

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

На правах рукописи

Конечкая Елена Викторовна

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

01.04.03 – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физ. – мат. наук, профессор
Тинин Михаил Валентинович

Иркутск – 2017

Введение.....	4
Глава 1 Ошибки ГНСС измерений и способы их устранения.....	17
1.1 Классификация типов ГНСС - измерений и источники ошибок этих измерений.....	17
1.2 Методики устранения не-ионосферных ошибок ГНСС измерений и предельная точность позиционирования современных ГНСС	26
1.3 Ошибки измерений ГНСС, возникающие из-за наличия магнитного поля Земли и ионосферы на пути распространения сигнала ГНСС, и методы их устранения.....	28
1.4 Выводы.....	35
Глава 2 Эффекты анизотропии ионосферы в работе ГНСС	36
2.1 Распространение сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в ионосфере.....	36
2.2 Двухчастотные измерения и остаточная ошибка этих измерений	40
2.3 Эффекты геомагнитного поля в ионосферных ошибках и приближение тонкого слоя. Границы применимости приближения тонкого слоя.....	42
2.4 Исследование погрешностей вычисления ионосферной ошибки второго порядка	49
2.4.1. Выбор модели геомагнитного поля при вычислении ионосферной ошибки второго порядка	51
2.4.2. Влияние точности задания ионосферного максимума на точность вычисления ионосферной ошибки второго порядка.....	58
2.4.3. Влияние точности задания полного электронного содержания на точность вычисления ионосферной ошибки второго порядка	61
2.5 Методика одновременного устранения ионосферных ошибок первого и второго порядков и ее границы применимости	65
2.6 Выводы.....	69

Глава 3 Эффекты анизотропии ионосферных неоднородностей в ГНСС измерениях	71
3.1 Ионосферные неоднородности. Детектирование неоднородностей с помощью измерений флуктуаций фазы сигналов ГНСС.....	72
3.2 Исследование зависимости дисперсии фазы сигнала ГНСС от углов прихода сигнала.....	75
3.3 Анализ ГНСС измерений в условиях роста дисперсии фазы сигнала ГНСС	81
3.4 Выводы.....	88
Заключение	89
Список литературы	91
Список рисунков	104
Благодарности.....	109
Приложение. Некоторые модели магнитного поля Земли	110

Актуальность и степень разработки темы исследования

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) являются наиболее распространенным инструментом в решении задач местоопределения приемного устройства, а также диагностики окружающей среды и иных научных задач. Преимущества спутниковых навигационных систем очевидны: доступность сервисов в любое время суток, время года и при любых погодных условиях. Однако наряду с такими преимуществами у спутниковых навигационных систем есть и недостатки – наличие ошибок, возникающих при распространении сигнала от спутника к приемнику [1-11].

Основной вклад в величину ошибки ГНСС вносит ионосфера, в которой лежит большая часть пути сигнала спутниковых систем [12 - 13]. Из-за того, что Земля обладает собственным магнитным полем, ионосферная плазма является магнитоактивной, а некоторые ионосферные неоднородности вытягиваются (ориентируются) вдоль силовых линий магнитного поля [14 - 16]. При этом в магнитоактивной плазме изменяется показатель преломления, из-за чего изменяется скорость распространения сигнала [17 - 18], а на магнитоориентированных неоднородностях происходит анизотропное рассеяние распространяющегося сигнала ГНСС [19 - 20]. Первый эффект магнитного поля Земли принято называть эффектом анизотропии ионосферы, второй эффект – эффект анизотропии ионосферных неоднородностей. Оба описанных выше явления оказывают влияние на точность и качество приема измерений ГНСС.

Как говорилось выше, эффект анизотропии ионосферы влияет на показатель преломления ионосферной плазмы и тем самым изменяет скорость распространения радиосигнала. Однако особенностью распространения высокочастотного сигнала ГНСС в ионосферной плазме является достаточно простая частотная зависимость показателя преломления [3, 8, 17-18], когда отличие показателя преломления от единицы может быть записано в виде суммы слагаемых по величине обратных степеням рабочей частоты ГНСС сигнала,

начиная со второй степени. При этом вклад каждого n -ого слагаемого в фазовый или групповой путь получает название ионосферной ошибки $(n-1)$ -го порядка [17 - 18]. Например,

- ионосферной ошибкой первого порядка принято называть слагаемое, учитывающее изменения фазовой скорости в ионосферной плазме без учета влияния магнитного поля Земли;
- ионосферная ошибка второго порядка обусловлена анизотропией ионосферы и учитывает влияние геомагнитного поля на показатель преломления;
- ионосферной ошибкой третьего порядка называется слагаемое, которое учитывает рефракционные эффекты искривления траектории распространения сигнала; и т.д..

В приложениях, не требующих высокой точности определения координат, обычно учитывают ионосферную ошибку первого порядка с типичными значениями в полтора – три метров в ночное время и максимум полтора десятка метров – в дневное время [21], при этом наиболее распространенным методом устранения ионосферной ошибки первого порядка является выполнение измерений на двух частотах. При этом точность двухчастотных измерений определяется и ограничивается, в основном, ошибкой второго порядка и является достаточной для многих приложений. Однако 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, этой точности уже не достаточно. Поэтому задача учета и коррекции ионосферной ошибки второго порядка, как вносящей наибольшую погрешность (после ионосферной ошибки первого порядка) в измерения ГНСС, является в настоящее время особенно актуальной.

Существующие методы учета ионосферной ошибки второго порядка предполагают два подхода [22 - 34]. В первом случае ионосферная ошибка второго порядка путем численного моделирования вычисляется непосредственно для каждой из рабочих частот, после чего вычитается из измерений ГНСС. Во втором

случае (и только для двухчастотных измерений) с помощью численного моделирования выполняется оценка остаточной ошибки измерений. Недостатком способов [22 - 34] вычисления ионосферных ошибок 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.

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 [3, 8, 17 – 18, 35 - 49]. 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 [19 – 20, 46 - 48].

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.

Объект и предмет исследования

В качестве объекта исследования в настоящей работе выступают ионосферные ошибки глобальных навигационных спутниковых систем, а также сбои сопровождения сигнала ГНСС, возникающие при распространении радиосигнала ГНСС в магнитоактивной случайно неоднородной ионосфере. Предметом исследования являются эффекты геомагнитного поля в измерениях ГНСС.

Цели и задачи

Целью настоящей работы является разработка методики устранения ионосферной ошибки второго порядка ГНСС для повышения точности определения координат приемника.

Для достижения поставленной цели решались следующие **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.

Методы исследования

В работе использовались методы численного моделирования распространения радиоволн в приближении геометрической оптики неоднородных анизотропных сред. В качестве моделей ионосферы использовались модели Чепмена и NeQuick. В качестве геомагнитного поля брались модели диполя магнитного поля и международная эталонная модель IGRF.

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)
- ФГБОУ ВО «ИГУ», грант на проведение НИР аспирантами и молодыми сотрудниками ФГБОУ ВО «ИГУ», № 091-16-214.

Список публикаций

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.

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 аэрономия. – 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-РОМ) – 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.

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 объем диссертации

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

Содержание работы

Во **введении** даны общая характеристика работы и краткое описание ее содержания; показана актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы; указана практическая и теоретическая значимость исследования и сформулированы основные положения. Также указываются конференции и симпозиумы, где была проведена апробация результатов диссертационной работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы, посвященной существующим ошибкам ГНСС, классифицированы ошибки ГНСС измерений по источникам происхождения и проанализированы преимущества и недостатки существующих методик устранения этих ошибок. Указаны потенциальные точности ГНСС, достижимые при условии использования представленных методик устранения ошибок. При этом особое внимание уделено наиболее интересной с точки зрения повышения точности приема ионосферной ошибке второго порядка как количественной оценка эффектов анизотропии ионосферы.

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 как позиции точности вычисления величины ионосферной ошибки. Представлена и описана методика учета ионосферной ошибки второго порядка, проанализирована эффективность использования этой методики.

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

В **заключении** приведены основные результаты, полученные при выполнении работы.

Глава 1 Ошибки ГНСС измерений и способы их устранения

1.1 Классификация типов ГНСС - измерений и источники ошибок этих измерений

Один из наиболее простых методов современного спутникового позиционирования базируется на решении задачи трилатерации: если известны расстояния D_i от трех спутников (навигационного космического аппарата - НКА) с известными координатами $\{X_i^{Sat}, Y_i^{Sat}, Z_i^{Sat}\}$ до приемника, то все возможные позиции этого приемника расположены на поверхности трех сфер с радиусами, соответствующими рассчитанным расстояниям. При этом искомое местоположение приемника – точка $\{X, Y, Z\}$ пересечения всех трех сфер (рис. 1), координаты которой следует находить из системы уравнений [3, 7 - 11, 13, 50 - 54]:

$$\left(X - X_i^{Sat}\right)^2 + \left(Y - Y_i^{Sat}\right)^2 + \left(Z - Z_i^{Sat}\right)^2 = D_i^2, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1.1)$$

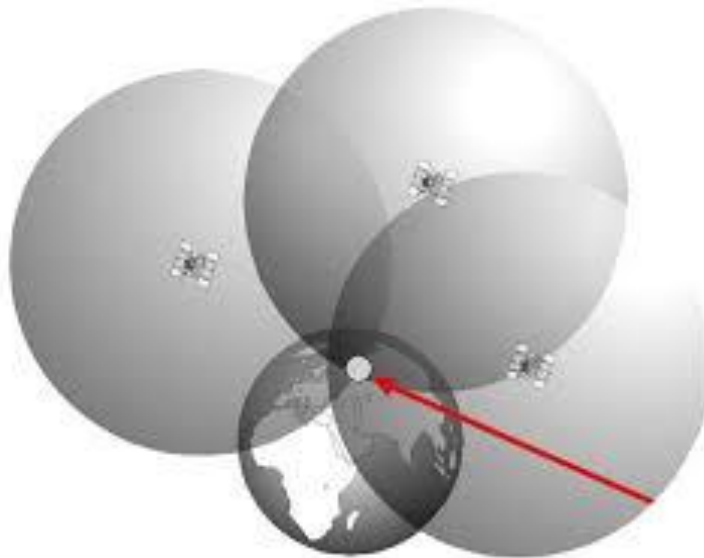


Рисунок 1—Определение позиции приемника по пересечению трех сфер.

Взято из работы [54]

В зависимости от того, какую физическую величину измеряют приемником ГНСС сигнала для нахождения расстояния D_i от i -го спутника до приемника, различают несколько режимов ГНСС измерений: кодовый, фазовый и доплеровский.

В кодовом режиме выполняется измерение времени $\Delta\tau$ распространения сигнала от спутника до приемника. Технически получение приемной аппаратурой информации о времени запаздывания производится следующим образом. Принимаемый непрерывный сигнал содержит периодически передаваемую метку – сведения о номере эпохи, по которой определяется время излучения $t_{изл}$ сигнала, в момент получения $t_{пр}$ сигнала производится сверка этих времен и вычисляется задержка $\Delta\tau = t_{пр} - t_{изл}$.

В фазовом режиме измеряемой величиной является мгновенная разность фаз $\Delta\varphi$ сигнала спутника и сигнала генератора приемника, которая определяется разностью между фазой колебаний, сгенерированных приемником в момент приема сигнала $\varphi_{пр}$ и фазой колебаний, сгенерированных спутником в момент его излучения $\varphi_{изл}$: $\Delta\varphi = \varphi_{пр} - \varphi_{изл}$. Стоит отметить, что в момент приема сигнала может быть измерена только дробная часть фазы несущей (доля целого цикла 2π), в то время как полное целое число циклов N остается неизвестным. При этом в кодовом режиме осуществляется абсолютное определение координат приемников (абсолютное позиционирование), а в фазовом и доплеровском режимах измерений - определение координат вектора базы (разности координат пунктов). Отметим, что в диссертационном исследовании будут рассматриваться измерения, полученные только в фазовом и кодовом режимах.

Фазовый режим также сопровождается доплеровским режимом измерений, когда производится измерение фазы φ и скорости изменения фазы ΔV_φ [3, 6, 8-11, 13, 50 - 54]. Однако, в отличие от доплеровского режима, по фазовым измерениям появляется возможность более точного определения координат за счет относительной малости длины волны сигнала и высокого разрешения при

определении разности фаз. Также по доплеровским измерениям возможно определять скорость передвигающегося приемника [55].

Таким образом, из кодовых и фазовых измерений извлекают информацию о дальности – расстоянии между спутником и приемником [3, 6, 8-11, 13, 50 - 56]:

$$D_c = c \cdot \Delta\tau; \quad (1.2)$$

$$D_\phi = \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} + N \right) \cdot \lambda_i. \quad (1.3)$$

Здесь D_c - кодовые измерения дальности; D_ϕ - фазовые измерения дальности; c - скорость распространения света в свободном пространстве; N – целое количество циклов фазы, укладываемых на длине луча «спутник-приемник»; λ_i - длина волны принимаемого сигнала ГНСС. Следует подчеркнуть, что в правой части выражения (1.3) первое слагаемое является измеряемой величиной, а второе — получают из кодовых измерений.

Как говорилось ранее, все виды измерений подвержены искажениям, вследствие чего вычисляемая на основании измерений длина луча «спутник-приемник» (D_c или D_ϕ) становится отличной от истинной D_0 . Именно из-за наличия этих ошибок точка пересечения трех сфер (рис. 1) превращается в некоторую область, где может находиться приемник, вследствие чего определение координат приемника также осуществляется с некоторыми погрешностями.

Говоря обобщенно об источниках ошибок измерений глобальных навигационных спутниковых систем (рис. 2), выделяют следующие группы ошибок [3, 6, 8-11, 13, 50 - 57]:

1. аппаратно – программные ошибки бортовой и приемной аппаратуры:

- рассинхронизация бортовых часов спутника и часов приемника;
- дифференциальные кодовые задержки в частотных каналах приёмников и спутников;
- тепловые шумы антенн передатчиков и приемников;
- ошибки определения фазового центра антенны приемника и передатчика;

2. ошибки на трассе «спутник-приемник», связанные с наличием среды между спутником и приемником:

- ионосферная ошибка;
- тропосферная ошибка;
- многолучевость;

3. ошибки исходных данных:

- ошибки координат спутников, т.н. ошибки эфемерид;
- ошибки, связанные с выбором геодезической системы координат, в которой будут определяться координаты приемника и т.п. .



Рисунок 2 — Схематическое описание процесса возникновения ошибок измерений ГНСС. Взято из [58]

Рассмотрим механизм возникновения каждой из указанных здесь ошибок.

1. Поскольку получение информации о дальности из наблюдаемых сигналов ГНСС основывается на разностном методе обработки измеряемых физических величин, для точного определения временного запаздывания сигнала (либо опережения по фазе) необходимо, чтобы бортовые часы и часы приемника работали синхронно. Однако в силу технических причин полностью

синхронизировать часы невозможно, из-за чего возникает ошибка рассинхронизации часов $\Delta\tau_{sync}$ на борту спутника и часов приемника.

Рассинхронизация влечет за собой возникновение ошибки определения дальности

$c \cdot \Delta\tau_{sync}$ в кодовых измерениях и $\frac{c \cdot \Delta\tau_{sync}}{\lambda_i}$ в фазовых. Типичные значения

времени рассинхронизации – 3 нс, или 1 м в единицах измерения дальности.

Кроме этого, из-за инерционности цепей формирования высокочастотного сигнала на спутнике, существует различие между реальным моментом формирования сигнала (закладки информации о времени излучения) и временем, передаваемым в навигационном сообщении. Для фазовых измерений характерно также отличие от нуля начальных фаз на опорном генераторе, как спутника, так и приемника.

При обработке сигналов ГНСС в приемнике, а также при генерации сигнала на спутнике возникают погрешности (ошибки) в оценке псевдодальности, среди которых выделяют два типа: погрешности, связанные с групповой задержкой сигнала в высокочастотном тракте приемника/спутника, и погрешности, обусловленные следящими системами за задержкой кода и фазой сигнала. Первая группа погрешностей - т.н. дифференциальные кодовые задержки (ДКЗ), обусловлены тем, что в каналах приемника/спутника сигналы с различными частотами распространяются с различными дополнительными задержками [59 - 61]. Кроме того, ДКЗ подвержены сезонным и температурным вариациям. Типичные значения ДКЗ приемников и спутников ГЛОНАСС и GPS приведены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Типичные значения ДКЗ спутников и приемников [61]

	Задержка, нс	Погрешность определения дальности, м
Спутник GPS	5 ÷ 7	1,5 ÷ 2,1
Спутник ГЛОНАСС	-8,5 ÷ 24	до 7,2
Приемник (в каналах GPS)	-14 ÷ 21	до 6,3
Приемник (в каналах ГЛОНАСС)	-15,4 ÷ 17,2	до 5,16

Вторая группа погрешностей связана с наличием в высокочастотном тракте внутренних шумов, которые могут подавлять сигнал, в то время как отношение сигнал/шум приемника определяет точность процедуры сравнения принятого от спутника сигнала - с опорным [1-11, 50, 56 - 57].

Еще одним источником возникновения ошибок является неточное центрирование фазовых центров антенн спутника и приемника. Поскольку фактически прием сигналов ГНСС производится относительно фазовых центров антенн спутника и приемника, которые не совпадают с центром масс [1-11, 50 - 57, 62 - 64], возникает некое постоянное по величине смещение в величине дальности.

2. Среда, через которую проходит сигнал, в зависимости от высоты над уровнем Земли, обладает различными электропроводными свойствами, из-за чего выделяют слои атмосферы – ионосферу и тропосферу. В тропосфере, на высотах до 8—10 км в полярных, 10—12 км в умеренных и 16—18 км в тропических широтах, количество незаряженных частиц резко преобладает над количеством ионов. Слой выше 60 км, где количество нейтральных частиц уменьшается, а ионов – увеличивается, называется ионосферой. Диэлектрические проницаемости этих слоев из-за своего состава сильно отличаются и динамически изменяются с различными временными масштабами, причем причиной изменения ионосферного показателя преломления является как солнечная, так и геомагнитная обстановка, а для тропосферного показателя преломления - метеорологические условия. Ионосфера является диспергирующей средой, в которой фазовая и групповая скорости отличаются друг от друга: фазовая скорость ГНСС сигнала при распространении в ионосфере возрастает, а групповая — уменьшается [56]. Причинами динамического изменения диэлектрической проницаемости является как солнечная, так и геомагнитная обстановка. При этом происходит опережение фазы и запаздывание огибающей сигнала ГНСС [56]. Вследствие этого в кодовом режиме измеряемая дальность становится больше истинной, а в фазовом режиме — меньше истинной на одну и ту же некоторую величину ионосферной ошибки $|ΔD_{iono}|$ [3, 6, 8-11, 13, 50, 52, 56 — 57, 64 - 66].

Подчеркнем, что благодаря особенности распространения высокочастотного сигнала ГНСС в ионосфере, ионосферная ошибка $|\Delta D_{iono}|$ содержит несколько слагаемых D_n , называемых ионосферными ошибками n-го порядка (см. введение). Так, типичные значения ионосферной ошибки первого порядка D_1 в различных гео- и гелиофизических условиях лежат в пределах от полутора – трех метров в ночное время и до полутора десятков метров – в дневное время [21] при угле возвышения спутника более угла отсечки (10 - 15 градусов). При углах возвышения спутника меньше угла отсечки ионосферная ошибка первого порядка увеличивается в 2 – 3 раза [7, 8, 21, 47, 50, 67 - 69]. В работах [70 - 72] была показана значительная роль эффектов магнитного поля (ионосферной ошибки второго порядка D_2) в высокоточных двухчастотных измерениях и были получены оценки вклада этих эффектов: от 2 до 4 см в зависимости от положения спутника.

В отличие от ионосферы, в тропосфере показатель преломления не зависит от частоты, однако влияние оказывают такие характеристики среды как давление, температура и влажность воздуха. При этом тропосферная ошибка ΔD_{trop} одинаково влияет и на фазовые, и на кодовые измерения, увеличивая измеряемые дальности [3, 6, 8-11, 13, 50, 52, 56 — 57, 64 - 66]. Типичные значения тропосферной ошибки составляют от 1 до 10 м.

Стоит отметить, что не только из-за изменения фазовой и групповой скоростей возникает отличие между истинной и измеренной дальностями. Еще одной причиной возникновения ошибок измерений являются неоднородности, как в ионосфере, так и в тропосфере. При прохождении через такую среду сигнал подвергается рассеянию и переизлучению, вследствие чего происходит искривление траектории распространения сигнала и увеличивается длина луча «спутник-приемник». Также наличие неоднородностей приводит к возникновению флуктуаций амплитуды и фазы [14 – 15, 17, 67]. Когда флуктуации фазы превышают целое число циклов 2π , происходит срыв слежения за фазой несущей, из-за чего следящая аппаратура теряет время на восстановление режима

слежения и получение нового решения навигационной задачи, вследствие чего понижается точность местоопределения приемника [14 – 15, 67 – 68].

Многолучевость — еще одна причина появления ошибок в ГНСС измерениях дальности [1-11, 13, 50, 53, 57, 64, 66]. Это явление заключается в том, что на антенну приемника поступают не только непосредственно сигнал ГНСС, но и сигналы, переотраженные от поверхности Земли, зданий и других объектов окружающей среды, либо обогнувшие мелкие препятствия вследствие дифракции. При этом результирующий сигнал, поступающий на обработку, будет искажен как по фазе - вследствие отражения и/или появления дополнительной разности хода, так и по амплитуде - вследствие интерференции приходящих сигналов. При этом стоит отметить, что ошибка $\Delta D_{multipath}$, обусловленная многолучевостью, является особенно важной для фазовых измерений, поскольку в них учитывается каждая приходящая волна.

3. Из-за случайных непрогнозируемых смещений спутников и постепенной деградации орбит прогнозируемые эфемериды спутников (координаты спутника в момент излучения навигационного сообщения) начинают отличаться от истинных, что непосредственно влияет на координатные определения приемника [1-11, 13, 50]. Еще одна причина неточного определения местоположения — ошибки при вычислении координат в привязке к различным системам координат, а также - при пересчете координат из одной системы в другую [1-11, 13, 50].

4. Кроме описанных выше источников ошибок из-за того, что спутники на своих орбитах находятся достаточно высоко над поверхностью Земли и скорости их движения составляют около 14 000 км/ч (3,874 км/с), на сигнал оказывают влияние релятивистские эффекты ΔD_{rel} и, вследствие разности гравитационных потенциалов - гравитационные эффекты. Также на ошибки в измеряемых дальностях оказывают большое влияние взаимное расположение спутников по отношению к приемнику — т.н. геометрический фактор [1-11, 13, 50].

Таким образом, модель получаемых приемником кодовых (1.2) и фазовых псевдодальностей (1.3) имеет следующий вид для кодовых D_c и фазовых измерений D_ϕ [1-11,47, 50 - 54, 56 – 57, 63, 64, 69]:

$$D_c = c \cdot t = D_0 - c\Delta\tau_{sync} + \Delta D_{instr}^{sat} + \Delta D_{instr}^{rec} + \Delta D_{ion} + \Delta D_{trop} + \Delta D_{multipath} + \Delta D_{rel} + \varepsilon; \quad (1.4)$$

$$D_\phi = \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} + N \right) \cdot \lambda_i = D_0 - c\Delta\tau_{sync} + \Delta D_{instr}^{sat} + \Delta D_{instr}^{rec} - \Delta D_{ion} + \Delta D_{trop} + \Delta D_{multipath} + \Delta D_{rel} + \varepsilon. \quad (1.5)$$

Здесь D_0 - истинное расстояние (дальность) от спутника до приемника; $c \cdot \Delta\tau_{sync}$ - погрешность определения расстояния, вызванная рассинхронизацией часов спутника и приемника; ΔD_{instr}^{sat} и ΔD_{instr}^{rec} - инструментальные ошибки, возникающие на спутнике и в приемнике соответственно, ΔD_{ion} - ионосферная ошибка; ΔD_{trop} - тропосферная ошибка; $\Delta D_{multipath}$ - ошибка определения дальности, обусловленная многолучевостью; ΔD_{rel} - ошибка, учитывающая релятивистские эффекты; ε - включает неупомянутые и неучтенные в данной работе ошибки измерений.

Несмотря на кажущееся большим количество ошибок, содержащихся в принимаемом измерении ГНСС (см. (1.4) и (1.5)), все описанные выше ошибки устраняются либо посредством моделирования и последующей коррекции, либо созданием специальных условий, в которых выполняются первичная и/или вторичная обработка измерений. Здесь под первичной обработкой понимают процесс получения кодовых или фазовых измерений аппаратурой потребителя (например, выполнение двухчастотных измерений), а под вторичной обработкой – обработку измерений, полученных на первом этапе обработки измерений, с целью вычисления координат аппаратуры потребителя (использование разностных методов обработки измерений).

Далее в общих чертах будут рассматриваться способы устранения не-ионосферных ошибок, а также большое внимание будет уделено методикам учета ионосферных ошибок и ошибок, связанных с наличием магнитного поля Земли.

1.2 Методики устранения не-ионосферных ошибок ГНСС измерений и предельная точность позиционирования современных ГНСС

Для определения координат потребителя существует несколько режимов позиционирования [53 – 54, 64, 66] с соответствующей целью определения координат приемника:

- абсолютный автономный, когда позиционирование выполняется при использовании единственного приемника и определяются координаты приемника в одной из международных систем координат;

- абсолютный режим с дифференциальной коррекцией, когда по измеренным координатам опорной станции определяются дифференциальные поправки к координатам остальных приемников, при этом координаты приемников также рассчитываются в международных или локальных системах координат;

- относительный режим, когда предполагается использование двух или более одновременно работающих приемников, причем один из работающих приемников выполняет роль опорной станции. При этом в первую очередь определяются т.н. базы или расстояния от текущего приемника до опорной станции, а после – выполняются преобразования относительных координат приемника в международные системы координат.

В зависимости от режима позиционирования существенными могут быть те или иные ошибки измерений [53 – 54, 64, 66]. Так, для абсолютного режима позиционирования все ошибки будут влиять на точность определения координат потребителя. При этом модели измерений будут соответствовать выражениям (1.4) и (1.5). Для устранения не-ионосферных ошибок, в зависимости от приемника, осуществляются следующие действия [1-11, 47, 50 - 54, 56 – 57, 63 – 64, 69].

1. Рассинхронизация бортовых часов и часов приемника минимизируется во-первых, с помощью непосредственной синхронизации часов спутника и приемника и введения высокостабильных опорных генераторов, во-вторых — с помощью алгоритмических методов, основанных на математических моделях поведения бортовых эталонов и позволяющих прогнозировать отклонение хода часов для каждого спутника индивидуально. Также возможно вычисление одинарной и двойной разностей либо между станциями, либо — между спутниками. Стоит отметить, что аппаратные и программные средства частичного либо полного устранения этой ошибки применяются и для дифференциальной коррекции, и для относительных измерений ГНСС. Так, в дифференциальном режиме остаточная ошибка не превышает $0.003 \div 0.03$ м.

2. Спутниковые инструментальные ошибки и инструментальные ошибки приемника чаще всего устраняются либо моделированием, либо — однократной или многократной калибровкой аппаратуры [60 - 61, 64]. При этом остаточная ошибка, сохраняющаяся после калибровки аппаратуры может составлять около 1 нс, или 30 см и меньше.

3. Тропосферные ошибки, благодаря слабой частотной зависимости, можно устранить следующими способами:

- использование моделей тропосферы (модели Нейла, Хопфилда, Саастаймонена, и т.д.) и последующее вычисление тропосферной ошибки;
- формирование разностей ГНСС - измерений;
- увеличение времени наблюдений;
- использование радиометров;
- использование данных метеостанций;
- использование широкозонных дифференциальных систем.

Стоит отметить, что тропосферная ошибка устраняется не полностью, но остаточная ошибка не превышает 0.015 ± 0.015 м.

4. Эффект многолучевости либо устраняются посредством дополнительной обработки (накопление и осреднение данных), либо созданием специальных благоприятных условий приема сигналов ГНСС, когда многолучевость или

подавляется или полностью исключается возможность ее появления [3, 6 – 7, 9 – 11]. Устранение посредством дополнительной обработки или подавления многолучевости чаще всего заключается в прогнозировании задержек и оптимальной обработке прямого и отраженного сигнала с последующим исключением отраженного сигнала из обработки. При этом в работах [3, 6 – 7, 9 – 11] говорится о возможности достижения миллиметровых остаточных ошибок после устранения эффекта многолучевости.

5. Релятивистские и гравитационные эффекты учитываются во внутренних алгоритмах аппаратуры НКА и потребителя с помощью математического моделирования [63]. В дифференциальном режиме эффективность определяется аппаратурными погрешностями приемника эталонной точки и объекта, расстоянием между ними, а также видом зависимости коэффициента корреляции эквивалентной дальномерной погрешности от расстояния и времени. Так, на практике эффективным считается использование режима дифференциальной коррекции при удалениях приемника от эталонной точки не более чем на 500 км. В относительном режиме позиционирования основными источниками погрешностей являются погрешности измерения относительной задержки сигналов, нестабильность генераторов; некомпенсированные остаточные погрешности, обусловленные ионосферной и тропосферной ошибками; а также погрешности, обусловленные неточностью знания о положении спутников.

1.3 Ошибки измерений ГНСС, возникающие из-за наличия магнитного поля Земли и ионосферы на пути распространения сигнала ГНСС, и методы их устранения

Как говорилось выше, в ионосферной ошибке условно выделяют несколько различных эффектов, которые благодаря высоким рабочим частотам являются аддитивными составляющими ионосферной ошибки:

- изменения фазовой скорости в ионосферной плазме без учета геомагнитного поля (ионосферная ошибка первого порядка D_1 с типичными

значениями в пределах от полутора – трех метров в ночное время и до полутора десятков метров – в дневное время [21] при угле возвышения спутника более угла отсечки);

- изменения фазовой скорости в ионосферной плазме с учетом эффектов магнитного поля Земли. В частности, эффект анизотропии ионосферы, качественно выраженный ионосферной ошибкой второго порядка D_2 с типичными значениями до 4 см в различных гео- и гелиофизических условиях;

- эффект неоднородной структуры ионосферы, в частности выраженный в появлении зависимости сбоев ГНСС измерений от ориентации трассы спутник-наблюдатель относительно силовой линии магнитного поля Земли из-за вытянутости (анизотропии) ионосферных неоднородностей.

Подчеркнем, что приведенные выше составляющие ионосферной ошибки указаны в порядке убывания величины вклада в общую величину ионосферной ошибки.

В случае работы одночастотного приемника в абсолютном автономном режиме позиционирования устранение ионосферной ошибки производится только путем использования моделей ионосферы, либо «вшитых» в программное обеспечение приемника (например, модель GemTec [52] разработанная в Иркутском государственном университете, или модель Клобучара [73 - 74]), либо - используемых в постобработке сигнала. Недостатками такого подхода к коррекции ионосферной ошибки первого порядка является неполная компенсация ионосферной ошибки (устраняется до 50% - 75% от величины ионосферной ошибки [7, 8, 10]) и потребность в наличии внешней информации о состоянии ионосферы. При абсолютном (с дифференциальной коррекцией) или относительном режимах позиционирования учитывается, что на относительно небольших расстояниях между приемными устройствами, координаты которых необходимо определить, влияние ионосферы на результаты измерений одинаково как для базового, так и для передвижного приемников и его можно устранить вычислением разностей между измерениями двух приемников. Так, для высокоточных измерений необходимо иметь в радиусе 100 км базовую станцию,

либо – данные от сети базовых станций. Однако даже на расстоянии в 100 км между опорной станцией и приемником ионосферы вносит погрешность в измерения порядка 10 – 20 см [8, 50, 52]. Кроме того, для получения данных о поправках к измерениям ГНСС от сети базовых станций требуется достаточно много времени, что является недостатком при измерениях в режиме реального времени.

Более точным и оперативным, по сравнению с одночастотными приемниками и независимо от режима позиционирования, является использование двухчастотных приемников для устранения ионосферных ошибок первого порядка без разнесения приемников в пространстве. При двухчастотном приеме измерения фазовых псевдодальностей производят на двух частотах, после чего, используя «свободную от ионосферы» комбинацию измерений, вычисляют истинную дальность между спутником и приемником [1-3, 12], устраняя наибольшую составляющую ионосферной ошибки – ошибку первого порядка D_1 [1-3]. При этом погрешность определения дальности после устранения ионосферной ошибки первого порядка, по различным оценкам, составляет от нескольких единиц до двадцати сантиметров [52, 70 – 72, 75]. В эту величину входят ионосферные ошибки высших порядков: ионосферная ошибка второго порядка D_2 , связанная с наличием магнитного поля Земли; ионосферная ошибка третьего порядка D_3 , связанная с рефракционными эффектами искривления траектории из-за присутствующих в ионосфере неоднородностей и т.д. Ионосферная ошибка второго порядка D_2 двухчастотных измерений составляет от 1,5 до 4 см, ионосферная ошибка третьего порядка D_3 (без учета влияния мелкомасштабных случайных неоднородностей на которых возникают дифракционные эффекты) – меньше 0,5 миллиметра [22, 31 - 33, 70, 76 - 77].

Таким образом, в результате увеличения количества частот, на которых выполняются измерения, погрешность ГНСС уменьшается с десятков метров до нескольких сантиметров. Несмотря на то, что указанная точность является удовлетворительной для многих приложений, в последнее время из-за развития

технологий потенциальная инструментальная погрешность фазовых ГНСС измерений уменьшилась до 1 – 2 мм [3, 78 - 80]. Благодаря этому обстоятельству были открыты новые возможности использования ГНСС измерений в исследованиях деформаций земной поверхности, прогнозе землетрясений и в удаленном мониторинге состояния атмосферы. Для таких исследований ошибка двухчастотных измерений, включающая ионосферные ошибки второго и высших порядков и обычно называемая остаточной ошибкой, становится порядка самой измеряемой величины. Поэтому в настоящее время изучение остаточной ошибки становится все более актуальным. При этом особое внимание уделяется исследованиям ошибки второго порядка D_2 , связанной с влиянием магнитного поля Земли на показатель преломления ионосферной плазмы и тем самым на скорость распространения в ней ГНСС сигнала.

Так, авторами [70] предлагались упрощенные способы вычисления ионосферной ошибки D_2 , в приближении прямолинейного распространения сигнала ГНСС и с учетом искривления лучевой траектории. Также в работе использовалось приближение тонкого слоя, которое основывается на предположении о медленном изменении геомагнитного поля в пределах ионосферного слоя.

Позже, опираясь на приближение тонкого слоя и результаты работы [72], изучалось влияние ошибки D_2 на оценку точности определения положения GPS-станций [22, 24 - 27] и на коррекцию параметров орбит спутников, параметров вращения Земли, тропосферной задержки [23 - 24]. Было обнаружено наличие систематических смещений положения приемников в северном и южном направлении при учете ошибок D_2 в так называемых рутинных, ежедневных измерениях [22, 24]. Выявлены наиболее сильно подверженные влиянию ионосферных ошибок D_2 параметры, влияющие на точность геодезических измерений (здесь точность должна быть не менее нескольких миллиметров) [23]. Также в работах [63, 70, 81] были изучены возможности повышения точности позиционирования с учетом ионосферных ошибок высших порядков при анализе

реальных данных дифференциальных двухчастотных измерений в экстремальных условиях возникновения магнитных бурь.

На основе разработанных авторами [29] алгоритма и специального программного модуля для расчета ионосферных ошибок D_2 по навигационным данным проводилась оценка величины остаточной ошибки после учета ионосферной поправки с учетом искривления лучевой траектории и использованием реалистичной модели ионосферы [33, 82 - 83]. Было показано, что разница между величинами ионосферных ошибок второго порядка, вычисленными на двух несущих частотах ГНСС может достигать 30 мм, в зависимости от ориентации спутника относительно приемника. Отметим, что стандартным приемом устранения ионосферных ошибок в данных работах было либо – непосредственное вычисление ионосферной ошибки D_2 на каждой из рабочих частот с последующим вычитанием из полученных измерений, либо – вычисление остаточной ошибки и коррекция дальностей, полученных из свободной от ионосферы комбинации.

Еще одной методикой устранения ионосферной ошибки второго порядка является эмпирический вывод формулы вычисления и коррекции остаточной ошибки двухчастотных измерений при определении положения приемника для территории Германии [31]. Особенностью данной методики является то, что зависимость остаточной ошибки в двухчастотных измерениях определенного приемника от азимута спутника, при фиксированном угле возвышения, имеет форму замкнутой кривой, симметричной по азимутам α и $(360-\alpha)$. Каждая кривая для приемника с фиксированными координатами была аппроксимирована двумя окружностями, для которых были выведены аналитически формулы. Также была выведена зависимость самой остаточной ошибки от параметров окружностей. Позже, предложенные в работе [31] формулы для вычисления ионосферной ошибки D_2 были экстраполированы на территорию Европы [32] и весь земной шар [30], а в работах [33] были изучены границы применимости приближения, полученного в работе [72] при вычислении ионосферной ошибки D_2 .

Еще одной методикой устранения ионосферной ошибки второго порядка является введение трехчастотных измерений [3, 75, 84]. Предлагалось также подобно тому, как в двухчастотных измерениях исключается ошибка первого порядка, устранять ошибки первого и второго порядков в трехчастотных измерениях. Однако недостатком такого подхода является такая особенность многочастотных ГНСС измерений, как усиление шумов с увеличением числа частот [84 - 85].

Стоит отметить, что, несмотря на кажущееся многообразие методик устранения ионосферной ошибки второго порядка с помощью моделирования, принцип устранения один и тот же: вычисленную различными способами ионосферную ошибку второго порядка вычитают из измеряемой величины кодовой и/или фазовой псевдодальности. При этом для расчета величины ионосферной ошибки D_2 используют либо модель ионосферы, либо карты ПЭС, которые для одного и того же пункта приема могут давать величины ПЭС, существенно отличающиеся как друг от друга, так и от реальных значений ПЭС (из-за пространственной и временной изменчивости ионосферы). Поэтому кажется довольно затруднительным выполнение однозначных расчетов ионосферной ошибки второго порядка и последующее использование результатов для коррекции и устранения эффектов анизотропии ионосферы.

В качестве иллюстрации обзора, приведенного в разделах 1.2 и 1.3, в таблице 2 приведены типичные значения для проанализированных ошибок фазовых измерений, вносимых различными источниками, и величины остаточных ошибок (которые останутся после устранения ошибки) в различных режимах позиционирования.

Стоит отметить, что остаточные ошибки либо вычислены на основании утверждений или заключений о доле остаточной ошибки в величине конкретной ошибки, либо - на основании среднего арифметического значения остаточных ошибок. Очевидно, что каждый из приведенных эффектов одновременно с другими не вносит максимальный вклад в итоговую величину ошибки дальности, а кроме того, может взаимно устраняться или ослабляться с другими эффектами.

Таблица 2. Ошибки ГНСС. Данные взяты из работ [1-11,47, 50 - 54, 56 – 57, 63 – 64, 69]

Источник ошибок	Вносимые погрешности, м		
	Абсолютный режим позиционирования. Максимальная или типичная величина ошибки / остаточная ошибка	Дифференциальная коррекция, остаточная ошибка	Относительный режим позиционирования, остаточная ошибка
Синхронизация часов спутника и приемника	$1 / \leq 1$	$0.003 \div 0.03$	$0.003 \div 0.03$
Инструментальные ошибки бортового оборудования	≤ 7 / нет данных	нет данных	нет данных
Инструментальные ошибки приемника	≤ 2 / нет данных	нет данных	нет данных
Эффект ионосферы (ионосферная ошибка первого порядка)	$2 - 15 / 0 - 1$	(0.015 ± 0.01)	
Эффект ионосферы (ионосферная ошибка второго порядка)	$0 - 0.04 / 0 - 0.01$		
Эффект тропосферы	$2.3 - 20$	0.01 ± 0.01	
Искривление траектории сигнала	1.5	нет данных	нет данных
Многолучевость	$0.5 / 0.01$	0.01	0.01
Эфемериды	$1 / 0.01$	0.01 м при условии отдаления от базовой станции 20 км	0.01 м при условии отдаления от базовой станции 10 км
Релятивистские и гравитационные эффекты	$21 \div 30$	0.01	0.01

В данной главе было показано, что существующие на сегодняшний день методики устранения ошибок, имеющих не-ионосферное происхождение, позволяют добиться достаточно высоких показателей точности. Наряду с этим ионосферные ошибки с учетом эффектов магнитного поля Земли (ионосферные ошибки второго порядка D_2), как источники ошибок позиционирования, являются наиболее существенными для повышения точности позиционирования.

При анализе способов устранения ионосферной ошибки второго порядка D_2 было показано, что существующие методики имеют ряд недостатков. Так, при выполнении измерений на дополнительных частотах для устранения ошибок D_2 увеличивается зашумленность измерений, из-за чего также снижается точность. Для численного моделирования либо ошибки D_2 , либо остаточной ошибки 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, указывает на большие различия в полученных величинах ПЭС, что приводит к возникновению непредвиденных ошибок измерений.

Глава 2 Эффекты анизотропии ионосферы в работе ГНСС

В данной главе будет описан процесс распространения сигнала ГНСС в анизотропной ионосфере. Также будут проанализированы ионосферная ошибка второго порядка D_2 и остаточная ошибка двухчастотных измерений как характеристика точности двухчастотных измерений. Кроме того, в рамках исследования ионосферной ошибки второго порядка будут проанализированы границы применимости приближения тонкого слоя для вычисления этой ошибки. Также будут исследованы погрешности вычисления ошибки D_2 , вносимые неполным учетом таких параметров, как модель магнитного поля Земли, высоты максимума ионосферного слоя и величина полного электронного содержания ионосферы вдоль луча «спутник — приемник». Наконец, будет описана альтернативная методика учета ионосферных ошибок второго порядка одновременно с ионосферной ошибкой первого порядка в фазовых измерениях в абсолютном режиме позиционирования. Представленные результаты опубликованы в работах [86 - 87].

2.1 Распространение сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в ионосфере

Из-за того, что кодовые измерения в большей степени подвержены шумам, получить с помощью этих измерений высокоточные координатные и иные определения - невозможно. Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только фазовые измерения с потенциальной погрешностью координатных определений в 1 – 2 мм [3, 78 - 80]. Кроме того, так как рабочие частоты сигналов ГНСС выше на два порядка плазменных частот, а характерные масштабы ионосферы - больше длины волны сигналов ГНСС, описание измерений ГНСС в работе будет проводиться с помощью приближения геометрической оптики (ГО).

Так же, как в работах [17 - 18], временная зависимость гармонического ГНСС сигнала будет принята как $e^{i\omega t}$. Довольно часто в работах по распространению радиоволн используется зависимость в виде $e^{-i\omega t}$. В этом случае в последующих формулах нужно заменить i на $-i$.

В приближении ГО фазовый путь принимаемого и измеряемого ГНСС сигнала, распространяющегося в ионосфере, записывается следующим образом [88]:

$$\varphi(\mathbf{r}, \omega) = \int_0^s n(\mathbf{r}(s), \omega) ds. \quad (2.1)$$

В выражении (2.1) интегрирование ведется вдоль траектории $\mathbf{r}(s)$ сигнала ГНСС, соединяющей точки излучения $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}(0)$ и приема $\mathbf{r}_t = \mathbf{r}(s)$; $n(\mathbf{r}(s), \omega)$ - показатель преломления магнитоактивной ионосферной плазмы (Рисунок 3).

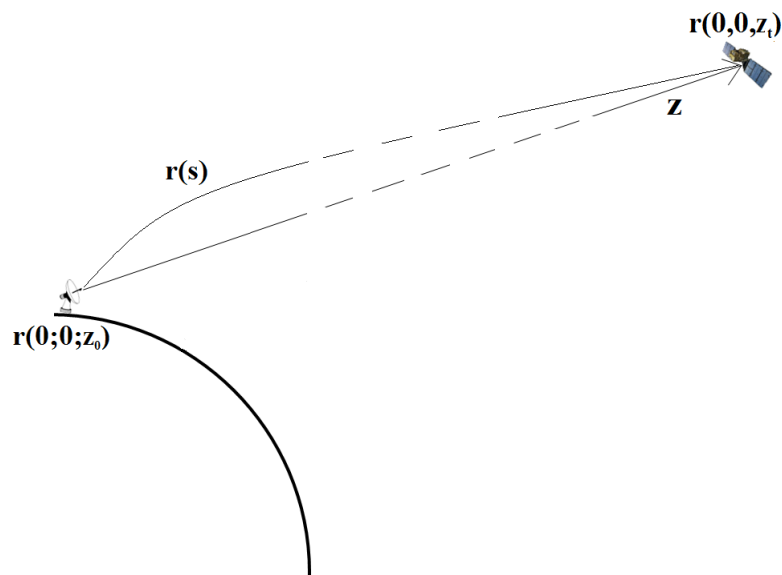


Рисунок 3 — Геометрия распространения сигнала от спутника к приемнику
(реальные пропорции не сохранены)

Вид показателя преломления определяется из соотношения (см. [17, 89])

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - i\rho Y \cos \vartheta}, \quad (2.2)$$

$$X = \omega_p^2 / \omega^2 = f_p^2 / f^2 = 80.6N / f^2,$$

$$Y = \omega_g / \omega = f_g / f = \frac{e\mathbf{B}_0}{2\pi mf},$$

где $f_p = \sqrt{80.6N}$ - плазменная частота; N - электронная концентрация; $f_g = \frac{e\mathbf{B}_0}{2\pi m}$, e и m - гирочастота, заряд и масса покоя электрона, соответственно; \mathbf{B}_0 - вектор напряженности магнитного поля Земли; \mathcal{G} - угол между \mathbf{B}_0 и направлением распространения волны \mathbf{k} , ρ - поляризация распространяющейся в ионосфере волны.

Входящая в формулу (2.2) поляризация ρ обыкновенной и необыкновенной волн, распространяющихся в магнитоактивной ионосферной плазме, определяется известным выражением [17, 18]. На частотах ГНСС, где $X = f_p^2 / f^2 = O(10^{-6})$, $Y = f_g / f = O(10^{-4})$, это выражение принимает простой вид

$$\rho_{1,2} = \pm i \operatorname{sign}(\cos \mathcal{G}) + O(Y) \quad (2.3)$$

Два знака в выражении (2.3) соответствуют обыкновенной (верхний знак) и необыкновенной (нижний знак) волнам. Важно отметить, что если показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн не зависят от знака $\cos \mathcal{G}$, то поляризация этих волн меняет знак вместе с $\cos \mathcal{G}$ (при изменении знака проекции магнитного поля на направление распространения), что означает возможность менять тип волны для определенной поляризации сигнала.

Так как ГНСС сигнал имеет правую поляризацию ($\rho = -i$), то из формулы (2.2), с учетом выражения (2.3), мы имеем

$$n = 1 - \frac{X}{2} [1 + Y \cos \mathcal{G}] + O(X^2) + O(XY^2). \quad (2.4)$$

Формула (2.4) получена для правополяризованного ГНСС сигнала, распространяющегося посредством как обыкновенной волны (при $\cos \mathcal{G} < 0$, когда спутник находится южнее, чем приемник), так и необыкновенной волны (при $\cos \mathcal{G} > 0$, когда спутник находится севернее приемника). Выражение (2.4)

может быть также получено из формулы (10) работы [90], если в последней пренебречь членами $O(X^2)$ и $O(XY^2)$.

Пусть ось z в нашей декартовой системе координат $\{x, y, z\}$ проходит через точки излучения $\mathbf{r}_0 = \{0, 0, z_0\}$ и приема $\mathbf{r}_t = \{0, 0, z_t\}$ (Рисунок 3). Тогда с учетом (2.4) формула для фазового пути примет вид:

$$\varphi = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} - 40.3 \frac{I_2}{f^3}, \quad (2.5)$$

где $D_0 = z_t - z_0$ - дальность спутника от наблюдателя;

$$I_1 = \int_{z_0}^{z_t} N(z) dz, \quad (2.6)$$

- полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы;

$$I_2 = \int_{z_0}^{z_t} N(z) f_g(z) \cos \vartheta(z) dz. \quad (2.7)$$

Таким образом, в соответствии с (1.5) ионосферная ошибка будет иметь следующий вид:

$$D_{iono} = D_1 + D_2, \quad (2.8)$$

где

$$D_1 = -40.3 \frac{I_1}{f^2}, \quad (2.9)$$

$$D_2 = -40.3 \frac{I_2}{f^3}. \quad (2.10)$$

Первое слагаемое ионосферной ошибки D_1 в (2.8) учитывает изменения фазовой скорости в ионосферной плазме без учета геомагнитного поля. Второе слагаемое D_2 в (2.8) учитывает влияние геомагнитного поля на показатель преломления и, следовательно, на фазовую скорость. Соответственно, первое слагаемое является ионосферной ошибкой первого порядка, а второе — ионосферное ошибкой второго порядка.

Ошибки третьего порядка, связанные с приближением (2.4) для показателя преломления обычно лежат в пределах 1–2 мм [37, 70, 91] и в данной работе не учитываются. Здесь также не удерживаются члены третьего порядка, связанные с переходом от интегрирования вдоль траектории луча в выражении (2.1) к интегрированию вдоль прямой $x = y = 0$ в выражениях (2.6) - (2.7). Стоит отметить, что переход к приближению прямолинейного распространения сигнала при наличии ионосферных неоднородностей может вызвать погрешности, соизмеримые с эффектами второго порядка [37, 85, 92-93]. Тем не менее, так как в работе исследуются эффекты второго порядка, то поправки третьего порядка в выражении (2.4) отброшены.

2.2 Двухчастотные измерения и остаточная ошибка этих измерений

Как говорилось во введении и разделе 1.3, эффективным способом устранения ионосферных ошибок является использование двухчастотных ГНСС измерений [1-3, 12]. Принцип устранения ошибок заключается в следующем: если в формуле (2.5) пренебречь эффектами второго порядка, получим формулу первого приближения:

$$\varphi = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} \quad (2.11)$$

При измерении фазы на двух частотах f_1 и f_2 , получаем систему:

$$\begin{cases} \varphi_1 = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f_1^2}; \\ \varphi_2 = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f_2^2}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Следует подчеркнуть, что задачу фазовой неопределенности (неоднозначности) в (2.12) мы считаем решенной.

Из системы (2.12) нетрудно найти, что в первом приближении истинная дальность примет выражение:

$$D_0^{(1)} = \frac{\varphi_1 f_1^2 - \varphi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.13)$$

Так называемая «свободная от ионосферы», комбинация (2.13) лежит в основе двухчастотных ГНСС измерений [1 – 3, 12]. При этом, не используя никакого моделирования ионосферы, устраняется ионосферная ошибка первого порядка и, тем самым, ионосферная ошибка ГНСС измерений снижается с десятков метров до сантиметров. Однако ионосферная ошибка второго порядка остается неучтенной.

Если ввести неучтенное третье слагаемое из формулы (2.5) в фазовые дальности (2.12), то в (2.13) появится дополнительное слагаемое, т.н. остаточная ошибка двухчастотных измерений *RRE* :

$$D^{(1)} = \frac{\left\{ D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f_1^2} - 40.3 \frac{I_2}{f_1^3} \right\} f_1^2 - \left\{ D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f_2^2} - 40.3 \frac{I_2}{f_2^3} \right\} f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \quad (2.14)$$

$$= D_0^{(1)} + RRE,$$

где

$$RRE = \frac{-40.3 \frac{I_2}{f_1} - \left(-40.3 \frac{I_2}{f_2} \right)}{f_1^2 - f_2^2} = -\frac{40.3 I_2}{f_1 f_2 (f_1 + f_2)}. \quad (2.15)$$

Таким образом, на величину остаточной ошибки влияет интеграл (2.7), входящий в выражение для вычисления ионосферной ошибки второго порядка (2.10). Причем если сравнивать величину остаточной ошибки (2.15) и ионосферную ошибку второго порядка (2.10), измеренную на частоте f_2 , то для рабочих частот GPS L1=1575,42 МГц и L2=1227,60 МГц остаточная ошибка *RRE* будет составлять 34% от D_2 :

$$\frac{RRE}{D_2(f_2)} = \frac{-\frac{40.3 I_2}{f_1 f_2 (f_1 + f_2)}}{-40.3 \frac{I_2}{f_2^3}} = \frac{f_2^2}{f_1 (f_1 + f_2)} = 34\%$$

Это означает, что при возможных значениях ионосферной ошибки D_2 в 2 — 4 см, будет некомпенсировано около 1 см. Поэтому дальнейшее уточнение ГНСС измерений связано с третьим слагаемым в правой части (2.5) – ионосферной ошибкой второго порядка.

2.3 Эффекты геомагнитного поля в ионосферных ошибках и приближение тонкого слоя. Границы применимости приближения тонкого слоя

Как было показано выше, ионосферная ошибка второго порядка, учитывающая влияние магнитного поля Земли на показатель преломления имеет следующий вид:

$$D_2 = \frac{-40.3}{f^3} \int_{z_0}^{z_f} N(z) f_g(z) \cos \vartheta(z) dz = -40.3 \frac{\int_{z_0}^{z_f} N(z) |e\mathbf{B}_0| \cos \vartheta(z) dz}{2\pi m f^3}. \quad (2.16)$$

Отметим, что в выражении (2.16) угол $\vartheta(z)$ - угол между векторами индукции \mathbf{B}_0 и направления распространения волны \mathbf{k} . Поэтому его можно определить из скалярного произведения вектора \mathbf{B}_0 и единичного волнового вектора \mathbf{k} (см. приложение):

$$\begin{aligned} \cos \vartheta(z) &= \frac{(\mathbf{B}_0(z); \mathbf{k}(z))}{|\mathbf{B}_0(z)| |\mathbf{k}(z)|} = \frac{(\mathbf{B}_0(z); \mathbf{k}(z))}{|\mathbf{B}_0(z)|} = \\ &= \frac{\mathbf{B}_x(z) \cdot k_x + \mathbf{B}_y(z) \cdot k_y + \mathbf{B}_z(z) \cdot k_z}{|\mathbf{B}_0(z)|}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Если рассмотреть взаимное расположение вектора индукции магнитного поля \mathbf{B}_0 и волнового вектора \mathbf{k} (см. рис. 4), то можно увидеть, что угол $\vartheta(z)$ в зависимости от местоположения приемника может быть как меньше 90° , так и больше (здесь и далее угол $\vartheta(z)$ определяется в точке z_m пересечения трассы «спутник-приемник» и максимума ионосферного слоя). При этом знак

ионосферной ошибки D_2 также будет меняться, увеличивая или уменьшая величину модуль ионосферной ошибки соответственно (см. формулу (2.8)).

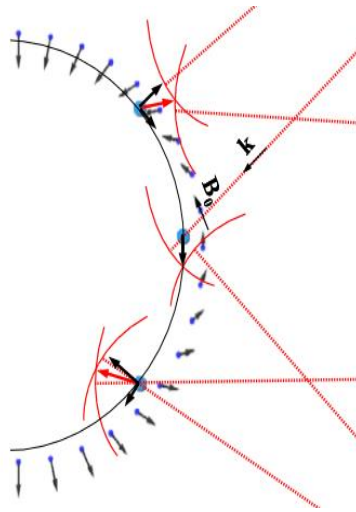


Рисунок 4 — Взаимная ориентация индукции геомагнитного поля Земли и волнового вектора. Взято из работы [22]

Кроме широтно-долготного пространственного распределения ионосферной ошибки второго порядка, существует зависимость ошибки D_2 от угла возвышения и азимута спутника. Так, на рисунках 5 и 6 представлены типичные зависимости ошибки D_2 от угла возвышения и азимута соответственно. В расчетах в качестве модели ионосферы был взят слой Чепмена:

$$N(h) = \frac{f_{кр}^2 \cdot e^{\frac{1}{2} [1 - \zeta - e^{-\zeta}]}}{80.6}, \quad (2.18)$$

где $\zeta = \frac{(h - h_0)}{H}$. Параметры слоя следующие: критическая частота $f_{кр} = 15 \text{ МГц}$; высота максимума слоя $h_0 = 320 \text{ км}$; характерный масштаб слоя $H = 70 \text{ км}$. При этом вертикальное ПЭС = 80 TECU (1 TECU = 10^{16} м^{-2}). Модель магнитного поля — диполь магнитного поля. Отметим, что данное моделирование проводилось с целью проверки корректности используемых алгоритмов вычисления ионосферной ошибки второго порядка.

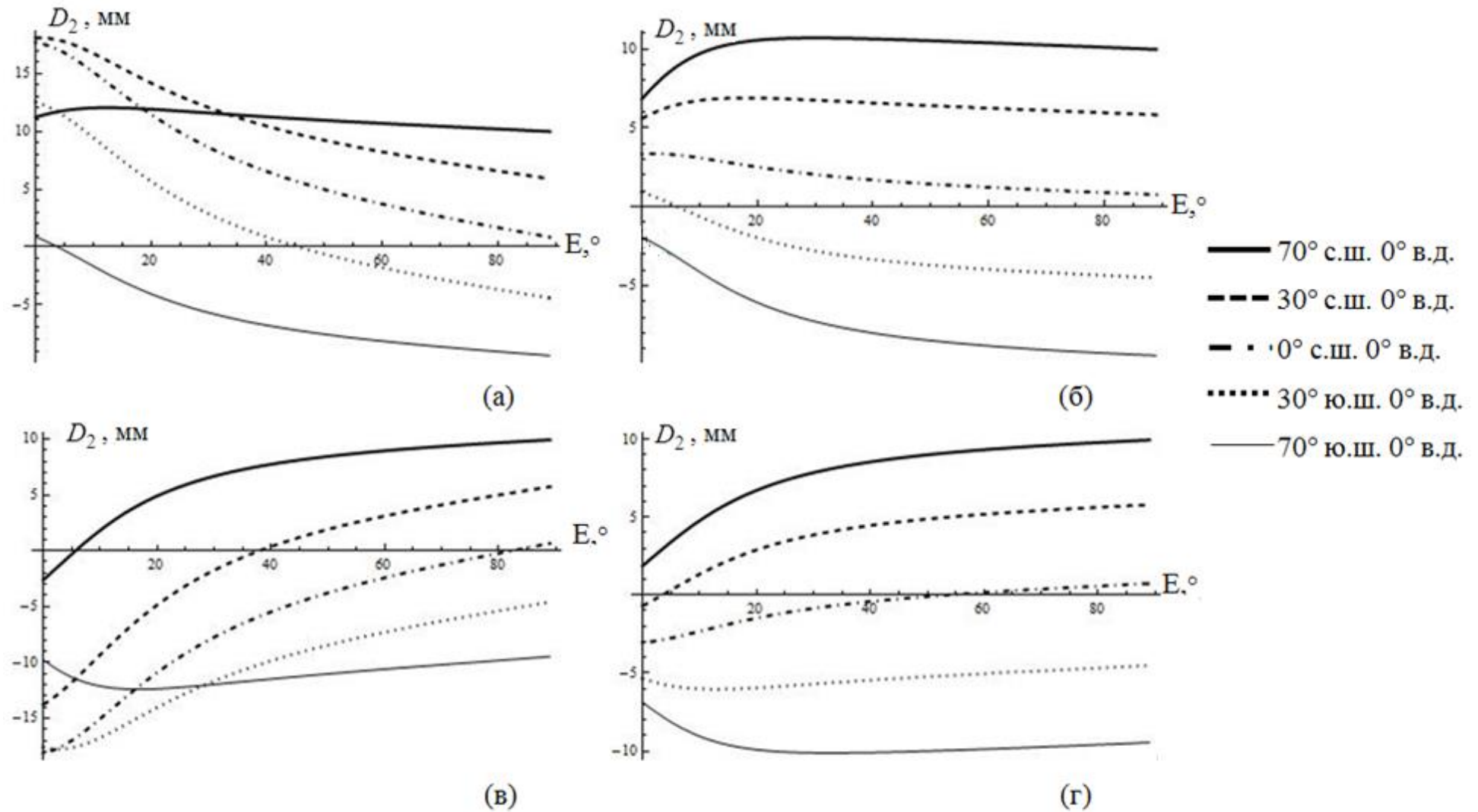


Рисунок 5 - Типичные зависимости ошибки D_2 (в мм) от угла возвышения спутника для различных положений приемника. Азимуты спутника: 0° (а), 90° (б), 180° (в) и 270° (г)

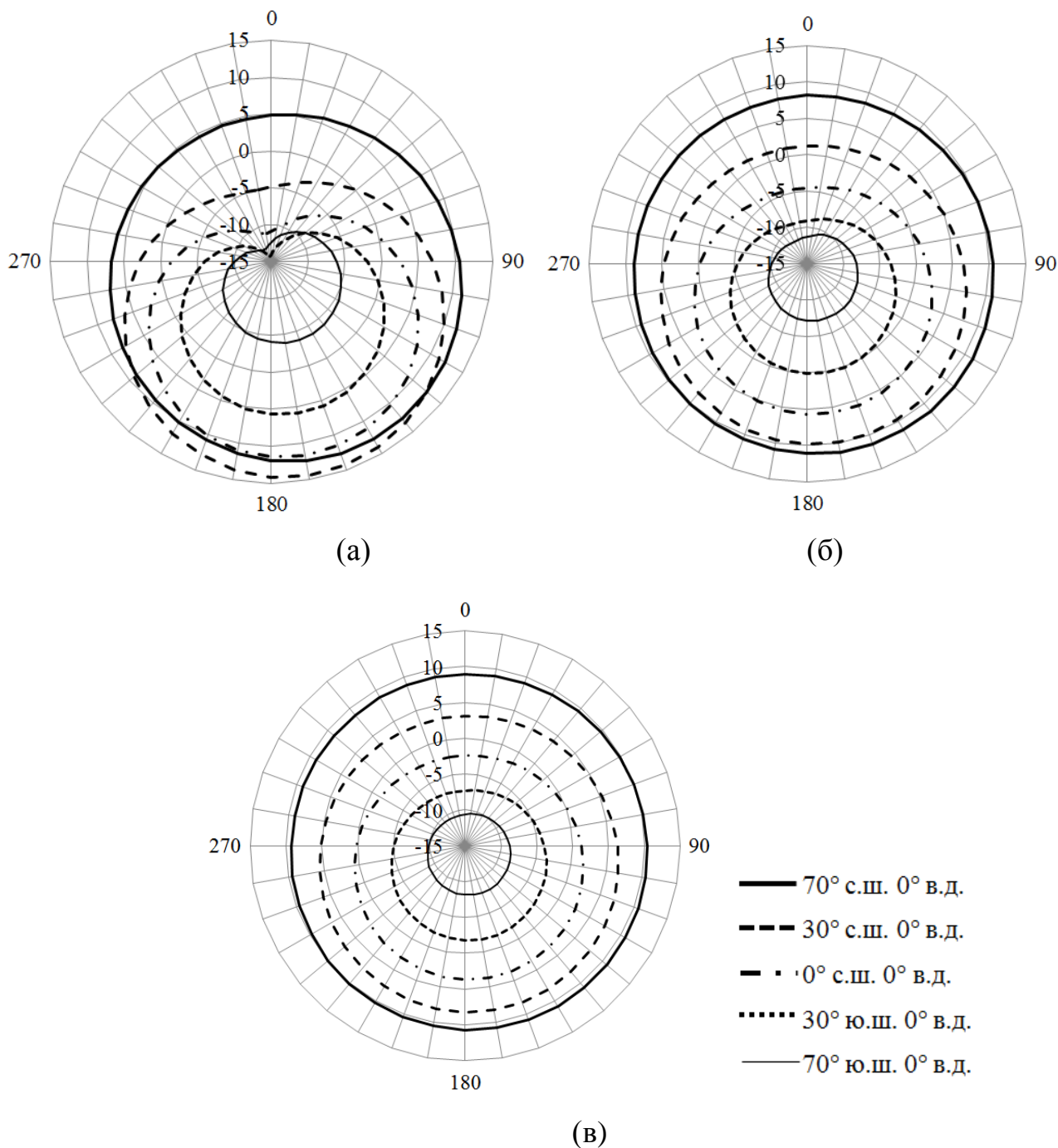


Рисунок 6 - Типичные зависимости ошибки D_2 (в мм) от азимута спутника для различных положений приемника. Углы возвышения спутника: 20° (а); 45° (б); 60° (в)

Из рисунков 5 - 6 видно, что с ростом угла возвышения спутника ионосферная ошибка зачастую увеличивается, либо – остается постоянной при углах возвышения больше 20° . Кроме этого, для подавляющего большинства расчетов азимутальная зависимость ошибки D_2 имеет форму, схожую с

зависимостью, представленной на рис. ба для приемников с координатами 30° ю.ш., 0° в.д. и 70° ю.ш., 0° в.д.. Таким образом, результаты моделирования хорошо согласуются с данными, полученными в работах [30 – 32, 52, 72 – 74].

Для упрощения процесса вычисления ошибки (2.16) в работе [72] было предложено так называемое приближение тонкого слоя, суть которого заключалась в предположении о медленном изменении магнитного поля Земли в ионосферном слое и связи интеграла I_2 (2.7) с полным электронным содержанием I_1 (2.6), учитывающей медленное изменение геомагнитного поля в пределах ионосферного слоя:

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_{z_0}^{z_t} N(z) f_g(z) \cos \vartheta(z) dz \approx f_g(z_m) \cos \vartheta(z_m) \int_{z_0}^{z_t} N(z) dz = \\ &= f_g(z_m) \cos \vartheta(z_m) I_1 = C_H \cdot I_1. \end{aligned} \quad (2.19)$$

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);

$$C_H = f_g(z_m) \cos \vartheta(z_m) = \frac{e(\mathbf{B}_0(z_m); \mathbf{k}(z_m))}{2\pi m} \quad (2.20)$$

- весовой коэффициент пропорциональности интеграла I_2 полному электронному содержанию I_1 , вычисленный на расстоянии z_m .

Таким образом, вычисление ошибки D_2 упрощается и выражение (2.16) примет окончательный вид:

$$D_2^{TL} = 40.3 \frac{C_H \cdot I_1}{f^3} \quad (2.21)$$

Здесь D_2^{TL} - ионосферная ошибка второго порядка, вычисленная в приближении тонкого слоя.

Поскольку, допустимость использования приближения (2.21) не была исследована с точки зрения потенциальных точностей фазовых измерений [3, 78 -

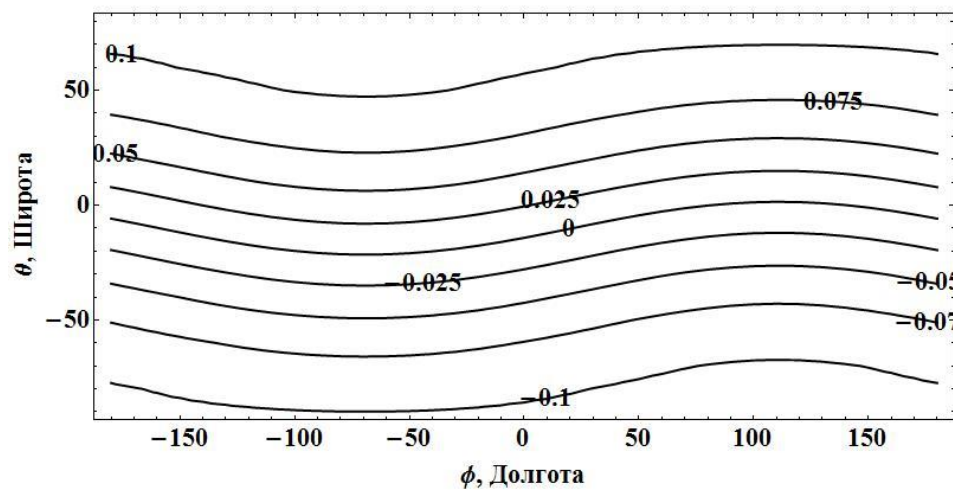
80] в данной работе была исследована погрешность использования приближения тонкого слоя:

$$\Delta^{TL} = D_2 - D_2^{TL} \quad (2.22)$$

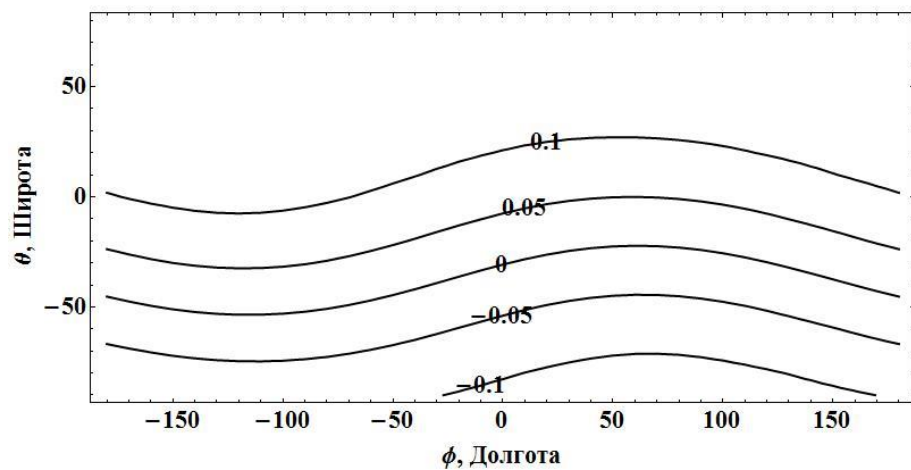
и проведено сравнение этой погрешности с погрешностями порядка 1 мм, вносимыми фазовыми приемниками [78 - 80].

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 приемники с фиксированным направлением на спутник — с одинаковыми азимутами и углами возвышения. Для каждого из лучей «спутник-приемник» моделировалась величина погрешности (2.22), после чего строились линии постоянного уровня погрешности Δ^{TL} .

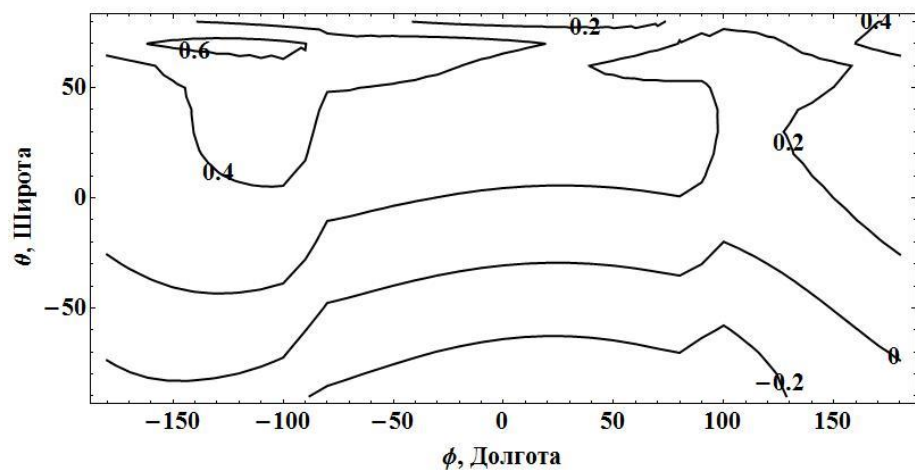
Рисунок 7 демонстрирует, что величина погрешности вычисления ошибки D_2 при ее вычислении с помощью приближения (2.22) очень мала. Проведенное нами моделирование для других условий показало, что при наихудших условиях приема сигнала (при угле возвышения, равном углу отсечки в 10°) по всему земному шару погрешность Δ^{TL} вычисления ошибки D_2 варьируется в пределах от 0 до 0,7 мм. На экваторе ошибка Δ^{TL} , вычисленная с помощью приближения (2.21), практически совпадает со своим точным значением D_2 . Стоит отметить, что полученные результаты достаточно хорошо согласуются с известными результатами моделирования и оценками [33, 72].



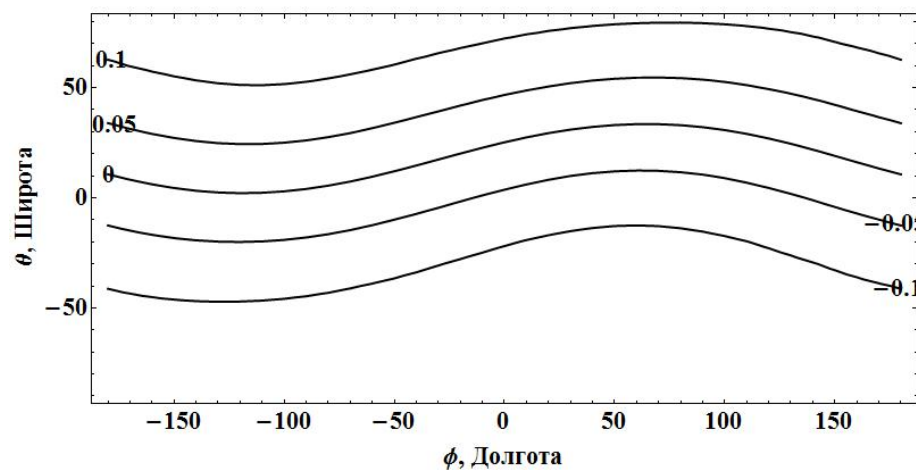
(а)



(б)



(в)



(г)

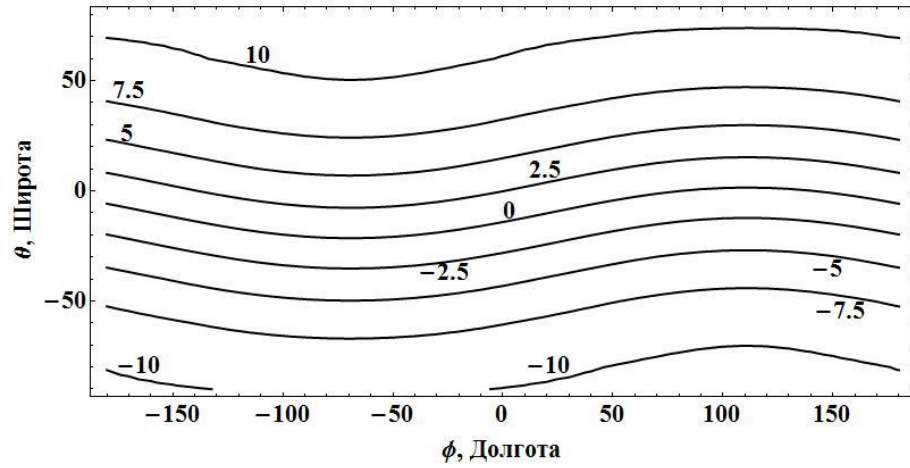
Рисунок 7 — Распределение (в мм) по Земной поверхности погрешности (2.22) использования приближения тонкого слоя: (а) — угол возвышения спутника 90° ; (б) угол возвышения спутника — 60° , азимут - 0° ; (в) угол возвышения спутника — 10° , азимут - 45° ; (г) угол возвышения спутника — 60° , азимут - 180°

Таким образом, приближение тонкого слоя позволяет очень точно вычислить значение ошибки D_2 , внося искажения, не превышающие величину минимальной потенциальной ошибки фазовых измерений. Благодаря этому приближению возможно дальнейшее исследование ионосферной ошибки второго порядка D_2 и ее устранение в двухчастотных фазовых измерениях. Поэтому далее в качестве формулы для вычисления ионосферной ошибки мы будем использовать выражение (2.21) и обозначать вычисленную ошибку как D_2 .

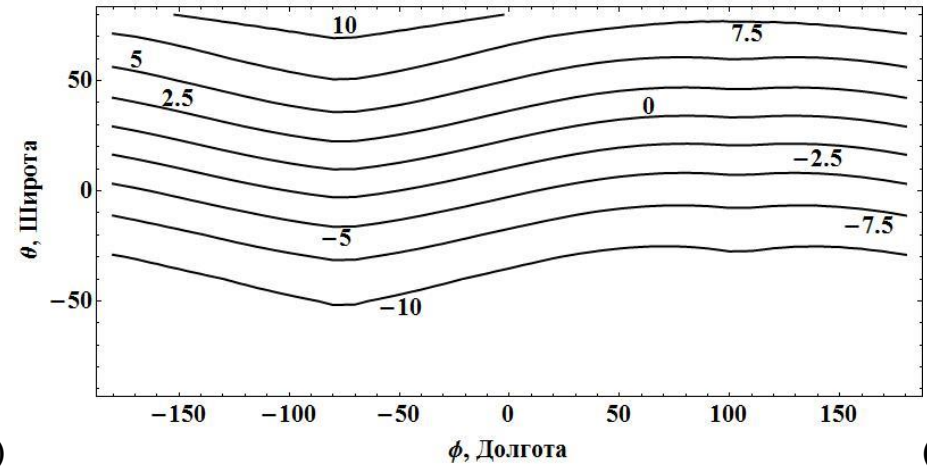
2.4 Исследование погрешностей вычисления ионосферной ошибки второго порядка

Для исследования ионосферной ошибки второго порядка можно проанализировать пространственное распределение ошибки D_2 . Моделирование распределения ионосферной ошибки второго порядка (2.21) для каждого из лучей «спутник-приемник» проводилось также как моделирование пространственного распределения погрешности приближения тонкого слоя (2.22). В качестве модели магнитного поля Земли взято поле магнитного диполя, модели ионосферы — слой Чепмена (2.18) с параметрами, приведенными на странице 43.

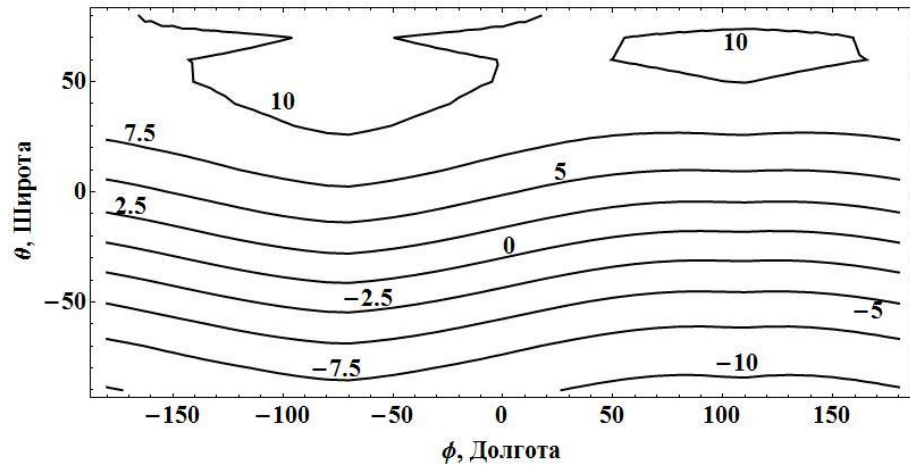
Из рис. 8 видно, что долготное распределение ошибки по Земной поверхности гармоническое. С ростом широты, на которой располагается приемник, ошибка D_2 возрастает, при выбранных моделях ионосферы и магнитного поля.



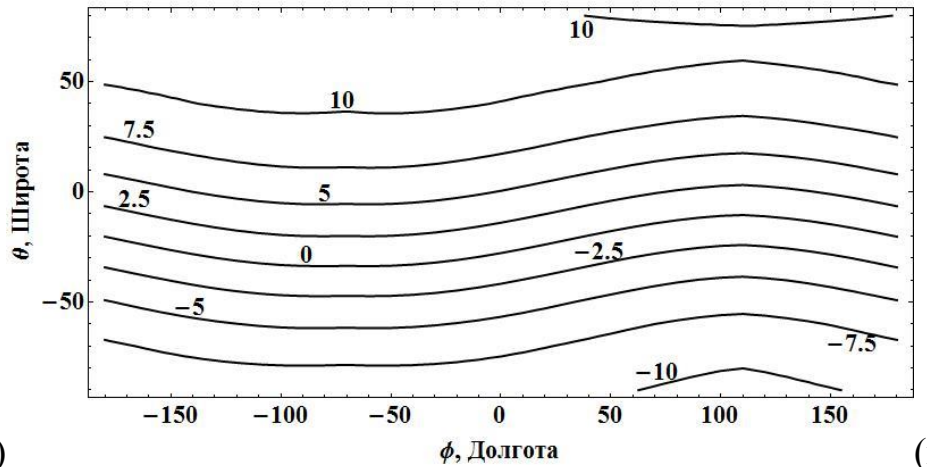
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 8 — Распределение (в мм) по Земной поверхности ионосферной ошибки второго порядка (2.21), вычисленной с использованием приближения тонкого слоя для различных положений спутника: (а) - для угла возвышения 20° и азимута -90° ; (б) - для угла возвышения 60° и азимута -90° ; (в) - для угла возвышения 20° и азимута -270° ; (г) - для угла возвышения 60° и азимута -270°

Однако, при вычислении ионосферной ошибки второго порядка возможны ситуации, когда один или несколько параметров, используемых в выражении (2.21), определены неточно. Поэтому в данном разделе будут 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».

2.4.1. Выбор модели геомагнитного поля при вычислении ионосферной ошибки второго порядка

Очевидно, что для вычисления ионосферной ошибки (2.21) необходимо использовать модель магнитного поля Земли. В первоначальных оценочных вычислениях ионосферной ошибки D_2 использовалась модель поля магнитного диполя [22, 72]. Утверждалось, что 75%-ной точности, достигаемой описанием магнитного поля с помощью поля магнитного диполя вполне достаточно. Однако впоследствии наиболее широко распространенной стала международная эталонная модель магнитного поля IGRF. Причиной этому стали результаты моделирования, в которых было показано, что модель IGRF описывает состояние геомагнитного поля Земли с большей достоверностью по сравнению с моделью поля магнитного диполя. По утверждениям [31] достигается 90%-ная точность в описании геомагнитного поля, точнее учитывается влияние солнечного ветра (рис. 9) и указываются магнитные полюса Земли. Однако ни в одной из работ не проводилось исследование выбора модели магнитного поля с точки зрения погрешностей фазовых измерений [78].

В приложении приведены аналитические выражения для индукции магнитного поля Земли в соответствии с моделью поля магнитного диполя и моделью IGRF.

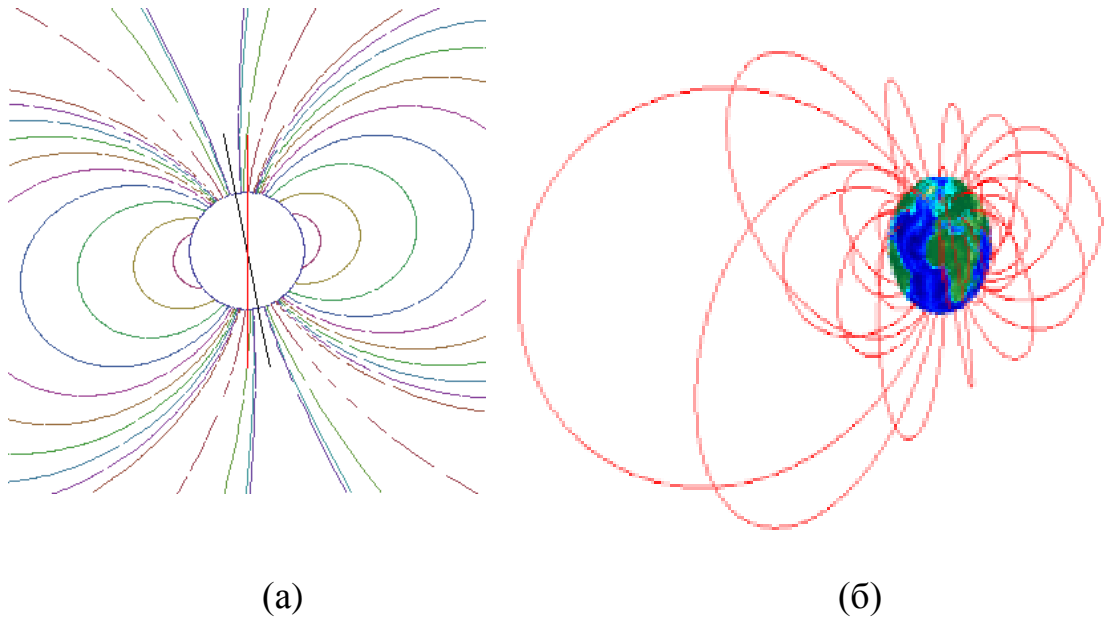


Рисунок 9 — Модели магнитного поля Земли (рисунок взят из работы [94]):

(а) диполь магнитного поля;

(б) международная модель магнитного поля IGRF [95]

Для оценки влияния используемой модели геомагнитного поля на точность вычисления ионосферной ошибки (2.21) были произведены расчеты поправок второго порядка для международной модели магнитного поля D_{2IGRF} (см. рис. 10 - 11) и для модели поля магнитного диполя D_{2Dip} (рис. 8).

Из рисунков видно, что главное отличие пространственного распределения поправки D_{2IGRF} с использованием модели IGRF заключается в более детальном и тонком описании напряженности магнитного поля, вследствие чего более точно учитывается взаимная ориентация волнового вектора и вектора магнитного поля, в отличие от модели диполя, где широтно-долготное распределение является гармоническим, а также не учитывается азимутальное распределение. Также при использовании модели IGRF видно, что распределение при азимутах 0° и 180° становится асимметричным: в южном полушарии ошибка становится больше, чем в северном.

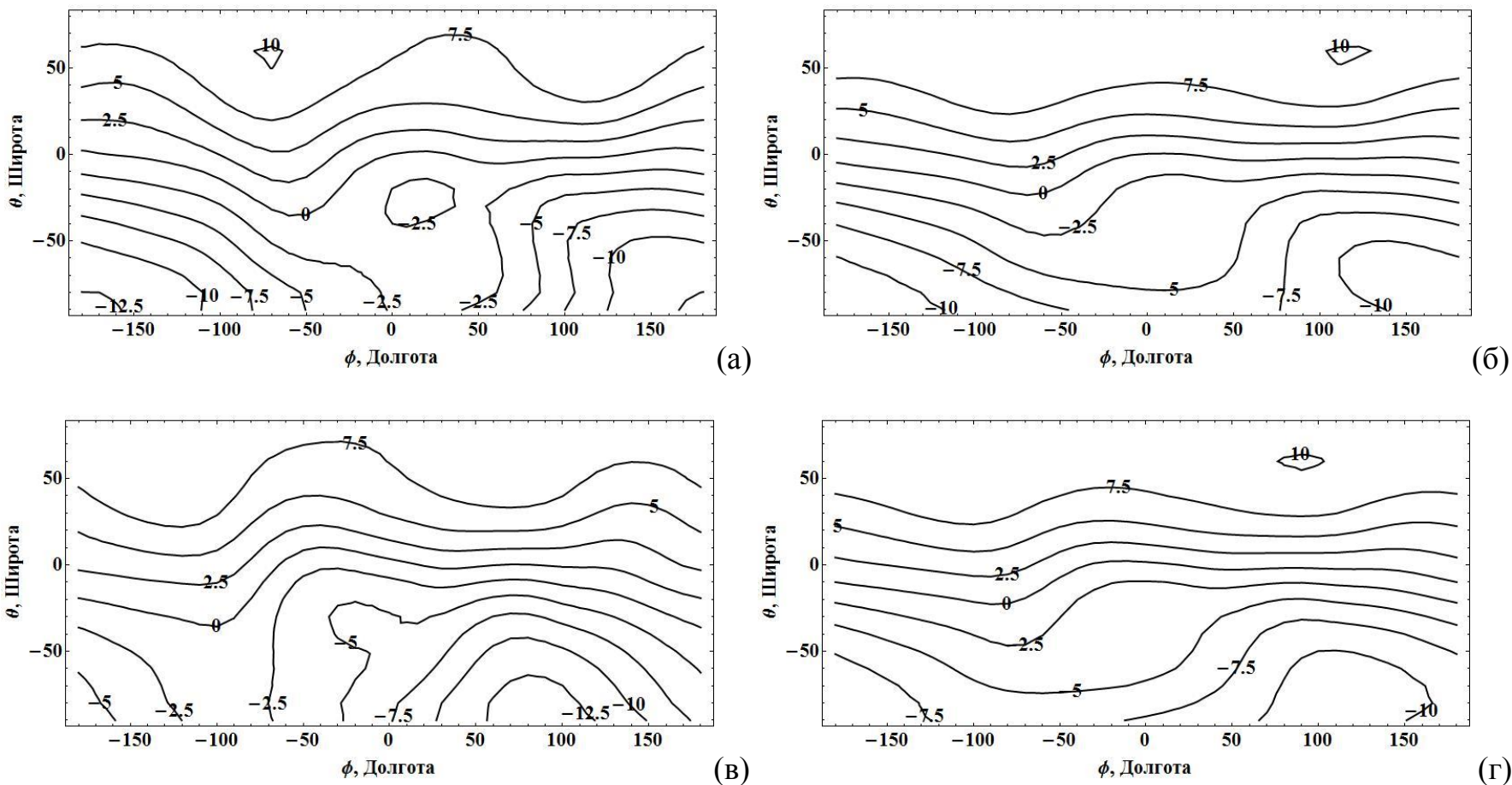


Рисунок 10 — Пространственное распределение (в мм) ионосферных поправок второго порядка D_2_{IGRF} , рассчитанных с использованием международной модели магнитного поля; (а) - для угла возвышения 20° и азимута -90° ; (б) - для угла возвышения 60° и азимута -90° ; (в) - для угла возвышения 20° и азимута -270° ; (г) - для угла возвышения 60° и азимута — 270°

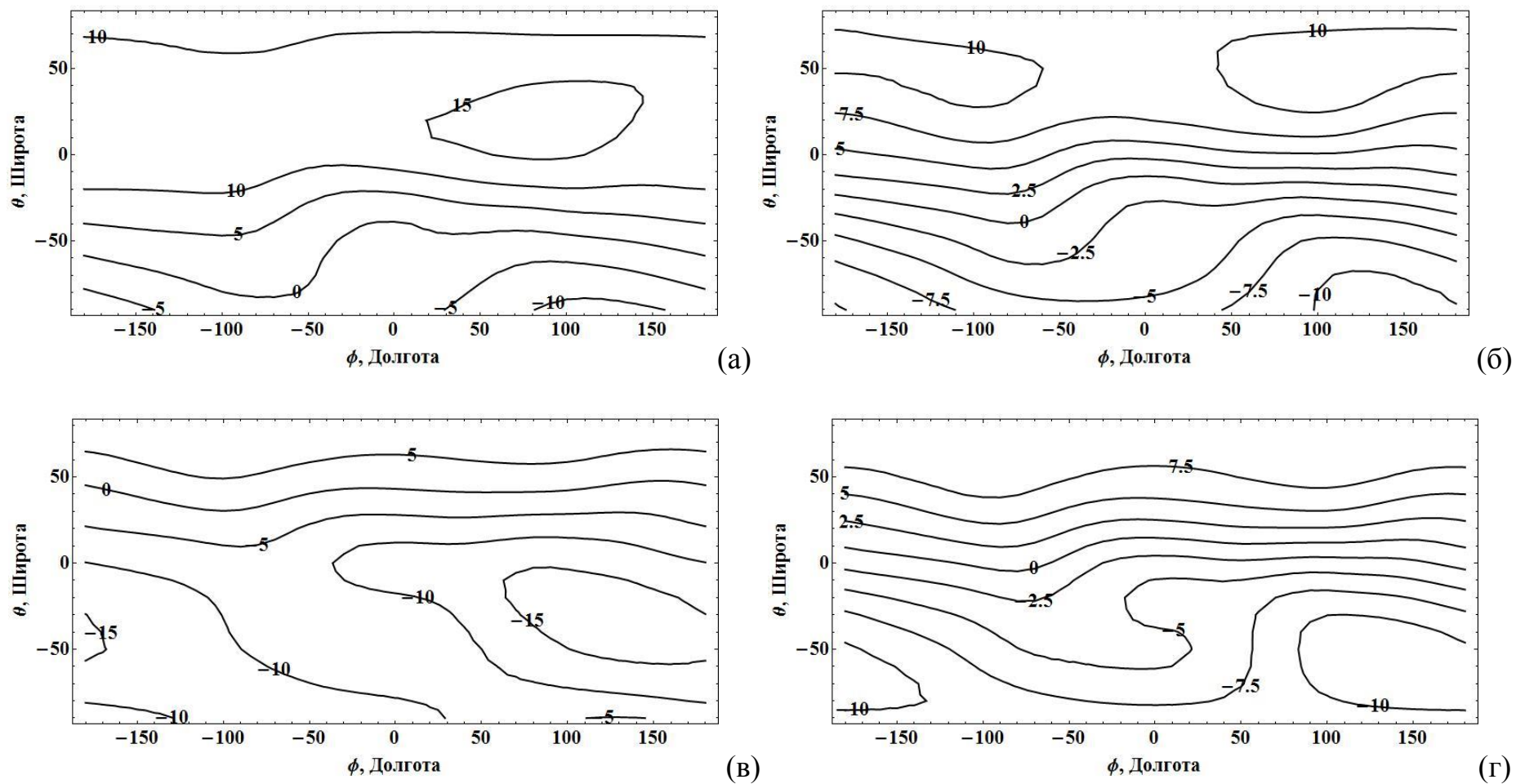


Рисунок 11 — Пространственное распределение (в мм) ионосферных поправок второго порядка D_2_{IGRF} , рассчитанных с использованием международной модели магнитного поля для углов возвышения и азимутов, соответственно: 20° и 0° (а); 60° и 0° (б); 20° и 180° (в); 60° и 180° (г)

Для анализа различий, возникающих в величине ионосферной ошибки второго порядка D_2 при использовании различных моделей магнитного поля было выполнено моделирование разности ошибок второго порядка, рассчитанных с помощью моделей IGRF и магнитного диполя: $\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$. В качестве модели ионосферы взят слой Чепмена (2.18) с параметрами, приведенными на странице 43.

Рисунки 12 - 13 демонстрируют при малых углах возвышения спутника достаточно большое расхождение ΔD_m , достигающее в некоторых областях 6 мм (рис. 13а). Стоит отметить, что даже 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 – 50 достигает 6 мм. Увеличение угла возвышения уменьшает ΔD_m (ср. рис. 13а и 13б, рис. 13в и 13г), но не устраняет полностью расхождений (рис. 12).

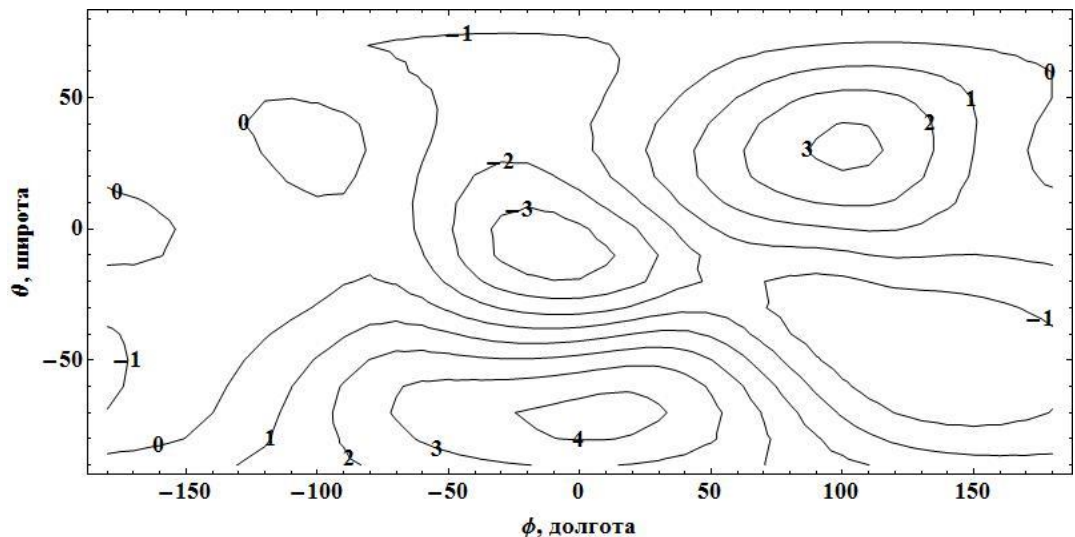
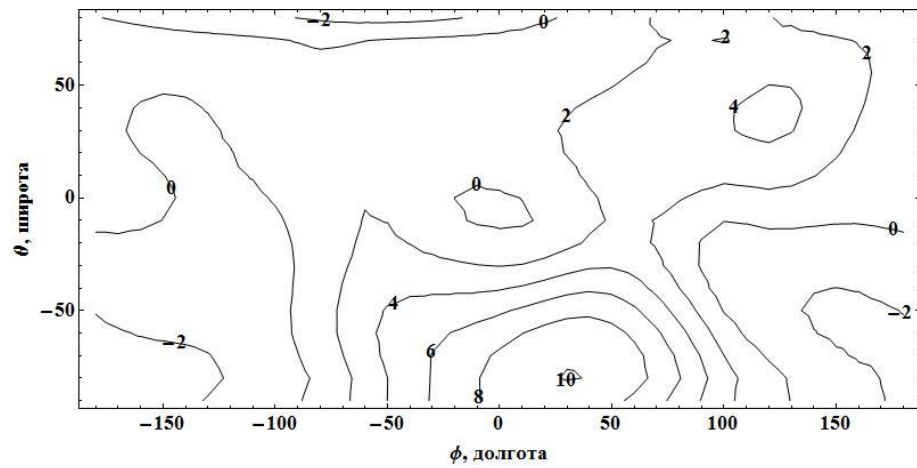
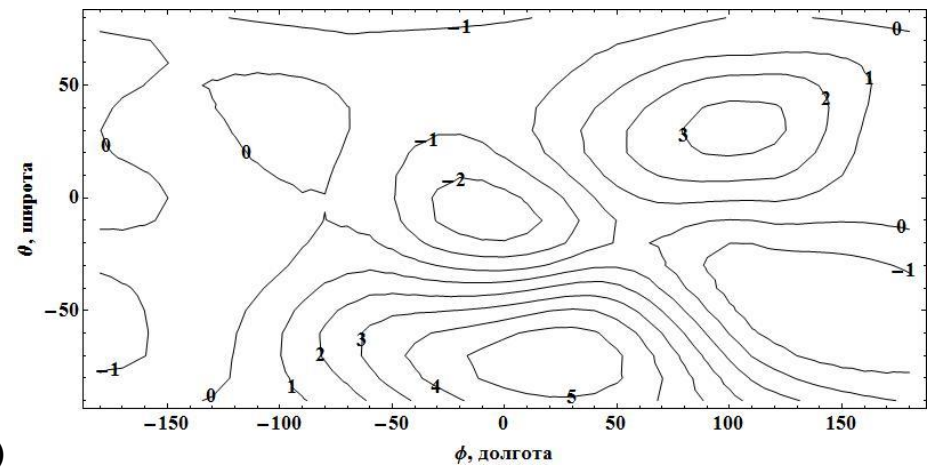


Рисунок 12 — Различие (в мм) поправок второго порядка

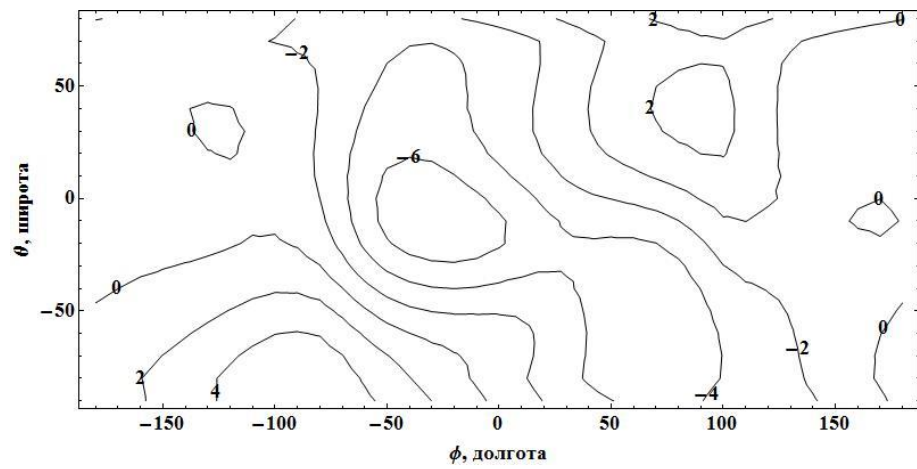
$\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$, рассчитанных с использованием различных моделей магнитного поля для угла возвышения 90°



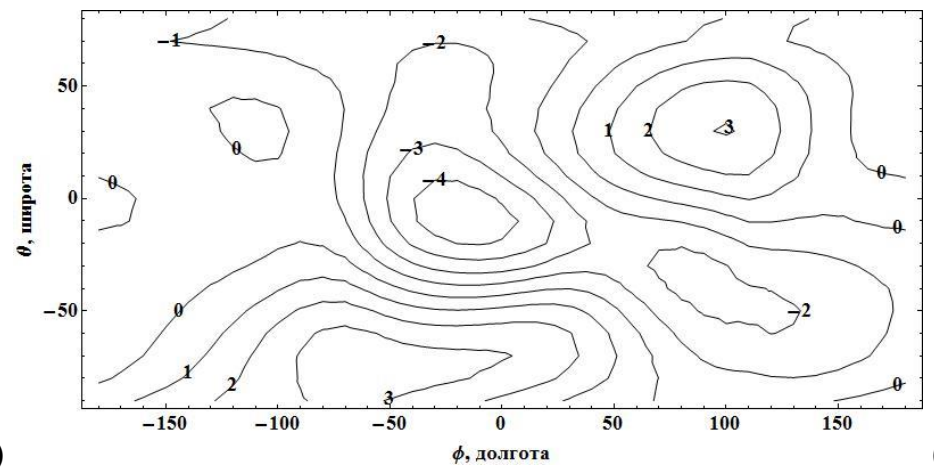
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 13 — Различия (в мм) поправок второго порядка $\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$, рассчитанных с использованием различных моделей магнитного поля. (а) - для угла возвышения 20° и азимута - 90° ; (б)- для угла возвышения 60° и азимута - 90° ; (в) - для угла возвышения 20° и азимута - 270° ; (г) - для угла возвышения 60° и азимута — 270°

Также следует отметить одну тенденцию: при различных параметрах спутника расхождение ΔD_m , с использованием двух моделей магнитного поля, в южном полушарии больше, чем в северном полушарии. Наибольшие значения расхождения ΔD_m достигаются в Антарктиде. Так, например, как показано на рис. 13а и рис.13б, в южном полушарии замена модели IGRF на модель магнитного диполя влечет за собой возникновение погрешности в вычислении ионосферной ошибки второго порядка, равной, в некоторых случаях, 10 мм. В то же время, в северном полушарии погрешность может не достигать даже значений в 2 мм. Кроме Антарктиды, есть и еще две, меньшие, области, где важен выбор модели магнитного поля: территория шириной в $\sim 50^\circ$ по долготе, на широтах от 30 до 60° с.ш, а также область на экваторе от 30° з.д. до 30° в.д.. В целом, в различных условиях, абсолютная величина разброса значений расчета эффектов второго порядка при использовании рассмотренных здесь моделей геомагнитного поля изменяется от 2 до 6 мм.

Однако существуют 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 1-2 мм по модулю [78 - 80], 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.

2.4.2. Влияние точности задания ионосферного максимума на точность вычисления ионосферной ошибки второго порядка

Для расчета коэффициентов C_H , используемых при вычислении ионосферной ошибки второго порядка, нужна информация о величине магнитного поля на высоте максимума ионосферного слоя h_0 (рис. 14).

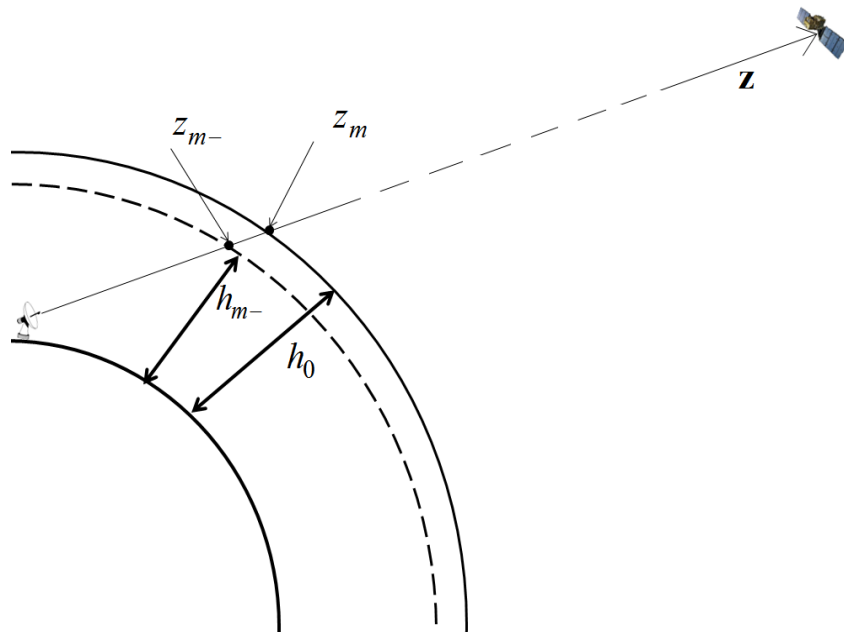


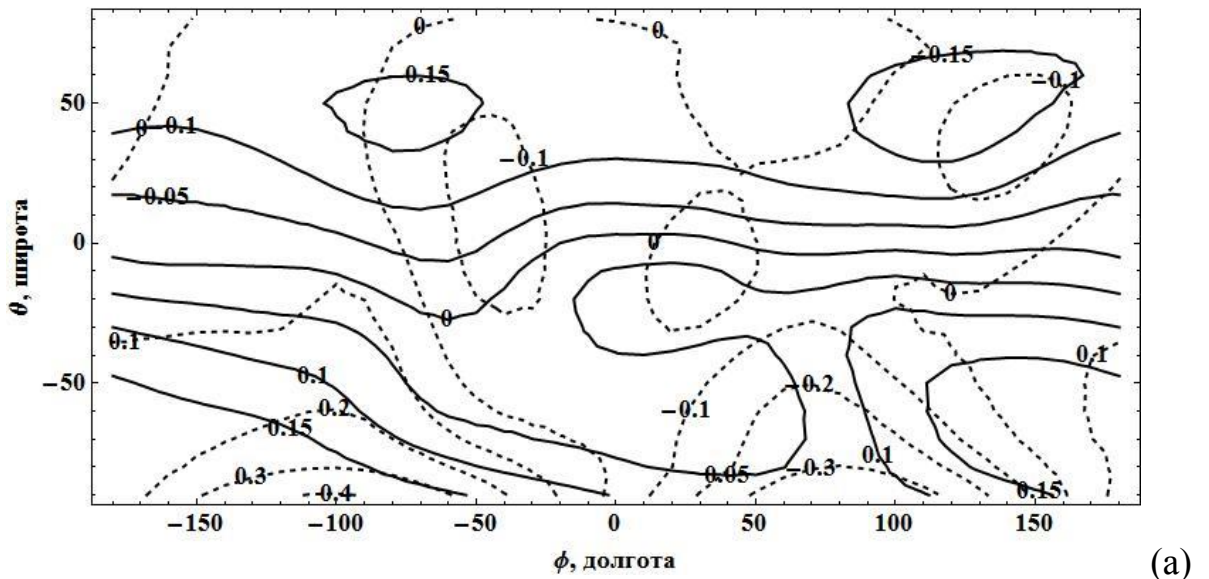
Рисунок 14 — К учету влияния неточного задания высоты h_m , на которой вычисляется C_H , на точность вычисления поправки (19). Здесь h_0 - истинная высота максимума ионосферного слоя, h_{m-} - уровень, ниже h_0 на 10%

Априори эта высота известна с некоторой ошибкой. Для проверки влияния точности задания высоты h_m , в которой вычисляется C_H , на точность вычисления поправки второго порядка D_2 (2.21), были проведены расчеты этой поправки при различных значениях h_m использованием слоя Чепмена (2.18) и модели IGRF [95] в качестве модели магнитного поля Земли.

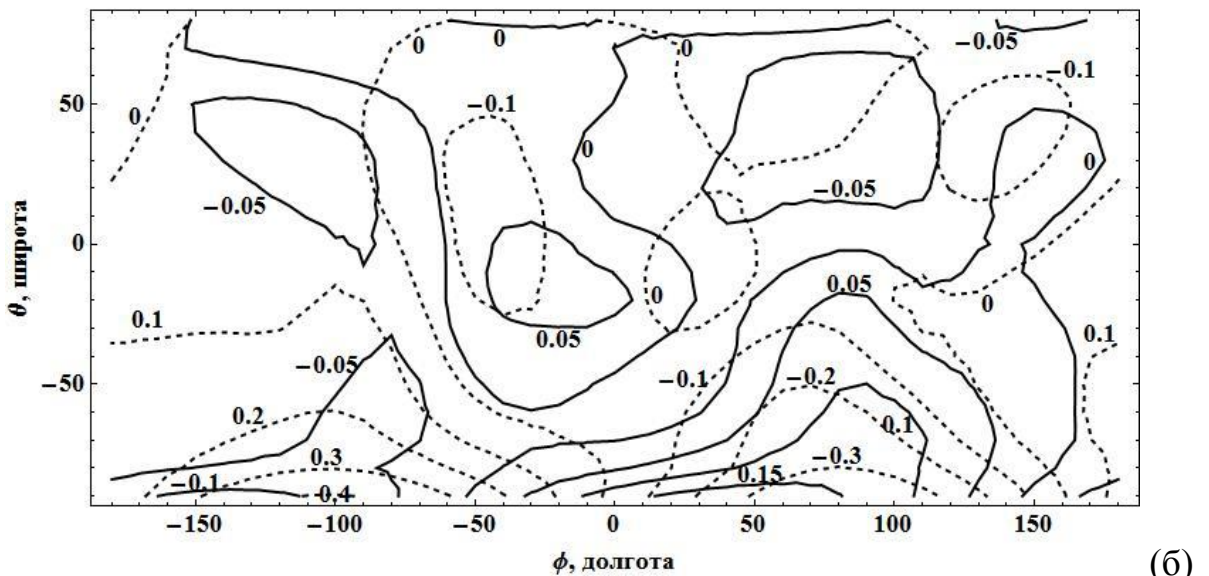
Расчеты значения коэффициента C_H в выражении (2.21) проводились при $h_m = h_0 = 320$ км, т.е. в максимуме ионосферного слоя, а также при завышенном ($h_{m+} = 352$ км) и заниженном ($h_{m-} = 288$ км) значениях высоты h_m . Результаты

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 из-за симметрии погрешностей $D_2^{-\Delta h}$ и $D_2^{+\Delta h}$ на рисунке 15 приведены результаты расчетов только для величины $D_2^{-\Delta h}$.

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. 15б). Следует отметить также некоторую несимметричность в значениях, проявляющуюся при распространении сигнала от спутников с азимутами, равными 90° и 270° (рис. 15б), особенно для низких углов возвышения. В таких ситуациях существует значительный разброс (наиболее часто встречаются отличия в 2 или менее раза) значений на одинаковых широтах севернее и южнее экватора. Например, (ср. рис. 15а,б), видно, что при одинаковых углах возвышения на 50° северной и 50° южной долготах (рис. 15б, непрерывные линии) значения погрешности, вносимой ошибкой задания высоты h_m , принимают различные величины. Так, в южном полушарии погрешность по модулю достигает значений в 0,1 мм, а в северном полушарии – только 0,05 мм.



(а)



(б)

Рисунок 15 — Погрешность (в мм) $D_2^{\Delta h}$ в расчетах ионосферной ошибки второго порядка, вносимая заданием высоты h_{m-} на 10% ниже истинного значения $h_0 = 320$ км. (а) - для углов возвышения 20° (штриховая линия) и 60° (непрерывная линия) при азимуте 90° ; (б) - для угла возвышения 20° при азимутах 90° (штриховая линия) и 270° (непрерывная линия)

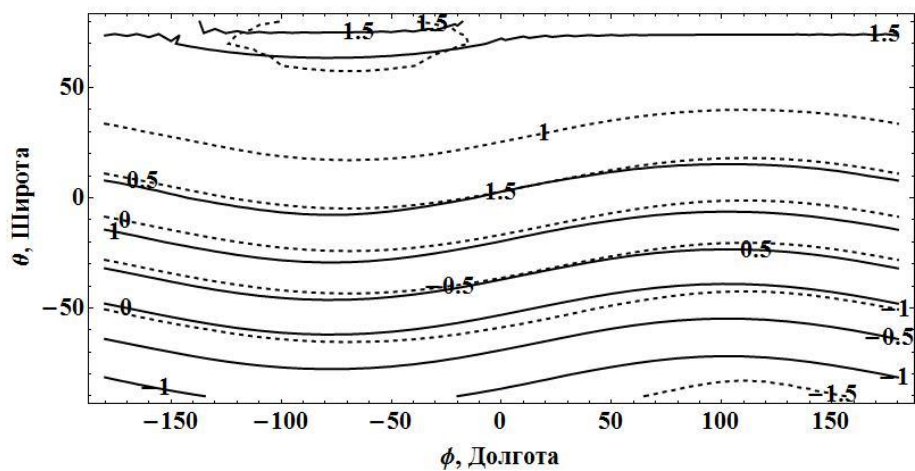
В целом, результаты моделирования говорят о незначительном влиянии неточного задания высоты h_m на расчет ионосферной ошибки D_2 .

2.4.3. Влияние точности задания полного электронного содержания на точность вычисления ионосферной ошибки второго порядка

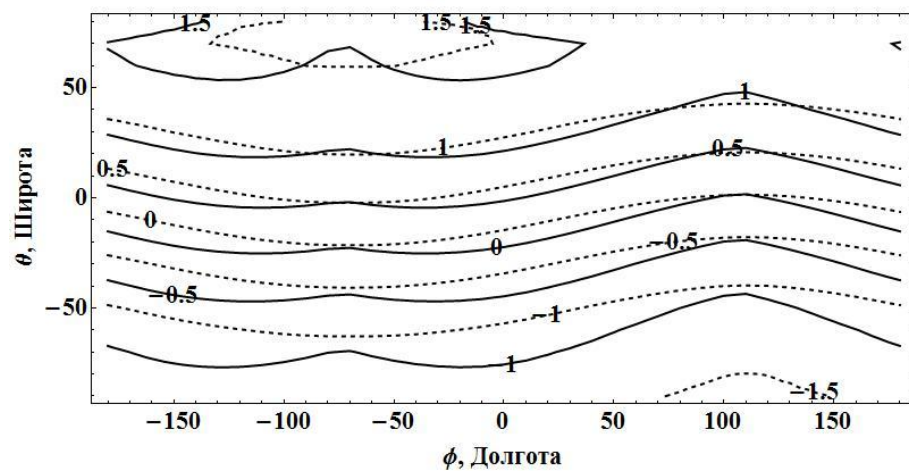
Еще одним параметром, необходимым при расчете ионосферной ошибки второго порядка является ПЭС ионосферы вдоль луча «спутник-приемник». Обычно ПЭС определяется либо по глобальным картам ПЭС, построенным по технологии GIM, либо – по эмпирическим и полуэмпирическим моделям ионосферы. В первом случае выполняется построение вертикального ПЭС по результатам спутниковых измерений и последующее вычисление величины наклонного ПЭС по обобщенным формулам, когда вертикальное ПЭС умножается на одинаковый для всех положений приемников множитель, зависящий от угла возвышения спутника. Во втором случае – для получения ПЭС используются уже готовые данные из различных карт. 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 [96 - 97]. Эти отклонения приводят к погрешности — неучтенной остаточной ошибке $D_2^{AI_1}$ в определении ионосферой ошибки второго порядка:

$$D_2^{AI_1} = \frac{40.3AI_2}{f_1f_2(f_1 + f_2)} \quad (2.23)$$

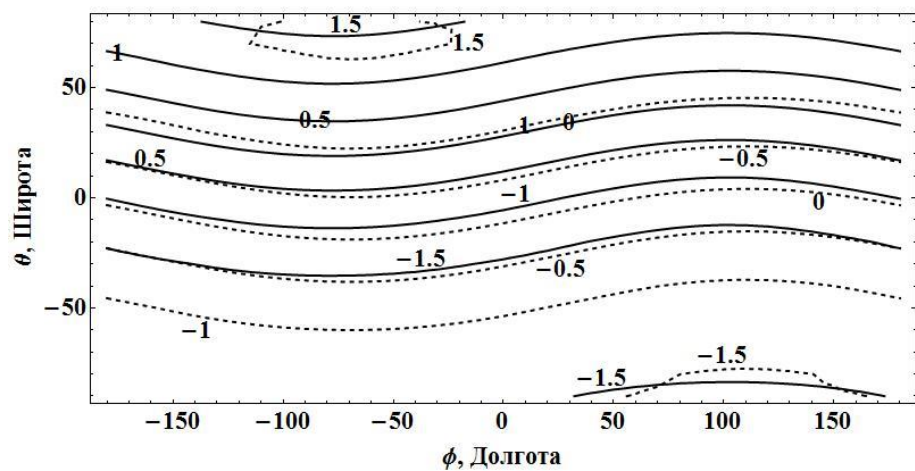
Для проверки влияния погрешности определения ПЭС ионосферы моделировались остаточная ошибка (2.23), возникающая из-за неточного определения ПЭС ионосферы. В качестве модели распределения погрешности определения ПЭС было выбрано три модели: модели ионосферы — слой Чепмена (2.18) с параметрами, приведенными на странице 43 (рис. 16). фиксированная погрешность ПЭС в 10 TECU (рис. 17), а также с модель NeQuick (рис. 18).



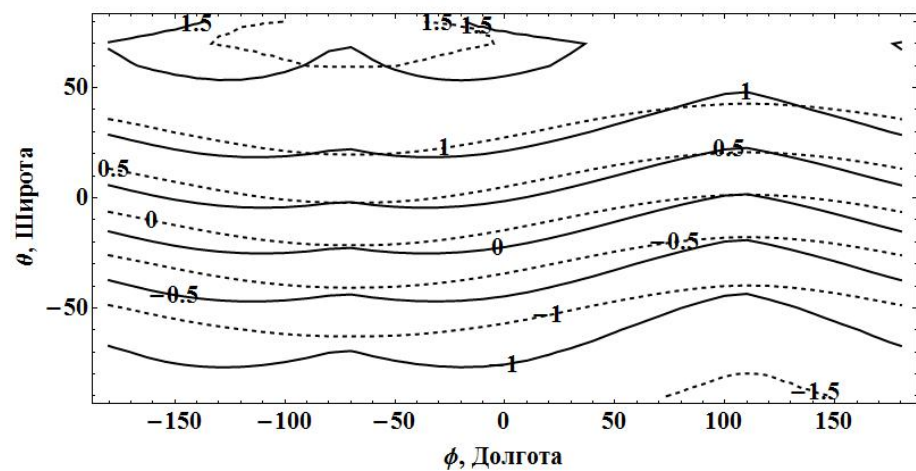
(a)



(б)



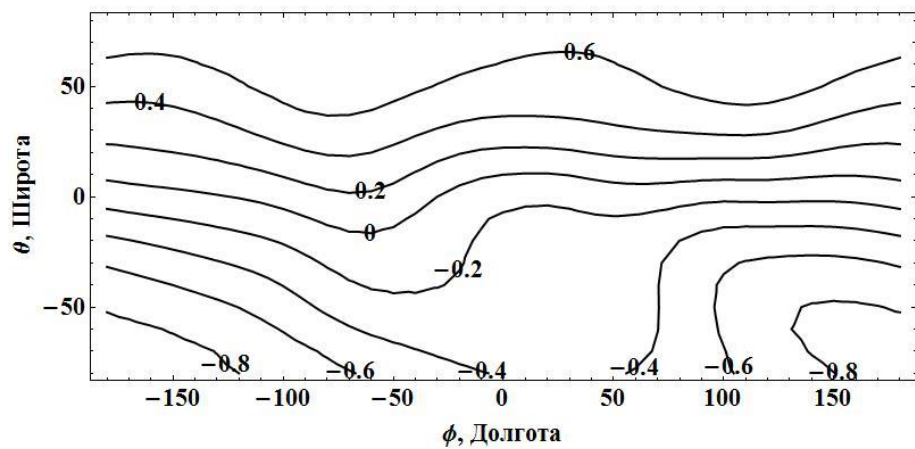
(в)



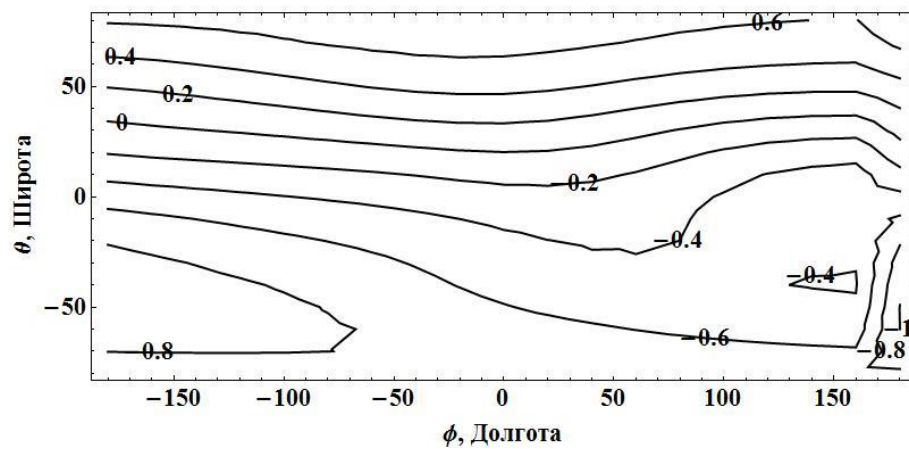
(г)

Рисунок 16 — Распределение (в мм) погрешности вычисления остаточной ошибки (2.23) по Земному шару при углах возвышения 30° (сплошная линия) и 85° (пунктирная линия). Азимут спутника 0° (а); 90° (б), 180° (в); 270° (г).

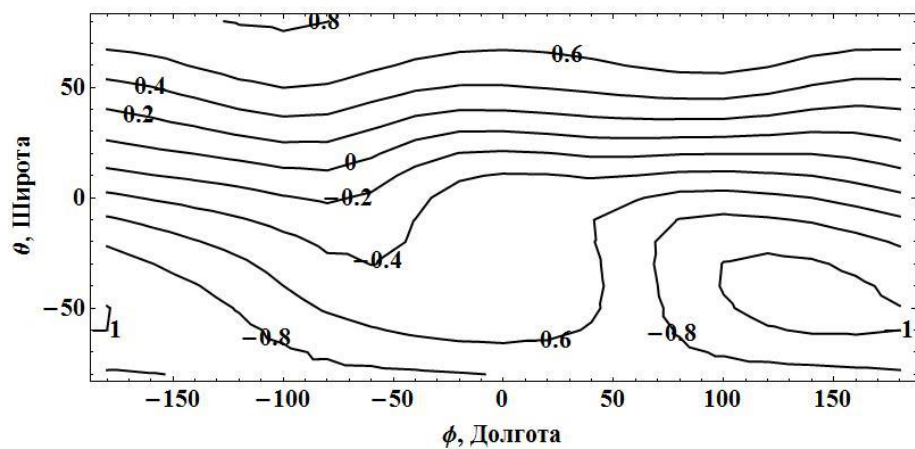
Модель магнитного поля – магнитный диполь



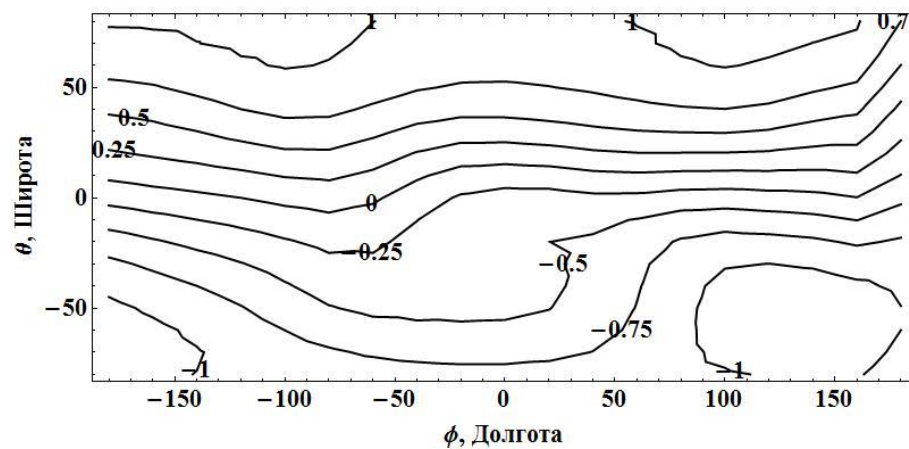
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 17 — Распределение (в мм) погрешности вычисления остаточной ошибки (2.23) по Земному шару при угле возвышения 40° и азимуте спутника 0° (а); 180° (б), а также азимуте 180° и углах возвышения 50° (в) и 80° (г). Модель магнитного поля - IGRF

Данные модели ионосферы на рис. 18 выбраны за 15 января 2017 г. При этом погрешность определения ПЭС ΔI_1 в первом и третьем случаях была задана на уровне 20%: $\Delta I_1 = 0.2I_1$.

Видно, что с ростом угла возвышения спутника погрешность вычисления остаточной ошибки уменьшается, но незначительно (рис. 16). При этом в одинаковых условиях (положении спутника) при выборе модели IGRF, погрешность вычисления ионосферной ошибки становится меньше, чем при выборе модели магнитного диполя (ср. рис. 16 и рис. 17). При этом следует выделить область экватора, где остаточная ошибка полностью устраняется из-за взаимного расположения силовых линий магнитного поля и волнового вектора. 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. 18) погрешность определения остаточной ошибки незначительна, но в некоторых регионах Земли превышает уровень внутренних шумов.

Анализ ошибки (2.23) показывает, что неустранимая ошибка превышает уровень внутренних шумов при фазовых измерениях, а при соответствующих значениях поправки ПЭС может достигать величины, равной половине максимального значения ионосферной ошибки второго порядка D_2 и поэтому должна устраняться наряду с самой ионосферной ошибкой D_2 .

2.5 Методика одновременного устранения ионосферных ошибок первого и второго порядков и ее границы применимости

Из сказанного ранее в разделах 2.4, а также из описания недостатков существующих методик устранения ионосферных ошибок второго порядка, становится понятно, что устранение ионосферной ошибки второго порядка также связано с точностью определения полного электронного содержания вдоль луча,

соединяющего спутник и приемник. Поэтому была предложена следующая методика устранения ионосферной ошибки второго порядка.

Поскольку в работе [85] были особо отмечены связь (2.19) между ионосферной ошибкой второго порядка D_2 и величиной ПЭС, а также малость ионосферной ошибки D_2 по сравнению с ионосферной ошибкой первого порядка, была предложена следующая модификация (здесь и далее будем пренебрегать ионосферными ошибками высших порядков):

$$\varphi = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} - 40.3 \frac{C_H \cdot I_1}{f^3} = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} \left(1 + 40.3 \frac{C_H}{f} \right), \quad (2.24)$$

Так как слагаемое $40.3 \frac{C_H}{f}$ в множителе (2.24) меньше единицы ($40.3 \frac{C_H}{f} \ll 1$) из-за больших рабочих частот ГНСС-систем, можно сделать следующее преобразование:

$$\frac{1}{f^2} \cdot \left(1 + 40.3 \frac{C_H}{f} \right) \approx \frac{1}{f^2 \cdot \left(1 - \frac{40.3 \cdot C_H}{2f} \right)^2} = \frac{1}{f_{mod}^2}. \quad (2.25)$$

Здесь

$$f_{mod} = f - \frac{40.3 \cdot C_H}{2} \quad (2.26)$$

- модифицированная частота, в которой учтено наличие магнитного поля Земли. Таким образом, выражение для фазовой дальности (2.24) примет следующий вид:

$$\varphi = D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f^2} \left(1 + 40.3 \frac{C_H}{f} \right) \approx D_0 - 40.3 \frac{I_1}{f_{mod}^2}. \quad (2.27)$$

С учетом полученной зависимости (2.27) двухчастотные измерения будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \varphi_1 = D_0 - 40.3 I_1 / f_{1mod}^2; \\ \varphi_2 = D_0 - 40.3 I_1 / f_{2mod}^2. \end{cases} \quad (2.28)$$

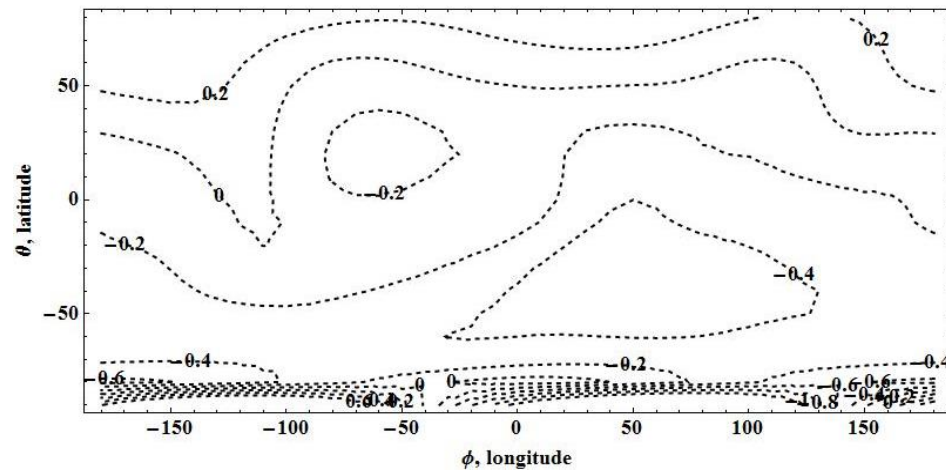
Из системы (2.28), по аналогии с принципами обработки двухчастотных измерений нетрудно найти, что уже во втором приближении истинная дальность примет выражение:

$$D_0^{(2)} = \frac{\varphi_1 f_{1mod}^2 - \varphi_2 f_{2mod}^2}{f_{1mod}^2 - f_{2mod}^2} \quad (2.29)$$

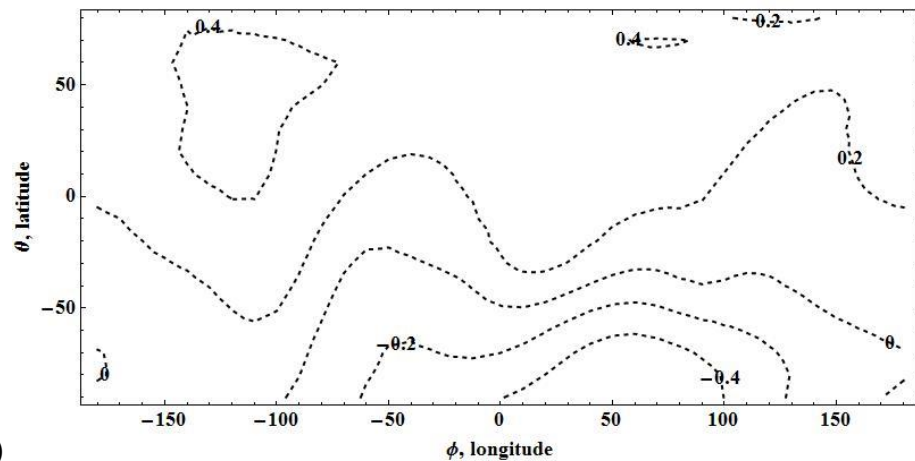
Таким образом, с помощью модификации формул двухчастотных измерений (2.12) и двухчастотного приема (2.13) учитываются одновременно ошибки первого и второго порядков. Здесь важно отметить две особенности использования модифицированной частоты f_{mod} . Во-первых, здесь подразумевается, что измерения (2.28) выполняются на стандартных рабочих частотах ГНСС, и содержат вклад как от наличия ионосферы, так и геомагнитного поля, но в результате математических преобразований (2.25) они принимают вид (2.28). 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 (2.29) исчезает необходимость определять ПЭС ионосферы вдоль луча «спутник — приемник». Для анализа эффективности предложенной методики исследовалась остаточная ошибка измерений:

$$\Delta D^{(2)} = D_0 - D_0^{(2)} \quad (2.30)$$

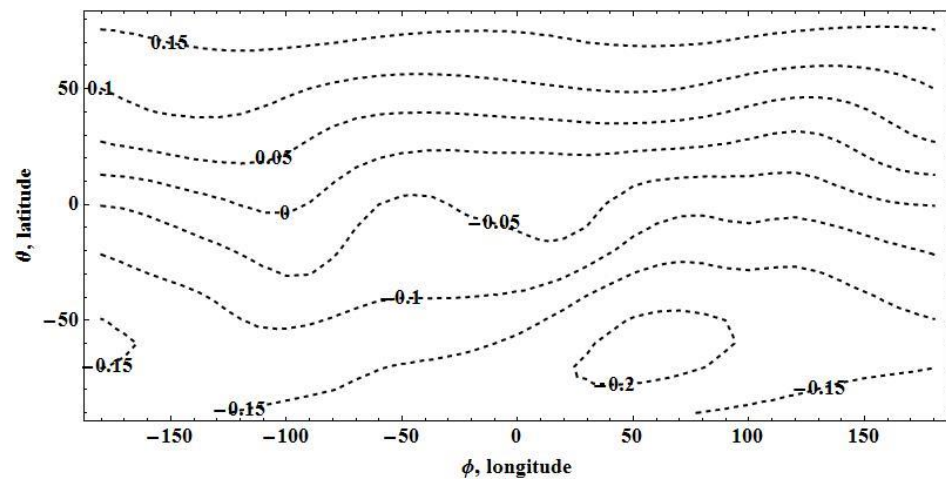
Несомненно, остаточная ошибка (2.30) будет содержать в себе погрешность приближения тонкого слоя и ограничиваться только им для моделируемой ситуации. В случае обработки экспериментальных данных могут возникнуть ошибки иного рода. Анализ распределения остаточной ошибки (2.30) по поверхности земного шара показал, что при малых углах возвышения остаточная ошибка достигает максимальных своих значений, но не превышает 1 мм (рис. 19).



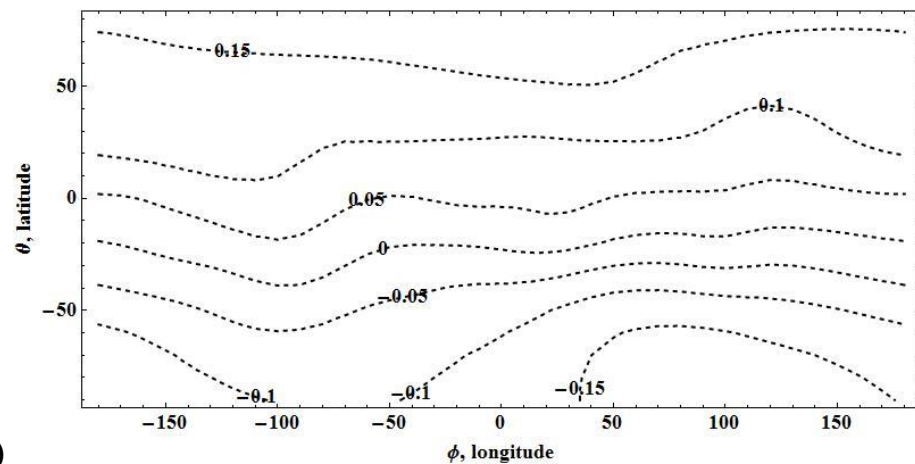
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 19 — Распределение (в мм) остаточной ошибки (2.30) по земному шару для угла возвышения и азимута соответственно: угла возвышения 10^0 и азимута 10^0 (а); угла возвышения 10^0 и азимута 135^0 (б); угла возвышения 60^0 и азимута 10^0 (в); угла возвышения 70^0 и азимута 135^0 (г)

В северном полушарии остаточная ошибка не превышает 0,2 мм. Для территорий, расположенных в Южном полушарии и имеющих долготы от 40° з.д. до 140° в.д. остаточная ошибка достигает 0,4 – 0,5 мм. Для интервала широт в Южном полушарии от 70° до 90° остаточная ошибка – не менее 0,4 мм и не более 1 мм.

Существует смещение величин остаточной ошибки в южном направлении (рис. 19а, б). Под смещением здесь понимается асимметрия при распределении остаточной ошибки по земному шару: в южном полушарии всегда остаточная ошибка больше, чем в северном. Существует это смещение для всех значений азимута, но наиболее ярко проявляется при азимутах (отсчет ведется с севера в восточном направлении) более 135 градусов. Причинами такой асимметрии в распределении остаточной ошибки являются особенности используемой модели геомагнитного поля IGRF и его распределение по земному шару.

Увеличение угла возвышения приводит к уменьшению остаточной ошибки до 0,2 мм. При этом асимметрия, наблюдавшаяся при низких углах возвышения, уменьшается и практически не наблюдается (рис. 19в, г).

Таким образом, моделирование показало, что предложенная методика позволяет устранить ионосферные ошибки второго порядка на 99%, одновременно уменьшив и остаточную ошибку двухчастотных измерений до величин, на порядок меньших, чем внутренние шумы фазовых приемников. Вместе с устранением эффектов магнитного поля Земли устраняется влияние неточного определения ПЭС ионосферы на остаточную ошибку двухчастотных измерений.

2.6 Выводы

В данной главе были рассмотрены процесс и особенности распространения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в ионосфере. Было показано, что остаточные ошибки двухчастотных измерений, вызванные наличием ионосферной ошибки второго порядка, значительно больше потенциальных

погрешностей фазовых измерений. Поэтому необходимо дальнейшее уточнение измерений ГНСС в части учета ионосферных ошибок второго порядка. При этом приближение тонкого слоя, используемое для упрощения вычисления ионосферной ошибки второго порядка, вносит искажения в истинную величину ионосферной ошибки второго порядка менее миллиметра, что сопоставимо с величинами внутренних шумов при фазовых измерениях.

Также изучалось влияние различных источников погрешностей, влияющих на величину ионосферной ошибки второго порядка, и являющихся непосредственными составляющими остаточной ошибки двухчастотных измерений. Было показано, что только ошибки определения ПЭС ионосферы воль луча «спутник-приемник» вносят существенные искажения в вычисляемую величину ионосферной ошибки второго порядка, достигая 50% от величины самой ионосферной ошибки D_2 при соответствующих значения погрешности определения ПЭС.

Была предложена методика устранения ионосферной ошибки второго порядка и проанализированы остаточные эффекты после устранения этой ошибки с помощью данной методики. Результаты моделирования показали, что при применении предложенной методики ионосферные ошибки второго порядка устраняются на 99%. Вместе с этим ионосферная ошибка первого порядка и эффекты неточного задания ПЭС ионосферы устраняются полностью благодаря введению модифицированной формулы «свободной от ионосферы» комбинации. Отметим, что для устранения эффектов анизотропии ионосферы не требуется информация о ПЭС ионосферы, что является преимуществом данной методики.

Глава 3 Эффекты анизотропии ионосферных неоднородностей в ГНСС измерениях

Как говорилось выше, 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 (см. рис. 20).

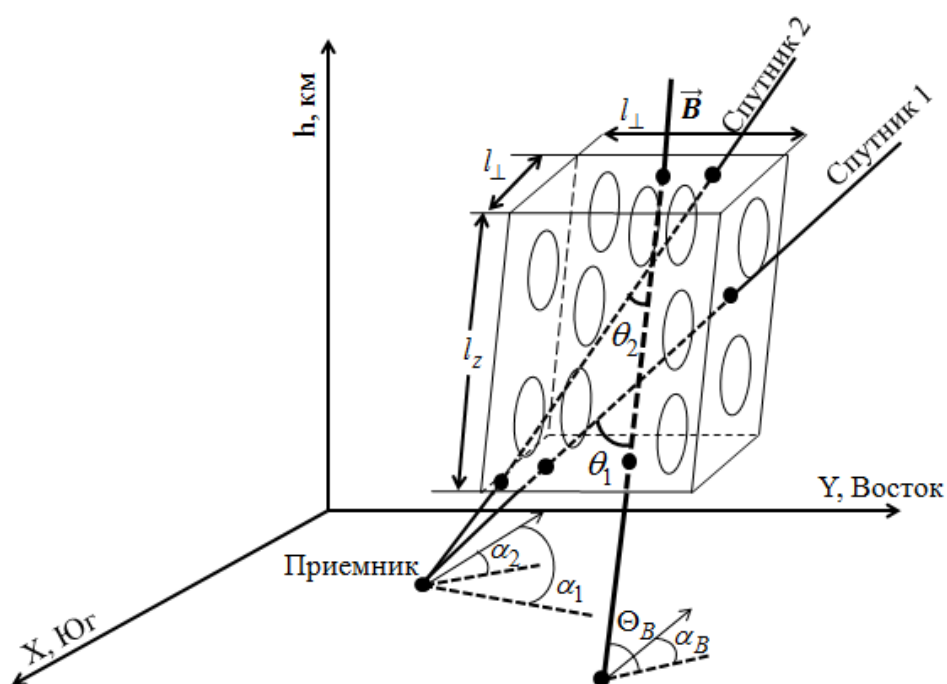


Рисунок 20 - Геометрия распространения сигнала ГНСС через область с анизотропными неоднородностями ($l_{\perp} = l_x = l_y$ и l_z - поперечные и продольный внешние масштабы неоднородностей). Здесь \vec{B} - вектор магнитного поля, Θ_B и α_B - угол возвышения и азимут вектора \vec{B} , соответственно; θ_1 и θ_2 - углы между волновыми векторами, соединяющими приемник со первым и вторым спутниками, соответственно. Положение спутников характеризуются углами возвышения E_1 и E_2 и азимутами α_1 и α_2 , соответственно

Сигнал, проходя через такую область с магнитоориентированными неоднородностями, анизотропно рассеивается, вследствие чего возникают

флуктуации амплитуды и фазы сигнала, влекущие за собой сбои в работе приемников сигнала ГНСС [20, 98 - 99]. При этом сбои начинают зависеть от ориентации трассы «спутник-приемник» относительно силовой линии магнитного поля.

В данном разделе будет сравнены эффекты рассеяния сигнала ГНСС, на изомерных и анизомерных неоднородностях. Также будет исследована территория Японии с точки зрения возникновения флуктуаций фазы и проанализировано влияние таких характеристик анизомерных неоднородностей, как степень вытянутости, на характер роста флуктуаций фазы. Подчеркнем, что представленные результаты опубликованы в работе [100].

3.1 Ионосферные неоднородности. Детектирование неоднородностей с помощью измерений флуктуаций фазы сигналов ГНСС

Исследование флуктуаций принимаемого сигнала ГНСС в настоящее время является одним из методов исследования неоднородной составляющей ионосферы. Впервые в достаточно полном объеме теоретические исследования неоднородной среды посредством анализа флуктуаций фазы и амплитуды сигналов искусственных спутников Земли и радиозвезд были представлены в работе [98]. Авторы проанализировали зависимость индекса мерцаний и флуктуаций фазы от угла возвышения источника радиоизлучения для случаев изомерных и анизомерных неоднородностей, а также влияние степени удаленности неоднородности от точки наблюдения на величину флуктуаций сигнала как искусственного, так и естественного происхождения. Было показано, что флуктуации амплитуды сигнала возрастают при уменьшении углов возвышения источника сигнала, а также что ионосферные неоднородности, расположенные на небольших высотах над приемником, влияют на флуктуации фазы сигнала от радиозвезд без оказания существенного эффекта на амплитудные флуктуации этого сигнала. Также в связи с влиянием присутствия неоднородностей на фазовые флуктуации и амплитудные мерцания стоит

упомянуть работу [99], где для высокоширотной и полярной ионосферы на фоне низких амплитудных мерцаний наблюдались сильные флуктуации фазы сигнала ГНСС, сопровождающиеся многочисленными срывами сопровождения фазы (см. рис. 21). При этом в работе подчеркивалось, что, во-первых, рост флуктуаций фазы в поставленном эксперименте неизбежно приводил к увеличению числа сбоев сопровождения фазы сигнала ГНСС; во-вторых, рост флуктуаций фазы вызван находящимися на пути распространения сигнала магнитоориентированными неоднородностями, которые были обнаружены с помощью альтернативных инструментов, таких как сети ионозондов, когерентных радаров SuperDarn, GPS приемников, а также специализированных антенн.

В работе [16] было исследовано влияние на возникновение мерцаний, обусловленных наличием ионосферных неоднородностей, таких параметров как угол возвышения и высота спутника, сезон и время суток, геомагнитная обстановка. Были определены размеры неоднородностей, а также области Земли, где с большой долей вероятности могут возникать флуктуации сигналов: авроральные зоны и экваториальные районы Земли.

Используемое в работе [98] представление об ориентированности крупномасштабных ионосферных неоднородностей вдоль силовых линий магнитного поля Земли было подтверждено впоследствии авторами работы [14], где по экспериментальным данным сделана оценка соотношения между продольным и поперечным размерами неоднородностей. В работе [101] была предложена классификация анизотропных ионосферных неоднородностей по плотности электронной концентрации: капли – области с повышенной (на 50-100% от фонового уровня) электронной концентрацией и пузыри – области с пониженной электронной концентрацией. Выполненное в работе [15] исследование сбоев сопровождения сигналов на вспомогательной частоте L2 системы GPS было интерпретировано как указание на наличие ионосферных пузырей.

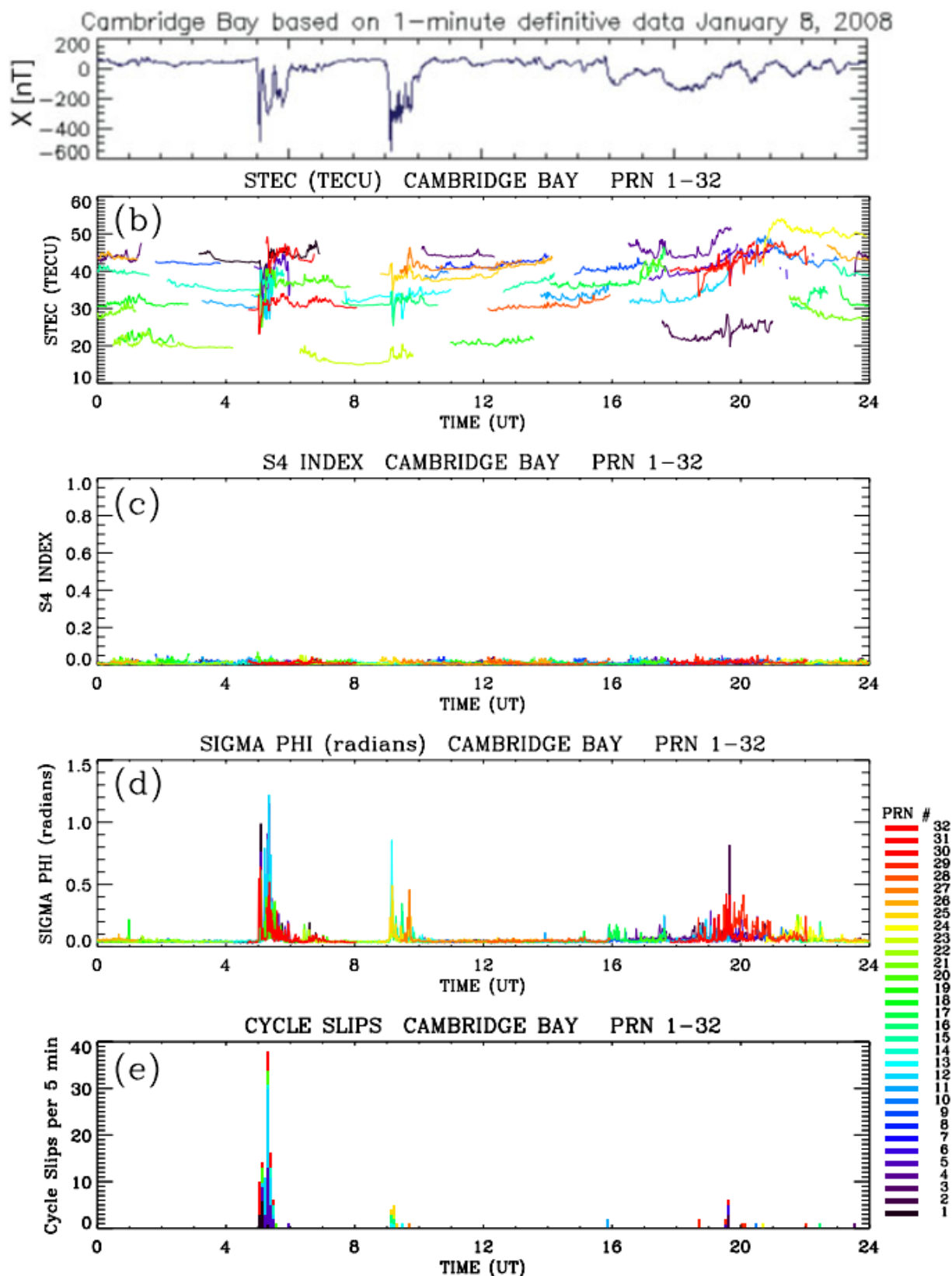


Рисунок 21 - Суточный ход горизонтальной меридианальной компоненты магнитного поля (а), наклонного ПЭС (b), индекса мерцаний S4(c), фазовых флуктуаций (d) и количества срывов сопровождения фазы (e), наблюдаемых в пункте Cambridge Bay. Взято из [99]

Использование результатов теоретических выкладок и экспериментальных исследований [14 – 16, 98 – 99, 101 - 103] позволило осуществить более точный анализ условий появления флуктуаций сигналов ГНСС для ограниченных регионов Земли вблизи магнитных аномалий [19, 20, 45, 68] и выделить некоторые характерные особенности пространственного и временного распределения магнитоориентированных ионосферных неоднородностей в различных геомагнитных условиях [43 - 44]. Так, характерной особенностью рассеяния сигнала ГНСС на магнитоориентированной неоднородности на средних широтах Китая является детерминированный период появления сбоев приема сигнала ГНСС. На большом объеме накопленной статистики для сети ГНСС-приемников, расположенной на средних широтах в Японии, было показано, что рассеяние сигнала от спутника ГНСС происходит как вдоль магнитной силовой линии, так и поперек. При этом в статье [20], в отличие от других работ, впервые были проанализированы экспериментальные данные количества сбоев приема сигнала ГНСС в зависимости от угла между магнитным полем Земли и лучом «спутник-приемник».

3.2 Исследование зависимости дисперсии фазы сигнала ГНСС от углов прихода сигнала

Для исследования зависимости дисперсии фазы и сбоев сопровождения сигнала ГНСС от углов прихода сигнала в присутствии неоднородностей (см. рис. 20) на пути распространения сигнала моделировалась зависимость дисперсии флуктуаций фазы от взаимного расположения спутника и приемника. При этом учитывалось, что выражение для дисперсии фазы имеет следующий вид [98, 104]:

$$\sigma^2 = \left(\frac{40.3k}{f^2} \right)^2 \frac{2\sqrt{\pi}\Gamma(p/2)}{\Gamma((p-3)/2)\Gamma(p-1/2)} \frac{\alpha l_{\perp}}{\sqrt{\cos^2 \theta + \alpha^2 \sin^2 \theta}} \int_{z_r}^{z_t} \sigma_N^2(z') dz' \quad (3.1)$$

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 продольный внешние масштабы случайных неоднородностей со спектром [98]:

$$\Phi_N(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \frac{l_{\perp}^2 l_z \Gamma(p/2) \sigma_N^2(\mathbf{r})}{\pi^{3/2} \Gamma((p-3)/2)} \left[1 + \kappa_z^2 l_z^2 + l_{\perp}^2 (\kappa_x^2 + \kappa_y^2) \right]^{-p/2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_N(\mathbf{r}) = \sigma_0 \bar{N}(\mathbf{r}). \quad (3.3)$$

Здесь $\bar{N}(\mathbf{r})$ - фоновая электронная концентрация, для которой в данной работе выбрана модель NeQuick. Стоит отметить, что в соответствии с (3.3) модель NeQuick также определяет дисперсию неоднородностей. Соотношение (3.3) было взято с учетом результатов работ [14, 107 - 108]. Для определения характеристик взаимной ориентации волнового вектора и силовых линий магнитного поля использовалась модель магнитного поля IGRF.

Из выражения (3.1) для дисперсии фазы видно, что кроме дисперсии неоднородностей существует несколько входных параметров, влияющих на флуктуации фазы:

- положение приемника (широта и долгота);
- положение спутника (угол возвышения и азимут);
- степень вытянутости неоднородности $\alpha = l_z / l_{\perp}$.

Был проведен анализ влияния каждого из этих параметров на флуктуации фазы сигнала ГНСС. Для этого 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 (2.18) со следующими параметрами: критическая частота $f_{кр} = 15$ МГц; высота максимума слоя $h_0 = 320$ км; характерный масштаб слоя $H=70$ км, а в качестве модели магнитного поля выбрана модель поля магнитного диполя.

Моделирование зависимости дисперсии фазы (3.1) от угла возвышения показало, что при «зондировании» ионосферного слоя с магнитоориентированными неоднородностями возникают два максимума: первый - при низких углах возвышения спутника, второй – на углах возвышения спутника более 30° (рис. 22б).

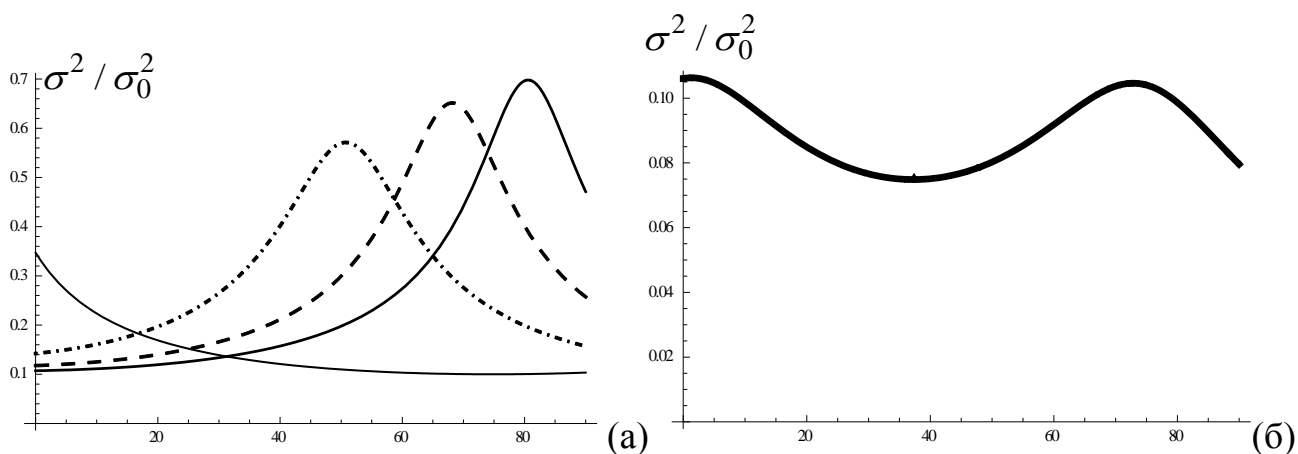


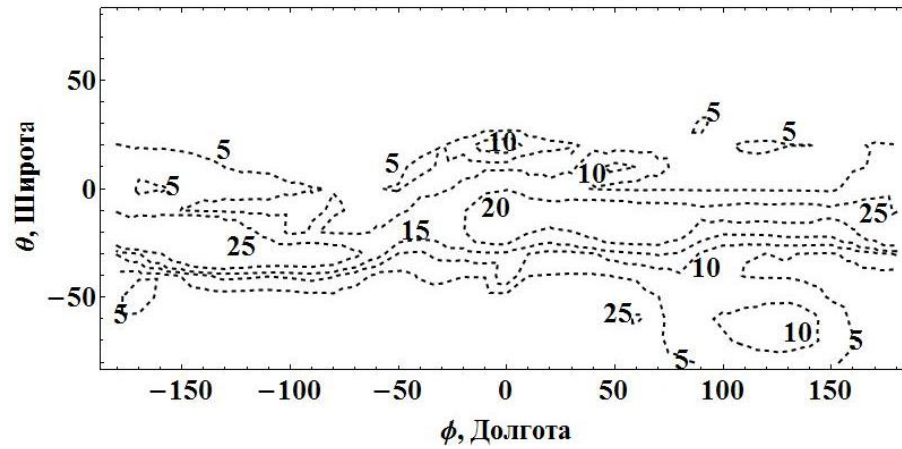
Рисунок 22 – Зависимость σ^2 / σ_0^2 от угла возвышения спутника для различных координат приемника в присутствии изомерных и анизомерных неоднородностей по отдельности (а) и совместно (б). Положение приемников и типы присутствующих неоднородностей на рис. а: изомерная неоднородность - тонкая сплошная линия для приемника с координатами 70° с.ш., 10° в.д.; анизомерные неоднородности неоднородностей - сплошная толстая линия - для приемника с координатами 10° ю.ш., 10° в.д.; пунктирная линия для приемника с координатами 30° с.ш., 10° в.д.; штрихпунктирная линия - положение приемника - 50° с.ш., 10° в.д.. Азимут спутника - 180° . Положение приемника и типы присутствующих неоднородностей на рис. б: одновременно присутствуют изомерные и анизомерные неоднородности, координаты приемника: 50° с.ш., 10° в.д., азимут спутника- 50°

Первый максимум, при малых углах возвышения, связан с увеличением пути распространения сигнала в неоднородной ионосфере для этих углов. Второй максимум можно связать только с приближением направления распространения сигнала ГНСС к ориентации ионосферных неоднородностей, вытянутых вдоль

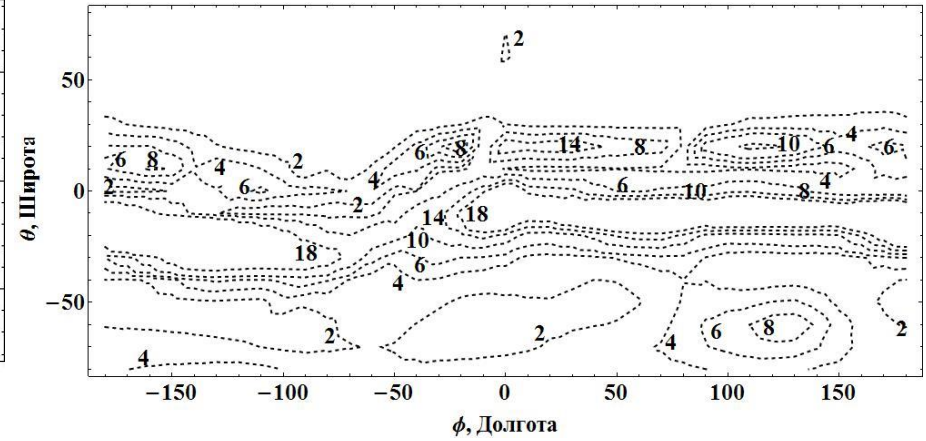
направления геомагнитного поля. Подчеркнем, что второй максимум не возникает в присутствии изомерных неоднородностей (см. рис. 22а для приемника с координатами 70°).

Моделирование пространственного распределения дисперсии (3.1) флуктуаций фазы (рис. 23) в случае анизомерных неоднородностей и с привлечением модели магнитного поля IGRF показало, что наиболее сильные флуктуации фазы (по сравнению со случаем изомерных неоднородностей) возникают на средних и низких широтах (ср. рис. 23 и 24), 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 совершенно противоположная картина: наибольшие значения дисперсии фазы достигаются при азимутах, равных 0° .

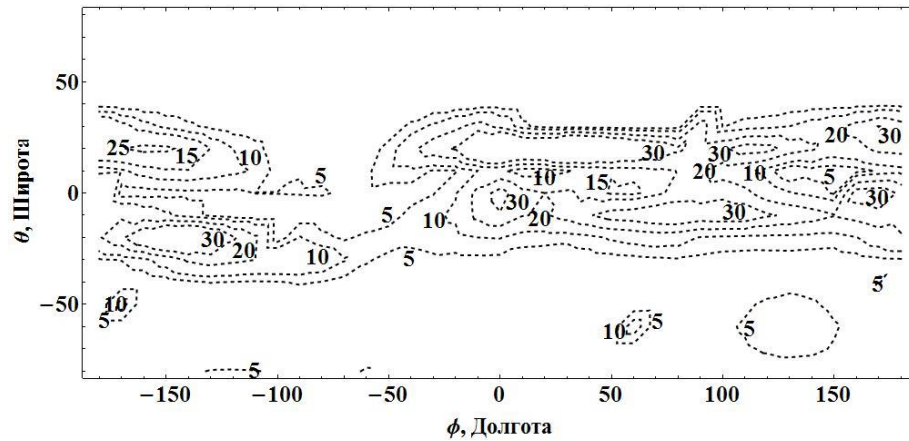
При приближении к экватору, в зависимости от азимута спутника, эффект полностью исчезает либо незначителен. Однако стоит отметить, что по абсолютным величинам в полярных и приполярных областях Земли практически не наблюдаются эффекты ионосферных неоднородностей. Это связано с тем, что в используемой модели (см. формулу (3.3)) пространственное распределение дисперсии электронной концентрации пропорционально фоновой электронной концентрации, которая уменьшается на полюсах. Вследствие этого на высоких широтах из-за малой фоновой электронной концентрации малыми становятся флуктуации фазы. Это подтверждается результатами моделирования (ср. рис. 25а и 25б), показавшие, что эффекты ракурсного рассеяния при условии равномерного распределения электронной концентрации на полюсах выражены сильнее (рис. 25а), чем в условиях использования модели (3.3).



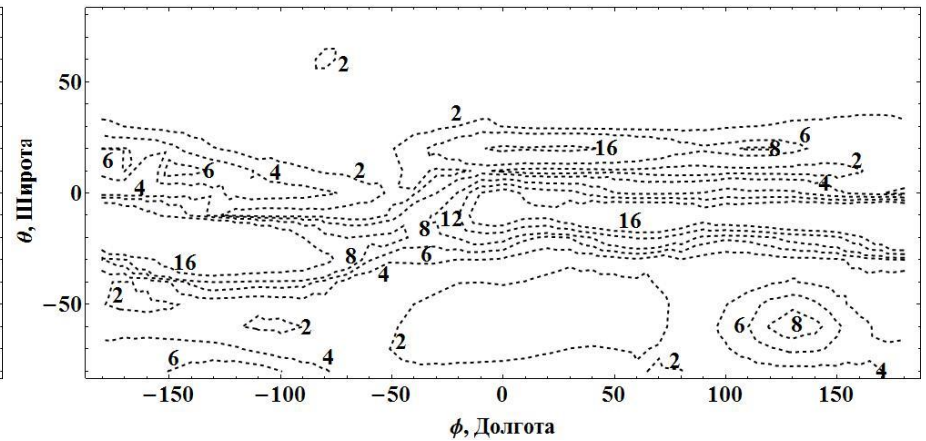
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 23 - Пространственное распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы сигнала ГНСС (в дм^2) в случае анизомерных неоднородностей для спутника с углом возвышения 40° и азимутами 0° (а), 90° (б), 180° (в), 270° (г).

Отложенные по осям широты и долготы соответствуют координатам приемника

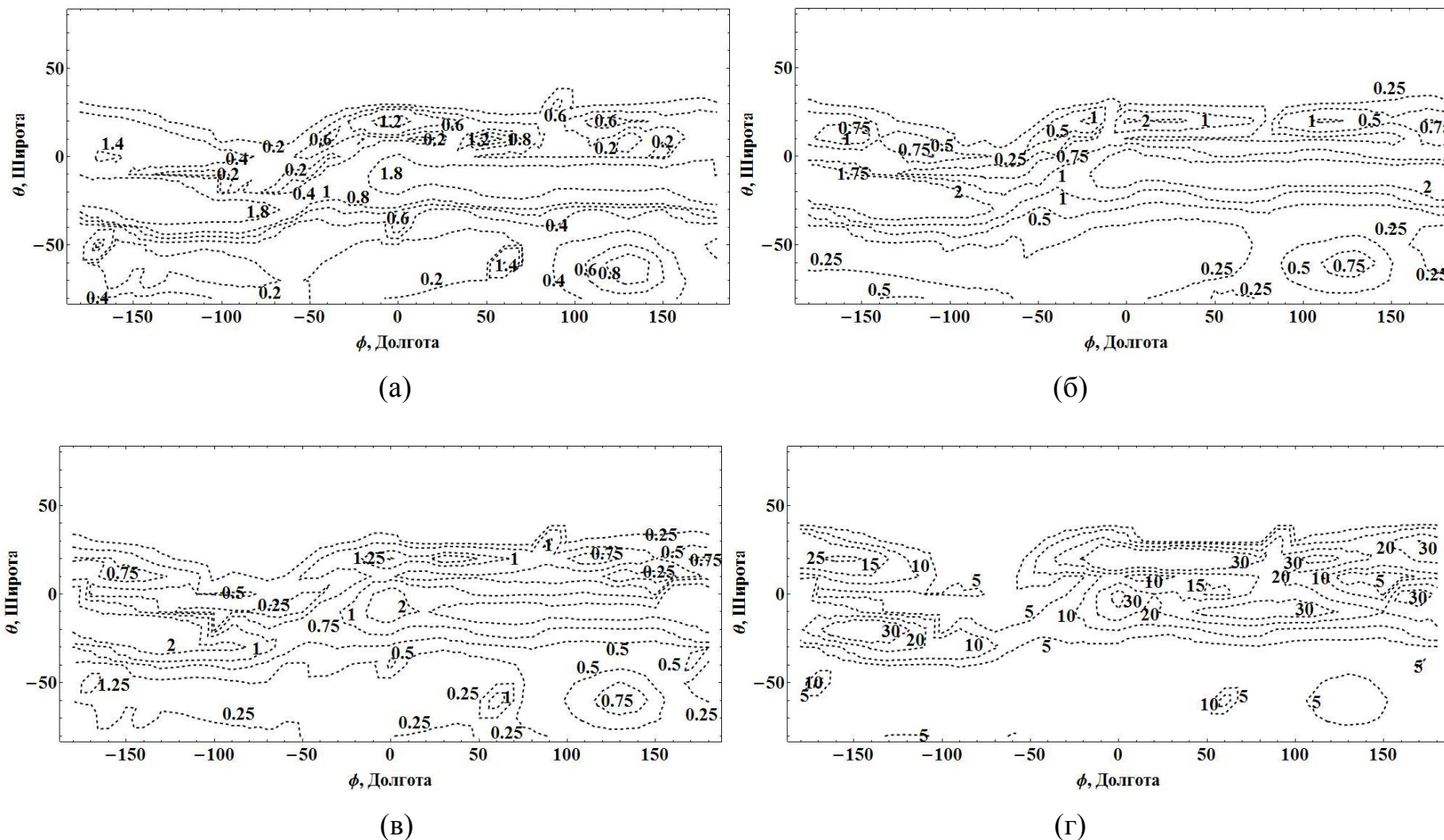


Рисунок 24 - Пространственное распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы сигнала ГНСС (в дм^2) в случае изомерных неоднородностей для спутника с углом возвышения 40° и азимутами 0° (а), 90° (б), 180° (в), 270° (г)

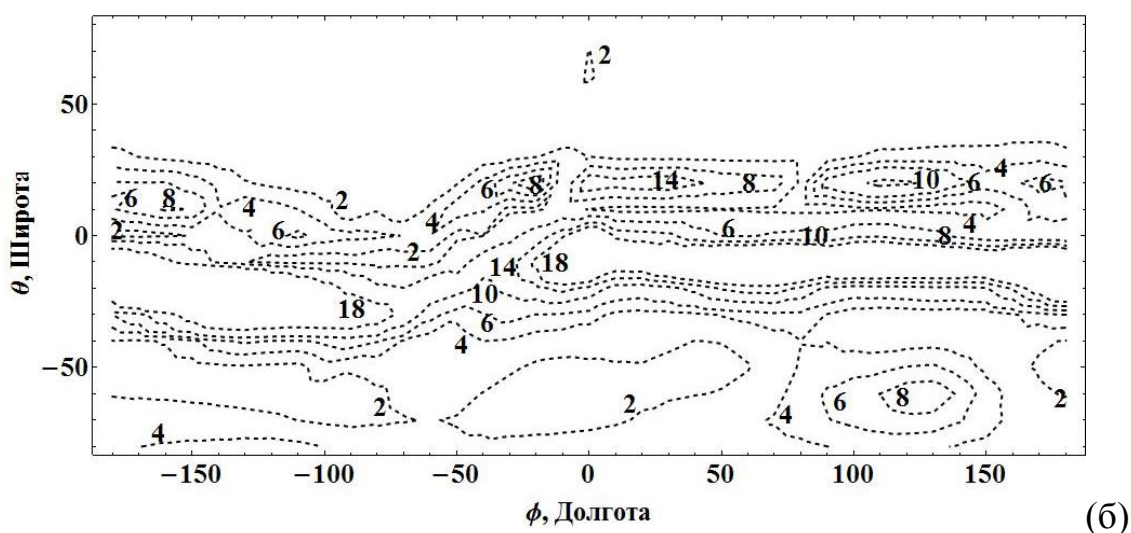
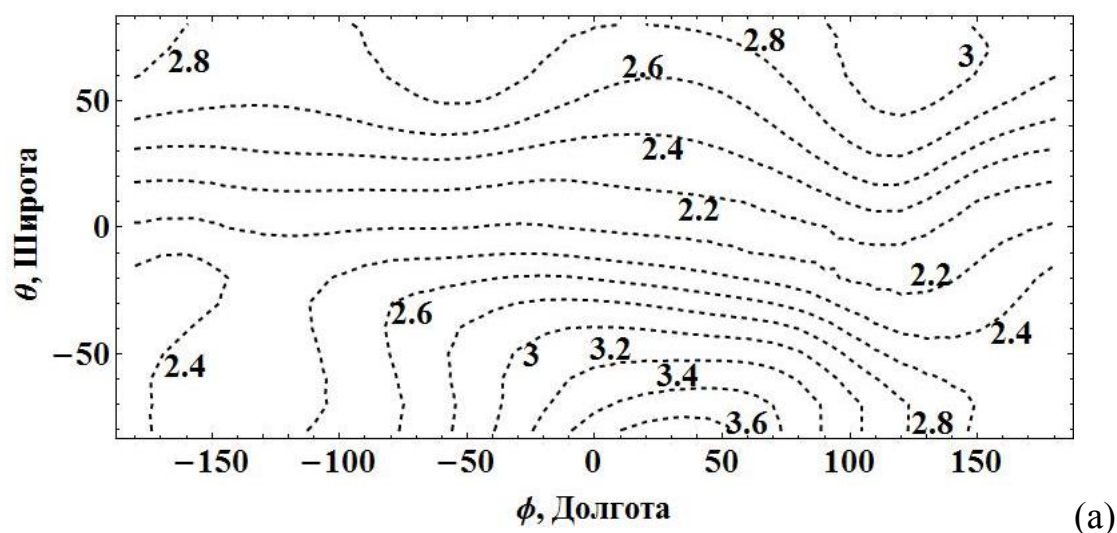


Рисунок 25 - Сравнение вкладов в дисперсию (3.1) флуктуаций фазы (в дм^2) эффектов от ракурсного рассеяния без учета (а) и с учетом пространственного распределения электронной концентрации ионосферы (б). Моделирование проводилось для спутника с углом возвышения 40° и азимутом 90°

3.3 Анализ ГНСС измерений в условиях роста дисперсии фазы сигнала ГНСС

Здесь особое внимание уделялось территории Японии как области, где были зафиксированы [20] сильные флуктуации фазы сигнала GPS, вызвавшие серьезные сбои в работе приемной аппаратуры. При этом будем учитывать, что в интерпретации авторов [20] 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. 26), в соответствии с данными, представленными на рис. 2 в работе [20]. 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.

Из результатов моделирования (рис. 26) видно, что существенные «пики» флуктуаций фазы в присутствии анизотропной неоднородности возникают в моменты, когда спутник находится южнее приемника. В случае, когда углы возвышения малы, увеличение флуктуаций фазы связано с увеличением толщины неоднородного ионосферного слоя, через который проходит сигнал (ср. рис. 26а и 26в, а также 26б и 26г). При больших углах возвышения «пики» флуктуаций фазы связаны непосредственно с рассеянием на анизотропных неоднородностях.

Также выполнялось сравнение флуктуаций фазы в присутствии изотропных и анизотропных неоднородностей и результатов набора статистики по распределению сбоев.

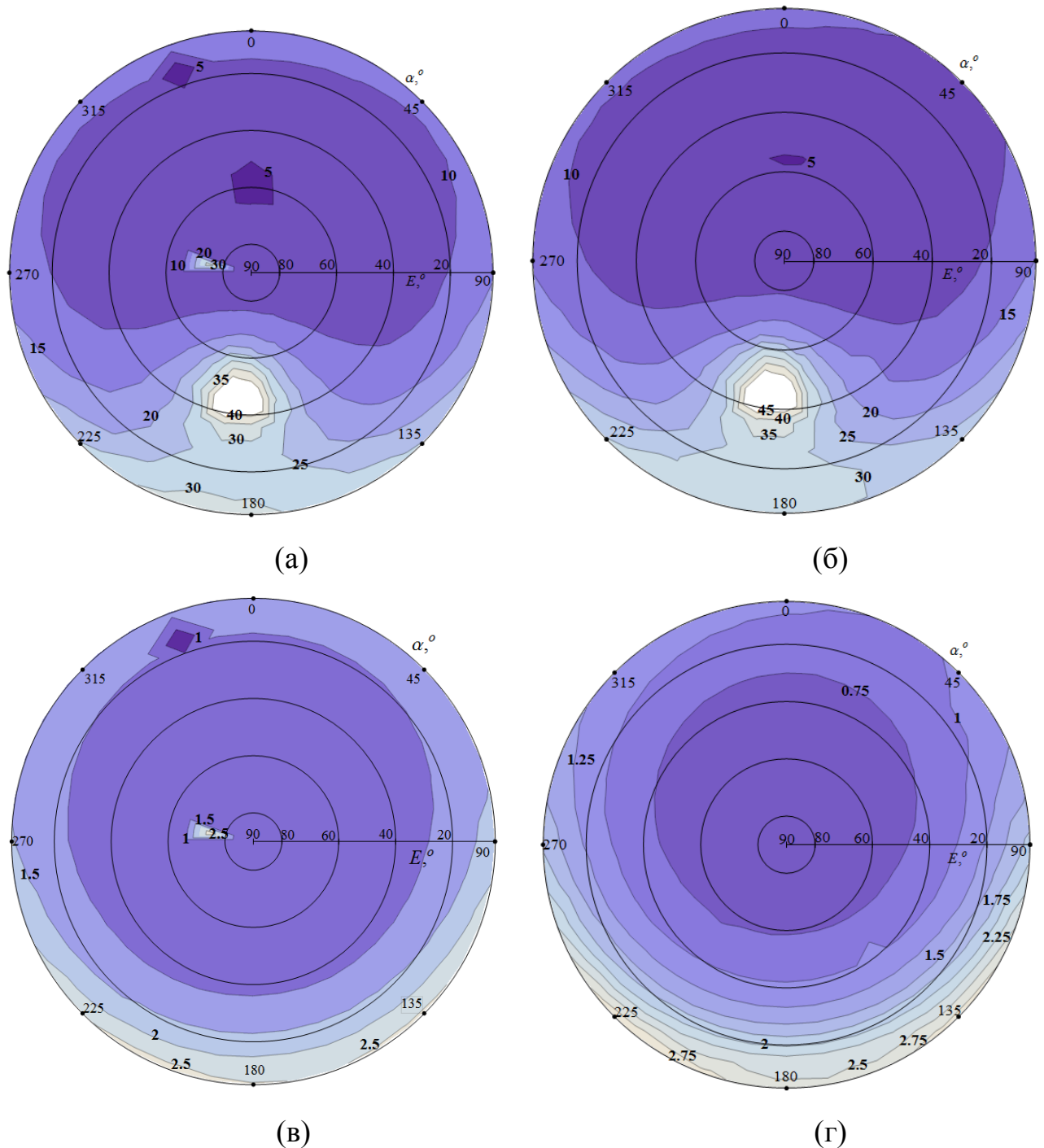


Рисунок 26 - Распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы (в дм^2) сигнала ГНСС в координатах «угол возвышения - азимут» для приемника в пункте с координатами 34.4° с.ш. 134.7° в.д.. 12 февраля 2000 г., в 12:00 UT (а,в) и 13:00 UT (б, г) с учетом анизотропии неоднородностей ((а) и (б)) и в предположении об изотропии неоднородностей ((в) и (г))

Стоит отметить, что моделирование также проводилось для нескольких значений степени вытянутости неоднородностей (см. рис. 27).

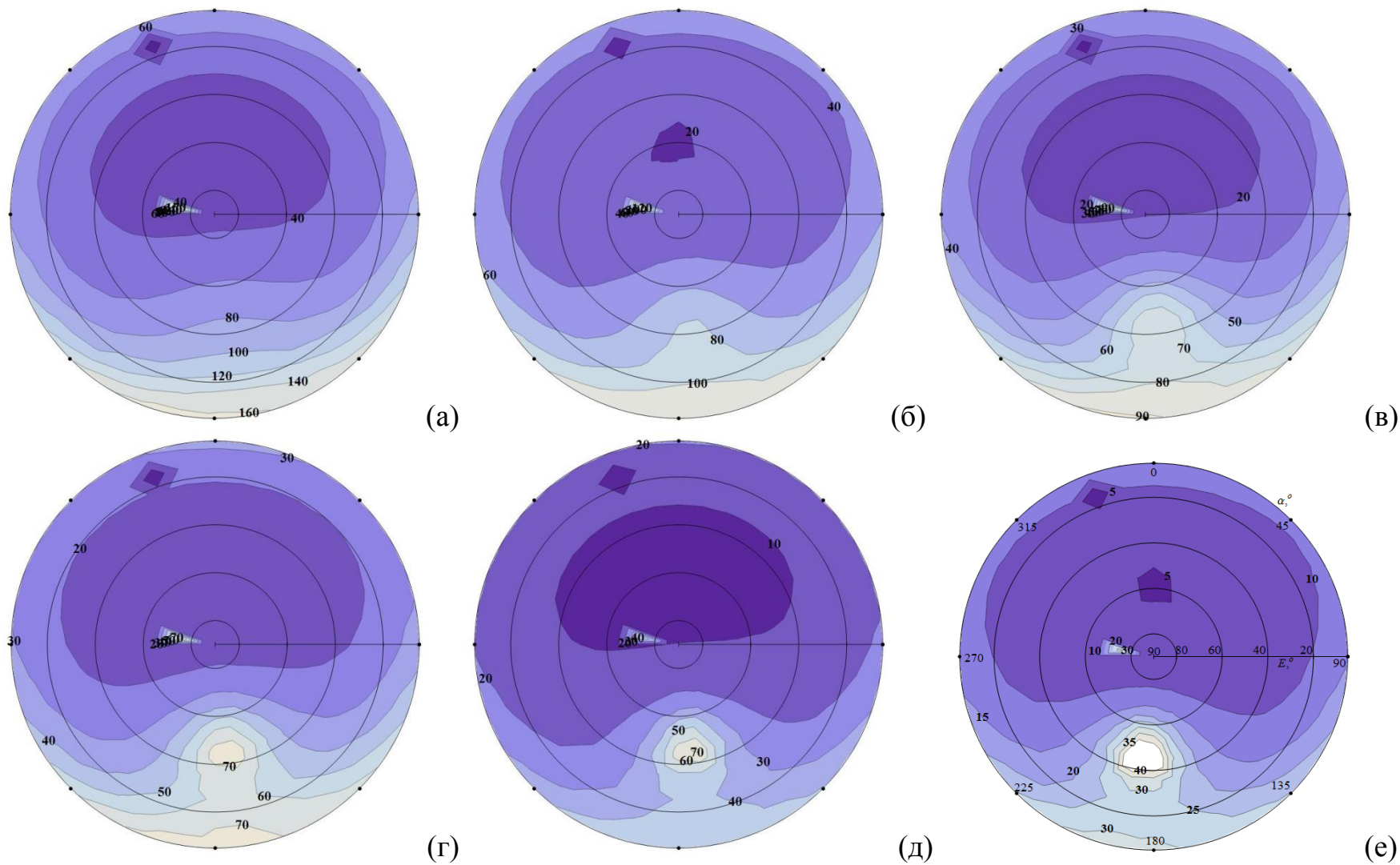


Рисунок 27 - Влияние степени вытянутости неоднородности на распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы (в дм^2) сигнала ГНСС 12 февраля 2000 г. 12:00. Положение приемника: 34.4° с.ш. 134.7° в.д.. Степень вытянутости: $\alpha=2$ (а); $\alpha=3$ (б); $\alpha=4$ (в); $\alpha=5$ (г); $\alpha=8$ (д), $\alpha=10$ (е)

Было получено, что при увеличении степени вытянутости неоднородности происходит усиление флуктуаций фазы при фиксированных поперечном масштабе неоднородности и азимуте происходит уширение «пика» в зависимости дисперсии фазовых флуктуаций от угла возвышения, а также 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 P_{slip} с величиной дисперсии σ^2 при пороге π имеет вид:

$$P_{slip} = \left(1 - \operatorname{Erf} \left(\frac{\pi}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right) \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

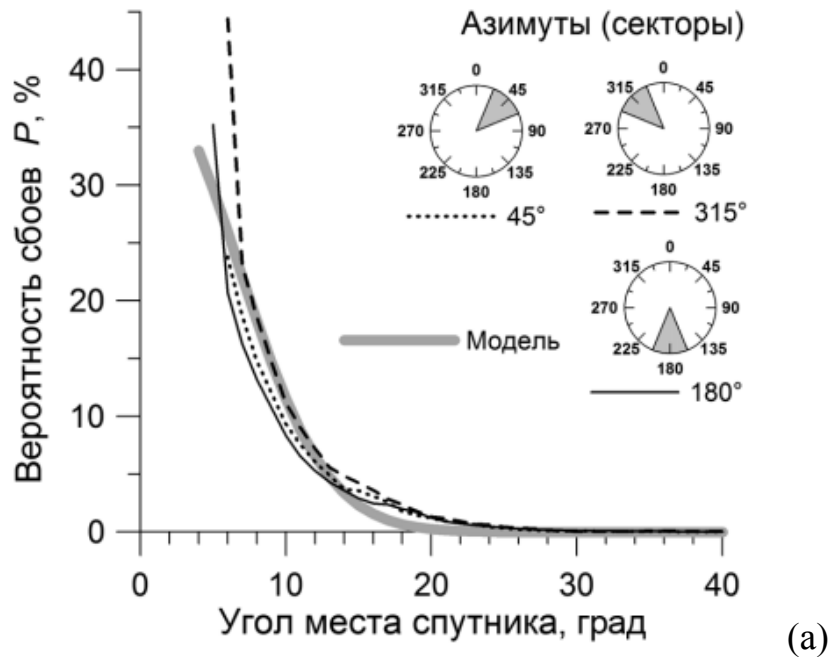
Анализ зависимости вероятности возникновения сбоев (3.4) от угла возвышения и азимута спутника показал, что картина распределения зависимости (3.4) в координатах «угол возвышения - азимут» качественно не отличается от картины распределения дисперсии фазового пути принимаемого сигнала.

Для интерпретации результатов измерений пространственно-временного распределения относительной плотности сбоев [20, 100] совместно с И.В. Безлером было проведено численное моделирование вероятности возникновения сбоя с помощью формул (3.1) - (3.4). При этом результаты моделирования сравнивались с экспериментальными кривыми зависимостей относительной плотности сбоев от угла возвышения спутника, полученные в работах [20, 108] А.Б. Ишиным. Подчеркнем, что под относительной плотностью сбоев в работах [20, 108] понималось отношение числа приемников, на которых произошел сбой сопровождения фазы сигнала к общему количеству приемников, работающих в данный момент времени.

Моделирование в спокойные дни показало хорошее качественное совпадение экспериментальных и модельных (серая кривая) данных для фоновой

ионосферы с изомерными ($\alpha = 1.0$) неоднородностями (см. 28а).

GPS GEONET



GPS GEONET 12 февраля 2000 г.

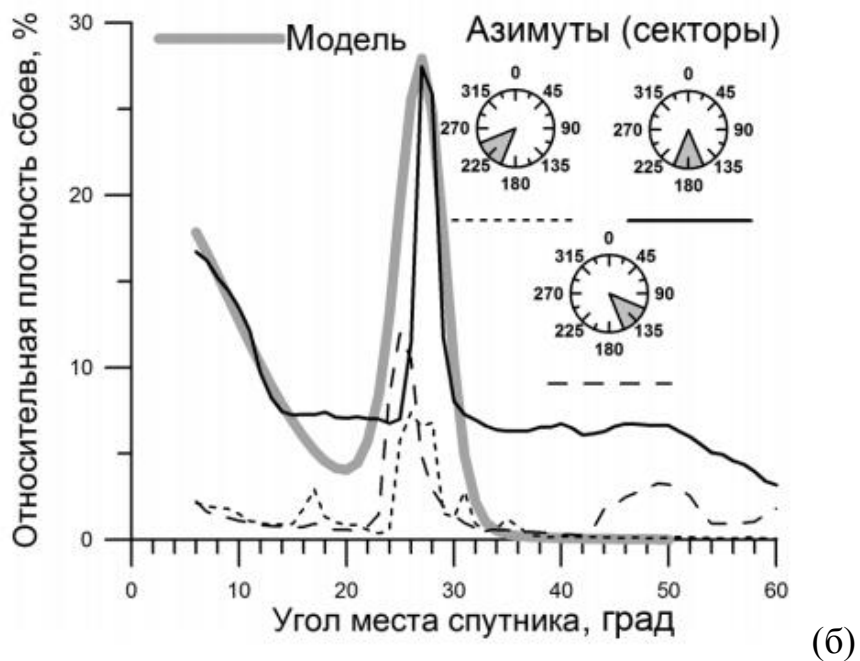


Рисунок 28 - Зависимости плотности сбоев сопровождения фазы несущей от угла места спутника для разных секторов по данным сети GEONET. Данные приведены по отдельным секторам. Модельные расчеты сбоев (сплошная жирная серая кривая) проводились без учёта (а) и с учетом (б) магнитоориентированности неоднородностей

Для объяснения эффекта появления двух максимумов в распределении относительной плотности сбоев (рис. 28б) к модели фоновой ионосферы (модель Чепмена) была добавлена модель анизотропного «пузыря» ионизации со степенью вытянутости $\alpha = 3$, содержащего анизотропные неоднородности и представляющего собой гауссову область. Таким образом, (см. также [20]), было выявлено, что только присутствием анизотропных 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. 26а и 26в, 26б и 26г, а также 28а и 28б). 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. 29) соответствует так называемому эффекту магнитного зенита [20, 108].

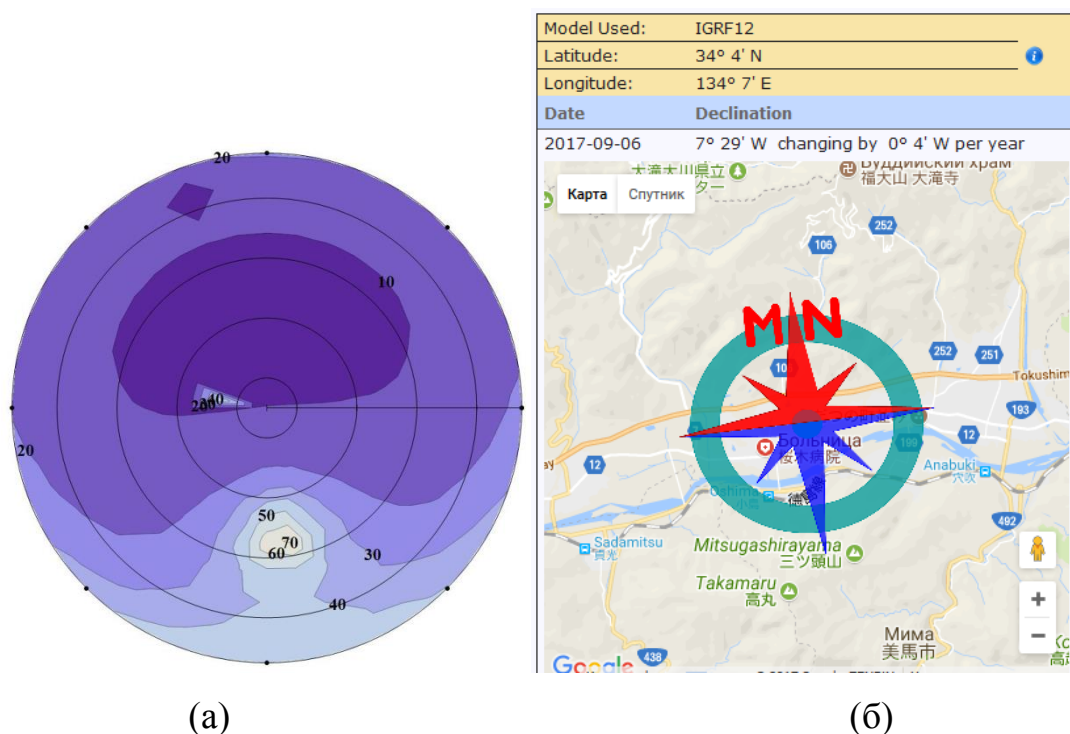


Рисунок 29 - Сравнение распределения дисперсии (3.1) фазового пути (в дм^2) сигнала ГНСС 12 февраля 2000 г. 12:00 (а) и оценочного значения магнитного склонения (б) для приемника с координатами: 34.4° с.ш. 134.7° в.д.. Степень вытянутости неоднородности $\alpha = 8$

Наиболее примечательным является то, что в одинаковых условиях присутствия анизомерных неоднородностей с ростом степени вытянутости дисперсия флуктуаций фазы растет, а скорость ее возрастания - падает (см. рис. 27). Причем скорость возрастания дисперсии флуктуаций фазы равномерна по всем направлениям от центра пика (максимума) флуктуаций, кроме южного: $180^{\circ} \pm 40^{\circ}$.

3.4 Выводы

В данном разделе была представлена классификация ионосферных неоднородностей, рассмотрены эффекты анизомерии ионосферных неоднородностей в фазовых измерениях ГНСС.

Сравнение дисперсий флуктуаций фазы, возникающих из-за присутствия изомерных и анизомерных неоднородностей, показало, что в присутствии анизомерных неоднородностей возникает, во-первых, зависимость дисперсии флуктуаций фазы ГНСС измерений от ориентации трассы спутник-наблюдатель, во-вторых – усиление флуктуационной составляющей фазовых измерений.

Сравнение результатов моделирования вероятности сбоя с результатами наблюдений показало, что сбои в большой степени связаны с флуктуациями фазы ГНСС сигнала в ионосфере с анизомерными неоднородностями.

Заключение

Сформулируем основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования:

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 «путник-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

анизотропных 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.

Список литературы

1. Grewal M.S. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration / M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews. - New York: Wiley, 2007. - 554 p.
2. Prasad R. Applied satellite navigation using GPS, GALILEO and Augmentation Systems / R. Prasad, M. Ruggieri. - London: Artech House, 2005. - 309 p.
3. Xu G. GPS Theory, algorithms and applications / G. Xu. - 2nd ed. - New York: Springer, 2007. - 353 p.
4. El-Rabbany A. Introduction to GPS. The Global Positioning / A. El-Rabbany. - Boston, London : Artech House, 2002. - 176 p.
5. French G. T. Understanding the GPS / G.T. French. – USA : GeoResearch, Inc., 1996. – 255 p.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. Монография / К.М. Антонович. - М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. - 334 с.
7. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В.С. Яценков. – М. : Горячая линия-Телеком, 2005. – 271 с.
8. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.
9. Hofmann-Wellenhof B. Global Positioning System. Theory and practice. – Fifth, revised edition / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J.Collins. – Wienn, New-York: Springer, 2001. – 384 p.
10. Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Walse. - Wien : Springer-Verlag, 2008. – 516 p.
11. Генике А.А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А.А. Генике, Г.Г. Побединский. – М. : Картгеоцентр, 2004. – 355 с.

12. Klobuchar J.A. Ionospheric Corrections for the Single Frequency User of the Global Positioning System / J.A. Klobuchar // National Telecommunications Conference, NTC'82. Systems for the Eighties. Galveston, Texas, USA (New York: IEEE, 1982). - 1982.

13. Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I, II / Ed. Parkinson B.W., Spilker J.J. PROGRESS IN ASTRONAUTICS AND AERONAUTICS Volume 163. Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024 -2518, 1996. - 781 p.

14. Moorcroft D.R. The shape of the F-region irregularities which produce satellite scintillations-Evidence for axial asymmetry / D.R. Moorcroft, K.S. Arima // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1972. - V. 34. - P. 437-450. - doi: 10.1016/0021-9169(72)90045-1.

15. Maruyama T. Ionosphere and Thermosphere / T. Maruyama // Journal of the Communications Research Laboratory. Special Issue on Space Weather Forecast. Study on Space Weather and its Hazards. - 2002. - V.49, №.3. - P. 163 – 179.

16. Yeh K.C. F-Region Irregularities Studied by Scintillation of Signals From Satellites / K.C. Yeh, G. W. Swenson, Jr. // Radio Science. – 1964. - V. 68D, №.8. - P. 881 – 894.

17. Budden K.G. The propagation of radio waves / K.G.Budden. - Cambridge: Cambridge University Press, 1961. - 562 p.

18. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург. – М. : Наука, 1967. – 685 с.

19. Temporal dependence of GPS cycle slip related to ionospheric irregularities over China low-latitude region / D. H. Zhang, Z. Xiao, M. Feng, Y. Q. Hao, L. Q. Shi, G. L. Yang, Y. C. Suo // Space weather. – 2010. - V. 8. - S04D08. - doi:10.1029/2008SW000438.

20. 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.

21. Бекентаева А.А. О компенсации ионосферной погрешности в глобальной спутниковой навигации [Электронный ресурс] / А. А. Бекентаева // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ».* – 2013. – №2. – С. 3 – 7. – URL : http://www.eltech.ru/assets/files/university/izdatelstvo/izvestiya-spbgetu-leti/LETI_2_13.pdf.

22. 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.

23. Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates / M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz, R. Orús // *Journal of Geophysical Research.* - 2007. - V. 112. - N B08417. - doi:10.1029/2006JB004707.

24. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates / M. Fritsche, R. Dietrich, C. Knöfel, A. Rülke, S. Vey, M. Rothacher, P. Steigenberger // *Geophysical Research Letters.* - 2005. - V. 32, № 23. - doi: 10.1029/2005GL024361.

25. Munekane H. A semi-analytical estimation of the effect of second-order ionospheric correction on the GPS positioning / H. Munekane // *Geophysical Journal International.* - 2005. - V. 163, № 1. - P. 10-17. - doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02723.x.

26. Model analysis method (MAM) on the effect of the second-order ionospheric delay on GPS positioning solution / X.F. Liu, Y.B. Yuan, X.L. Huo, Z.S. Li, W. Li // *Chinese Science Bulletin.* - 2010. - V.55, №.15. - P.1529–1534. - doi: 10.1007/s11434-010-3070-2.

27. Palamartchouk K. Apparent geocenter oscillations in Global Navigation Satellite Systems solutions caused by the ionospheric effect of second order / K. Palamartchouk // *Journal of Geophysical Research.* - 2010. - V.115. - N B3. - doi: 10.1029/2008JB006099.

28. Hawarey M. Effects of the 2nd order ionospheric terms on VLBI measurements / M. Hawarey, Th. Hobiger, H. Schuh // *Geophysical Research Letters*. - 2005. - V.32, №11. - doi: 10.1029/2005GL022729.

29. Marques H.A. RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files / H.A. Marques , J.F.G. Monico, M. Aquino // *GPS Solutions*. - 2011. - V. 15, №. 3. - P. 305-314. doi 10.1007/s10291-011-0220-1.

30. Global modeling 2nd-order ionospheric delay and its effects on GNSS precise positioning / H.P. Zhang, H.X. Lv, M. Li, C. Shi // *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*. - 2011. - V.54, № 6. - P.1059–1067. - doi: 10.1007/s11433-011-4346-5.

31. Hoque M.M. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning / M.M. Hoque, N. Jakowski // *Journal of Geodesy*. - 2006. - V. 81. - P. 259–268. - doi:10.1007/s00190-006-0106-0.

32. Hoque M.M. Mitigation of higher order ionospheric effects on GNSS users in Europe / M.M. Hoque, N. Jakowski // *GPS Solution*. - 2008. - V.12. - № 2. - P. 87-97. - doi: 10.1007/s10291-007-0069-5.

33. Hoque M.M. Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning / M.M. Hoque, N. Jakowski // *Radio Science*. - 2008. - V. 43, № 5. - doi: 10.1029/2007RS003817.

34. Elsobeiey M. On modelling of second-order ionospheric delay for GPS precise point positioning / M. Elsobeiey, A. El-Rabbany // *The Journal of navigation*. – 2012. – V. 65. – P. 59–72. - doi:10.1017/S0373463311000531.

35. Beach T. Ionospheric scintillation monitoring and mitigation using a software GPS receiver / T. Beach // *Radio Science*. – 2004. - V. 39. - RS1S21. - doi: 10.1029/2002RS002812.

36. Demyanov V.V. Effects of Solar Radio Emission and Ionospheric Irregularities on GPS/GLONASS Performance / V.V. Demyanov, Y.V. Yasyukevich, Sh. Jin (Ed) // *Geodetic Sciences - Observations, Modeling and Applications*. – 2013. - P. 177–222. - doi: 10.5772/54568.

37. Kim B.C. Contribution of ionospheric irregularities to the error of dual-frequency GNSS positioning / B.C. Kim, M.V. Tinin // *Journal Geodesy*. -2007. - V. 81. - P. 189–199, doi 10.1007/s00190-006-0099-8.

38. Kintner P.M. GNSS and ionospheric scintillation: how to survive the next solar maximum [Электронный ресурс] / P.M. Kintner, T. Humphreys, J. Hinks // *InsideGNSS*. -2009. - V. 4, №4. – P. 22 - 30. - URL: <http://www.insidegnss.com/>.

39. Kintner P.M. GPS and ionospheric scintillations / P.M. Kintner, B.M. Ledvina, E.R. de Paula // *Space weather*. -2007. - V. 5. - S09003. - doi:10.1029/2006SW000260SBAS

40. Effect of Ionospheric Scintillations on GNSS – A White Paper [Электронный ресурс] / SBAS Ionospheric Working Group. Accepted in November 2010 // URL: http://waas.stanford.edu/papers/IWG/sbas_iono_scintillations_white_paper.pdf.

41. Propagation model for signal fluctuations on transionospheric radio links / V.E. Gherm, N.N. Zernov, S. M. Radicella, H.J. Strangeways // *Radio Science*. – 2000. - V. 35. - P.1221 - 1232.

42. Gherm V.E. Propagation model for transionospheric fluctuating paths of propagation: Simulator of transionospheric channel / V.E. Gherm, N.N. Zernov, H.J. Strangeways // *Radio Science*. - 2005. - V. 40. - RS1003. - doi: 10.1029/2004RS003097.

43. Skone S. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance / S. Skone, M. de Jong // *Earth Planets Space*. - 2000. – V. 52. – P. 1067–1071.

44. Wernik A.W. Ionospheric irregularities, scintillation and its effect on systems / A.W. Wernik, L. Alfonsi, M. Materass // *Acta Geophysica Polonica*. – 2004. - V. 52, №2. – P. 237 – 249.

45. Cervera M.A. Latitudinal and temporal variation of equatorial ionospheric irregularities determined from GPS scintillation observations / M. A. Cervera, R. M. Thomas // *Annales Geophysicae*, European Geosciences Union (EGU). – 2006. – V. 24, №12. - P. 3329 - 3341.

46. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере / А.В. Гуревич // Успехи физических наук. Обзоры актуальных проблем. – 2007. – Т. 177, №11. – С. 1145 – 1177.
47. Афраймович Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. - Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
48. Forte B. Geometrical control of scintillation indices: What happens for GPS satellites / B. Forte and S. M. Radicella // Radio Science. – 2004. – V.39. - RS5014. - doi:10.1029/2002RS002852.
49. Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions / L.Spogli, L. Alfonsi, G. De Franceschi, V. Romano, M.H.O. Aquino, A. Dodson // Annales Geophysicae. – 2009. – V. 27, № 9. –P. 3429–3437. - doi:10.5194/angeo-27-3429-2009.
50. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 270 с.
51. Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single frequency GPS users / J.A. Klobuchar // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. – 1987. – AES – 23. – P. 325 – 331.
52. Гефан Г.Д. Исследование глобальной статистической модели полного электронного содержания в ионосфере, основанной на методе естественных ортогональных функций и предназначенной для систем спутниковой навигации // В.Б. Иванов, Г.Д. Гефан, О.А. Горбачев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – Т.36, № 4. – С. 154 – 160.
53. Инженерная геодезия : Учебник для вузов / Е.Б. Ключин, М.И.Киселев, Д.Ш. Михелев, В.Д. Фельдман. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 481 с.
54. Tsui J.B.-Y. Fundamentals of Global Positioning System Receivers A Software Approach / J.B.-Y. Tsui : 2nd edition. USA : Wiley – Interscience, 2005. – 352 p.

55. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография / К.М. Антонович. - М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2006. - 360 с.

56. Zogg J.-M. Основы спутниковой навигации : Краткое руководство / J. - M. Zogg. - 2007. - 132 с.

57. Othieno N. Satellite Navigation Using Doppler and Partial Pseudorange Measurements [Электронный ресурс] / N.Othieno, S. Gleason // GPS World : сайт. - URL : <http://gpsworld.com/innovation-easy-peasy-lemon-squeezy>.

58. Тяпкин В.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В.Н. Тяпкин, Е.Н. Гарин. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 260 с.

59. Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы : время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат / А.А. Поваляев. - М. : Радиотехника, 2008. - 328 с.

60. Першин Д.Ю. Определение местоположения высокой точности для односторонних приёмников спутниковой навигации с использованием инерциальных датчиков [Электронный ресурс] / Д.Ю. Першин, А.С. Щербаков // IX Международные научный конгресс и выставка «ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2013» : материалы международной научной конференции «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». Новосибирск, 15–26 апр. 2013 г. - Новосибирск, СГГУ, 2011. – С. 3 - 7. – Режим доступа: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/Lyap-100/fulltext/74643/75486/KinemPPP.pdf>

61. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations / N. Wang, Y. Li, Z. Li, O.Montenbruck, B.Tan // Journal of Geodesy. – 2016. - V.90, Issue 3. – P. 209–228. - doi:10.1007/s00190-015-0867-4.

62. Оценка динамики дифференциальных кодовых задержек в каналах ГЛОНАСС и GPS / Ю.В. Ясюкевич, А.Мыльникова, В.Е. Куницын, А.М. Падохин // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, 2015. - P. 173-176.

63. Мыльникова А.А. Восстановление абсолютного значения, пространственных градиентов и временной производной полного электронного содержания по данным GPS/ГЛОНАСС : дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук : 03.04.03 / А.А. Мыльникова ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. - Иркутск, 2017. – 98 с.

64. Подкорытов А.Н. Математическая модель смещения фазовых центров антенн при высокоточном местопределении в глобальных навигационных комплексах [Электронный ресурс] /А.Н. Подкорытов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. № 50. - С 1 — 13. - URL: <https://www.mai.ru/upload/iblock/354/matematiceskaya-model-smeshcheniya-fazovykh-tsentrov-antenn-pri-vysokotochnom-mestopredelenii-v-globalnykh-navigatsionnykh-kompleksakh.pdf>.

65. Комаровский Ю.А. Оценка погрешностей определения координат судовым GPS-приемником SPR-1400 во время магнитной бури 15 декабря 2006 года / Ю.А. Комаровский // Солнечная активность и ее влияние на Землю. - 2008. - Вып. 11. – С. 52 – 73.

66. Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Диагностика естественных неоднородных сред акустическими и радиофизическими методами на базе комплекса уникальных и инструментов ИСЗФ (промежуточный)». Иркутск : Иркутский государственный университет, 2011 г. – 143 с.

67. Ionospheric Effects on Microwave Signals / M. Alizadeh, D. Wijaya, Th. Hobiger, R. Weber, H. Schuh // Atmospheric Effects in Space Geodesy / Johannes Böhm Harald Schuh. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. -P. 35 - 71. - ISSN 2194-5225.

68. Виноградов А.В. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах [Электронный ресурс] / А.В. Виноградов, А.В. Войтенко, А.Ю. Жигулин // ГЕОПРОФИ . - 2010. - № 2. - P. 27 – 30.

69. Mohino E. Understanding the role of the ionospheric delay in single-point single-epoch GPS coordinates / E. Mohino // *Journal Geodesy*. – 2008. – V. 82. – P. 31–45. – doi: 10.1007/s00190-007-0155-z.

70. Ionospheric error analysis in GPS measurements / N. Crocetto, F. Pingue, S. Ponte, G. Pugliano, V. Sepe // *Annals of geophysics*. – 2008. - V. 51, № 4. – P. 585 – 595.

71. Kunches J.M. Eye on the ionosphere: GPS after SA / J.M. Kunches, J.A. Klobuchar // *GPS Solutions*. - 2001. - V.4, №.3. - P.52-54.

72. Bassiri 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.

73. Brunner F.K. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations / F. K. Brunner, M. Gu // *Manuscripta Geodaetica*. - 1991. - №16. - P.205-214.

74. Ashmanets V.I. Exact calculation of errors at tropospheric propagation / V.I. Ashmanets, V.V. Vodyannikov, B.V. Troitsky // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. - 1995. - V. 58. - № 10. - P.1161-1163.

75. Triple-frequency method for high-order ionospheric refractive error modeling in GPS modernization / Z. Wang, Y. Wu, K. Zhang, Y. Meng // *The Journal of Global Positioning Systems*. - 2005. - V. 4, № 1-2. - P. 291-295.

76. GAMIT Reference Manual GPS Analysis at MIT / R. 10.6

77. Morton Y.T. Assessment of second-order ionosphere error in GPS range observables using Arecibo incoherent scatter radar measurements. / Y. T. Morton, Q. Zhou, F. van Graas. // *Radio Science*. - 2009. - V. 44. – RS1002, doi:10.1029/2008RS003888

78. 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.

79. Amiri-Simkooei A.R. Noise Characteristics in High Precision GPS Positioning [Электронный ресурс] / A.R. Amiri-Simkooei, C.C.J.M. Tiberius, P.J.G.

Teunissen // VI Hotine-Marussi Symposium of Theoretical and Computational Geodesy: Challenge and Role of Modern Geodesy, 29 May - 2 June, 2006, Wuhan, China. - URL : http://www1.sgg.whu.edu.cn/icct/html/icct_ppt/S9/2-AmiriSimkooei_AliReza_S9_3.pdf

3.pdf

80. Schaal R.E. A methodology for monitoring vertical dynamic sub-centimeter displacements with GPS / R.E. Schaal, A.P.C. Larocca // *GPS Solution*. - 2002. - V. 5, №. 3. - P. 15-18. - doi: 10.1007/PL00012895.

81. Higher-order ionospheric effects in GPS time and frequency transfer / S. Pireaux, P. Defraigne, L. Wauters, N. Bergeot, Q. Baire, C. Bruyninx // *GPS Solutions*. - 2010. – V.14. – P. 267–277. - doi: 10.1007/s10291-009-0152-1.

82. Strangeways H.J. Rigorous calculation of ionospheric effects on GPS Earth-Satellite paths using a precise path determination method / H.J. Strangeways, R.T. Ioannides // *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. - 2002. - V.37, №№ 2–3. – P.281–292.

83. Kashcheyev A. Estimation of higher-order ionospheric errors in GNSS positioning using a realistic 3-D electron density model / A. Kashcheyev, B. Nava, S.M. Radicella // *Radio Science*. – 2012. - V. 47. - RS400. - doi:10.1029/2011RS004976.

84. Bassiri S. Three – frequency ranging systems and their applications to ionospheric delay calibration : progress report 42-103 / S. Bassiri // *Telecommunications and Data Acquisition*. - Pasadena : NASA Jet Propulsion Laboratory, Caltech. - 1990. - P. 14-20.

85. Kim B.C., Tinin M.V. Potentialities of multifrequency correction in Global Navigation Satellite Systems / B.C. Kim, M.V. Tinin // *Journal of Geodesy*. - 2011. - V. 85, №. 3. - P. 159-169. – doi:: 10.1007/s00190-010-0425-z.

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

87. 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.

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

89. Серапинас Б.Б. Введение в ГЛОНАСС и GPS измерения : Учебное пособие / Б.Б. Серапинас. - Ижевск : Удм. Гос. Ун-т, 1999. - 93 с.

90. Moore R.C. Magneto-ionic polarization and GPS signal propagation through the ionosphere / R.C. Moore, Y.T. Morton // *Radio Science*. – 2011. - V. 46, №. 1. - doi:10.1029/2010RS004380.

91. Kim B.C. The influence of different-scale ionospheric irregularities on the residual error of the satellite navigation system / B.C. Kim , M.V. Tinin // *7th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory Proceedings*, Oct. 26-29, 2006. Guilin China. - V. I. - P. 433-436.

92. КИМ Б.Ч. Влияние ионосферных неоднородностей на точность двухчастотных систем GPS / Б.Ч. Ким, М.В. Тинин // *Геомагнетизм и аэронавигация*. – Т. 47. – №2. – С. 254-259.

93. Kim B.C., Tinin M.V. The second-order Rytov approximation and residual error in dual-frequency satellite navigation systems / B.C. Kim, M.V. Tinin // *Wave Random Complex*. - 2009a. - V. 19, № 2. - P. 284-304. - doi: 10.1080/17455030802460080.

94. Manda M. International Geomagnetic Reference Field—the eighth generation / M. Manda, S. Macmillan // *Earth Planets Space*. - 2000. - V. 52, №.12. - P.1119–1124.

95. Delgado M.R. Magnetic Field – Ionosphere. Modeling the Space Environment [Электронный ресурс] / M.R. Manuel // *European Masters in Aeronautics and Space*. E.T.S.I. Aeronauticos. Universidad Politecnica de Madrid. April 2008. – 37 p. – URL : http://ocw.upm.es/ingenieria-aeroespacial/modeling-the-space-environment/contenidos/material-de-clase/mse08_mageticionos.pdf.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

99. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum / P. Prikryl, P.T. Jayachandran, S.C. Mushini, D. Pokhotelov, J.W. MacDougall, E. Donovan, E. Spanswick, J.-P.St.-Maurice // Annales Geophysicae. – 2010. – V. 28. – P. 1307–1316. - doi:10.5194/angeo-28-1307-2010.

100. 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.

101. Ma G. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes / G. Ma, T. Maruyama // Geophysical Research Letters. - 2006. –V. 33. . L21103.- doi: 10.1029/2006GL027512.

102. Fremow E.J. Modelling and scientific application of scintillation results / E.J. Fremow, J.A. Secan // Radio Science. - 1984. - V.19, №.3. - P.687-694.

103. Rino C.L. The angle dependence of singly scattered wavefields / C.L. Rino, E.J. Fremow // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1977. - V. 39. - P. 859-868.

104. 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.

105. Sreeja V. Impact of ionospheric scintillation on GNSS receiver tracking performance over Latin America: Introducing the concept of tracking jitter variance

maps / V. Sreeja, M. Aquino, Z.G. Elmas // Space weather. – 2011. - V. 9. - S10002. - doi:10.1029/2011SW000707.

106. Wheelon A.D. Electromagnetic Scintillation. Vol. 1. Geometrical Optics / A.D. Wheelon. - Cambridge University Press, Cambridge, 2004. – 455 p.

107. Fejer B.G. Ionospheric irregularities / B.G. Fejer , M.C. Kelley // Review Geophys.Space Phys. 1980. V.18. №2. P.401 – 454.

108. 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.

109. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. - М. : Наука, 1986. – 544 с.

110. Spherical functions and their normalization [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://spenvisoma.be/help/background/magnifield/legendre.htm#Smidt1>.

111. Observational geomagnetism. Lecture 5 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://epm.geophys.ethz.ch/finlay/teachig/Core_15.pdf

112. Герасимов И.А. Небесная механика (Общий курс) / И.А. Герасимов, Б.Р. Мушаилов. - М. : Наука, 2007. - 613 с.

Список рисунков

Рисунок 1—Определение позиции приемника по пересечению трех сфер.
Взято из работы [54] 17

Рисунок 2 — Схематическое описание процесса возникновения ошибок измерений ГНСС. Взято из [58] 20

Рисунок 3 — Геометрия распространения сигнала от спутника к приемнику (реальные пропорции не сохранены) 37

Рисунок 4 — Взаимная ориентация индукции геомагнитного поля Земли и волнового вектора. Взято из работы [22] 43

Рисунок 5 -Типичные зависимости ошибки D_2 (в мм) от угла возвышения спутника для различных положений приемника. Азимуты спутника: 0° (а), 90° (б), 180° (в) и 270° (г)44

Рисунок 6 - Типичные зависимости ошибки D_2 (в мм) от азимута спутника для различных положений приемника. Углы возвышения спутника: 20° (а); 45° (б); 60° (в) 45

Рисунок 7 — Распределение (в мм) по Земной поверхности погрешности (2.22) использования приближения тонкого слоя: (а) — угол возвышения спутника 90° ; (б) угол возвышения спутника — 60° , азимут - 0° ; (в) угол возвышения спутника — 10° , азимут - 45° ; (г) угол возвышения спутника — 60° , азимут - 180°
48

Рисунок 8 — Распределение (в мм) по Земной поверхности ионосферной ошибки второго порядка (2.21), вычисленной с использованием приближения тонкого слоя для различных положений спутника: (а) - для угла возвышения 20° и азимута - 90° ; (б) - для угла возвышения 60° и азимута - 90° ; (в) - для угла возвышения 20° и азимута - 270° ; (г) - для угла возвышения 60° и азимута — 270°
50

Рисунок 9 — Модели магнитного поля Земли (рисунок взят из работы [94]):

52

Рисунок 10 — Пространственное распределение (в мм) ионосферных поправок второго порядка D_{2IGRF} , рассчитанных с использованием международной модели магнитного поля; (а) - для угла возвышения 20° и азимута - 90° ; (б) - для угла возвышения 60° и азимута - 90° ; (в) - для угла возвышения 20° и азимута - 270° ; (г) - для угла возвышения 60° и азимута — 270° 53

Рисунок 11 — Пространственное распределение (в мм) ионосферных поправок второго порядка D_{2IGRF} , рассчитанных с использованием международной модели магнитного поля для углов возвышения и азимутов, соответственно: 20° и 0° (а); 60° и 0° (б); 20° и 180° (в); 60° и 180° (г) 54

Рисунок 12 — Различие (в мм) поправок второго порядка $\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$, рассчитанных с использованием различных моделей магнитного поля для угла возвышения 90° 55

Рисунок 13 — Различие (в мм) поправок второго порядка $\Delta D_m = D_{2IGRF} - D_{2Dip}$, рассчитанных с использованием различных моделей магнитного поля. (а) - для угла возвышения 20° и азимута - 90° ; (б) - для угла возвышения 60° и азимута - 90° ; (в) - для угла возвышения 20° и азимута - 270° ; (г) - для угла возвышения 60° и азимута — 270° 56

Рисунок 14 — К учету влияния неточного задания высоты h_m , на которой вычисляется C_H , на точность вычисления поправки (19). Здесь h_0 - истинная высота максимума ионосферного слоя, h_{m-} - уровень, ниже h_0 на 10% 58

Рисунок 15 — Погрешность (в мм) $D_2^{-\Delta h}$ в расчетах ионосферной ошибки второго порядка, вносимая заданием высоты h_{m-} на 10% ниже истинного значения $h_0 = 320$ км. (а) - для углов возвышения 20° (штриховая линия) и 60° (непрерывная линия) при азимуте 90° ; (б) - для угла возвышения 20° при азимутах 90° (штриховая линия) и 270° (непрерывная линия) 60

Рисунок 16 — Распределение (в мм) погрешности вычисления остаточной ошибки (2.23) по Земному шару при углах возвышения 30° (сплошная линия) и 85°

(пунктирная линия). Азимут спутника 0° (а); 90° (б), 180° (в); 270° (г). Модель магнитного поля – магнитный диполь 62

Рисунок 17 — Распределение (в мм) погрешности вычисления остаточной ошибки (2.23) по Земному шару при угле возвышения 40° и азимуте спутника 0° (а); 180° (б), а также азимуте 180° и углах возвышения 50° (в) и 80° (г). Модель магнитного поля - IGRF 63

Рисунок 18 — Распределение (в мм) погрешности вычисления остаточной ошибки (2.23) по Земному шару при угле возвышения 40° и азимуте спутника 0° (а); 180° (б), Азимуте 180° и углах возвышения 50° (в) и 80° (г). Модель магнитного поля – IGRF. Данные модели NeQuick выбраны за 15 января 2017 г., 12:00 LT 64

Рисунок 19 — Распределение (в мм) остаточной ошибки (2.30) по земному шару для угла возвышения и азимута соответственно: угла возвышения 10° и азимута 10° (а); угла возвышения 10° и азимута 135° (б); угла возвышения 60° и азимута 10° (в); угла возвышения 70° и азимута 135° (г) 68

Рисунок 20 - Геометрия распространения сигнала ГНСС через область с анизотропными неоднородностями ($l_\perp = l_x = l_y$ и l_z - поперечные и продольный внешние масштабы неоднородностей). Здесь \vec{B} - вектор магнитного поля, Θ_B и α_B - угол возвышения и азимут вектора \vec{B} , соответственно; θ_1 и θ_2 - углы между волновыми векторами, соединяющими приемник со первым и вторым спутниками, соответственно. Положение спутников характеризуются углами возвышения E_1 и E_2 и азимутами α_1 и α_2 , соответственно 71

Рисунок 21 - Суточный ход горизонтальной меридианальной компоненты магнитного поля (а), наклонного ПЭС (б), индекса мерцаний S4(с), фазовых флуктуаций (д) и количества срывов сопровождения фазы (е), наблюдаемых в пункте Cambridge Bay. Взято из [99] 74

Рисунок 22 – Зависимость σ^2 / σ_0^2 от угла возвышения спутника для различных координат приемника в присутствии изотропных и анизотропных неоднородностей по отдельности (а) и совместно (б). Положение приемников и

типы присутствующих неоднородностей на рис. а: изомерная неоднородность - тонкая сплошная линия для приемника с координатами 70° с.ш., 10° в.д.; анизомерные неоднородности неоднородностей - сплошная толстая линия - для приемника с координатами 10° ю.ш., 10° в.д.; пунктирная линия для приемника с координатами 30° с.ш., 10° в.д.; штрихпунктирная линия - положение приемника - 50° с.ш., 10° в.д.. Азимут спутника - 180° . Положение приемника и типы присутствующих неоднородностей на рис. б: одновременно присутствуют изомерные и анизомерные неоднородности, координаты приемника: 50° с.ш., 10° в.д., азимут спутника- 50° 77

Рисунок 23 - Пространственное распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы сигнала ГНСС (в дм^2) в случае анизомерных неоднородностей для спутника с углом возвышения 40° и азимутами 0° (а), 90° (б), 180° (в), 270° (г). Отложенные по осям широты и долготы соответствуют координатам приемника 79

Рисунок 24 - Пространственное распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы сигнала ГНСС (в дм^2) в случае изомерных неоднородностей для спутника с углом возвышения 40° и азимутами 0° (а), 90° (б), 180° (в), 270° (г) 80

Рисунок 25 - Сравнение вкладов в дисперсию (3.1) 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° 81

Рисунок 26 - Распределение дисперсии (3.1) 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 (а,в) и 13:00 UT (б, г) с учетом анизомерии неоднородностей ((а) и (б)) и в предположении об изомерии неоднородностей ((в) и (г)) 83

Рисунок 27 - Влияние степени вытянутости неоднородности на распределение дисперсии (3.1) флуктуаций фазы (в дм^2) сигнала ГНСС 12 февраля 2000 г. 12:00. Положение приемника: 34.4° с.ш. 134.7° в.д.. Степень вытянутости: $\alpha=2$ (а); $\alpha=3$ (б); $\alpha=4$ (в); $\alpha=5$ (г); $\alpha=8$ (д), $\alpha=10$ (е) 84

Рисунок 28 - Зависимости плотности сбоев сопровождения фазы несущей от угла места спутника для разных секторов по данным сети GEONET. Данные приведены по отдельным секторам. Модельные расчеты сбоев (сплошная жирная серая кривая) проводились без учёта (а) и с учетом (б) магнитоориентированности неоднородностей 86

Рисунок 29 - Сравнение распределения дисперсии (3.1) фазового пути (в дм^2) сигнала ГНСС 12 февраля 2000 г. 12:00 (а) и оценочного значения магнитного склонения (б) для приемника с координатами: 34.4° с.ш. 134.7° в.д.. Степень вытянутости неоднородности $\alpha = 8$ 87

Благодарности

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю, д. ф.-м. н., профессору М.В. Тинину за чуткое руководство, безграничное терпение и неоценимую помощь на всех этапах выполнения диссертационного исследования и своей семье за всестороннюю поддержку и понимание.

Также автор благодарит:

- Иванова 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.

Приложение. Некоторые модели магнитного поля Земли

1. Модель диполя магнитного поля.

Считается, что магнитное поле Земли лучше всего описывается полем геоцентрического диполя с наклоном оси по отношению к оси вращения Земли в $110,5^\circ$ или углами $\beta = 291^\circ$ и $\delta = 11,5^\circ$ - согласно [72] углы последовательного поворота вначале относительно оси z , затем — относительно новой оси y соответственно. Центр диполя - элементарного бесконечно малого магнита - смещен в Восточное полушарие от центра Земли на 430 км [95].

Компоненты поля магнитного диполя в сферической геомагнитной СК, в которой ось сонаправлена с осью магнитного поля, имеют следующий вид:

$$B_r = -2 \cdot B_g \left(\frac{R_e}{r_m} \right)^3 \cos \theta_m, \quad (1)$$

$$B_\theta = B_g \left(\frac{R_e}{r_m} \right)^3 \sin \theta_m, \quad (2)$$

$$B_\varphi = 0. \quad (3)$$

Здесь B_g - значение магнитного поля на поверхности Земли, на магнитном экваторе, приблизительно равно $3,12 \cdot 10^{-5}$ Тл, R_e - радиус Земли, θ_m - угол, отсчитываемый от северного полюса Земли. Также важно отметить, что поле не зависит от геомагнитной долготы φ_m .

2. Международная эталонная модель магнитного поля IGRF.

Модель IGRF является полуэмпирической. Согласно [95], магнитное поля связано со скалярным потенциальном следующим выражением:

$$\mathbf{B} = -\nabla V, \quad (4)$$

а скалярный потенциал V имеет следующий вид:

$$V = R_e \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+1} \left[g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi \right] \cdot P_n^m(\cos \theta). \quad (5)$$

Здесь R_e - радиус Земли; коэффициенты; r, θ, φ - геоцентрические сферические радиус, коширота (т. е. географическая широта, вычтенная из 90°) и долгота; g_n^m, h_n^m - эмпирически вычисленные коэффициенты гармонических компонентов для определения тонкой структуры магнитного поля; $P_n^m(\cos\theta)$ - квазинормированная по Шмидту присоединенная функция Лежандра степени и порядка, согласно [109 - 112] она имеет вид:

$$P_n^m(x) = \begin{cases} P_n^m(x), & m = 0; \\ \sqrt{2 \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} P_n^m(x), & m > 0; \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{Где } P_n^m = (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m P_n}{dx^m}, \text{ а } P_n = \frac{1}{2^n n!} \cdot \frac{d^n \left[(x^2-1)^n \right]}{dx^n}.$$

Коэффициенты g_n^m, h_n^m гармонических компонентов магнитного поля также позволяют определить широту θ_m^{magn} и долготу λ_m^{magn} северного и южного магнитных полюсов Земли:

$$\cos \theta_m^{magn} = -\frac{g_1^0}{B_0}; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \lambda_m^{magn} = \frac{h_1^1}{g_1^1}; \quad (8)$$

$$\text{где } B_0 = \frac{\mu M}{4\pi R_e^3} \cdot \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}. \text{ При этом стоит отметить, что при}$$

обновлении модели IGRF значения коэффициентов гармонических компонентов g_n^m, h_n^m магнитного поля меняются, а также увеличивается их количество.

Компоненты магнитного поля Земли можно найти следующим образом:

$$B_r = -\nabla_r V = -\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi \right] \cdot P_n^m(\cos\theta); \quad (9)$$

$$B_\theta = -\nabla_\theta V = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} =$$

$$= \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \cos m\varphi + h_n^m \sin m\varphi \right] \frac{\left[(\sin\theta (P_n^{m+1}(\cos\theta) - m \cos\theta P_n^m(\cos\theta))) \right]}{\sin\theta}, \quad (10)$$

$$B_\varphi = -\nabla_\varphi V = -\frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi} =$$

$$= \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R_e}{r} \right)^{n+2} \left[g_n^m \sin m\varphi - h_n^m \cos m\varphi \right] \frac{P_n^m}{\sin\theta}. \quad (11)$$

При этом стоит отметить, что при вычислении производной от квазинормированная по Шмидту присоединенная функция Лежандра в (10), использовались следующие свойства [109 - 112]:

$$\frac{dP_n^m(x)}{dx} = -\frac{m}{2} \cdot (-2x) \cdot (1-x^2)^{\frac{m}{2}-1} \cdot \frac{d^m P_n(x)}{dx^m} + (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \cdot \frac{d^{m+1} P_n(x)}{dx^{m+1}} =$$

$$= -\frac{mx}{1-x^2} \cdot P_n^m(x) + \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} P_n^{m+1}(x) \quad (12)$$

3. Скалярное произведение вектора напряженности магнитного поля и волнового вектора.

Стоит отметить, что поскольку в (2.13) угол $\mathcal{G}(z_m)$ - динамически изменяющийся в зависимости от высоты над поверхностью Земли угол между векторами индукции B_0 и направления распространения волны \mathbf{k} , определяемыми на высоте максимума ионосферного слоя $B_0 \cdot \cos \mathcal{G}(z_m)$, произведение можно представить как скалярное произведение вектора B_0 и единичного волнового вектора \mathbf{k} :

$$B_0 \cdot \cos \mathcal{G}(z_m) = |B_0| \cdot 1 \cdot \cos \mathcal{G}(z_m) = (B_0 \cdot k) = B_x \cdot k_x + B_y \cdot k_y + B_z \cdot k_z, \quad (13)$$

где $k = -\sin E_{sat} \cdot e_r - \cos E_{sat} \cos \alpha_{sat} \cdot e_\theta - \cos E_{sat} \sin \alpha_{sat} \cdot e_\varphi$, E_{sat} - угол возвышения спутника (см. рис. 1), α_{sat} - азимут спутника, определенные в локальной геодезической системе координат, e_r, e_θ, e_φ - орты локальной геодезической сферической системы координат.

Также стоит отметить, что в случае использования модели поля магнитного диполя, необходимо преобразование для вычисления компонент магнитного поля, позволяющее перейти из геоцентрической системы координат $V = \{x_{gc}, y_{gc}, z_{gc}\}$ в геомагнитную $V_m = \{x_m, y_m, z_m\}$ [72], используя углы β и δ (см. часть 1 данного приложения):

$$V_m = \begin{pmatrix} \cos\delta \cdot \cos\beta & \cos\delta \cdot \sin\beta & -\sin\delta \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ \sin\delta \cdot \cos\beta & \sin\delta \cdot \sin\beta & \cos\delta \end{pmatrix} V \quad (14)$$

При использовании модели IGRF не требуется выполнять дополнительные преобразования в иные системы координат.