

На правах рукописи

Конечкая Елена Викторовна

**ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ИЗМЕРЕНИЯХ
ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Тинин Михаил Валентинович

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук
Зернов Николай Николаевич
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет" (СПбГУ), г. Санкт-Петербург, профессор, зав. кафедрой

Доктор технических наук
Демьянов Владислав Владимирович
ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), сообщения, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», г. Иркутск, профессор

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится «07» февраля 2018 г. в 09⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.074.04 при Иркутском государственном университете по адресу: 664003, г. Иркутск, б-р Гагарина, 20, ИГУ, физический факультет, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета, либо – на сайте ИГУ, с авторефератом – на сайте ИГУ: <http://www.isu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять на имя секретаря диссертационного совета по адресу: 664003, Иркутск, б-р Гагарина, 20, физический факультет.

Автореферат разослан «21» ноября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, доцент

Гаврилюк А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Основной вклад в величину ошибки ГНСС вносит ионосфера, в которой лежит большая часть пути сигнала спутниковых систем. Из-за того, что Земля обладает собственным магнитным полем, ионосферная плазма является магнитоактивной, а некоторые ионосферные неоднородности вытягиваются (ориентируются) вдоль силовых линий магнитного поля. При этом в магнитоактивной плазме изменяется показатель преломления, из-за чего изменяется и скорость распространения сигнала (т.н. эффект анизотропии ионосферы), а на магнитоориентированных неоднородностях происходит анизотропное рассеяние распространяющегося сигнала ГНСС (эффект анизомерии ионосферных неоднородностей). Оба описанных выше явления оказывают влияние на точность и качество приема измерений ГНСС.

В высокоточных измерениях, которые требуются при мониторинге нижней атмосферы для прогноза погоды и климатических изменений; в исследованиях деформации земной поверхности при прогнозировании землетрясений и вулканической активности, наибольший интерес с точки зрения повышения точности приема является ионосферная ошибка второго порядка как количественная оценка эффектов анизотропии ионосферы. Существующие методы учета ионосферной ошибки второго порядка предполагают два подхода: либо ионосферная ошибка второго порядка путем численного моделирования вычисляется непосредственно, после чего вычитается из измерений ГНСС, либо – в случае двухчастотных измерений с помощью численного моделирования выполняется оценка остаточной ошибки измерений. Недостатком вычисления ионосферной ошибки второго порядка была и до сих пор остается потребность в информации о величине полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы вдоль луча, соединяющего спутник и приемник. Данные о ПЭС принято получать либо из карт ПЭС, либо применяя модели ионосферы, но, к сожалению, эти данные не отличаются высокой точностью и сравнение информации, полученной различными способами, указывает на большие различия в полученных величинах ПЭС. Поэтому в данной работе предлагается методика одновременного устранения ионосферных ошибок первого и второго порядков ГНСС.

Ионосферные неоднородности существенно влияют на качество принимаемого сигнала ГНСС. Так, в присутствии неоднородностей возникают флуктуации амплитуды (амплитудные мерцания) и фазы (фазовые мерцания) сигнала ГНСС, его деградация и срыв сопровождения сигнала навигационными приемниками с последующим длительным периодом восстановления режима слежения приводят к сбоям и увеличению погрешности в определении координат. Анизомерия ионосферных неоднородностей приводит к анизотропии рассеяния, что в свою очередь проявляется в зависимости сбоев ГНСС измерений от ориентации трассы спутник-наблюдатель относительно силовой линии магнитного поля Земли.

Таким образом, в настоящей работе исследуются два фактора, влияющие на точность ГНСС измерений и связанные с наличием магнитного поля Земли: анизотропия ионосферы и анизомерия ионосферных неоднородностей.

Цель работы: разработка методики устранения ионосферной ошибки второго порядка ГНСС для повышения точности определения координат приемника.

Задачи:

1. Исследование границ применимости методов вычисления ионосферной ошибки второго порядка, а также исследование влияния точности задания параметров ионосферы в моделях ионосферы на величину ионосферной ошибки второго порядка.

2. Разработка методики устранения ионосферной ошибки второго порядка в двухчастотных ГНСС измерениях, которая не нуждается в информации о текущем состоянии ионосферы.

3. Сравнение остаточных ошибок двухчастотных измерений, полученных с помощью разработанной методики с аналогичными данными, полученными с помощью существующих методик устранения.

4. Исследование с помощью численного моделирования зависимости вероятности срыва сопровождения фазы несущей сигнала ГНСС от взаимной ориентации луча «спутник-приемник» и магнитоориентированных неоднородностей.

Научная новизна:

1. Впервые проведена оценка влияния параметров ионосферы, оказывающих существенное влияние на точность вычисления ионосферной ошибки второго порядка. Исследованы возможности использования моделей магнитного поля Земли при вычислении ионосферной ошибки второго порядка. Указаны регионы Земли, где с учетом существующих точностей фазовых измерений нет существенных различий между двумя анализируемыми в данной работе моделями.

2. Разработанная методика устранения ионосферной ошибки второго порядка впервые позволила наряду с ионосферной ошибкой первого порядка уменьшить остаточную ошибку двухчастотных измерений, обусловленную эффектами анизотропии ионосферы. Также особенностью предложенной методики является отсутствие необходимости в информации о полном электронном содержании ионосферы вдоль луча «спутник-приемник».

3. Впервые с помощью численного моделирования исследована зависимость вероятности срыва сопровождения фазы несущей сигнала ГНСС от взаимной ориентации луча «спутник-приемник» и характеристик магнитоориентированных неоднородностей. Сравнение результатов моделирования вероятности сбоя с результатами наблюдений показало, что сбои в большой степени связаны с флуктуациями фазы ГНСС сигнала в ионосфере с анизотропными неоднородностями.

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложенная методика устранения ионосферной ошибки второго порядка позволяет учесть эффекты магнитного поля Земли в двухчастотных измерениях глобальных навигационных спутниковых систем. Преимущество данной методики заключается в одновременном устранении ионосферных ошибок первого и второго порядков без выполнения оценок текущего состояния полного электронного содержания. Полученные в настоящей работе результаты, а также методику обработки экспериментальных данных двухчастотных фазовых измерений

глобальных навигационных спутниковых систем можно использовать в высокоточных геодезических измерениях для более точного определения положения опорных станций дифференциальной коррекции, коррекции дифференциальных кодовых шумов приемников, а также в диагностике движения литосферных плит и мониторинге состояния атмосферы.

Впервые с помощью моделирования было показано, что существует связь между вероятностью возникновения сбоя сопровождения фазы и взаимной ориентацией луча «спутник-приемник», а также характеристиками магнитоориентированных неоднородностей. Сравнение результатов моделирования вероятности сбоя с результатами наблюдений показало, что сбои в большой степени связаны с флуктуациями фазы ГНСС сигнала в ионосфере с анизотропными неоднородностями.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Точность определения ионосферной ошибки второго порядка в наибольшей степени определяется точностью используемой величины полного электронного содержания ионосферы, в то время как зависимость этой ошибки от высоты максимума ионосферного слоя выражена слабо.

2. Предложенная методика устранения ионосферной ошибки второго порядка позволяет уменьшить остаточную ошибку двухчастотных измерений, обусловленную эффектами анизотропии ионосферы и не нуждается в информации о полном электронном содержании ионосферы вдоль луча «спутник-приемник».

3. Вероятность возникновения сбоев в системе GPS в определенных областях при наличии магнитоориентированных ионосферных неоднородностей возрастает по сравнению с вероятностью возникновения сбоев в условиях присутствия изотропных неоднородностей.

Достоверность научных положений

Достоверность результатов, полученных в настоящей работе, обусловлена использованием современных методов моделирования распространения радиоволн и хорошим качественным и количественным согласием результатов модельных расчетов с данными, опубликованными в работах других авторов. Результаты, которые получены в ходе работы и вынесены на защиту, обсуждались на научных семинарах, публиковались в рецензируемых журналах и докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Апробация и внедрение результатов

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих **научных мероприятиях**: XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium (Istanbul, Turkey, 2011); Байкальская международная школа по фундаментальной физике (Иркутск, 2011, 2013 гг.); X Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника (Томск, 2012 г.), где работа была отмечена дипломом III степени; конференция «Физика и оптика океана и атмосферы» (Иркутск, 2012 г.), где работа была отмечена дипломом II степени; Первая украинская конференция «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства» (Украина, Харьков, 2012 г.); X Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2013 (Красноярск, 2013 г.); XXIV Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 100-летию со дня рождения профессора В.М. Полякова (Иркутск, 2014 г.); Progress In Electromagnetics Research Symposium (Prague, Czech Republic 2015); XXV

всероссийская научная конференция с международным участием «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований. 4-9 июля 2016 года, Томск; XX Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», 3-6 мая 2017 года, Красноярск, где работа была отмечена дипломом I степени; тематические семинары «Радиозондирование ионосферы», посвященные памяти проф. Э.Л. Афраймовича (Иркутск, 2012 г., 2013 г. и 2016 г.); научные семинары физического факультета Иркутского Государственного Университета (2010 – 2016 гг).

Исследования по теме диссертации проходили **при поддержке** федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (проект № 8388); государственного задания Минобрнауки России (задание № 3.903.2017/ПЧ); Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-02-00249 и № 12-05-31169); Российского научного фонда (проект № 14-37-00027), грант на проведение НИР аспирантами и молодыми сотрудниками ФГБОУ ВО «ИГУ», № 091-16-214.

Публикации

Всего по основным положениям диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе: 5 - в рецензируемых научных изданиях, включенных в международные базы систем цитирования (5 работ в источниках, индексируемых в «Scopus»; 2 - в «Web of Science»), 3 - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук; а также публикации в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора

Основные результаты работы являются оригинальными и получены либо автором, либо при его непосредственном участии.

Постановка задач исследования проводилась автором совместно с руководителем. Автором лично разработаны алгоритмы численных расчетов, а также выполнены непосредственные расчеты, необходимые для исследования. Также автором осуществлялись анализ полученных данных, оценка эффективности созданных алгоритмов и разработанной методики. Выводы делались автором на основе полученных результатов.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из 3-х глав, введения, заключения, списка литературы и одного приложения. Общий объём – 113 страниц, 29 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 112 цитируемых источников, в том числе 82 - на иностранных языках.

Основное содержание работы

Во **введении** обсуждается актуальность исследуемой темы, формулируются цели исследования и решаемые задачи, поясняется научная значимость выполненной работы. Также представлены научные положения, выносимые на защиту, и изложено краткое содержание работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы, посвященной существующим ошибкам ГНСС, выполнен анализ существующих ошибок ГНСС измерений ионосферного и неионосферного происхождения, проанализированы преимущества и недостатки существующих методик устранения этих ошибок и указаны потенциальные точности ГНСС, достижимые при условии использования

представленных этих методик. Сделан вывод о том, что существующие на сегодняшний день методики устранения ошибок, имеющих не-ионосферное происхождение, позволяют добиться достаточно высоких показателей точности.

При анализе методик устранения ошибок ионосферного происхождения был сделан вывод о существенности ионосферной ошибки второго порядка как ограничителе точности двухчастотных измерений. При анализе методик устранения этой ошибки было указано, что существующие методики имеют ряд недостатков. Так, при выполнении измерений на дополнительных частотах для устранения ошибок увеличивается зашумленность измерений, из-за чего также снижается точность. Для численного моделирования либо непосредственно ошибки, либо остаточной ошибки двухчастотных измерений необходимы или корректные модели ионосферы, которые позволили бы вычислять величину полного электронного содержания, или - карты ПЭС. Однако эти данные не отличаются высокой точностью и сравнение информации, полученной различными способами, демонстрирует большие различия в полученных величинах ПЭС, что приводит к возникновению непредвиденных ошибок измерений.

Во **второй главе** описан механизм распространения сигналов ГНСС в магнитоактивной ионосфере, описаны качественные характеристики ошибок двухчастотных измерений, определены оптимальные параметры моделей ионосферы и геомагнитного поля с позиции точности вычисления величины ионосферной ошибки. Представлена и описана методика учета ионосферной ошибки второго порядка, проанализирована эффективность использования этой методики.

В приближении геометрической оптики ионосферная ошибка второго порядка D_2 , которой естественным образом ограничивается точность двухчастотных измерений (см. главу 1), имеет вид:

$$D_2 = \frac{-40.3}{f^3} \int_{z_0}^{z_t} N(z) f_g(z) \cos \vartheta(z) dz = -40.3 \int_{z_0}^{z_t} N(z) |e\mathbf{V}_0| \cos \vartheta(z) dz / (2\pi m f^3). \quad (1)$$

Здесь $N(z)$ - электронная концентрация; dz - элемент траектории сигнала (в данной работе мы пренебрегаем эффектами, вызванными искривлением траектории); z_t - точка излучения сигнала; z_0 - точка приема сигнала; f - рабочая частота, $f_g = e\mathbf{V}_0 / (2\pi m)$, e и m - гирочастота, заряд и масса покоя электрона, соответственно; \mathbf{V}_0 - вектор напряженности магнитного поля Земли; ϑ - угол между \mathbf{V}_0 и направлением распространения волны \mathbf{k} .

Для упрощения процесса вычисления ошибки (1) было предложено¹ так называемое приближение тонкого слоя, суть которого заключалась в предположении о медленном изменении магнитного поля Земли в ионосферном слое и связи интеграла

¹Bassiri S. Higher order ionospheric effects on global positioning system observables and means of modeling them / S. Bassiri, G.A. Hajj // Manuscripta Geodaetica. - 1993. - № 18. - P. 280 – 289.

$$I_2 = \int_{z_0}^{z_t} N(z) f_g(z) \cos \vartheta(z) dz \quad (2)$$

с полным электронным содержанием $I_1 = \int_{z_0}^{z_t} N(z) dz$, учитывающей медленное изменение геомагнитного поля в пределах ионосферного слоя:

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_{z_0}^{z_t} N(z) f_g(z) \cos \vartheta(z) dz \approx f_g(z_m) \cos \vartheta(z_m) \int_{z_0}^{z_t} N(z) dz = \\ &= f_g(z_m) \cos \vartheta(z_m) I_1 = C_H \cdot I_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь в качестве z_m обычно берется длина луча «спутник-приемник» от приемника до высоты главного максимума ионосферного слоя (или, как принято говорить, в под-ионосферной точке);

$$C_H = f_g(z_m) \cos \vartheta(z_m) = \frac{e(\mathbf{B}_0(z_m); \mathbf{k}(z_m))}{2\pi m} \quad (4)$$

- весовой коэффициент пропорциональности интеграла I_2 полному электронному содержанию I_1 , вычисленный на расстоянии z_m . Таким образом, вычисление поправки D_2 упрощается и выражение (1) примет окончательный вид:

$$D_2^{TL} = 40.3 C_H \cdot I_1 / f^3. \quad (5)$$

Здесь D_2^{TL} - поправка ионосферной ошибки второго порядка, вычисленная в приближении тонкого слоя. Однако, поскольку допустимость использования приближения (5) не была исследована с точки зрения потенциальных точностей фазовых измерений² в 1 мм, в данной работе была проанализирована погрешность использования приближения тонкого слоя:

$$\Delta^{TL} = D_2 - D_2^{TL}. \quad (6)$$

В расчетах в качестве модели ионосферы был взят слой Чепмена:

$N(h) = 1/80.6 \cdot f_{кр}^2 \cdot e^{0.5(1 - \zeta - e^{-\zeta})}$, где $\zeta = (h - h_0)/H$. Параметры слоя следующие: критическая частота $f_{кр} = 15$ МГц; высота максимума слоя $h_0 = 320$ км; характерный масштаб слоя $H = 70$ км. При этом вертикальное ПЭС = 80 TECU (1 TECU = 10^{16} м⁻²). Модель магнитного поля — диполь магнитного поля.

Отметим, что моделирование проводилось следующим образом: вся поверхность Земли разбивалась на сетку в 10 градусов по широте и 10 градусов по долготе, и в узлах этой сетки помещались виртуальные приемники с фиксированным направлением на спутник — с одинаковыми азимутами и углами

² GPS surveying with 1mm precision using corrections for atmospheric slant path delay / C. Alber, R. Ware, C. Rocken, F. Solheim // Geophysical Research Letters. - 1997. - V.24. - №15. - P. 1859–1862.

возвышения. Для каждого из лучей «спутник-приемник» с фиксированными углами возвышения и азимутом спутника моделировалась величина погрешности (6), после чего строились линии постоянного уровня погрешности Δ^{TL} . Рис. 1 демонстрирует, что величина погрешности вычисления ошибки D_2 , определенная с помощью приближения (3), при больших углах возвышения очень мала. Моделирование для других условий показало, что при наихудших условиях приема сигнала (при угле возвышения, равном углу отсечки в 10°) по всему земному шару погрешность Δ^{TL} варьируется в пределах от 0 до 0,7 мм. На экваторе ошибка D_2^{TL} , вычисленная с помощью приближения (3), практически совпадает со своим точным значением D_2 .

Из-за того, что при вычислении ионосферной ошибки (5), которую в дальнейшем мы будем обозначать D_2 , возможны ситуации, когда один или несколько параметров, используемых в выражении (5), определены неточно, нами были исследованы погрешности вычисления ошибки D_2 , вносимые неполным учетом таких параметров, как модель магнитного поля Земли; определение высоты максимума ионосферного слоя; величина полного электронного содержания ионосферы вдоль луча «спутник — приемник».

1. Выбор модели магнитного поля Земли. Если в первоначальных оценочных вычислениях ионосферной ошибки D_2 использовалась модель поля магнитного диполя³, то впоследствии наиболее распространенной стала международная эталонная модель магнитного поля IGRF. Причиной этому стали результаты моделирования, которые показали, что модель IGRF описывает состояние геомагнитного поля Земли с большей достоверностью чем модель поля магнитного диполя.

Для оценки влияния используемой модели геомагнитного поля на точность вычисления ионосферной ошибки (6) с учетом потенциальных точностей фазовых измерений были произведены расчеты поправок второго порядка для международной модели магнитного поля D_{2IGRF} и для модели поля магнитного диполя D_{2Dip} , после чего вычислялась разность $\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$. Рисунок 2б демонстрирует при малых углах возвышения спутника достаточно большое расхождение ΔD_m , достигающее в некоторых областях 6 мм и более. На экваторе, где сама ионосферная ошибка второго порядка D_2 мала из-за взаимной ориентации луча «спутник-приемник», расхождение ΔD_m по абсолютному значению на долготах $0^\circ - 50^\circ$ достигает 6 мм. Увеличение угла возвышения уменьшает ΔD_m (ср. рис. 2а), но не устраняет полностью расхождений.

Отметим, что моделирование выявило области (в зависимости от положения спутника такие области занимают 40-70% поверхности земного шара), где разница ΔD_m , находясь в пределах ошибки измерений фазовых приемников, не превышает

³ The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions / S. Kedar, G.A. Hajj, B.D. Wilson, M.B. Heflin // Geophysical Research Letters. – 2003. - V. 30, № 16. - P.1829 – 1832. - doi:10.1029/2003GL017639.

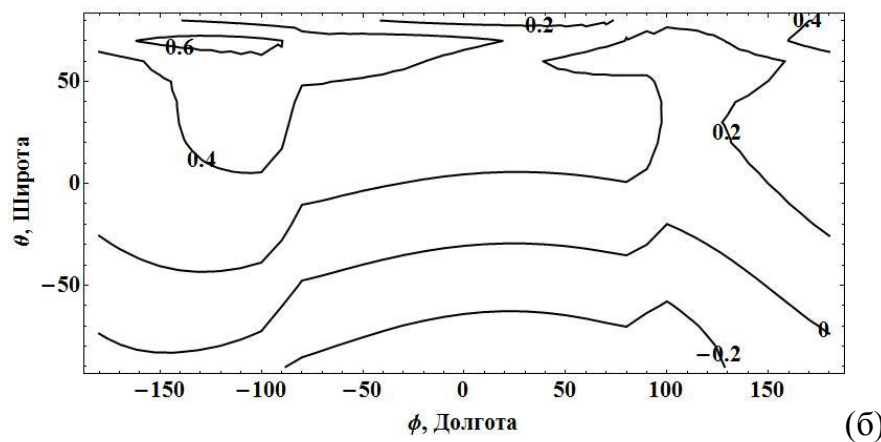
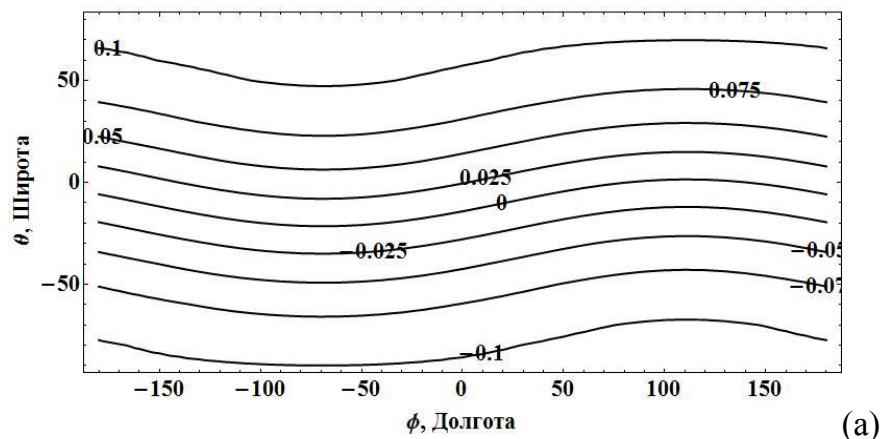


Рисунок 1 — Распределение (в мм) по Земной поверхности погрешности (б) использования приближения тонкого слоя в зависимости от широты и долготы приемника: (а) — угол возвышения спутника 90° ; (б) угол возвышения спутника — 10° , азимут - 45°

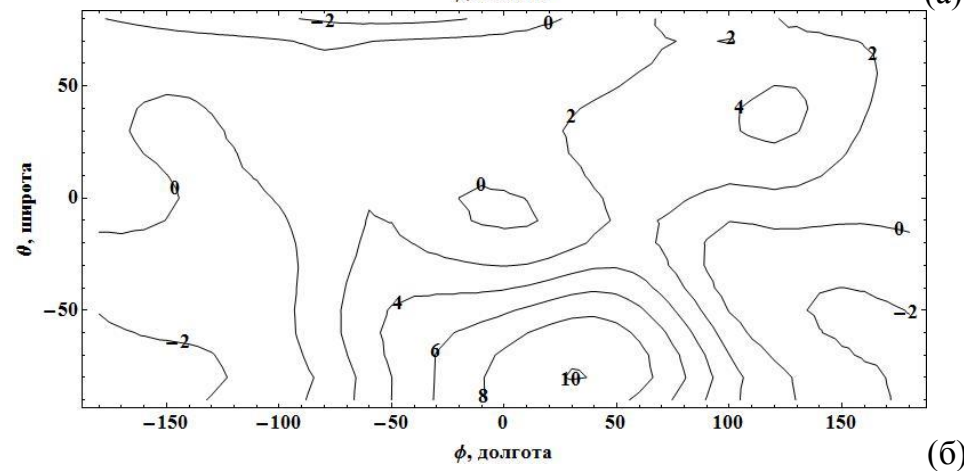
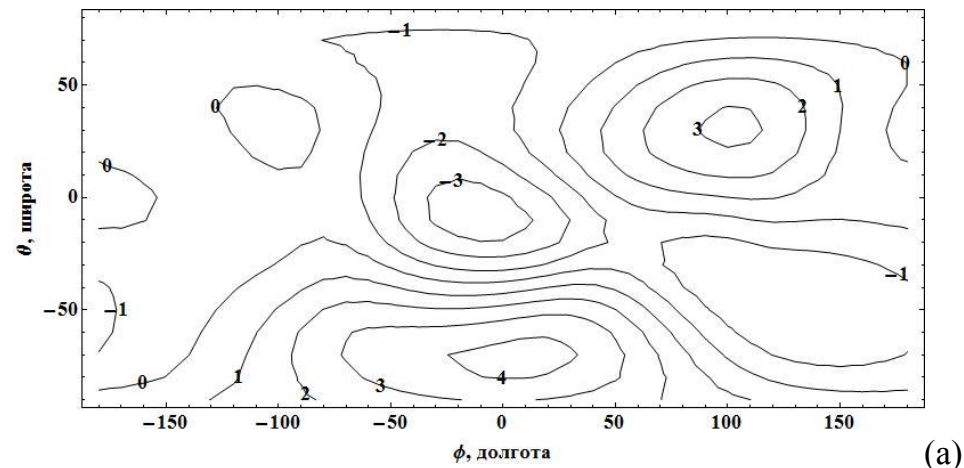


Рисунок 2 — Различие (в мм) поправок второго порядка $\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$, в зависимости от широты и долготы приемника, рассчитанных с использованием различных моделей магнитного поля (а) - для угла возвышения 90° ; (б) - для угла возвышения 20° и азимута - 90°

1-2 мм по модулю, т.е. выбор модели существенно не влияет на полученные результаты. Малые значения расхождения ΔD_m можно объяснить большим сходством поведения обеих моделей в этих областях. Отметим, что чаще всего эти области расположены в северной части западного полушария и южной части - восточного. Так, например, на территориях западной части США и Канады, а также Австралии, Индонезии существуют области, где вообще разница при использовании модели IGRF и модели магнитного диполя в расчетах ошибки второго порядка гораздо меньше погрешности фазовых измерений. Таким образом, в указанных областях возможно использование более простой модели поля магнитного диполя.

2. Задание высоты максимума слоя. Для расчета коэффициентов C_H (см. (4)) в выражении (5), используемых при вычислении ионосферной ошибки второго порядка, нужна информация о неизвестном априори расстоянии от точки приема до под-ионосферной точки. Расчеты значения коэффициента C_H в выражении (5) проводились при $h_m = h_0 = 320$ км, т.е. в максимуме ионосферного слоя, а также при завышенном ($h_{m+} = 352$ км) и заниженном ($h_{m-} = 288$ км) значениях высоты h_m . Результаты расчетов показали, что разности $D_2^{+\Delta h} = D_2(h_0) - D_2(h_{m+})$ и $D_2^{-\Delta h} = D_2(h_0) - D_2(h_{m-})$ отличаются только знаком. Поэтому на рис. 3 приведены результаты расчетов только для величины $D_2^{-\Delta h}$.

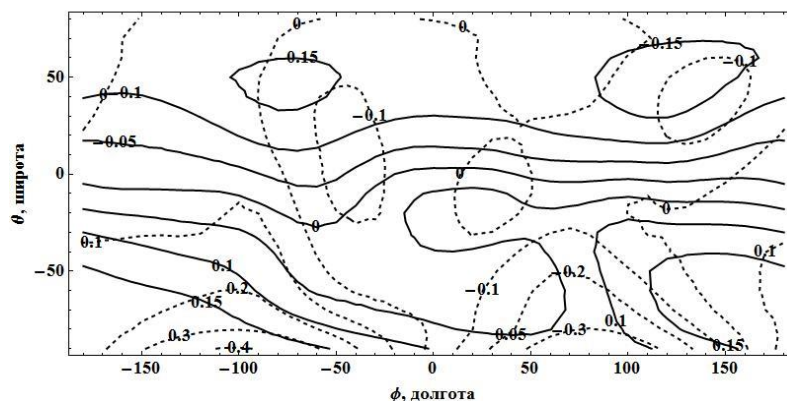


Рисунок 3 — Погрешность (в мм) $D_2^{-\Delta h}$ в расчетах ионосферной ошибки второго порядка в зависимости от широты и долготы приемника, вносимая заданием высоты h_{m-} на 10% ниже истинного значения $h_0 = 320$ км для углов возвышения 20° (штриховая линия) и 60° (непрерывная линия) при азимуте 90°

Видно, что при погрешности задания высоты максимума ионосферного слоя в 10% погрешность D_2^- вычисления ошибки D_2 не превышает 0,5 мм. При этом увеличение угла возвышения спутника не всегда позволяет уменьшить значение погрешности D_2^- (рис. 3). Следует отметить также некоторую несимметричность в значениях, проявляющуюся при распространении сигнала от спутников с азимутами, равными 90° и 270° (рис. 3), особенно для низких углов возвышения.

3. Определение полного электронного содержания ионосферы вдоль луча «спутник-приемник». Обычно ПЭС определяется либо по глобальным картам ПЭС, построенным по технологии GIM, либо – по эмпирическим и полуэмпирическим моделям ионосферы. Однако в обоих случаях существует возможность ошибочного определения ПЭС. Так, две различные модели ПЭС демонстрируют отличие в получаемых величинах наклонных ПЭС в несколько единиц, а иногда — и более десятка TECU. Стандартные различия в получаемых из карт величинах ПЭС достигают, по различным данным, 2 – 10 TECU в зависимости от положения приемника^{4,5}. Эти отклонения приводят к погрешности — неучтенной остаточной ошибке $D_2^{\Delta I_1}$ в определении ионосферой ошибки второго порядка:

$$D_2^{\Delta I_1} = \frac{40.3 \Delta I_2}{f_1 f_2 (f_1 + f_2)}. \quad (7)$$

Погрешность определения ПЭС ΔI_1 была задана на уровне 20%: $\Delta I_1 = 0.2 I_1$. Моделирование показало, что при фиксированном угле возвышения спутника изменение азимута спутника приводит к изменению картины распределения остаточной ошибки и малым отличиям по величинам остаточной ошибки. Также видно, что в условиях спокойной ионосферы (рис. 4) погрешность определения остаточной ошибки незначительна, но в некоторых регионах Земли превышает уровень внутренних шумов. По сравнению с погрешностями, вносимыми неточным заданием высоты максимума слоя, погрешности $D_2^{\Delta I_1}$ - существеннее и вносят существенные искажения в величину вычисляемой ионосферной ошибки второго порядка, достигающие 50% от самой величины ошибки.

Из результатов исследования погрешностей вычисления ошибки D_2 видно, что устранение ионосферной ошибки второго порядка связано с точностью определения полного электронного содержания вдоль луча, соединяющего спутник и приемник. Поэтому была предложена следующая методика устранения ионосферной ошибки второго порядка. Благодаря связи (3) между ионосферной ошибкой второго порядка D_2 и величиной ПЭС, а также малости ионосферной ошибки D_2 по сравнению с ионосферной ошибкой первого порядка, была предложена следующая модификация выражения для фазового пути (здесь и далее будем пренебрегать ионосферными ошибками высших порядков, а также будем считать проблему решения фазовой неопределенности решенной):

$$\varphi = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} - 40.3 \frac{C_H \cdot I_1}{f^3} = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} \left(1 + 40.3 \frac{C_H}{f} \right). \quad (8)$$

Так как слагаемое $40.3 C_H / f$ в множителе (8) меньше единицы ($40.3 C_H / f \ll 1$) из-за больших рабочих частот ГНСС-систем, можно выполнить

⁴ Sekido M. Evaluation of GPS-based ionospheric TEC map by comparing with VLBI data / M. Sekido, T. Kondo, E. Kawai // Radio science. - 2003. - V. 38, №4. - doi:10.1029/2000RS002620.

⁵ A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOPEX radar, and the Bent model / C.M. Ho, B.D. Wilson, A.J. Mannucci, U.J. Lindqwister, D.N. Yuan // Radio Science. - 1997. - V.32, №4. - P. 1499-1512.

следующее преобразование:

$$\frac{1}{f^2} \cdot \left(1 + 40.3 \frac{C_H}{f} \right) \approx 1 / \left(f^2 \cdot \left(1 - \frac{40.3 \cdot C_H}{2f} \right)^2 \right) = \frac{1}{f_{mod}^2}. \quad (9)$$

Здесь

$$f_{mod} = f - 40.3 \cdot C_H / 2 \quad (10)$$

- модифицированная частота, в которой учтено наличие магнитного поля Земли.

С учетом полученной зависимости (9) двухчастотные измерения фазовой дальности (8) будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \varphi_1 = D_0 - 40.3 I_1 / f_{1mod}^2; \\ \varphi_2 = D_0 - 40.3 I_1 / f_{2mod}^2. \end{cases} \quad (11)$$

Из системы (11), по аналогии с принципами обработки двухчастотных измерений нетрудно найти, что уже во втором приближении истинная дальность примет выражение:

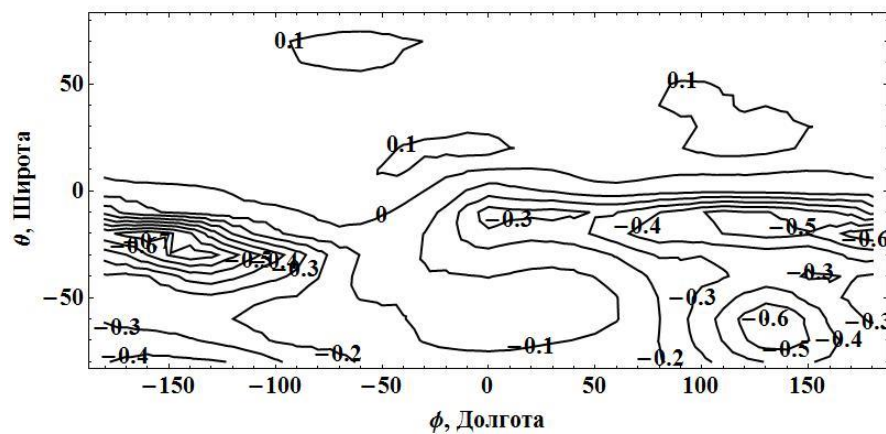
$$D_0^{(2)} = \left(\varphi_1 f_{1mod}^2 - \varphi_2 f_{2mod}^2 \right) / \left(f_{1mod}^2 - f_{2mod}^2 \right). \quad (12)$$

Таким образом, с помощью модификации известных формул двухчастотных измерений и двухчастотного приема учитываются одновременно ошибки первого и второго порядков. Здесь важно отметить две особенности использования модифицированной частоты f_{mod} . Во-первых, здесь подразумевается, что измерения (11) выполняются на стандартных рабочих частотах ГНСС, и содержат вклад как от наличия ионосферы, так и геомагнитного поля, но в результате математических преобразований (9) они принимают вид (11). Здесь ни в коем случае не идет речь о перестройке всей системы вещания сигнала спутниками, а всего лишь о новом представлении полученных результатов двухчастотных измерений. Во-вторых, следует отметить, что в результате использования формулы приема (12) исчезает необходимость определять ПЭС ионосферы вдоль луча «спутник — приемник». Для анализа эффективности предложенной методики исследовалась остаточная ошибка измерений:

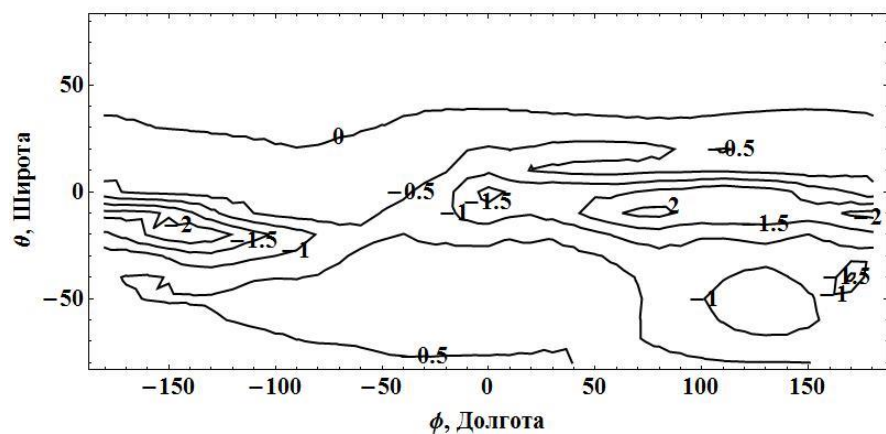
$$\Delta D^{(2)} = D_0 - D_0^{(2)}. \quad (13)$$

Несомненно, остаточная ошибка (13) будет содержать в себе погрешность приближения тонкого слоя и ограничиваться только им для моделируемой ситуации. В случае обработки экспериментальных данных могут возникнуть ошибки иного рода. Анализ распределения остаточной ошибки (13) по поверхности земного шара показал, что при малых углах возвышения остаточная ошибка достигает максимальных своих значений, но не превышает 1 мм (рис. 5).

В **третьей главе** рассмотрены эффекты анизотропии ионосферных неоднородностей в фазовых измерениях ГНСС. Проанализировано распределение дисперсии флуктуаций фазы, возникающих из-за наличия анизотропных неоднородностей, проведено сравнение с дисперсией флуктуаций фазы, возникающих на изотропных неоднородностях. Выявлена связь сбоев сопровождения сигналов ГНСС и степени вытянутости анизотропных неоднородностей.

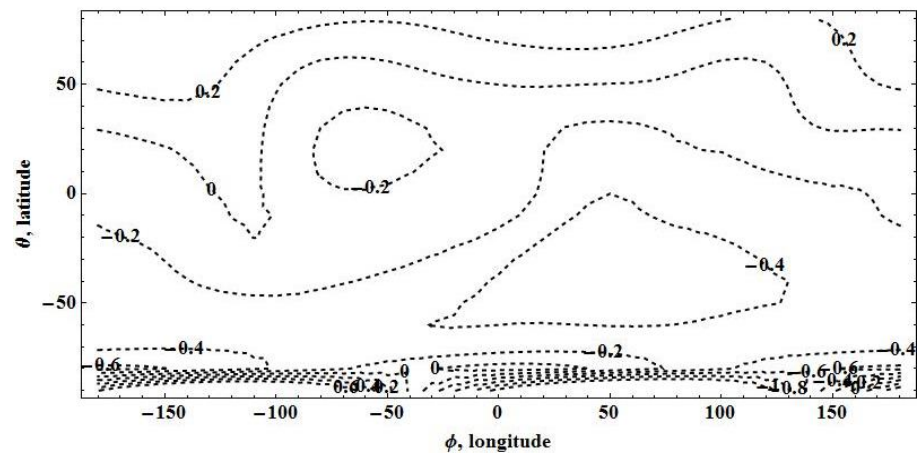


(a)

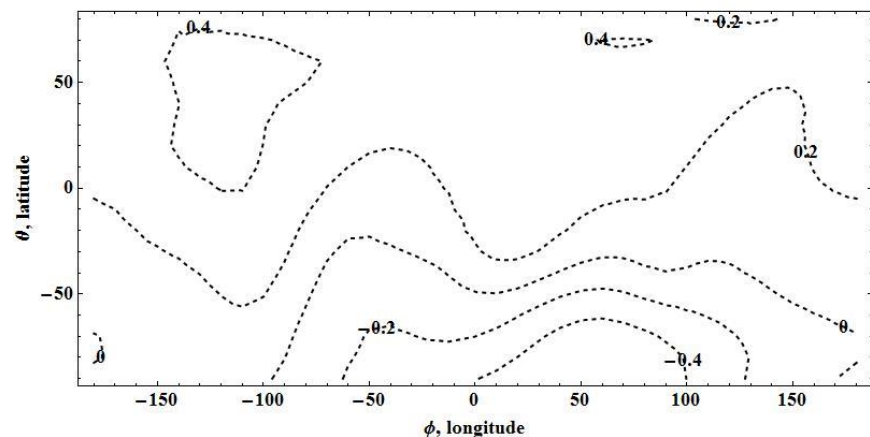


(б)

Рисунок 4 — Распределение (в мм) погрешности вычисления остаточной ошибки (7) по Земному шару при угле возвышения 40° и азимутах спутника 0° (а) и 180° (б) в зависимости от широты и долготы приемника. Модель магнитного поля – IGRF. Данные модели ионосферы NeQuick выбраны за 15 января 2017 г., 12:00 LT



(a)



(б)

Рисунок 5 — Распределение (в мм) остаточной ошибки $\Delta D^{(2)} = D_0 - D_0^{(2)}$ по земному шару для угла возвышения и азимута соответственно: угла возвышения 100° и азимута 100° (а); угла возвышения 100° и азимута 135° (б)

Эффекты геомагнитного поля не ограничиваются возникновением зависимости фазовой скорости сигнала ГНСС от поляризации. Также в ионосфере происходит ориентирование ионосферных неоднородностей вдоль силовых линий магнитного поля. Сигнал, проходя через такую неоднородность, анизотропно рассеивается, вследствие чего возникают флуктуации амплитуды и фазы сигнала, влекущие за собой сбои в работе приемников сигнала ГНСС. При этом сбои начинают зависеть от ориентации трассы «спутник-приемник» относительно силовой линии магнитного поля.

Для исследования зависимости дисперсии фазы и сбоев сопровождения сигнала ГНСС от углов прихода сигнала моделировалась зависимость дисперсии флуктуаций фазы от взаимного расположения спутника и приемника. При этом учитывалось, что выражение для дисперсии фазы имеет следующий вид^{6,7}:

$$\sigma^2 = \left(\frac{40.3k}{f^2} \right)^2 \frac{2\sqrt{\pi}\Gamma(p/2)}{\Gamma((p-3)/2)\Gamma(p-1/2)} \frac{\alpha l_{\perp}}{\sqrt{\cos^2\theta + \alpha^2 \sin^2\theta}} \int_{z_r}^{z_t} \sigma_N^2(z') dz' \quad (14)$$

где f – рабочая частота, θ – угол между волновым вектором k и вектором магнитного поля, σ_N^2 – дисперсия электронной концентрации, $p=11/3$, $\alpha=l_z/l_{\perp}$ – степень вытянутости неоднородности; $l_{\perp}=l_x=l_y$ и l_z – поперечные и продольные внешние масштабы случайных неоднородностей со спектром:

$$\Phi_N(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \frac{l_{\perp}^2 l_z \Gamma(p/2) \sigma_N^2(\mathbf{r})}{\pi^{3/2} \Gamma((p-3)/2)} \left[1 + \kappa_z^2 l_z^2 + l_{\perp}^2 (\kappa_x^2 + \kappa_y^2) \right]^{-p/2} \quad (15)$$

$$\sigma_N(\mathbf{r}) = \sigma_0 \bar{N}(\mathbf{r}). \quad (16)$$

Здесь $\bar{N}(\mathbf{r})$ – фоновая электронная концентрация. Был проведен анализ влияния каждого из этих параметров на флуктуации фазы сигнала ГНСС, кроме дисперсии неоднородностей: положение приемника (широта и долгота) и спутника (угол возвышения и азимут), а также степень вытянутости неоднородности $\alpha=l_z/l_{\perp}$.

При этом моделировалось поведение флуктуаций фазы при прохождении сигнала через максимум плазменной капли со следующими параметрами: степень вытянутости равна $\alpha=10$; продольный размер $l_{\perp}=10$ км; интенсивность в центре «капли» была $0.1\sigma_{\max}$, где σ_{\max} – максимальный уровень флуктуаций фоновой ионосферы. При этом в качестве модели фоновой ионосферы был выбран слой Чепмена со следующими параметрами: критическая частота $f_{kp}=15$ МГц; высота максимума слоя $h_0=320$ км; характерный масштаб слоя $H=70$ км, а в качестве модели магнитного поля выбрана модель IGRF.

Моделирование пространственного распределения дисперсии (14) флуктуаций фазы (рис. 6) в случае анизомерных неоднородностей показало, что наиболее сильные флуктуации фазы (по сравнению со случаем изомерных

⁶ Briggs B.H. On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle / B.H. Briggs, I.A. Parkin // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1963. - V.25. - P. 339 – 365.

⁷ Yeh K.C. Radio Wave Scintillations in the Ionosphere / K.C. Yeh, C.-H. Liu // Proceedings of the IEEE. - APRIL 1982. - V. 70, №. 4. – P. 324 – 360.

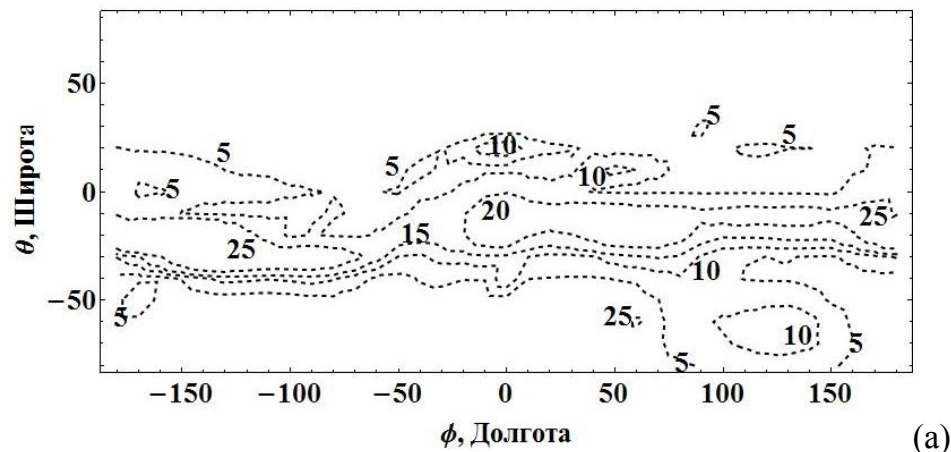
неоднородностей) возникают на средних и низких широтах (рис. 6), причем влияние магнитоориентированных неоднородностей на дисперсию фазы проявляется наиболее сильно в северном полушарии при «просвечивании» ионосферы с южной стороны, когда азимут спутника равен 180° , а углы возвышения - более 45° . Для южного полушария наблюдается полностью противоположная картина. Причиной малых флуктуаций на высоких широтах является то, что в используемой модели (16) пространственное распределение дисперсии электронной концентрации пропорционально фоновой электронной концентрации, которая уменьшается на полюсах. Вследствие этого на высоких широтах в северном полушарии из-за малой фоновой электронной концентрации малыми становятся флуктуации фазы (рис. 7).

Особое внимание уделялось территории Японии как области, где были зафиксированы⁸ сильные флуктуации фазы сигнала GPS, вызвавшие серьезные сбои в работе приемной аппаратуры. При этом будем учитывать, что в интерпретации авторов⁸ причиной таких сбоев стало ракурсное рассеяние на крупномасштабных анизотропных неоднородностях. Стоит отметить, что под сбоями в работе понималось отсутствие (пропуск) измерений на частоте L2.

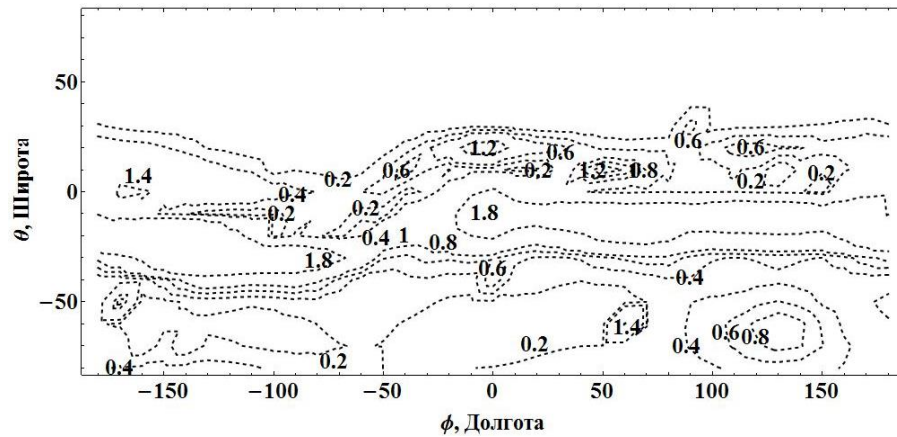
Моделирование распределения дисперсии флуктуаций фазы в зависимости от угла возвышения и азимута спутника выполнялось для приемника в Японии (34.4° с.ш. 134.7° в.д.) для моментов времени 12:00 UT и 13:00 UT (см. рис. 8), в соответствии с данными, представленными на рис. 2 в работе [8]. В качестве модели анизотропной неоднородности была выбрана модель анизотропного пузыря, вытянутого вдоль силовой линии магнитного поля и расположенной на высоте максимума ионосферного слоя в 300 км, со следующими параметрами: степень вытянутости $\alpha=10$; поперечный размер $l_{\perp}=10$ км; интенсивность в центре - $0.03 N_{\max}$, где N_{\max} – максимальный уровень концентрации фоновой ионосферы. Модель NeQuick была выбрана в качестве модели ионосферы. Также в соответствии с (16) эта модель определяет дисперсию неоднородностей.

Моделирование дисперсии флуктуаций фазы показало (рис. 8), что существенные «пики» флуктуаций фазы в присутствии анизотропной неоднородности возникают в моменты, когда спутник находится южнее приемника. Когда углы возвышения спутника малы, увеличение флуктуаций фазы связано с увеличением толщины неоднородного ионосферного слоя, через который проходит сигнал (ср. рис. 8а и 8б). При больших углах возвышения «пики» флуктуаций фазы связаны непосредственно с рассеянием на анизотропных неоднородностях. Также было выявлено, что только в присутствии анизотропных неоднородностей возникают сильные флуктуации при азимутах спутника от $140^\circ \div 220^\circ$ и углах возвышения $35^\circ \div 65^\circ$ (ср. рис. 8а и 8б), что соответствует минимальным углам между силовой линией магнитного поля и волновым вектором сигнала ГНСС (см. рис. 8в) – так называемый эффект магнитного зенита. В то же время присутствие изотропных неоднородностей не демонстрирует усиления флуктуаций при больших углах возвышения спутника.

⁸ First evidence of anisotropy of GPS phase slips caused by the mid-latitude field-aligned ionospheric irregularities / E.L. Afraimovich, A.B. Ishin, M.V. Tinin, Yu.V. Yasyukevich, S.G. Jin // *Advances in Space Research*. - 2011. - V.47. - P. 1674–1680.

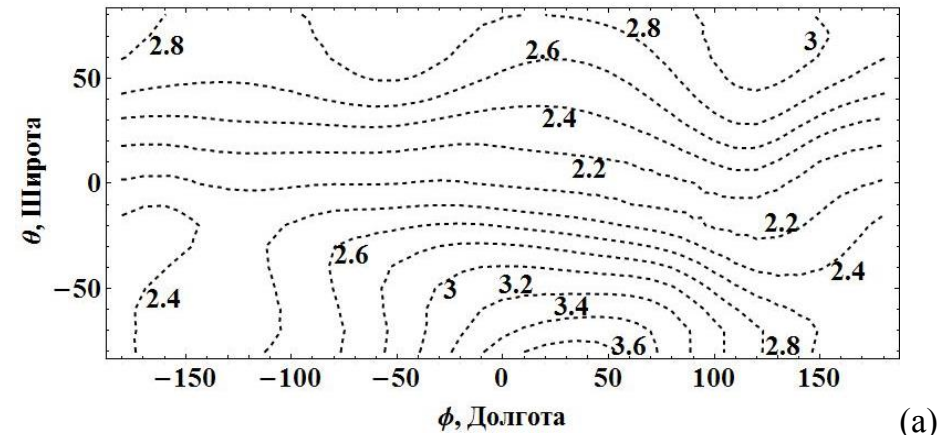


(a)

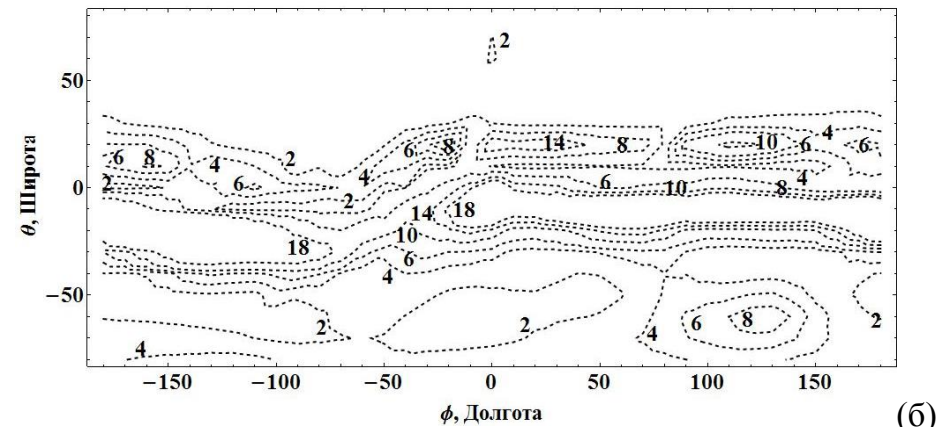


(б)

Рисунок 6 - Пространственное распределение дисперсии (14) флуктуаций фазы сигнала ГНСС (в дм^2) в случае анизомерных (а) и изомерных (б) неоднородностей для спутника с углом возвышения 40° и азимутом 0° . Отложенные по осям широты и долготы соответствуют координатам приемника



(a)



(б)

Рисунок 7 - Сравнение вкладов в дисперсию (14) флуктуаций фазы (в дм^2) эффектов от ракурсного рассеяния без учета (а) и с учетом пространственного распределения электронной концентрации ионосферы (б). Моделирование проводилось для спутника с углом возвышения 40° и азимутом 90° . Отложенные по осям широты и долготы соответствуют координатам приемника

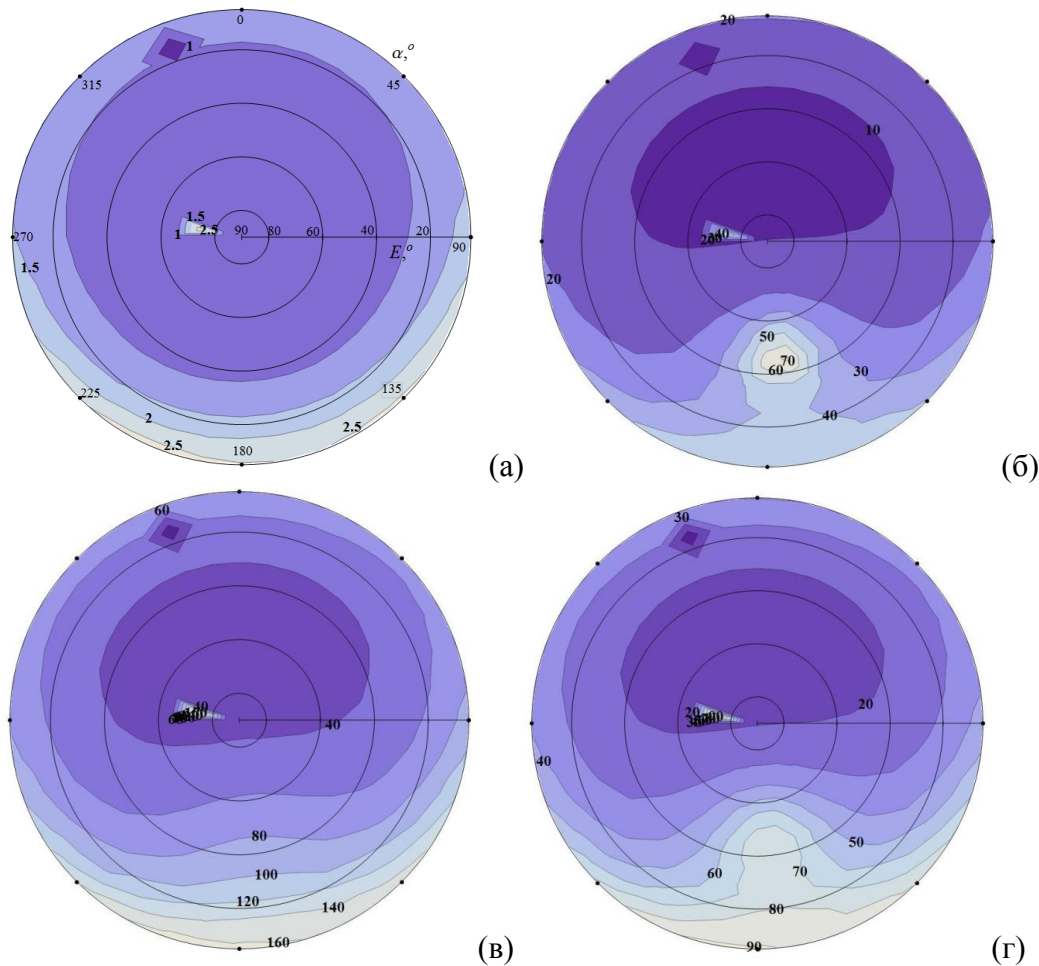
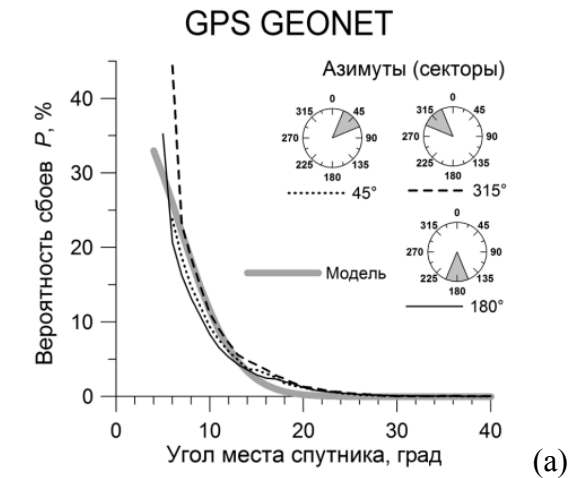


Рисунок 8 - Распределение дисперсии (14) флуктуаций фазы (в дм^2) сигнала ГНСС в координатах «угол возвышения - азимут» для приемника в пункте с координатами 34.4° с.ш. 134.7° в.д., 12 февраля 2000 г., в 12:00 UT в предположении об изомерии (а) и анизомерии неоднородностей с различными степенями вытянутости: $\alpha = 8$ (б), $\alpha = 2$ (в), $\alpha = 4$ (г)



GPS GEONET 12 февраля 2000 г.

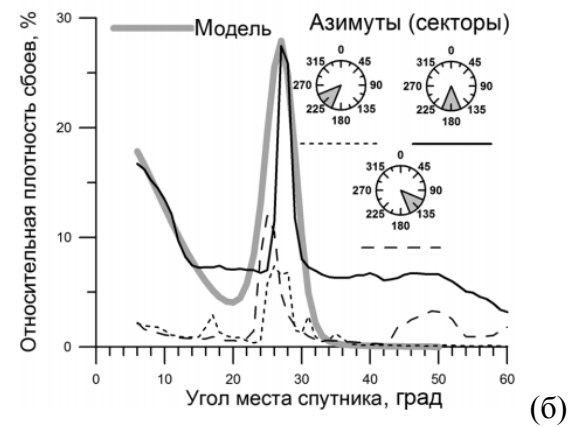


Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости плотности сбоев сопровождения фазы несущей от угла возвышения спутника для разных секторов по данным сети GEONET. Модельные расчеты сбоев (сплошная жирная серая кривая) проводились без учёта (а) и с учетом (б) магнитоориентированности неоднородностей

Моделирование флуктуаций фазы также проводилось для нескольких значений степени вытянутости неоднородностей (см. рис. 8а-г). Было получено, что при увеличении степени вытянутости неоднородности происходит усиление флуктуаций фазы, при фиксированных поперечном масштабе неоднородности и азимуте происходит уширение «пика» зависимости дисперсии фазовых флуктуаций от угла возвышения, а указанный «пик» смещается в сторону больших значений угла возвышения. Увеличение степени вытянутости при фиксированном угле возвышения не приводит к значительному увеличению набора азимутов, на которых флуктуации существенно увеличатся.

Как говорилось выше, превышение флуктуациями фазы порогового значения может вызывать сбои в работе приемника сигнала ГНСС, при этом связь вероятности возникновения сбоя с величиной дисперсии при пороге π имеет вид:

$$P_{slip} = \left(1 - \text{Erf} \left(\pi / \sqrt{2\sigma^2} \right) \right) \cdot 100\%. \quad (17)$$

Анализ зависимости вероятности возникновения сбоев (17) от угла возвышения и азимута спутника показал, что картина распределения зависимости (17) в координатах «угол возвышения - азимут» качественно не отличается от картины распределения дисперсии фазового пути принимаемого сигнала.

Для интерпретации результатов измерений пространственно-временного распределения относительной плотности сбоев^{8,9}, с помощью (14)- (17) было проведено численное моделирование вероятности возникновения сбоя. Моделирование в спокойные дни показало хорошее качественное совпадение экспериментальных и модельных (серая кривая) данных для фоновой ионосферы с изомерными ($\alpha = 1.0$) неоднородностями (см. рис. 9а). Подчеркнем, что под относительной плотностью сбоев понималось отношение числа приемников, на которых произошел сбой сопровождения фазы сигнала к общему количеству приемников, работающих в данный момент времени.

Для объяснения эффекта появления двух максимумов в распределении относительной плотности сбоев (рис. 9б) к модели фоновой ионосферы (модель Чепмена) была добавлена модель анизомерного «пузыря» ионизации со степенью вытянутости $\alpha = 3$, содержащего анизомерные неоднородности и представляющего собой гауссову область. Таким образом, было выявлено, что только присутствием анизомерных неоднородностей может быть объяснено возникновение сильных флуктуаций фазы не только при малых углах возвышения, но и при азимутах спутника от $140^\circ \div 220^\circ$ и углах возвышения $35^\circ \div 65^\circ$ (ср. рис. 8а и 8б-г, а также рис. 9а и 9б). Также стоит отметить, что возникновение сильных флуктуаций для указанных азимутов и углов возвышения спутников, связанное с уменьшением угла между силовой линией магнитного поля и волновым вектором сигнала ГНСС (см. рис. 9) соответствует так называемому эффекту магнитного зенита^{8,10}.

⁹ Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // А.Б. Ишин, М.В. Тинин, И.В. Безлер, Е.В. Конечкая // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2016. – Т. 59, №12/2, Ч.1: Распространение радиоволн : тематический выпуск. - С. 88-92.

¹⁰ Романова Н.Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar. 2015. P. 157-160.

Выводы

1. Показано, что погрешность приближения тонкого слоя, используемого для упрощения вычисления ионосферной ошибки второго порядка, связанной с влиянием геомагнитного поля на скорость ГНСС сигнала, не превышает миллиметра, что сопоставимо с погрешностями измерений фазы. Сделан вывод о допустимости использования приближения тонкого слоя при вычислении ионосферной ошибки второго порядка.

2. Проверка влияния точности задания параметров ионосферы, а также выбора модели ионосферы и магнитного поля Земли на величину ионосферной ошибки второго порядка показала, что существует очень слабая зависимость величины ошибки второго порядка от точности задания высоты максимума ионосферного слоя. В тоже время неточное определение полного электронного содержания ионосферы вносит существенные искажения в величину вычисляемой ионосферной ошибки второго порядка, достигающие 50% от самой величины ошибки. Выработаны рекомендации по выбору параметров геомагнитного поля.

3. Впервые была представлена методика одновременного учета ионосферных ошибок первого и второго порядка, а также – устранения ошибок неточного определения ПЭС вдоль луча «спутник-приемник». Особенность этой методики заключается в том, что информация о полном содержании ионосферы не требуется. Остаточная ошибка дальности после применения данной методики определяется точностью приближения тонкого слоя и не превышает десятой доли миллиметра, что на порядок ниже потенциальной точности фазовых измерений.

4. Представлены результаты анализа пространственного распределения дисперсии флуктуаций фазы принимаемого сигнала, обусловленной наличием на пути распространения сигнала ГНСС магнитоориентированных неоднородностей. Выполнено сравнение эффектов изомерных и анизомерных неоднородностей на возникновение флуктуаций фазы сигналов ГНСС. Показано, что в присутствии анизомерных неоднородностей усиливается флуктуационная составляющая фазовых измерений, а также возникает зависимость дисперсии флуктуаций фазы ГНСС измерений от ориентации трассы спутник-наблюдатель относительно силовой линии магнитного поля.

Полученные в настоящей работе результаты, а также методику обработки экспериментальных данных двухчастотных фазовых измерений глобальных навигационных спутниковых систем можно использовать в высокоточных геодезических измерениях для более точного определения положения опорных станций дифференциальной коррекции, коррекции дифференциальных кодовых шумов приемников, диагностике движения литосферных плит, мониторинге состояния атмосферы. Также выявленную связь между дисперсией фазы принимаемого сигнала и вероятностью возникновения срыва сопровождения фазы несущей сигнала ГНСС можно использовать в диагностике тонкой структуры ионосферы.

Публикации по теме диссертации

1. Тинин М.В. Остаточная ошибка второго порядка глобальной навигационной спутниковой системы / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая // XXIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн»: материалы всеросс. науч. конф. «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола, 24 - 26 мая 2011 г. - Йошкар-Ола, МарГТУ, 2011. – Т. 1. - С. 216 – 219.

2. Tinin M.V. Ionospheric Irregularities and Potentialities of Multifrequency Correction in Global Navigation Satellite Systems / M.V. Tinin, E.V. Konetskaya // General Assambley and Scientific Symposium URSI: Материалы докладов. Стамбул, Турция, август 2011 г. - Стамбул, Турция, 2011. doi 10.1109/URSIGASS.2011.6050862.

3. Конецкая Е.В. Возможность учета ионосферной ошибки второго порядка в двухчастотных глобальных навигационных спутниковых системах / Е.В. Конецкая, М.В. Тинин // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, XII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: Тезисы докладов. Иркутск, 19 - 24 сентября 2011 г. – Иркутск, 2011. - С.48.

4. Конецкая Е.В. Возможность учета ионосферной ошибки второго порядка в двухчастотных глобальных навигационных спутниковых системах / Е.В. Конецкая, М.В. Тинин // Труды XII конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом", 19-24 сентября 2011 г. - Иркутск, Изд-во ИСЗФ СО РАН. – С. 191-193.

5. Тинин М.В. Устранение эффектов геомагнитного поля в ионосферной ошибке спутниковых навигационных систем / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая // X Международная школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника: материалы докладов. Томск, Россия, 12 – 16 июня 2012 г. – Томск, 2012. – С. 136 – 138.

6. Tinin M.V. Possibilities of Eliminating Ionospheric Effects in Multifrequency Global Navigation Satellite Systems / M.V. Tinin, B.C. Kim, E.V. Konetskaya // Recent Advances in Satellite Research and Development / M.V. Tinin, B.C. Kim, E.V. Konetskaya. N.Y. : Nova Publishers, 2013. - P. 93-120. ISBN: 978-1-62417-443-8.

7. Тинин М.В. Влияние геомагнитного поля на ионосферную ошибку спутниковых навигационных систем / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая // Геомагнетизм и аэрномия. – 2013. - Т. 53. - № 6. - С. 788–796.

8. Тинин М.В. Повышение точности определения координат приёмника в двухчастотных измерениях ГНСС / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике : тезисы докладов XIII конференции молодых учёных "Взаимодействие полей и излучения с веществом". Иркутск, 9-14 сентября 2013 г. - Иркутск, Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2013. - С. 85.

9. Тинин М.В. Повышение точности определения координат приёмника в двухчастотных измерениях ГНСС / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая // Международная Байкальская молодёжная научная школа по фундаментальной физике : труды XIII конференции молодых учёных "Взаимодействие полей и излучения с веществом". Иркутск, 9-14 сентября 2013 г. - Иркутск, Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2013. - С. 236 - 238.

10. Тинин М.В. Повышение точности определения координат приёмника при учёте ионосферной ошибки второго порядка в двухчастотных измерениях глобальных навигационных спутниковых систем / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая – Электрон. Текстовые дан. // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) : сб. докладов. Красноярск, 12-13 сентября 2013 г. - Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2013. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM)

11. Тинин М.В. Учет эффектов магнитного поля Земли при обработке фазовых измерений ГНСС / М.В. Тинин, Е.В. Конецкая // XXIV всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн" : материалы конференции. Иркутск, 29 июня - 5 июля, 2014 г. Иркутск, ИСЗФ СОРАН, 2014.

12. Tinin M.V. Eliminating the second-order ionospheric error in dual-frequency global navigation satellite systems / M.V. Tinin, E.V. Konetskaya // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – V. 107. - P. 99-103. - doi: 10.1016/j.jastp.2013.11.011.

13. Geomagnetic effects on GNSS measurements / I.V. Bezler, A.B. Ishin, E.V. Konetskaya, A.V. Kulizhsky, M.V. Tinin, S.V. Voeykov // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6–9, 2015. Prague. - 2015. - P. 2021-2025. – URL : <http://www.piers.org/piersproceedings/piers2015PragueProc.php?start=400>.

14. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС / И.В. Безлер, А.Б. Ишин, Е.В. Конецкая, М.В. Тинин // Труды XXV Всероссийской конференции «Распространение радиоволн», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований. – Томск, 3-9 июля 2016. - Т.1. - С. 173-176. - ISBN 978-5-86889-733-7.

15. Влияние анизотропии ионосферных неоднородностей на работу ГНСС // А.Б. Ишин, М.В. Тинин, И.В. Безлер, Е.В. Конецкая // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2016. – Т. 59, №12/2, Ч.1: Распространение радиоволн : тематический выпуск. - С. 88-92.

16. Конецкая Е.В. Проблемы устранения ионосферной ошибки второго порядка в ГНСС измерениях [Электронный ресурс] / И.В. Безлер, Е.В. Конецкая, М.В. Тинин // Труды XXV Всероссийской конференции «Распространение радиоволн», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований. – Томск, 3-9 июля 2016.- 1 электрон.опт.диск (С-ROM) – Томск, 2016.

17. Конецкая Е.В. Эффекты магнитного поля Земли в работе ГНСС / Е.В. Конецкая, М.В. Тинин // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники». – Красноярск, 3 – 5 мая 2017. – С. 102-106.

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю, д. ф.-м. н., профессору М.В. Тинину; также автор благодарит Иванову В.Б. – за ценные комментарии, рекомендации, полезные замечания, полученные во время обсуждений материалов исследования, а также консультации при обработке данных; Ишина А.Б., Безлера И.В., Воейкова С.В., Ясюкевич Ю.В. – за полезные обсуждения, советы и предоставленные материалы для работы над диссертацией; всех сотрудников кафедры радиофизики и радиоэлектроники за участие и поддержку. Кроме этого, автор благодарит студентов физического факультета, обучающихся по специальности «Радиофизика и электроника» (выпуск 2014 г.) за предоставленную возможность использовать их личные компьютеры для набора статистического материала при проведении компьютерного моделирования.