана с неоднозначностью определения фазы. При дальнейшем рассмотрении эту константу учитывать не будем, так как в дальнейшем будет рассматриваться относительные вариации ПЭС с начального момента времени.

Возвращаясь к особенности вклада ионосферы в групповой (псевдодальность) и фазовый пути, а именно разные знаки, вычтем из группового пути фазовый. В результате получим удвоенное значение ионосферного запаздывания и шум кодовых измерений. В итоговом виде для частоты L1 величина ПЭС, полученная на одночастотных измерениях вычисляется по формуле:

$$I = 3.08(C1 - L_1\lambda_1) \quad (3.4)$$

Для единообразия с формулой (3.1) вновь использовано произведение $L_1\lambda_1$. C1 - псевдодальность, полученную для сигнала кода C/A, то есть величины в скобках формулы (3.4) присутствуют непосредственно в RINEX-файлах. Вычисленное по формуле (3.4) ПЭС, представлено в единицах TECU. Если в RINEX-файлах присутствуют данные псевдодальностей по коду повышенной точности P1 то их можно использовать вместо псевдодальности по коду C1. Хотя код P1 является закрытым, в RINEX-файлах, получаемых со станций системы IGS, он, как правило, присутствует.

3.2 Регистрация ионосферного эффекта солнечных затмений на примере события 20 марта 2015

Данный раздел посвящен анализу влияния на ПЭС полного солнечного затмения 20 марта 2015 года. Самый значимый эффект от солнечного затмения наблюдался в северо-западной части Европы и над северной Атлантикой. Для анализа рассматриваемого солнечного затмения были использованы данные

станций системы IGS, а именно пункта MORP с координатами 55.2° северной широты, 1.7° западной долготы (Великобритания). Так как для нее наблюдалось закрытие Солнца лунным диском на величину порядка 90% - наибольшее из имеющихся. К сожалению, для еще более близкой к максимуму перекрытия станции IGS REYZ (Исландия) отсутствует необходимый набор исходных данных. Затмения в районе станции MORP началось примерно в 8 часов 40 минут UTC. Продолжительность затмения около 2-х часов.

Карта региона с указанием области полного покрытия солнечного диска изображена на рис. 25. На нем же крестом отмечено положение станции наблюдения и линиями изображены траектории движения ионосферных точек для трех спутников GPS G6, G9 и G10 за весь период анализа данных. Стоит обратить внимание, что во время солнечного затмения ионосферные точки располагались в зонах с закрытием солнечного диска около 80 – 90 процентов – максимальным для данной станции. Поэтому было предположено, что эффект солнечного затмения окажет заметное влияние на измеренное ПЭС для упомянутых выше спутников. Также стоит отметить, что спутники G9 и G10 располагались с достаточно большими углами возвышения, что позволяет максимально уменьшить влияние наклона ПЭС. Ионосферные точки спутника G6 были тоже расположены в зоне значительного закрытия солнечного диска, но углы возвышения здесь были меньше, вплоть до погружения спутника за горизонт. Ориентировочно данный момент и является временем окончания наблюдений.

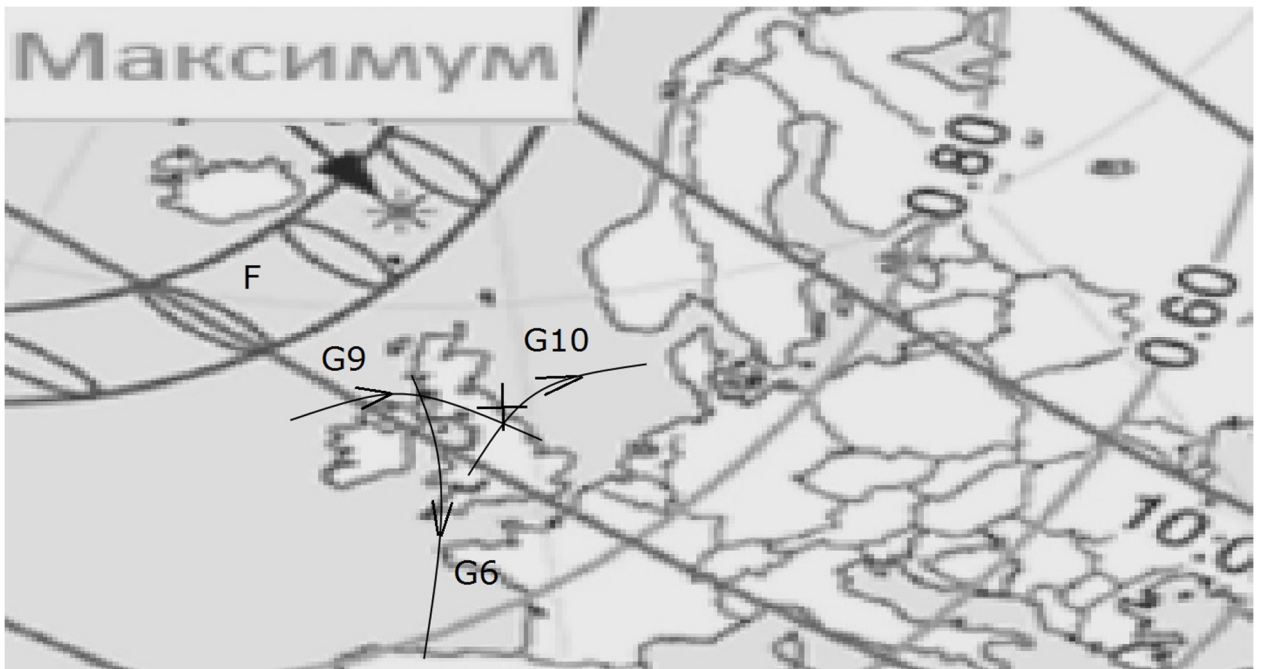


Рис. 25. Район солнечного затмения. F – зона полного затмения (закрытие солнечного диска на 100%). + - станция MORP. Линиями со стрелками изображены траектории и направления движения соответствующих ионосферных точек.

По формуле (3.1) на основе двухчастотных наблюдений были рассчитаны временных изменения наклонных ПЭС для спутников GPS G6, G9, G10. Первая точка отсчета времени соответствует 6 часам 47 минутам UTC. Продолжительность наблюдений составляет 3 часа 50 минут. В дальнейшие периоды времени начали происходить сбои сопровождения фазы несущей, что не дало возможность для более длительных сеансов наблюдений. Из-за особенностей форматов файлов RINEX дискретность по времени во всех расчетах составляет 30 секунд. Поэтому анализировались данные для 460 временных точек. Для выявления отклонений ПЭС от типичного временного хода были произведены аналогичные расчеты для соседних с возмущением дней - 19 и 21 марта 2015 года. Так как период обращения спутников GPS составляет 11 часов 58 минут, то геометрия движения наблюдаемых спутников в двух соседних сутках практически одинаковая.

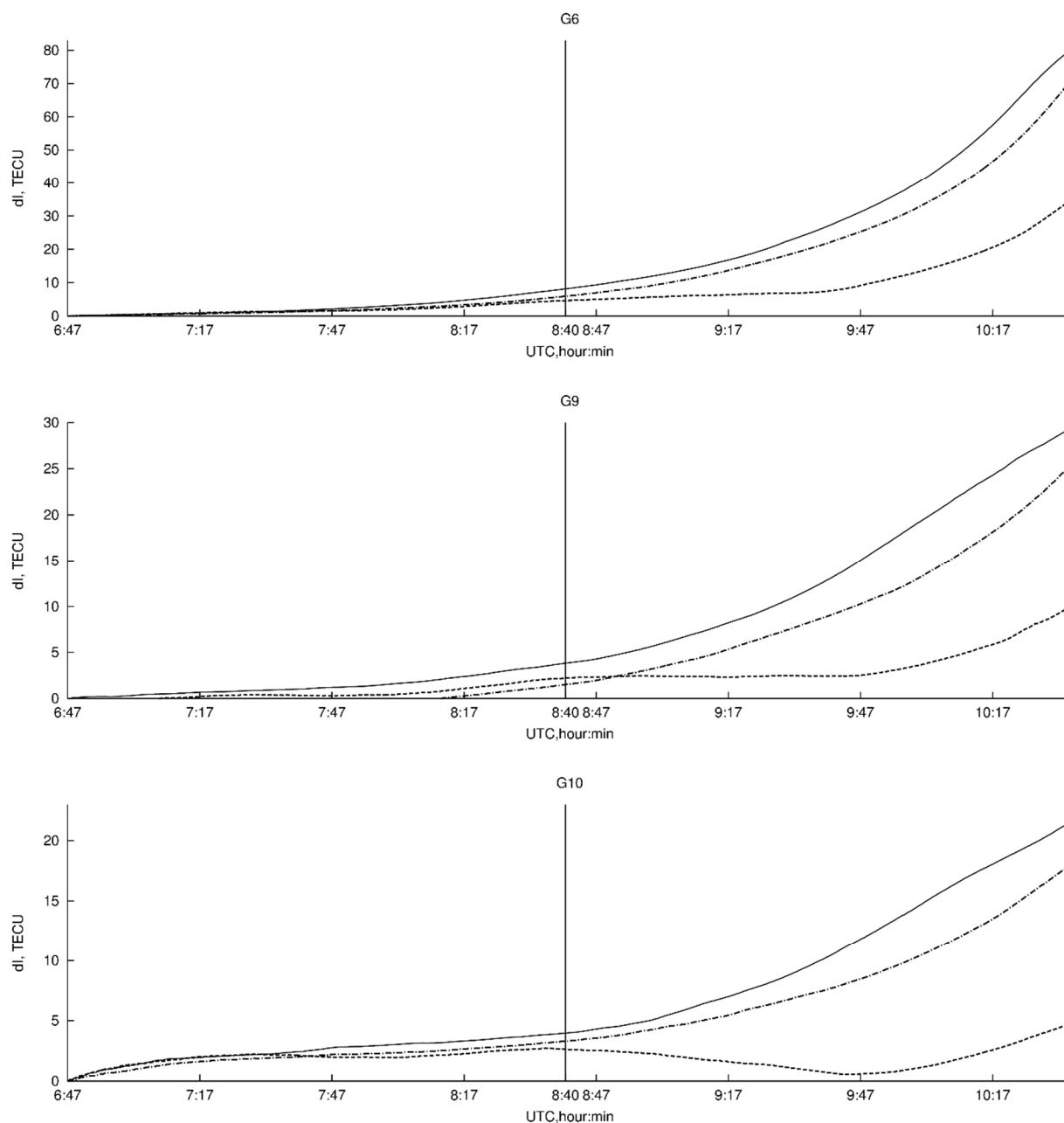


Рис. 26. Относительные временные вариации наклонного ПЭС для дня затмения 20 марта – пунктирные линии, предыдущего дня 19 марта – сплошные линии и для последующего дня 21 марта – штрихпунктирные линии для трех спутников GPS.

Графики вариаций наклонных ПЭС относительно начального момента для спутников G6, G9, G10 представлены на рис. 26. Изменения ПЭС отложены в единицах TECU. Пунктирными линиями показан ход для дня солнечного затмения, сплошными линиями – для предыдущих суток 19 марта 2015 года и

штрихпунктирными – для последующих суток 21 марта 2015. Легко заметить различную степень воздействия на ПЭС для разных спутников. Данный факт можно объяснить тем, что ионосферные точки разнесены на некоторое расстояние и оказываются в разной степени закрытия солнечного диска. Наиболее значимый эффект для спутника G10. Для него максимальное отклонение ПЭС, связанное с затмением, относительно контрольных суток составляет порядка 15 TECU. Из графиков изменений ПЭС видно, что реакция на солнечное затмение начинается непосредственно с началом закрытия солнечного диска для соответствующей ионосферной точки. На графиках рис. 26 вертикальной прямой отмечено начало закрытия станции MORP солнечным диском.

Таким образом, вновь подтверждается факт того, что с использованием данных двухчастотного приема сигналов GPS реализуется возможность детектирования аномальных явлений в ионосфере, проявляющихся во временных вариациях ПЭС. Можно отметить заметные отличия эффекта от результатов, представленных в [57] для затмения 2009 года, - большее уменьшение относительного ПЭС, более протяженный эффект по времени.

Одновременно с двухчастотными фазовыми измерениями по описанной в разделе 3.1 методике проводилось восстановление хода ПЭС по одночастотным измерениям на частоте L1 для сигналов спутника G10, используя формулу (3.4). На представленном ниже рис. 27 сравниваются вариации ПЭС, полученные по одночастотным (сплошная линия) и двухчастотным измерениям (штриховая линия) в увеличенном по длительности до 4-х часов 40 минут сеансе наблюдений.

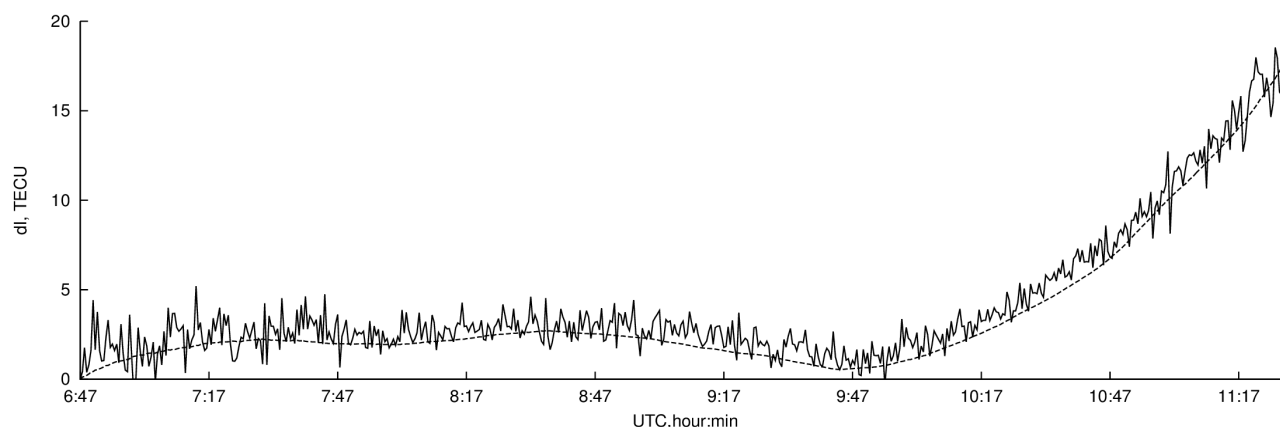


Рис. 27. Сравнение относительных вариаций наклонного ПЭС во время солнечного затмения. Двухчастотные измерения – штриховая линия, одночастотные – сплошная.

В измерениях на основе одночастотных данных ожидаемо наблюдается значительная зашумленность, по сравнению с двухчастотными. Однако два графика качественно совпадают. Существующее на всем периоде наблюдений среднее смещение друг от друга по вертикали малозначимо, так как рассматриваются вариации относительно начального момента. В этих условиях, представляется целесообразным использовать сглаживание одночастотной кривой. Данная операция была проделана с использованием программного пакета OriginPro [73]. Сглаживания используется для удаления короткопериодических флуктуаций, связанных с шумами на псевдодальности, и сохранением всех особенностей временного хода, не связанных с ними. Опытным путем было выяснено, что оптимальным является сглаживание с использованием фильтрации высокочастотных гармоник на основе быстрого преобразования Фурье при заранее удаленном среднем линейным трендом – стандартный метод пакета OriginPro. Настраиваемый параметром данного метода – частота обрезания спектра. В нашем случае поставленной задаче удовлетворяет выбор такой частоты около значения $1/1400 \text{ с}^{-1}$.

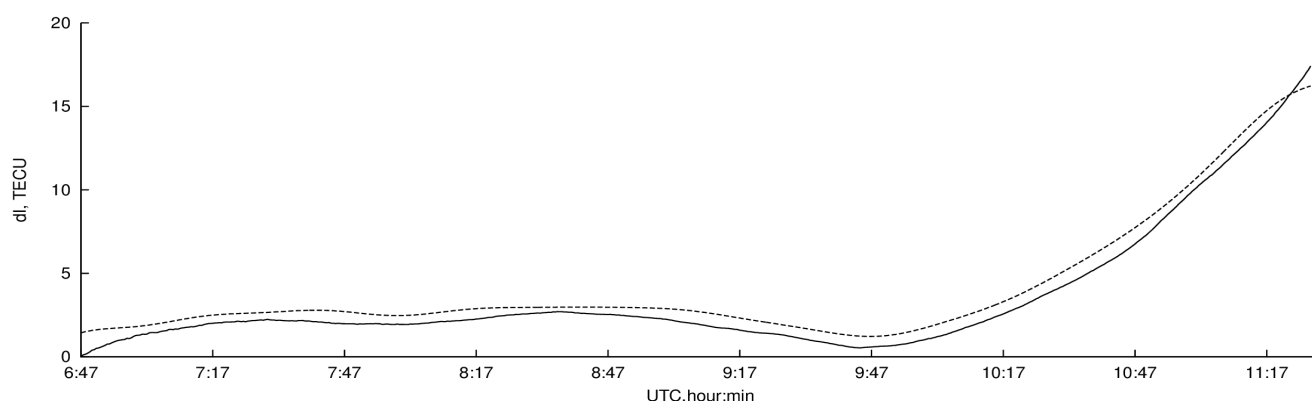


Рис. 28. Сравнение двухчастотных (сплошная линия) и сглаженных одночастотных измерений временного хода ПЭС во время солнечного затмения (штриховая линия).

Легко заметить из рисунка 28, что процедура сглаживания позволила без значительного уменьшения точности восстановить особенности временного хода ПЭС с характерными временами порядка и более десяти минут.

Основным результатом здесь, наряду с собственно исследованием временных вариаций ПЭС в конкретных условиях солнечного затмения 20 марта 2015, служит вывод о возможности использования для диагностики ионосферы недорогой и мобильной одночастотной аппаратуры. В следующих разделах показана возможность одночастотной диагностики применительно к изучению возмущений иной природы - реакции ионосферы на землетрясения и падения крупных метеороидов.

3.3 Регистрация ионосферных эффектов мощных землетрясений на примере землетрясений в Японии 11 марта 2011 и Чили 27 февраля 2010

Исследованиям ионосферных эффектов мощных землетрясений на основе двухчастотных измерений вариаций наклонного ПЭС посвящен целый ряд статей. В рамках текущей работы будут рассмотрены землетрясения в Чили 2010 года и в Японии 2011 года. Данные события рассматривались с различных сторон, в том числе в работах [59, 74 - 76]. В них анализируются реакция ПЭС на

землетрясение, представлены количественные характеристики движений перемещающихся ионосферных возмущений квазиволнового характера, а также изломов на временном ходе ПЭС. Даются некоторые физические интерпретации природы таких возмущений.

Например, одна из работ [60] была нацелена на поиск эффектов, идентифицируемых в виде квазипериодических возмущений регулярного временного хода ПЭС, которые появляются спустя некоторое время после основного толчка. На рис. 29 показан пример такого временного хода наклонного ПЭС, полученный и нами. Три представленные кривые изображают изменения ПЭС относительно начального значения 11 марта и в два контрольных дня: 10 и 12 марта. Показаны наклонные ПЭС, регистрируемые на станции TSKB международной сети IGS для спутника GPS PRN18. Сплошной тонкой линией изображен ход ПЭС за 10 марта, сплошной жирной линией – ход ПЭС за 12 марта, пунктирной линией – ход ПЭС за 11 марта. Вертикальной прямой отмечено время первичного толчка землетрясения. Отличие от представления аналогичного варианта в публикации [60] заключается в том, что в наших расчетах здесь и далее не производится удаление регулярного тренда. Для целей данной работы производить эту процедуру нет необходимости.

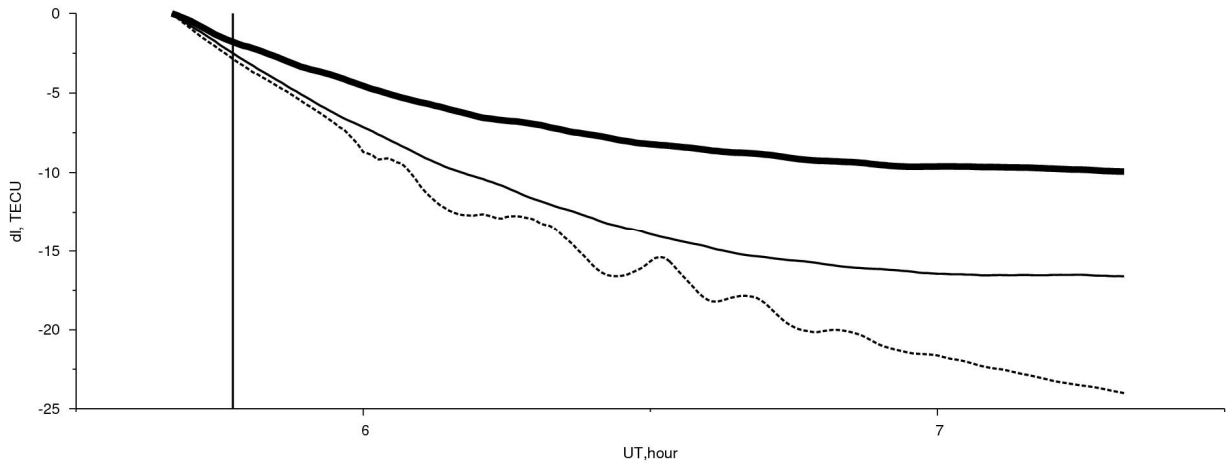


Рис. 29. Временной ход относительного изменения ПЭС на пути луча станция (TSKB) - спутник (PRN 18) для 10 марта – сплошная тонкая линия, 11 марта – пунктир, 12 марта – сплошная жирная линия. Вертикальной прямой изображено время первичного толчка землетрясения.

Важнейшим обстоятельством является то, что наряду с эффектами типа, показанного на рис. 29, были обнаружены возмущения, качественно непохожие на квазипериодические пакеты. На рис. 30 изображены такие возмущения, детектированные для землетрясения в Японии для пар станция-спутник: USUD – PRN 26 (верхний график), USUD – PRN 15 (нижний график). Здесь также для сравнения со спокойными условиями изображены два контрольных дня – 9 и 10 марта. Ключевым свойством временного хода ПЭС служит то, что через некоторое время после основного толчка регистрируется резкий излом с дальнейшими нерегулярными флуктуациями.

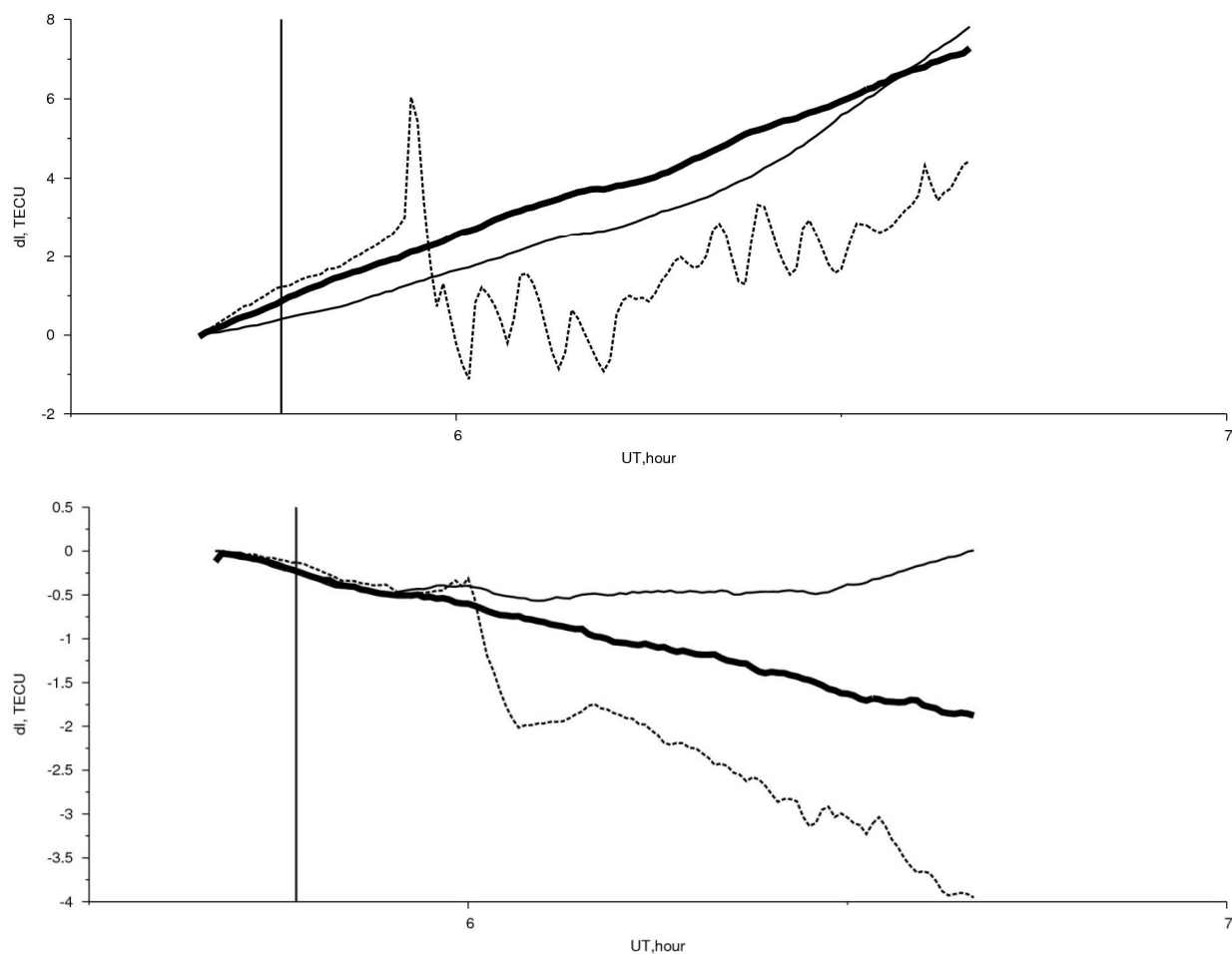


Рис. 30. Временные хода ПЭС во время землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график) – пунктирная линия и в два контрольных дня 9 – сплошная тонкая линия и 10 марта – сплошная жирная линия. Вертикальной линией отмечено время первичного толчка землетрясения.

Похожие изломы на временном ходе ПЭС наблюдались также и в представленных в работах [75 - 77], в то время как в цитируемой статье [60] они в значительной степени скрыты, возможно из-за удаления регулярного тренда. В публикациях [75, 76] предлагаются и физические механизмы формирования этих изломов.

Подобный отклик ионосферы на землетрясение детектировался и во время события в Чили, например, для пар станция-спутник: SANT – PRN 13 (верхний график), SANT – PRN 23 (нижний график) на рис. 31. Сопоставление с

временными ходами ПЭС в соседние дни, показанными на последних рисунках, доказывает то, что наблюдается именно реакция на землетрясение. Стоит отметить, что подобные, хотя, возможно, и менее ярко выраженные особенности вариаций ПЭС, наблюдаются и для иных комбинаций СТАНЦИЯ IGS – СПУТНИК GPS.

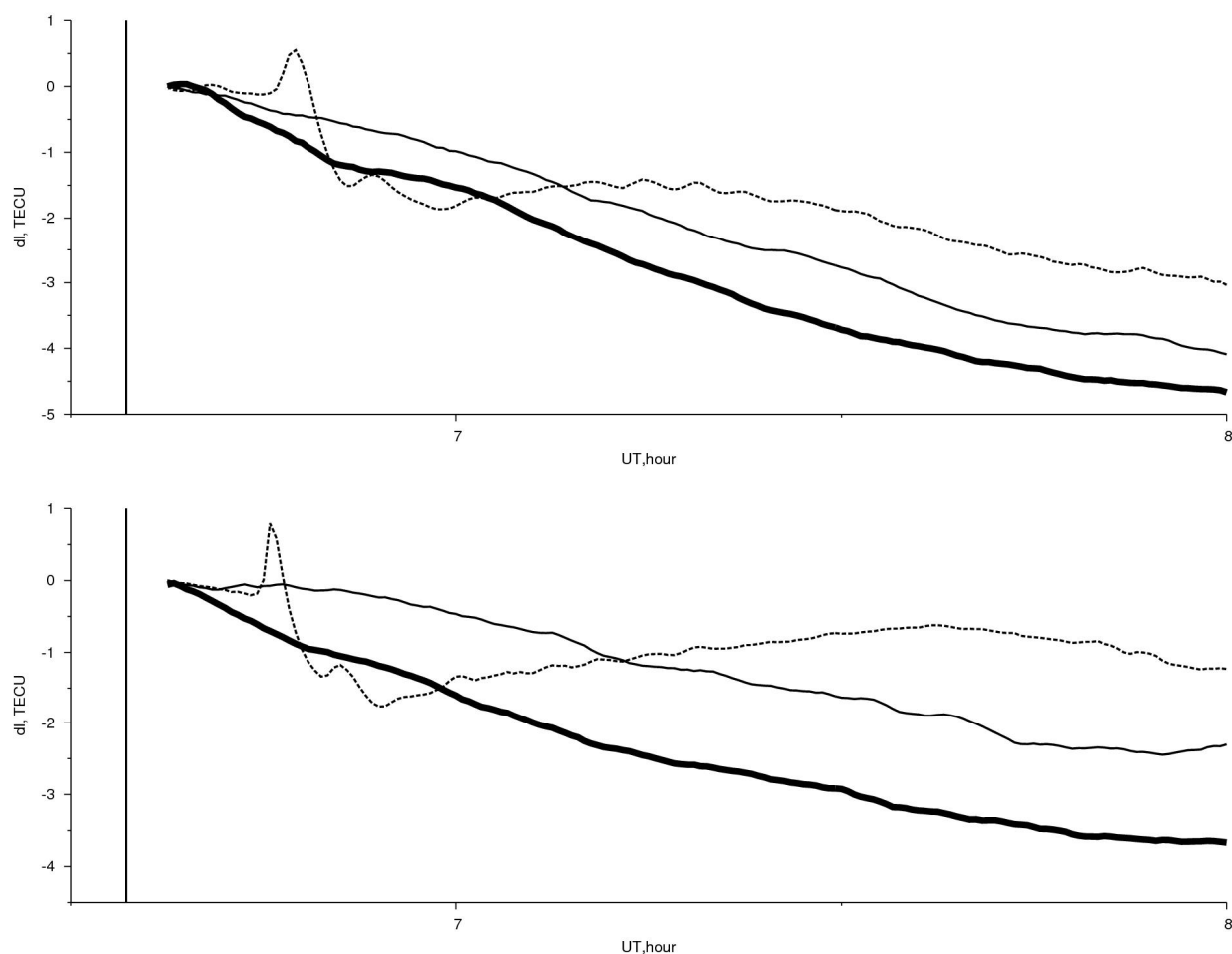


Рис. 31. . Временные хода ПЭС во время землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. на пути луча станция (SANT) – спутник (PRN13 – верхний график, PRN23 – нижний график) – пунктирная линия и в два контрольных дня 25 февраля – сплошная тонкая линия и 26 февраля – сплошная жирная линия. Вертикальной линией отмечено время первичного толчка землетрясения.

Одновременно с двухчастотными фазовыми измерениями ПЭС по представленной выше методике были проведены одночастотные измерения ПЭС

по псевдодальности по коду P1 и фазового пути на частоте L1 для события 11 марта и пары СТАНЦИЯ – СПУТНИК, соответствующей рис. 29. (Для станции TSKB отсутствовали данные псевдодальности C/A кода). Соответствующие графики представлены на рис. 32. Сплошная линия – данные двухчастотных измерений, пунктирная линия – данные одночастотных измерений, вертикальная прямая – время землетрясения.

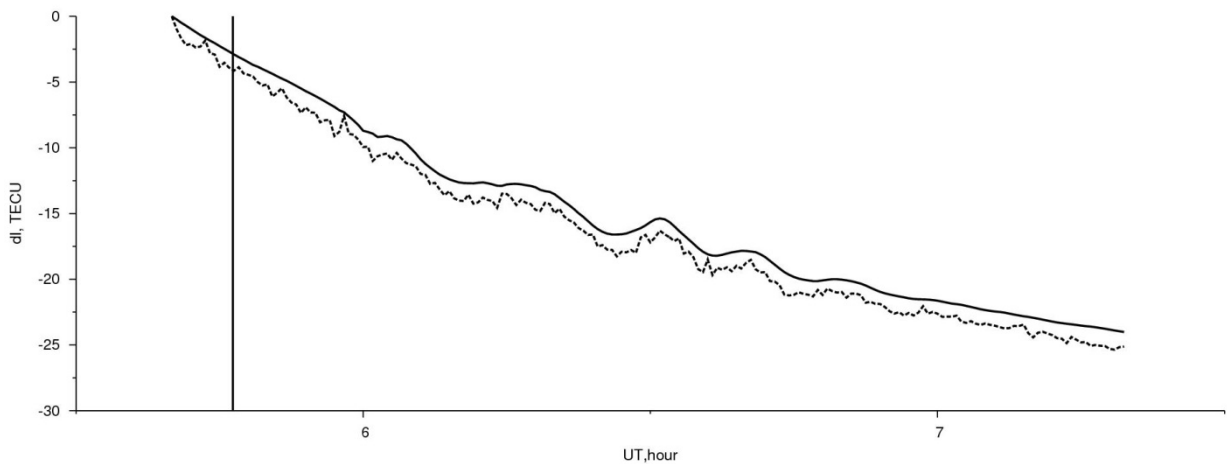


Рис. 32. Сравнение данных двухчастотных и одночастотных фазовых измерений для землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. на пути луча станция (TSKB)-спутник (PRN18). Сплошная линия – данные двухчастотных фазовых измерений, пунктирная линия – одночастотные измерения по коду P1 и фазовому пути.

Можно видеть, что одночастотные измерения воспроизводят все основные особенности временного хода, выявляемые в двухчастотном режиме. В частности, как будет показано далее, даже без дополнительной обработки можно уверенно определить время начала ионосферного отклика и характерные периоды генерируемых возмущений.

На рис. 33 изображены графики временного хода ПЭС, измеренные в двухчастотном режиме (сплошная линия) и в одночастотном режиме с использованием C/A-кода (пунктирная линия), соответствующего графикам рисунка 30. Даже с учетом большего шума на кодовых измерениях, можно видеть,

что одночастотные наблюдения уверенно воспроизводят основные относительно долгопериодические вариации, обнаруженные с помощью двухчастотного режима. Например, по кодовым измерениям можно уверенно определить момент начальной реакции ПЭС на толчок землетрясения. Аналогичная ситуация, показанная на рис. 34, соответствует данным, представленным на рис. 31.

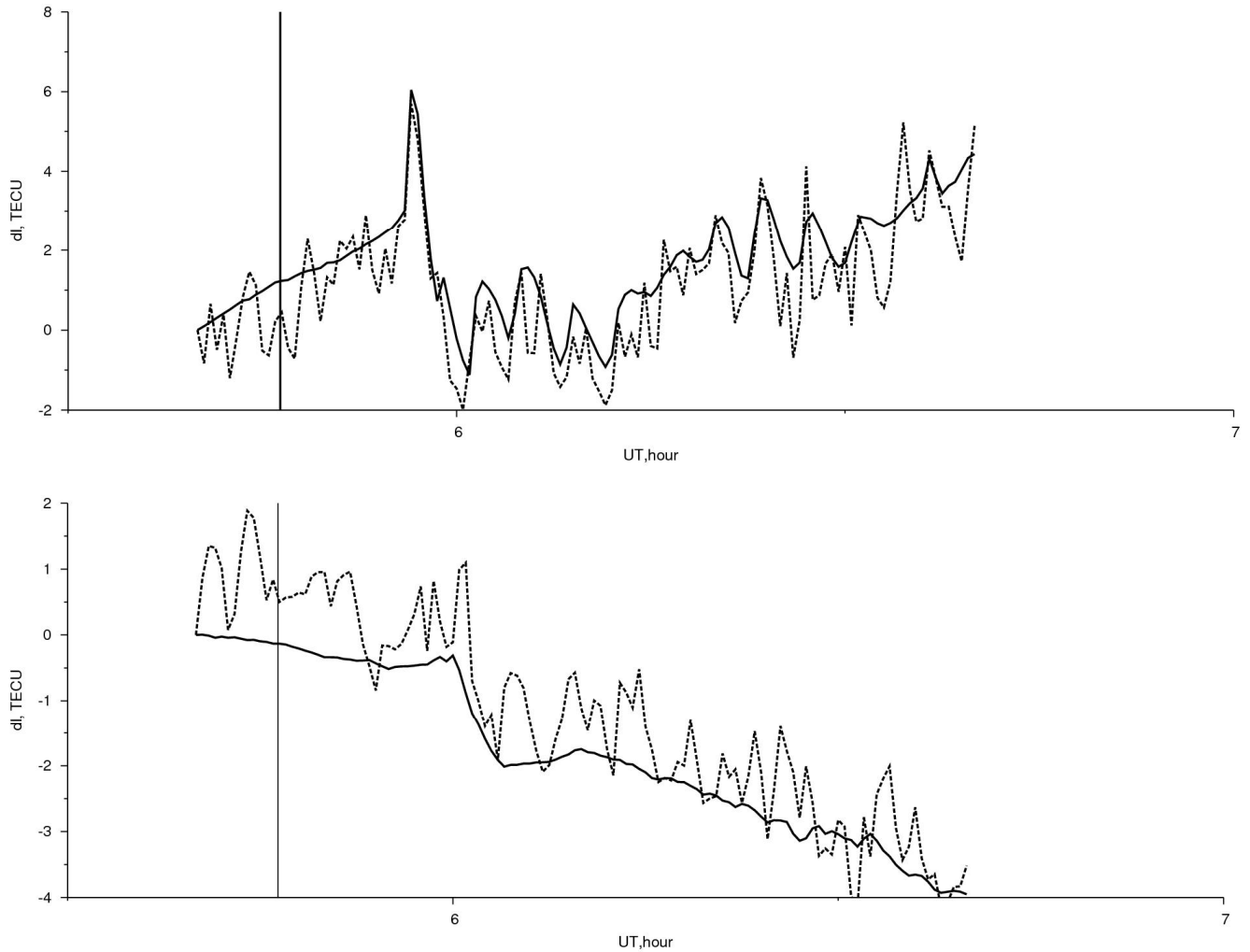


Рис. 33. Сравнение временных вариаций ПЭС, определяемых по двухчастотным фазовым измерениям (сплошная линия) и одночастотным кодовым измерениям, определяемым по C/A коду (пунктирная линия) для землетрясения в Японии 11 марта 2011 на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график).

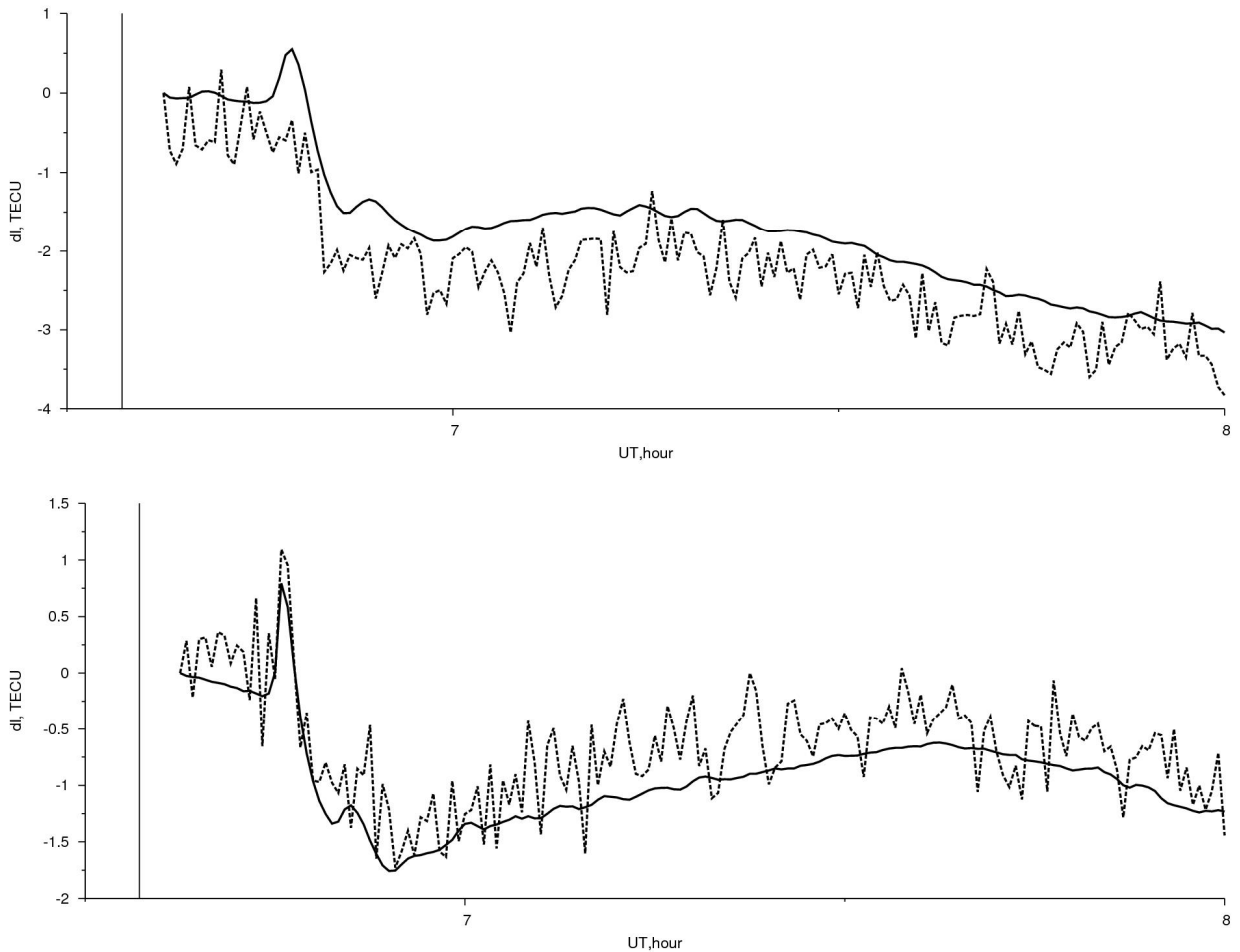


Рис. 34. Сравнение временных вариаций ПЭС, определяемых по двухчастотным фазовым измерениям (сплошная линия) и одночастотным кодовым измерениям, определяемым по C/A коду (пунктирная линия) для землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. на пути луча станция (SANT) – спутник (PRN13 – верхний график, PRN23 – нижний график).

Фиксация времени реакции ПЭС на основной толчок позволяет оценить скорость распространения возмущений в атмосфере – ионосфере от очага землетрясения до ионосферной точки. На рис. 35 показана геометрия событий в Японии (левая панель) и в Чили (правая панель), соответствующая описываемым землетрясениям. Здесь обозначены эпицентры основных толчков (звезды) и ионосферные точки (окружности), рассчитанные как области пересечения лучами от спутников до антенн станций IGS с поверхностью высоты 300 километров над Землей в момент реакции ионосферы. Координаты спутников, требуемые для

расчетов в моменты измерений псевдодальностей были получены при помощи программы WHERESAT из пакета GPS Toolkit [34, 35].

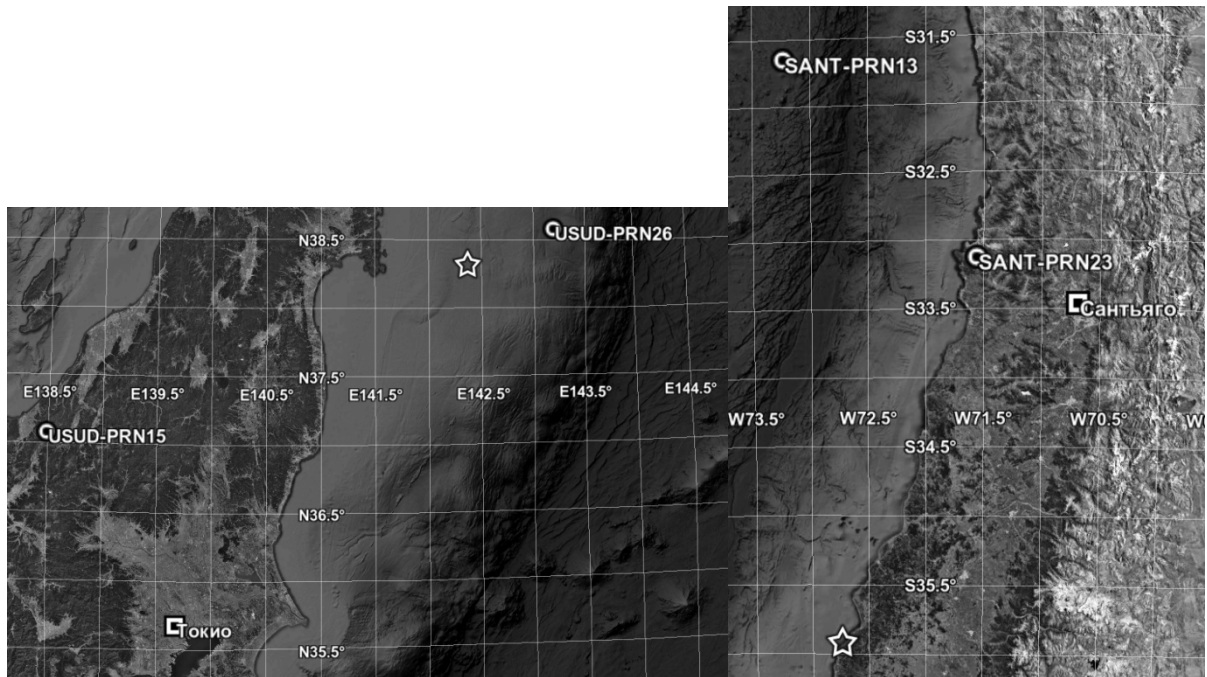


Рис. 35. Геометрия событий в Японии (левый рисунок) и в Чили (правый рисунок).

Результаты расчетов скоростей и времен распространения возмущений представлены в таблице 17. В связи с дискретностью данных в 30 с в RINEX файлах, время после толчка рассчитано с такой же точностью.

Таблица 17. Результаты расчетов времен и скоростей.

Землетрясение	Станция	Номер спутника	Время после толчка, с	Расстояние между ионосферными точками и эпицентром землетрясения, м	Скорость, м/с
Япония 11 марта 2011	USUD	15	727	480637	661
		26	517	310113	600
Чили 27 февраля 2010	SANT	13	643	568809	885
		23	673	450735	670

Прежде всего следует обратить внимание на то, что реакция ионосферы, регистрируемая как излом на временном ходе ПЭС, является более быстрой по сравнению с откликом в виде квазипериодических пакетов. Типичные скорости распространения детектируемых «быстрых» возмущений лежат в диапазоне около 600 – 900 м/с, как видно из таблицы 17. Представленные числовые оценки могут оказаться полезными для проверки тех или иных физических представлений о характере распространения возмущений.

Стоит отметить, что во всех цитируемых выше работах оценивается скорость распространения самих возмущений в ионосферной плазме, в отличие от приведенной выше оценки, которая относится к скорости распространения первичного возмущения в нейтральной атмосфере от поверхности Земли до ионосферных высот. Полученные нами временные задержки реакции ионосферы согласуются с результатами в работе [59]. Также применительно к статье [59] следует обратить внимание на то, что в этой работе рассматривается только горизонтальная скорость распространения возмущения в самой ионосфере, полученная иными методами, а не скорость первичного возмущения.

Можно предположить, что агентом передачи первичного возмущения в нейтральной атмосфере является ударная волна акустической природы. Например, по данным приведенным в работе [61], скорость звука меняется от примерно 300 м/с в приземной атмосфере до 900 м/с на ионосферных высотах. Рассчитанные скорости первичного агента, указанные в таблице 17 лежат в диапазоне от 600 до 900 м/с, что вполне соответствует скоростям звука в верхней атмосфере.

Итак, проведенное исследование показало, что мощные землетрясения уверенно детектируются одночастотной спутниковой радионавигационной аппаратурой, в том числе и в одночастотном режиме. Наряду с откликами ионосферы в виде квазипериодических возмущений ПЭС, детектируются вариации качественно иного характера – излома на временном ходе ПЭС.

3.4 Регистрация ионосферного эффекта взрыва Челябинского метеороида 15 февраля 2016

Рассмотренные в представленных выше разделах 3.2 и 3.3 гео-гелиофизические события представляют собой мощные эффекты, которые в свою очередь генерируют значительную реакцию в ионосфере и сильные возмущения ПЭС. Вместе с тем очень интересен вопрос возможностей одночастотной диагностики для менее мощных первичных факторов, которые могут влиять на ПЭС, например, реакция ионосферы на падение Челябинского метеороида [78].

По оценкам НАСА Челябинский метеороид является самым крупным из известных космических тел, достигших Земли после падения Тунгусского метеорита в 1908 году. Метеороид имел массу до 11 тысяч тонн, и вошел в атмосферу Земли по разным оценкам со скоростью около 18 км/с. Самый значительный взрыв произошел в точке с координатами 54.84° северной широты и 61.46° восточной долготы на высоте от 21 до 25 км 15.02.2016 в 3:20:30 UTC. Космическое тело двигалось по основному азимуту 290 градусов. Угол входа в атмосферу составил 20° к горизонту. Траектория была вычислена рядом ученых,

например, астрономами из Колумбии [79] с помощью многочисленных камер видеонаблюдения и видеорегистраторов.

Мощность взрыва, по различным оценкам, достигла величины около 0,44 Мт в тротиловом эквиваленте. Вполне ожидаемым было то, что последствия взрыва отразились в различных геосферах: ионосфере, тропосфере и литосфере, вызвав землетрясение магнитудой до 4-х.

Падение Челябинского метеороида удалось сопроводить при помощи различных средств радиодиагностики ионосферы, а именно, радаром ЕКВ российского сегмента когерентных радаров декаметрового диапазона сети SuperDarn [80], системы ионозондов [81, 82], средств радиотомографии [81, 82] и спутниковых навигационных систем [82 - 86]. Также стоит отметить, что использование всех вышеупомянутых средств осложняется весьма низкой плотностью сети инструментов на территории Российской Федерации.

Радар системы SuperDarn находился севернее на 200 км от места падения метеороида, и траектория его падения пролегла в заднем лепестке диаграммы направленности антенны радара. По данным системы, наблюдалось два эффекта в ионосфере [80]: с 03:45 до 05:00 – радиальная волна в F-слое ионосферы и 02:45 – 04:00 – нерегулярные возмущения в E-слое ионосферы. Взрыв в 03:20:33 характеризовался резким ростом шумов на частотах радара 10 и 16 МГц.

По данным ионозондов, спустя примерно час после вторжения, в районе Екатеринбурга наблюдалось формирование спорадического E-слоя, заслонившего регулярный слой E, который продержался около семи часов. Возмущения же в слое F₂ начались в Екатеринбурге в 03:45 UT, что подтверждают данные с радара SuperDarn, но главная фаза, максимальный всплеск, произошел только в 08:45, после которого начался спад интенсивности волны плотности в ионосфере, вызванной событием. Данные же радиотомографического исследования показали возмущения двух типов: быстрые и медленные волны [81].

По имеющимся публикациям существует 2 подхода для анализа ПЭС с использованием спутниковых радионавигационных систем:

1. Анализ вариаций ПЭС на отдельных радиолучах [82 - 85].

2. Анализ совокупности ПЭС на многих радиолучах [86].

Оба подхода показали схожий результат в плане возможности изучения последствий падения метеороида посредством анализа данных GPS. В частности, в работе [83] были упомянуты сложности при анализе падения метеороида из-за близости солнечного терминатора, однако четко виден эффект взрыва, как и в работах [82, 85, 86]. Также заметен эффект в $8 \div 9$ часов UTC - больше первичного эффекта взрыва. Аналогичная ситуация наблюдалась при использовании ионозондов. В работе [86] показана анизотропия взрыва – более значимый эффект наблюдался южнее точки взрыва.

В соответствии с основной целью работы нами были проведены измерения временных ходов ПЭС с использованием данных со станций международной сети IGS, представленных на ftp-серверах в виде файлов в формате RINEX. Извлечение необходимой информации из RINEX-файлов и ее первичная обработка выполнялась с использованием пакета программ GPS Toolkit [34, 35]. Анализировались временные зависимости наклонных ПЭС для различных пар СТАНЦИЯ IGS – СПУТНИК GPS. На карте рис. 36 представлены место взрыва метеороида (звезда), расположение станций GPS, участвующих в дальнейшем анализе, и отрезки, соединяющие станцию с ионосферной точкой по направлению на соответствующий спутник. Как известно, ионосферной точкой является точка пересечения луча со станции на спутник условной поверхности уровня максимума плотности ионосферы (в наших расчетах высота 300 км). Были выбраны те пары СТАНЦИЯ – СПУТНИК, для которых уверенно детектировался ионосферный эффект взрыва метеороида. Ионосферные точки здесь соответствуют времени регистрации начала эффекта. Здесь представлена геометрия для пар ARTU – PRN26, NOVМ-PRN30, ZECK-PRN26.

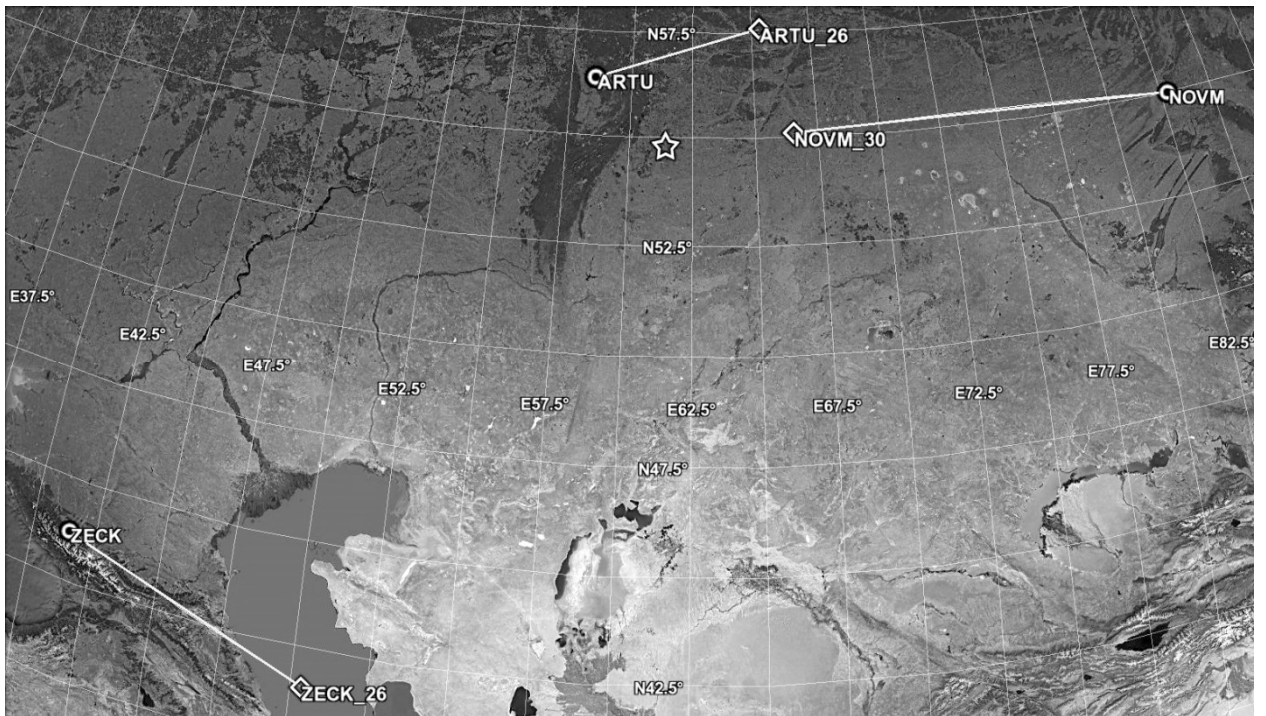


Рис. 36. Геометрия регистрации взрыва Челябинского метеороида. Звездой отмечено место взрыва, круглыми точками – координаты соответствующих станций IGS, линией – прямая, соединяющая станцию IGS и ионосферную точку, отмеченную ромбом, на луче станция - спутник

Анализ эффекта от падения метеороида производился путем сравнения временных ходов наклонных ПЭС в день события и в два спокойный дня без события – 14 и 16 февраля 2016 года. Соответствующие графики для указанных пар станция-спутник представлены на рис. 37. Первоначально расчеты были проведены для двухчастотного режима по формуле (3.1) с исключением константы фазовой неоднозначности, поэтому начальное значение ПЭС равно нулю. На рис. 37 изображены три графика для пар станция-спутник сверху вниз: ARTU-PRN26, NOVM-PRN30, ZECK-PRN26. Вертикальная прямая на всех графиках – время взрыва Челябинского метеороида, сплошная линия - поведение наклонного ПЭС за сутки до падения, штрих - пунктирной линией– день падения, пунктирная линия– день после, для станции NOVM отсутствовали данные для дня после события, поэтому на графике они не представлены.

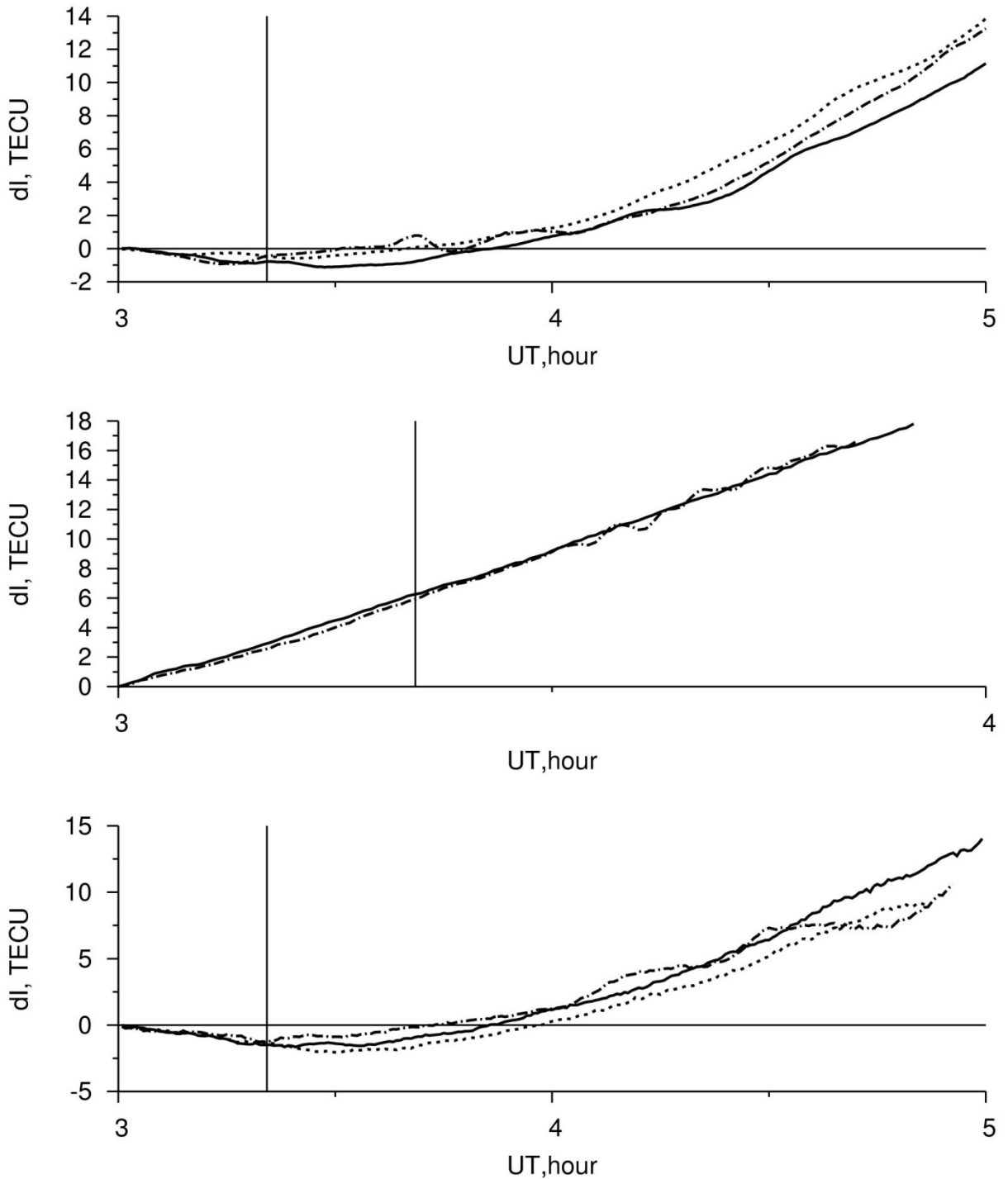


Рис. 37. Сравнение временного хода наклонного ПЭС для пар станция-спутник (сверху вниз): ARTU – PRN26, NOVМ-PRN30, ZECK-PRN26. Вертикальной линией на всех графиках отмечено время взрыва Челябинского метеороида, сплошной линией на графиках показано поведение наклонного ПЭС за сутки до падения, штрих - пунктирной линией – день падения, пунктирная линия – день после.

Представляет интерес сопоставить приведенные графики с результатами аналогичных, но иначе представленных результатов из работы [84]. На рис. 38, заимствованном из указанной статьи, представлен временной ход ПЭС для пары ARTU – PRN26 с удаленным общим трендом. По горизонтали отложено текущее мировое время, вертикальной линией отмечено время землетрясения, по вертикальной оси также отложено изменение ПЭС. Черным графиком отмечен день падения метеороида, серыми - день до и день после. Из сравнения рисунков 37 и 38 можно видеть, что и без удаления тренда легко оценивается размах квазипериодических возмущений ПЭС – величина около 1 TECU. Также не вызывает затруднений и оценка временных характеристик возмущений без исключения тренда.

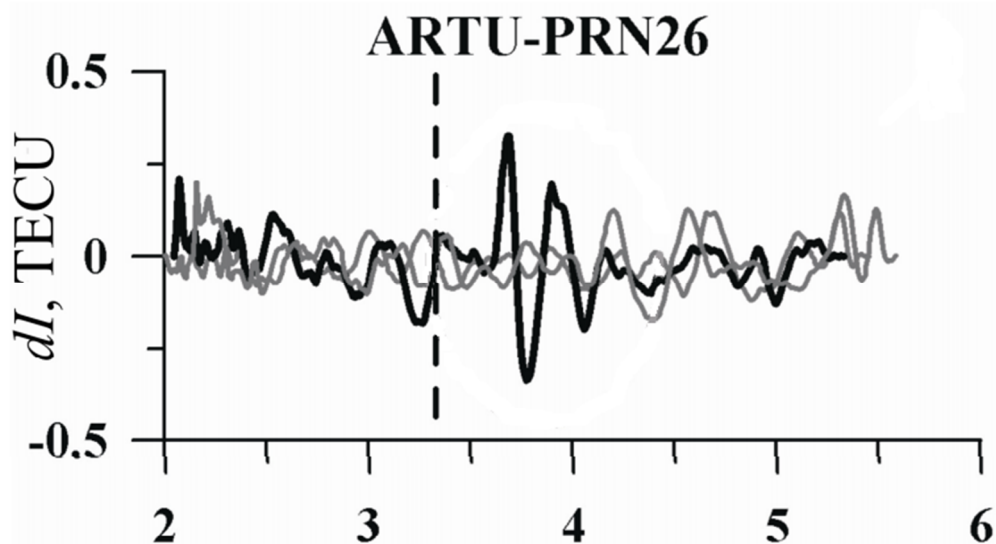


Рис. 38. Сравнение временного хода наклонного ПЭС с удалением линейного тренда для пары станция-спутник ARTU – PRN26 из работы [84]. Черной линией отмечен – день падения, серыми - день до и день после

Из графиков можно сделать вывод, что отклик ионосферы на Челябинский метеороид уверенно регистрируется, при помощи двухчастотных измерений, в виде нерегулярных (квазипериодических) вариаций наклонного ПЭС на временном ходе, начинающиеся с некоторого момента времени и продолжающегося значительное время и не замеченный в соседних сутках. Из

представленных графиков можно визуально оценить возможную погрешность определения времени начальной реакции ионосферы величиной порядка 0,1 часа.

Основной задачей было провести анализ возможности регистрации эффекта падения Челябинского метеороида на основе измерений на одной частоте L1, а именно, вариаций псевдодальности по коду C1 и фазы несущей на этой же частоте. Как упоминалось ранее кодовые измерения существенно зашумлены по сравнению с чисто фазовыми (двухчастотные измерения), поэтому одночастотные данные были предварительно обработаны, а именно, усреднены, с использованием плавающего среднего с временным интервалом в 7 минут. В итоге были получены временные вариации ПЭС на основе одночастотных измерений, на которых были обнаружены аналогичные двухчастотному режиму особенности, связанные с падением метеороида. Характерная временной ход ПЭС показан на рис. 39 для пары ARTU – PRN26 в обоих режимах. Для двухчастотных измерений ход наклонного ПЭС изображен сплошной линией, для одночастотных - штрих – пунктирной.

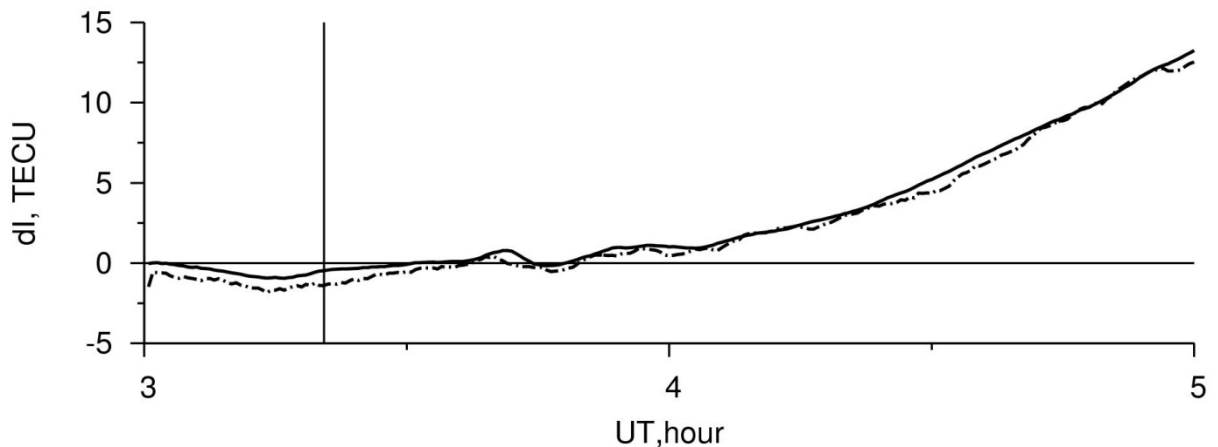


Рис. 39. Сравнение хода наклонного ПЭС вычисленного по двухчастотным (сплошная линия) и одночастотным (штрих - пунктирная линия) измерениям для пары ARTU – PRN26

Как и в разделе 3.3 вызывает интерес оценить среднюю скорость распространения возмущения в верхней атмосфере от точки взрыва до ионосферных высот путем определения на временном ходе ПЭС начала реакции

ионосферы на событие. Для всех представленных на рис. 36 рассматриваемых пар станция-спутник были рассчитаны соответствующие расстояния до ионосферных точек.

Результаты вычислений представлены в таблице 18. Приведены соответствующие пары станция-спутник, для каждой из которых указано время начала наблюдения эффекта после взрыва в атмосфере, расстояние от места взрыва до соответствующей ионосферной точки и рассчитанная скорость реакции.

Таблица 18. Скорость реакции ионосферы на взрыв Челябинского метеороида

Станция	Спутник	Время после взрыва в атмосфере, с	Расстояние от взрыва в атмосфере, км	Скорость реакции, м/с
ARTU	PRN26	927	485	523
NOVM	PRN30	567	430	758
ZECK	PRN26	2367	1749	739

Как известно из работы [61], скорость звука в атмосфере меняется с высотой от 300 м/с до 900 м/с. Таким образом, средняя скорость из таблицы 18 соответствует звуковой, что позволяет сделать вывод о том, что первичным агентом передачи возмущения, вероятно, является волна акустической природы.

3.5 Выводы по главе

Проведенные выше исследование показали, что использование одночастотных приемников сигналов ГНСС позволяет производить диагностику ионосферы, хотя, возможно, и с меньшей точностью, чем при использовании двухчастотных приемников. Полученные результаты показали возможность детектирования таких эффектов, как солнечное затмение, мощные землетрясения и взрывы больших метеороидов.

Заключение

Сформулируем основные результаты диссертационной работы:

1. Произведено тестирование оптимизированной модели GEMTES, показавшее, что ее использование заметно снижает погрешности позиционирования в навигационной аппаратуре. При этом продемонстрирована полнофункциональная реализация модели в программном обеспечении навигационного приемника МНП-М7.
2. Предложен новый режим работы наземной аппаратуры ГНСС, названный дифференциально-временной режимом, основанный на использовании обнаруженной особенности поведения суточного хода ошибки позиционирования. Использование ДВР позволяет существенно уменьшить ошибки позиционирования.
3. Исследованы возможности диагностики ионосферы посредством одночастотных приемников ГНСС. Показана возможность регистрации различных эффектов в ионосфере, на примере солнечного затмения, мощных землетрясений и падения Челябинского метеороида с определением ряда количественных характеристик событий.

Литература

1. Данилкин Н.П. Трансионосферное радиозондирование – метод диагностики наличия ионосферных неоднородностей / Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, С.В. Журавлев, Н.Г. Котонаева // Гелиогеофизические исследования. - 2012. - № 1. - С. 47-54.
2. Данилкин Н.П. Трансионосферное радиозондирование как средство контроля состояния ионосферы / Н.П. Данилкин // Ионосферно-магнитная служба. – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1987. - С. 79-110.
3. Анучин О.Н. Интегрированные системы ориентации для морских подвижных объектов / О.Н. Анучин, Г.И. Емельянцева. - 2-е изд. - СПб: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор». - 2003.— 390 с.
4. Hofmann-Wellenhof B. Global Positioning System: Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. - New York: Verlag Wien. - 1992. – 327 p.
5. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users / J. A. Klobuchar // Ieee transactions on aerospace and electronic systems. - V. AES-23. - MAY 1987. - V. 3. - №. 3. – P. 325-331
6. Jakowski N. A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors / N. Jakowski, M. M. Hoque, C. Mayer // Journal of Geodesy. – 2011. – V. 85.- №. 12. – P. 965–974
7. Ivanov V.B. Global empirical modelling of the total electron content of the ionosphere for satellite radio navigation systems / V.B. Ivanov, G.D. Gefan, O.A. Gorbachev // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2011. – V. 73. - 1703–1707
8. Поляков В.М. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В.М. Поляков, В.Е. Суходольская, М.К. Ивельская, Г.Е. Сутырина, Г.В. Дубовская, М.Ю. Бузунова. - М.:Измаiran. - 1986. – 136с.

9. Горбачев О.А. Оценка качества модели полного электронного содержания GEMTEC при автономном определении местоположения в глобальных навигационных спутниковых системах / О.А. Горбачев, В.Т. Залуцкий, В.Б. Иванов, Д.В. Хазанов, А.А. Холмогоров // Гирскопия и навигация. - 2015. – №. 1. - С. 101-109.
10. Афраймович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н.П. Первалова. - Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН. - 2006. - 480 с.
11. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера / Я.Л. Альперт. - М.: Наука. - 1972. - 564 с.
12. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе // М.: Наука. - 1988. - 528 с.
13. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. - М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы. - 1953. - 884 с.
14. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К. М. Антонович. - М.: ФГУП «Картгеоцентр».- Т. 1. - 2005.- 344с.
15. Куницын В.Е. Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева. - М.: Физматлит. - 2007. - 336 с.
16. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. - М.: Мир. - 1973. - 502 с.
17. Teunissen P.J. GPS for Geodesy / P.J. Teunissen, A. Kleusberg, P. Teunissen. - Berlin. -1998. - 650 p.
18. Шебшаевич В.С. Дифференциальный режим сетевой спутниковой радионавигационной системы / В.С. Шебшаевич, М.Н. Григорьев, Э.Г. Кокина, И.Н. Мищенко, Ю.Д. Шишман // Зарубежная радиоэлектроника. - 1989. - № 1. - С. 5-32
19. Тинин М.В. Повышение мощности определения координат приемника в двухчастотных измерениях ГНСС / М.В. Тинин, Е.В. Конечкая // Труды XIII

конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом».
- 2013. - 9-14 сентября. – Иркутск, 2013. - С. 236–238

20. ICD-GPS-200 Interface control document. Rockwell International Corporation. - 12114 Lakewood Blvd., Downey, Calif. 90241. - released Sept. 26 1984

21. Jakowski N. TEC Monitoring by Using Satellite Positioning Systems, Modern Ionospheric Science / N. Jakowski, H.Kohl, R. Rüster, K. Schlegel // EGS, Katlenburg-Lindau, ProduServ GmbH Verlagsservice. – Berlin. – 1996. – P. 371-390

22. Jakowski N. GPS-based TEC observations in comparison with IRI95 and the European TEC model NTCM2 / N. Jakowski, E. Sardon, S. Schlueter // Advances in Space Research. – 1998. – V. 22. - № 22. – P. - 803–806

23. Hugentobler U. CODE IGS Analysis Center Technical Report 2002 / U. Hugentobler, S. Schaer, G. Beutler, H. Bock, R. Dach A. Jäggi, M. Meindl, C. Urschl, L. Mervartl , M. Rothacher² Astronomical Institute, University of Bern U. Wild, A. Wiget, E. Brockmann, D., Wabern G. Weber, H. Frankfurt, C. Boucher // CODE IGS Analysis Center Technical Report 2002. – 2002. – P. 43-51

24. Wilson B.D. Subdaily northern hemisphere maps using the IGS GPS network / B.D. Wilson, A.J. Mannucci, C.D. Edwards // Radio Science. - 1995. - V. 30. - P. 639-648

25. Mannucci A.J. A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements / A.J. Mannucci, C.M. Ho, U.J. Lindqwister // Radio Science. - 1998. - V. 33. - № 8. - P. 565-582

26. Schaer S. IONEX: The Ionosphere Map EXchange Format Version 1 / S. Schaer, W. Gurtner, J. Feltens // Proc. IGS AC Workshop. Darmstadt. - Germany. - February 9-11, 1998. - P. 233-247

27. Jakowski N. Report on the observations of the total electron content of the ionosphere in Neustrelitz/GDR from 1976 to 1980 / N. Jakowski, E. Paasch // Annales Geophysicae . – 1984. – V. 2. - № 4. – P. 501–504

28. Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990 / D. Bilitza. - NSSDC 90–22, Greenbelt, Maryland, 1990.

29. Горбачев О. А. Эмпирическое моделирование полного электронного содержания в ионосфере / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, М. К. Ивельская // Космические исследования. – 2012. - Т. 50. - № 1. С. 42–46
30. Ma G. Construction of an empirical model relating TEC to f_0F_2 / G. Ma, T. Maruyama // Proceedings of radio science conference. - 2004. - Asia_Pacific. - P. 366–367.
31. Двинских Н.И. Статистический метод представления суточных и пространственных вариаций ионосферных характеристик / Н.И. Двинских // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука. – Вып. 13. - с. 13-34
32. Кoen М.А. Моделирование ионосферы в прикладных задачах геофизики / М.А. Кoen. - Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. - 1983. – 280 с.
33. Иванов В.Б. Модель полного электронного содержания GEMTEC: практическая реализация / В.Б. Иванов, А.А. Холмогоров // XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн", материалы конференции. Иркутск, 29 июня - 5 июля, 2014. - г. Иркутск, ИСЗФ СОРАН. – 2014. – Т. 1. – С. 175-178
34. Tolman B. The GPS Toolkit / B. Tolman, R. B. Harris // Linux J. - September 2004. - P. 72.
35. Harris R. B. GPSTk_An Open Source GPS Toolkit / R. B. Harris, R. G. Mach // GPS Solutions. - March 2007. - V. 11. - № 2. - P. 145–150.
36. Ivanov V. B. The GEMTEC Model: Assessment of Quality of Ionospheric Correction in Satellite Radio Navigation Systems / V. B. Ivanov, O. A. Gorbachev, G. D. Gefan // Consumer Electronics Times. - Oct. 2012. - V. 1. - № 2. - P. 43-46
37. Иванов В. Б. Оптимизация и тестирование модели полного электронного содержания в ионосфере GEMTEC / В. Б. Иванов, О. А. Горбачев, А. А. Холмогоров, Д. Е. Хохряков // Космические исследования. – 2015. - Т. 53. - № 4. - С. 286 – 291

38. Иванов В. Б. Сравнительный анализ качества моделей полного электронного содержания ионосферы / В. Б. Иванов, О. А. Горбачев, А. А. Холмогоров // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56. - № 3. - С. 340–344

39. Иванов В.Б. Эмпирическая модель полного электронного содержания для спутниковых радионавигационных систем / В.Б.Иванов, А.А. Холмогоров // Южно – сибирский научный вестник. Научно – технический журнал. - № 2 (6). - 2014 г. - С. 44 – 46

40. Холмогоров А. А. Модель полного электронного содержания ионосферы GEMTEC – сравнение с другими моделями / В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Тезисы докладов XVII Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков. 21-23 апреля 2015г. – Санкт- Петербург, 2015. - С. 52-55

41. Холмогоров А. А. Сравнительное тестирование модели полного электронного содержания GEMTEC // В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Труды XIV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» Международная Байкальская Молодежная научная школа по фундаментальной физике. - г. Иркутск. 14-18 сентября 2015. - Иркутск, 2015. - С. 203-204

42. Горбачев О. А. Временные вариации ошибок позиционирования в спутниковой навигационной системе GPS / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, Д. В. Хазанов, А. А. Холмогоров // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013. - № 195. – с. 118 – 125

43. Ivanov V. B. Some peculiarities of positioning in satellite radio navigation system / V. B. Ivanov, O. A. Gorbachev, D. V. Khazanov, A. A. Kholmogorov // Consumer Electronic Times. - April, 2013. - P. 96-100

44. Kholmogorov A.A. New possibilities of increase of positioning accuracy in satellite navigation systems / V.B. Ivanov, A.A. Kholmogorov, O.A. Gorbacev // Modern Engineering and Technologies of the Future : International scientific online conference, METF 2013. Zheleznogorsk and Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Territory, Russia, February 6-8, 2013. - Khnykin – Krasnoyarsk, 2013. - P. 36 – 44

45. Холмогоров А. А. Особенности ошибок позиционирования в спутниковых радионавигационных системах / А. А. Холмогоров, В. Б. Иванов // Труды XIII конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». - 2013. - 9-14 сентября. – Иркутск, 2013. – С. 264 – 267
46. Global Positioning System: Theory and Applications / Edited by V.W. Parkinson and J.J. Spilker Jr. –Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. - 1996. – 781 p.
47. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. П.П. Дмитриева, В.С. Шебшаевича. - М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
48. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии / К. М. Антонович. - М.: ФГУП «Картгеоцентр».- Т. 2. - 2006.- 311 с.
49. Горбачев О. А. Дифференциально-временная коррекция ошибок позиционирования для спутниковых радионавигационных систем / О. А. Горбачёв, В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2014. - № 207 (9). - С. 90 – 95
50. Иванов В. Б. Дифференциально-временная коррекция ошибок позиционирования для спутниковых радионавигационных систем. / В. Б. Иванов, О. А. Горбачев, А. А. Холмогоров // Новости навигации. – 2015. - №2. - С. 17-23
51. Холмогоров А.А. О новой возможности повышения точности позиционирования в системе GPS/ А.А. Холмогоров, В.Б. Иванов// Южно – сибирский научный вестник. Научно – технический журнал. - № 2 (6). - 2014 г. - С. 47 – 49
52. Иванов В. Б. Дифференциально-временной режим для навигационной системы GPS / В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Труды XXIV Всероссийской научной конференции распространения радиоволн, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В.М. Полякова. – 2014. - Иркутск 2014. – Т. 2. - Стр. 37 – 40
53. Холмогоров А. А. Дифференциально-временной режим GPS как средство повышения точности позиционирования для спутниковых

навигационных систем / В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Тезисы докладов XVII Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков. 21-23 апреля 2015г. – Санкт- Петербург, 2015. - С. 55-58

54. Холмогоров А.А. Дифференциально-временной режим для навигационной системы GPS/ А.А. Холмогоров, В.Б. Иванов // XXIV всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн": материалы конференции. Иркутск, 29 июня - 5 июля, 2014 - г. Иркутск, ИСЗФ СО РАН. – 2014. – Т. 2. – С. 37-40

55. Афраимович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраимович, Н.П. Перевалова. - Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН. - 2006. - 480 с.

56. Перевалова Н.П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS-зондирования: дисс. доктора ф.-м. наук: 25.00.29 / Перевалова Наталья Петровна. – Иркутск. – 2014. - 286 с.

57. Афраимович Э.Л. Ионосферные эффекты полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. по данным плотной сети GPS в Японии (GEONET) / Э.Л. Афраимович, С.В. Воейков, И.К. Едемский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. - № 3. - С. 94-98

58. Afraimovich E.L. Ionospheric effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from European GPS network data / E.L. Afraimovich, E.A. Kosogorov, O.S. Lesyuta // Adv. Space Res. - 2001. - V. 27. - № 6-7. - P. 1351-1354

59. Astafyeva E. First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake / E. Astafyeva, P. Lognonne, L. Rolland // Geophysical Research Letters. - 2011. - V. 38. - L22104. – doi: 10.1029/2011GL049623

60. Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET / Н. П. Перевалова, С. В. Воейков, Ю. В. Ясюкевич, А. Б. Ишин, Е. С. Воейкова, В. А. Саньков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2012. - Т.9. - № 3. - С. 172-180

61. Berngardt O.I. Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake / O.I. Berngardt, G.V. Kotovich, S.Ya. Mikhailov, A.V. Podlesnyi // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. - 2015. - № 132. - P. 106-115

62. Афраймович Э.Л. Параметры ударно-акустических волн, генерируемых при землетрясениях / Э.Л. Афраймович, Е.А. Косогооров, А.В. Плотников, А.М. Уралов // *Известия ВУЗов. Физика Земли*. - 2001. - № 6. - С. 16-28

63. Афраймович Э.Л. Крупномасштабные возмущения аврорального происхождения во время магнитных бурь 29-31 октября 2003 г. и 7-11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов / Э.Л. Афраймович, С.В. Воейков, Н.П. Перевалова, К.Г. Ратовский // *Геомагнетизм и аэрономия*. - 2006. - Т.46. - № 5. - С. 637-642

64. Afraimovich E.L. Ionospheric, Geomagnetic Variations and GPS Positioning Errors During the Major Magnetic Storm on 29-31 October 2003 / E.L. Afraimovich, E.I. Astafieva, V.V. Demyanov, I.F. Gamayunov, T.N. Kondakova, S.V. Voeykov, B. Tsegmed // *International Reference Ionosphere News*, December 2004. - V.11. - №3.4. - P. 10-14

65. Astafyeva E.I. Dynamics of total electron content distribution during strong geomagnetic storms / E.I. Astafyeva, E.L. Afraimovich, E.A. Kosogorov // *Advances in Space Research*. - 2007. - doi:10.1016/j.asr.2007.03.006

66. Афраймович Э.Л. С.В. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая / Э.Л. Афраймович, С.В. Воейков, А.Б. Ишин, Н.П. Перевалова, Ю.Я. Ружин // *Геомагнетизм и аэрономия*. - 2008. - Т. 48. - № 5. - С. 703–708

67. Иванов В. Б., Холмогоров А. А., Горбачев О. А. Анализ возможностей одночастотных приемников ГНСС для диагностики ионосферы / В.Б. Иванов, А. А. Холмогоров, О. А. Горбачев // *Исследования наукограда*. - 2017. - Т. 1. - № 3. - С. 130-138

68. Холмогоров А. А. Использование одночастотных приемников для регистрации нерегулярных событий в ионосфере /А. А. Холмогоров, В. Б. Иванов // Тезисы докладов XV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» Международная Байкальская Молодежная научная школа по фундаментальной физике. г. Иркутск. 11-16 сентября 2017. - Иркутск, 2017. - С. 75-76

69. Холмогоров А. А. Использование одночастотных приемников для регистрации нерегулярных событий в ионосфере / А. А. Холмогоров, В. Б. Иванов // Труды XV Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» Международная Байкальская Молодежная научная школа по фундаментальной физике. г. Иркутск. 11-16 сентября 2017. - Иркутск, 2017. - С. 223-225

70. Холмогоров А. А. Регистрация ионосферного эффекта солнечного затмения 20 марта 2015 г. по данным GPS-мониторинга в одночастотном режиме / О. А. Горбачев, В. Б. Иванов, А. А. Холмогоров // Солнечно-земная физика. - 2015. - Т. 1. - № 4. - С. 35-39. - doi: 10.12737/12068

71. Kholmogorov A. A. GPS-Monitoring of the Ionospheric Reaction on Solar Eclipse using Single-Frequency Mode on the Example of Event 20 March 2015 // A. A. Kholmogorov, V. B. Ivanov/ Proceedings of V International conference ATMOSPHERE, IONOSPHERE, SAFETY, 2016 - — Kaliningrad, 2016. – P. 161 – 165

72. Горбачев О.А. GPS-регистрация ионосферных эффектов землетрясений в двухчастотном и одночастотном режимах / О.А. Горбачев, В.Б. Иванов, А.А. Холмогоров// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2016. - Т. 13. - № 5. - С. 251–261

73. Исакова О.П. Обработка и визуализация данных физического эксперимента с помощью пакета Origin. / О.П. Исакова, Ю.Ю. Тарасевич, Ю.И. Юзюк // Астрахань: ОГОУ ДПО «АИПКП». - 2007. – 68 с.

74. Ясюкевич Ю. В. Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик / Ю. В. Ясюкевич, В. И.

Захаров, В. Е. Куницын, С. В. Воейков // Геомагнетизм и аэрономия. - 2015. - Т. 55. - № 1. - С. 113-122

75. Kakinami Y. Tsunamigenic ionospheric hole / Y. Kakinami, M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A.R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe, T. Mogi // Geophysical Research Letters. - 2012. - V. 39. - L00G27. - doi:10.1029/2011GL050159

76. Tsugawa T. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake / T. Tsugawa, A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, K.T. Murata // Earth, Planets and Space. - 2011. - V. 63. - № 7. - P. 875-879

77. Kamogawa M. Seismo-tsunamigenic ionospheric hole triggered by M 9.0 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake / M. Kamogawa, Y. Kakinami, S. Watanabe, J. Y. Liu, Y. Watanabe // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. - 2012. - V. 23. - № 3. - P. 327-331

78. Холмогоров А. А. Оценка возможности использования одночастотной аппаратуры GPS для регистрации отклика ионосферы на падение челябинского метеороида / А. А. Холмогоров, В. Б. Иванов // Сборник научных трудов XX Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск, 4-5 мая 2017. – Красноярск, 2017. – С. 252-256

79. Zuluaga J. I. A preliminary reconstruction of the orbit of the Chelyabinsk Meteoroid [Электронный ресурс] / J. I. Zuluaga; I. Ferrin. – 2013. – URL: <https://arxiv.org/abs/1302.5377>

80. Бернгардт О.И. Ионосферные эффекты в первые два часа после падения метеорита «Челябинск» / О.И. Бернгардт, В.И. Куркин, Г.А. Жеребцов, О.А. Кусонский, С.А. Григорьева // Солнечно- земная физика. - 2013. - № 24. - С. 3 -14

81. Гивишвили Г. В. Ионосферные эффекты стимулированные Челябинским метеоритом / Г. В. Гивишвили, Л. Н. Лещенко, В. В. Алпатов, С. А. Григорьева, С. В. Журавлев, В. Д. Кузнецов, О. А. Кусонский, В. Б. Лапшин, М. В. Рыбаков // Астрономический вестник. - 2013. - Т. 47. - № 4. - С. 304–311

82. Тертышников А.В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. / А.В. Тертышников, В.В. Алпатов, Я.В. Глухов, Д.В. Давиденко // Гелеофизические исследования. - 2013. - № 5. - С. 65-73
83. Перевалова Н.П. Поведение полного электронного содержания во время пролета и взрыва Челябинского метеороида / Н.П. Перевалова, Н. В. Шестаков, А. С. Жупитяева, Ю. В. Ясюкевич, С. В. Воейков, К. А. Кутелев // Солнечно-земная физика. - 2013. - №. 24. - С. 34-41
84. Ружин Ю. Я. Отклик ионосферы на вторжение и взрыв южноуральского суперболида / Ю. Я. Ружин, В. Д. Кузнецов, В. М. Смирнов // Геомагнетизм и аэрономия. - 2014. - Т. 54. - № 5. - С. 646–657
85. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. - 2015. - Т. 55. - № 3. - С. 370–385
86. 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. 234–243