

Национальная академия наук Украины
Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова

На правах рукописи

Попов Дмитрий Олегович

УДК 621.371+537.86

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЙ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

01.04.03 – радиопизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Луценко Владислав Иванович

Харьков – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
Раздел 1 ДИАГНОСТИКА АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ.....	17
1.1 Перспективы использования ГНСС для диагностики атмосферы.....	17
1.2 Исследование атмосферы и условий распространения сигналов.....	18
1.3 Существующие методы диагностики тропосферы.....	25
Выводы к разделу 1.....	41
Раздел 2 МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ.....	43
2.1 Сезонная изменчивость высотных профилей коэффициента преломления тропосферы над сушей.....	43
2.2 Математическое формулирование имитационной модели коэффициента преломления.....	59
2.3 Экспериментальные исследования плотности распределения коэффициента преломления.....	63
2.3.1 Использование метода наименьших квадратов для аппроксимации экспериментальных данных.....	71
2.3.2 Оценка моментных характеристик коэффициента преломления при представлении его плотности распределения полигауссовой статистикой.....	74
2.3.3 Аппроксимация плотности распределения коэффициента преломления функциями Кравченко – Рвачева.....	78
2.4 Новые подходы к проверке гипотез о законах распределения случайной величины.....	82
Выводы к разделу 2.....	88

Раздел 3	ДИАГНОСТИКА	АТМОСФЕРНЫХ	ПРОЦЕССОВ	И	
	ПОВЕРХНОСТИ	РАЗДЕЛА	НА	ОСНОВАНИИ	GPS / ГЛОНАСС
	ИЗМЕРЕНИЙ.....				89
3.1	Обнаружение метеорологических образований на основе				
	ГНСС-измерений.....				89
3.1.1	Особенности поведения сигналов ГНСС при наличии на трассе				
	метеообразований.....				91
3.1.2	Анализ пространственного изменения коэффициента преломления				
	по данным GPS.....				98
3.2	Модель функции отображения тропосферной задержки				101
3.2.1	Модель функции отображения.....				102
3.2.2	Решение обратной задачи по нахождению градиента коэффициента				
	преломления тропосферы.....				109
3.3	Влияние Солнца на атмосферу.....				111
3.3.1	Влияние солнечной активности на тропосферу.....				111
3.3.2	Влияние солнечных затмений на ГНСС-измерения.....				114
3.4	Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения				
	глобальной навигационной спутниковой системы.....				121
	Выводы к разделу 3.....				136
Раздел 4	ПОВЫШЕНИЕ	ТОЧНОСТИ	ИЗМЕРЕНИЙ	ПРИ	
	ИСПОЛЬЗОВАНИИ	ГНСС.....			138
4.1	Интерполяционный метод формирования дифференциальных				
	поправок в системах глобальной навигации.....				138
4.1.1	Интерполяционный метод формирования дифференциальных				
	поправок при определении координат.....				138
4.1.2	Интерполяционный метод коррекции псевдодальностей.....				152

4.2	Устранение аномально-высоких ошибок при определении координат ГНСС.....	156
4.2.1	Устранение аномально-высоких ошибок при измерении пространственных координат.....	156
4.2.2	Использование особенностей поведения сигналов ГНСС при малых углах наблюдения для повышения точности измерений.....	162
4.3	Эмпирическая модель коррекции зенитной тропосферной задержки.....	166
	Выводы к разделу 4.....	174
	ВЫВОДЫ.....	176
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	180
	Приложение А АППАРАТУРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.....	204
A.1	Измерительный комплекс для регистрации сигналов ГНСС (одночастотных).....	205
A.2	Измерительный комплекс для регистрации сигналов ГНСС (двухчастотный).....	209
A.3	Измерительный комплекс для регистрации сигналов метеорологических спутников Земли.....	211
A.4	Метеостанция	215
A.5	Конденсаторный НЧ-рефрактометр	218

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АГВ	– акустико-гравитационные волны
АПС	– атмосферный пограничный слой
ГЛОНАСС	– глобальная навигационная спутниковая система
ГНСС	– глобальная навигационная спутниковая система
ИСЗ	– искусственный спутник Земли
МНК	– метод наименьших квадратов
ПИВ	– перемещающееся ионосферное возмущение
ПЭС	– полное электронное содержание
РАЗ	– радиоакустическое зондирование
РВП	– радиометр водяного пара
РЛС	– радиолокационные системы
СВЧ	– сверхвысокие частоты
CHAMP	– challenging mini-satellite payload
COSMIC	– constellation observing system for meteorology, ionosphere, and climate
IGS	– international GNSS service
IMF	– isobaric mapping function
GOCE	– gravity field and steady-state ocean circulation explorer
GPS	– global positioning system
GPSRO	– GPS radio occultation
NOAA	– national oceanic and atmospheric administration
NWP	– numerical weather prediction
RINEX	– receiver independent exchange format
TECU	– total electron content unit
VLBI	– very long baseline interferometry
VTEC	– vertical total electron content
a	– радиус Земли
c	– скорость света в вакууме
D	– длина траектории, искривленной на атмосферном участке вследствие рефракции
D_{st}	– асимметричная относительно геомагнитного диполя компонента

возмущенного магнитного поля

D_{true}	– истинное расстояние между приемником и спутником
e	– влажность
F	– критерий Фишера
$GMFh$	– гидростатический градиент функции отображения
g_N	– градиент коэффициента преломления
H_g	– высота центра тяжести вертикального столба воздуха
h	– высота
h_i	– относительная высота точки отражения
h_x, h_y	– мощность облачности в горизонтальной и вертикальной плоскостях
I	– полное электронное содержание электронов вдоль фазового луча
K_p	– планетарный индекс геомагнитной активности
L	– долгота
L_1, L_2	– псевдодальности, измеренные фазовым методом
l_0	– длина пути радиоволны в осадках
MFh	– произвольная азимутально-симметричная гидростатическая функция отображения
$m(\beta)$	– функция отображения
$m_{Pi}^j, m_{\Phi i}^j$	– ошибки за счет многолучевости и дифракционных эффектов
N	– индекс коэффициента преломления
N_i^j	– целочисленная фазовая неоднозначность
N_e	– электронная концентрации.
n	– коэффициент преломления
$P_{1,2}$	– псевдодальности, соответствующие групповому пути радиоволны
P_d	– парциальное давление сухого воздуха
P_{wv}	– парциальное давление водяного пара
R_d, R_{wv}	– универсальная газовая постоянная сухого воздуха и водяного пара
R_T	– зенитная тропосферная задержка
r'	– радиус зоны, существенной для распространения
r_0	– размер частиц облаков и осадков
S	– геометрическое расстояние между 2 точками

T	– температура
$T(l)$	– термодинамическая температура
$T_{\text{я}}$	– радиояркость температура
t_i	– время прихода сигнала, который регистрируется i -ым приемником
W	– влажность
X_i, Y_i, Z_i	– координаты приемника
X^j, Y^j, Z^j	– координаты ИСЗ
x	– дальность до области отражения
Z_d, Z_w	– коэффициенты сжатия для сухого воздуха и водяного пара
α	– азимутальный угол
β	– угол места
β_i^j	– инструментальная ошибка i -го приемника
γ	– погонное затухание
ΔL_0	– эффективное удлинение пути за счет влияния тропо-стратосферы, рассогласования часов, фазовой неоднозначности измерений и т. п.
$\Delta L_{ph1,2}$	– ионосферный набег пути
Δt_i	– отклонение часов i -го приемника от системного времени GPS
Δt^j	– отклонение часов j -го ИСЗ от системного времени GPS
$\Delta Z, \Delta Z_i$	– коррекция измерений высоты в прогнозируемой и опорных точках
$\Delta \theta$	– ширина интерференционного лепестка
λ	– длина волны сигнала на частоте несущей
$\nu(l)$	– коэффициент поглощения атмосферы вдоль траектории луча
ξ_i^j	– инструментальная ошибка приемника в режиме фазовых измерений
Π	– порог фильтрации
ρ	– общая плотность воздуха
σ_c	– ошибка измерений по коду P или C/A
σ_L	– ошибка измерений фазы
τ^j	– время выхода сигнала, регистрируемого временным блоком ИСЗ
Φ_i^j	– измеренная фаза сигнала, который пришел от j -го ИСЗ в i -й приемник в момент времени t_i

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Диссертация посвящена решению задачи мониторинга и диагностики атмосферных процессов и подстилающих поверхностей при помощи излучений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также учету их влияния для улучшения точности и стабильности при измерении координат.

В настоящее время навигационные спутниковые системы широко используют для решения разнообразных задач во многих сферах жизнедеятельности, таких как геодезия, картография, аэрофотосъемка, прогнозирование погоды, авиационный, автодорожный и железнодорожный транспорт. Это обусловлено высокой частотной стабильностью сигнала, широким покрытием и повышенной точностью траекторных параметров спутников. Принимая во внимание широкий спектр задач, для которых на данный момент используются ГНСС, и постоянно растущие требования к ним, для повышения эффективности работы этих систем необходим точный учет среды распространения спутниковых сигналов.

Точные геодезические измерения с помощью ГНСС на сегодняшнее время позволяют использовать эту информацию для прогнозирования погоды и климатических исследований ближнего действия. Подобные возможности стали доступны при оценке тропосферных задержек на трассах распространения сигналов ГНСС в качестве побочных продуктов геодезических решений. Водяной пар, присутствующий в тропосфере, играет решающую роль в атмосферных процессах, которые действуют в широком пространственно-временном диапазоне, в масштабах от глобального климата до микрометеорологии. При определенных предположениях с использованием сведений о метеорологических параметрах можно пересчитать оцененную тропосферную задержку в интегральную меру влажности воздуха. Ее распределение наиболее тесно связано

с распределением облаков и осадков, а также играет большую роль в вертикальной устойчивости атмосферы, поэтому изучение тропосферных задержек в пространственно-временной области может быть использовано для моделирования распространения электромагнитных сигналов и оценки погодных условий на трассе распространения. Наличие различных метеорологических образований, например, дождей, может обуславливать ухудшение качества канала связи, поэтому оперативный мониторинг атмосферы необходим для оценки рефракционного состояния среды распространения, которое определяет параметры радиолокационных систем, такие как дальность действия, точность и др. Ранее для диагностики атмосферы использовались специально разработанные для этого локальные системы, обладающие высокой стоимостью и имеющие узкий круг решаемых задач. В данной диссертационной работе предложено расширение функциональных возможностей существующих систем глобальной спутниковой навигации с целью решения задач дистанционного зондирования и диагностики атмосферных процессов. Использование существующих систем позволит создать общее информационное поле, которое значительно расширит возможности глобального мониторинга.

Следует отметить, что при диагностике атмосферы необходимо понимать основные физические эффекты воздействия тропосферы и ионосферы на ГНСС измерения. Атмосферные эффекты при прохождении электромагнитной волны довольно разнообразны и обусловлены сложной структурой земной атмосферы. В общем случае атмосфера Земли может быть представлена как среда, состоящая из двух областей: электрически нейтральной, что находится у земной поверхности (тропосфера, стратосфера), и расположенной выше электрически заряженной области – ионосферы. В большинстве подходов принято рассматривать влияние этих областей отдельно друг от друга, однако в ряде работ отмечается взаимосвязь между процессами, происходящими в каждой из областей.

Проанализировав поведение коэффициента преломления в этих областях, можно выделить регулярные и случайные (вариационные) составляющие. В

случае с ионосферой, где фазовый коэффициент преломления в радиодиапазоне меньше единицы и зависит от частоты, возникает групповое запаздывание и фазовое опережение радиосигналов. Именно благодаря этому эффекту появляется возможность выделения ионосферной задержки при проведении измерений на разных несущих частотах. Однако, в случае с тропосферой, показатель преломления не зависит от частоты в диапазоне ГНСС сигналов, поэтому моделирование тропосферной задержки остается довольно сложной задачей. Тропосферную задержку принято разделять на гидростатическую и влажную компоненты, для которых созданы эмпирические модели, имеющие ряд недостатков, связанных с отсутствием учета реальной метеорологической обстановки, поэтому именно влияние тропосферы на точность ГНСС измерений остается основным источником ошибок.

Раньше для решения задач дистанционного зондирования создавались специализированные радиотехнические системы. Однако, в связи со значительной загрузкой эфира, а также влиянием излучений на среду обитания человека, в последнее время все больший интерес приобретает использование для решения этих задач существующих излучений. Это позволило сформулировать концепцию глобального информационного поля, в рамках которой предлагается комплексное рациональное использование существующих электромагнитных полей. В этой концепции особое значение приобретает использование существующих излучений спутниковых и наземных систем. Глобальные навигационные спутниковые системы, как существующие: GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), так и создаваемые: Galileo (ЕС), Compass (КНР), вследствие глобального охвата Земли открывают новые широкие возможности для дистанционного зондирования окружающей среды.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки новых методов и технологий дистанционного зондирования окружающей среды: диагностики тропосферных процессов, подстилающей поверхности, создание новых методов описания коэффициента

преломления с помощью существующих систем глобальной навигации, что позволит проводить оперативный мониторинг состояния атмосферы и поверхности.

Связь работы с научными программами, планами, темами

В диссертации приведены обобщенные результаты исследований, полученные автором в период 2012 – 2016 гг., которые базируются на программах, планах и госбюджетных темах научных исследований Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины:

"Розроблення методів та технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації", шифр "Тропосфера" (2011 – 2012 гг.), № Государственной регистрации 0111U005998 (исполнитель), который выполнялся в соответствии с поставлением Кабинета Министров Украины от 22.06.2011 г. № 673 «Про державне замовлення на закупівл товарів, виконання робіт, надання послуг та державних потреб у 2011 році» и Постановления Кабинета Министров Украины от 01.09.2012 № 689 «Про державне замовлення на закупівлю товарів, виконання робіт, надання послуг для державних потреб у 2012 році»;

«Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів», шифр «Діагностика» (2013 – 2014 гг.) № Государственной регистрации 0113U002976 (исполнитель), которая выполнялась в соответствии с Целевой комплексной программой НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012 – 2016 гг. по распоряжению Президиума НАН Украины от 01.02.13 № 56 (1 этап) и от 04.03.14 № 140 (2 этап);

«Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС технологій», шифр «Кут» (2013 – 2014 гг.) № Государственной регистрации 0113U002977 (ответственный исполнитель), которая выполнялась в соответствии с Целевой комплексной программой НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012 –

2016 гг. по распоряжению Президиума НАН Украины от 01.02.13 № 56 (1 этап) и от 04.03.14 № 140 (2 этап).

Цель и задачи исследований.

Целью исследования является разработка радиофизических методов мониторинга, диагностики атмосферных процессов и подстилающих поверхностей с помощью излучений глобальных навигационных спутниковых систем, а также учета их влияния на точность и стабильность при определении координат.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику измерений и определить требования к комплексу измерительной аппаратуры, предназначенной для изучения особенностей принятых сигналов навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ);
- разработать и создать измерительные комплексы;
- теоретически и экспериментально исследовать суточные и сезонные изменения флуктуаций измеряемых параметров навигационных ИСЗ и их взаимосвязь с различными метеоявлениями;
- создать модели, позволяющие учесть влияние атмосферных процессов и подстилающих поверхностей на результат измерения координат в ГНСС, разработать методику диагностики зон осадков по изменениям сигналов ГНСС;
- разработать методику нахождения областей отражения и оценки их характеристик на земной поверхности при пролете спутников ГНСС;
- провести анализ влияния солнечной радиации на изменения измеряемых координат;
- разработать методы описания коэффициента преломления тропосферы;
- разработать методы коррекции измеряемых координат на основе особенностей распространения спутниковых сигналов в атмосфере.

Объект исследования – процессы распространения и рассеяния радиоволн в неоднородной атмосфере.

Предмет исследования – параметры принятого излучения навигационных ИСЗ и их взаимосвязь с характеристиками тропосферы и подстилающей поверхности.

Методы исследований – теоретические методы статистической радиофизики, дистанционного зондирования атмосферных процессов, статистической радиотехники, математической статистики, теории статистических решений и экспериментальные методы изучения особенностей распространения радиоволн в тропосфере.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые:

1. Созданы методы описания коэффициента преломления тропосферы с использованием полумарковских процессов и финитных атомарных функций. Показана возможность учета нестационарности поведения коэффициента преломления путем отдельного описания его статистических характеристик гауссовой функцией или функцией Кравченко – Рвачева на протяжении сезонов. Предложен новый подход к проверке гипотез о законах распределения случайной величины.

2. Выявлены особенности поведения сигналов ГНСС при наличии зон осадков на трассе распространения сигналов навигационных спутников. Предложена методика обнаружения зон прохождения дождей по данным об изменениях координатной информации и псевдодальностей. Экспериментально показано, что наличие осадков приводит к увеличению электрического пути прохождения сигнала за счет изменения диэлектрической проницаемости воздуха при увеличении коэффициента преломления. Впервые предложено использование информации о флуктуациях плоскостных координат для оценки пространственно-временных изменений коэффициента преломления вокруг точки проведения накоплений навигационных данных.

3. Разработана модель функции отображения тропосферной задержки, которая в отличие от эмпирических моделей, использующих статистическую информацию про метеорологические параметры для различных регионов, дает

возможность коррекции данных через учет сферичности тропосферы, то есть градиента коэффициента преломления.

4. Предложена методика диагностики подстилающей поверхности суши, обнаружения на ней отражающих областей и их параметров с помощью излучений систем ГНСС.

5. Предложена интерполяционная методика коррекции ошибок определения координат для повышения точности и стабильности измерений координатной информации на базах средней длины.

Практическое значение полученных результатов состоит в следующем:

1. Создана экспериментальная база данных навигационной информации с ИСЗ, полученной в разных городах Украины, которая может использоваться для разработки методик и исследования пространственно-временных характеристик атмосферных процессов. Разработанные в диссертационной работе методы диагностики тропосферы и подстилающей поверхности могут использоваться при построении систем глобального мониторинга атмосферных процессов, или для коррекции существующих систем навигационного обеспечения.

2. Разработанная модель функции отображения тропосферной задержки может использоваться для решения обратной задачи определения градиента коэффициента преломления на основании реальных данных про тропосферную задержку на трассах распространения спутниковых сигналов.

3. Разработана интерполяционная методика дифференциальной коррекции измеряемых координат и псевдодальностей за счет использования 3-х опорных станций, которые находятся вокруг точки коррекции. Предложенная методика позволяет снизить дисперсию погрешностей определения координат до 40 %. Предложен эмпирический коэффициент коррекции зенитной тропосферной задержки, который можно использовать при отсутствии реальных значений метеорологических параметров, а также для снижения среднеквадратического значения погрешности определения координат на 4...9 %.

4. Показана необходимость постоянного отслеживания амплитуд сигналов спутников для устранения аномально-высоких выбросов при оценке измеряемых координат. Предложено использование дополнительного информационного канала производной при фильтрации результатов навигационных измерений для устранения аномально-высоких выбросов без затрагивания полезной информации.

Личный вклад соискателя

В диссертационной работе изложены результаты исследований, выполненных автором самостоятельно и в соавторстве с коллегами. Личный вклад диссертанта заключается в следующем.

В работах [146, 148, 152 – 154] автор предложил методику диагностики атмосферных процессов и обнаружения зон осадков на основании ГНСС-данных, провел экспериментальные исследования и анализ полученных данных. В работах [102 – 107, 109] предложил модель описания нестационарных процессов с помощью функций Кравченко – Рвачева и подход по проверке гипотезы о законе распределения случайной величины. В работах [147, 151] предложил идею просвечивания подстилающей поверхности для трасс ИСЗ с целью нахождения точек отражения, провел экспериментальные исследования, обработку и анализ данных. В работах [145, 155] предложил модель функции отображения тропосферной задержки, провел экспериментальные исследования, анализ и обработку результатов. В работах [191, 192, 194, 195] принимал участие в разработке интерполяционного метода ввода дифференциальной коррекции координат и псевдодальностей, а также в создании базы данных навигационной информации, обработке и анализе полученных результатов. В работах [108, 193, 197, 199] участвовал в разработке методов коррекции измеряемых координат и снижении воздействия атмосферных процессов на навигационные измерения, а также в создании измерительных комплексов, на которых проводились эксперименты и исследования.

Апробация результатов диссертации.

Материалы диссертации докладывались на 11 международных и отечественных конференциях и симпозиумах (всего 17 докладов), в том числе:

1. 4 доклада на международных конференциях за границей: International scientific conference: Geophysics - Cooperetation and sustainable development (Hanoi, Vietnam, 2012) [191], XII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов» (Москва, Россия, 2014) [152], SSF – 2014 «Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития» (Минск, Беларусь, 2014) [153].

2. 13 докладов на отечественных конференциях: EMES-2012 «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства» (Харьков, 2012), 4-я, 5-я Международные научно-практические конференции «Обработка сигналов и негауссовых процессов» (Черкассы, 2013, 2015) [102, 103, 109, 147], The Eight International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and SubMillimeter Waves MSMW'13 (Харьков, 2013) [104, 105, 155], 23rd, 24th, 25th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Севастополь, 2013 - 2015) [150, 154, 192, 193, 199], 5-ом международном радиоэлектронной форуме «Прикладной радиоэлектроники. Состояние и перспективы развития» (Харьков, 2014) [146].

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 статьях [106 – 108, 145, 148, 149, 151, 194, 195, 197] в научных зарубежных и отечественных изданиях, из них 8, которые входят в список специализированных изданий Украины по специальности «радиофизика», в 17 тезисах [102 – 105, 109, 111, 146, 147, 150, 152 – 155, 191 – 193, 199] международных научных конференций.

РАЗДЕЛ 1

ДИАГНОСТИКА АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

1.1 Перспективы использования ГНСС для диагностики атмосферы

В последнее время в связи развитием навигационных систем, таких как GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), появилась реальная возможность использования данных систем для дистанционного зондирования параметров атмосферы, поскольку они обладают высокой частотной стабильностью сигнала, широким покрытием и их траекторные параметры известны с высокой точностью. Густая сеть наземных приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) позволяет производить относительное позиционирование с точностью до миллиметров, что необходимо для геофизических исследований. С другой стороны, точные геодезические измерения ГНСС могут использоваться в прогнозировании погоды и мониторинге изменений климата. Данное применение стало возможно с использованием оценок тропосферной задержки сигналов ГНСС в качестве побочных продуктов геодезических решений [1]. Атмосферные эффекты, в частности, тропосферная задержка, являются одной из причин появления значительных ошибок при позиционировании. Выделив тропосферную задержку и оценив значение сухой компоненты, используя дополнительные данные о метеопараметрах, можно преобразовать влажную компоненту в интегральную меру влажности воздуха [2, 3]. Водяной пар оказывает существенное влияние на атмосферные процессы, которые действуют в широком пространственно-временном диапазоне. Он является наиболее изменчивым фактором среди основных компонент атмосферы. Из-за большого количества скрытого тепла, связанного с изменением агрегатного состояния воды, распределение водяного

пара играет большую роль в вертикальной устойчивости атмосферы, а также в структуре и эволюции атмосферных грозových систем. Адвекция водяного пара и скрытого тепла в общей циркуляции атмосферы является важным компонентом меридионального энергетического баланса Земли. Кроме того, вода играет важную роль во многих химических реакциях, которые происходят в атмосфере. Поэтому исследование тропосферной задержки в пространственно-временной области может быть применено для моделирования распространения электромагнитных сигналов и оценки погодных условий на трассе распространения.

1.2 Исследование атмосферы и условий распространения сигналов

При проведении диагностики атмосферных процессов необходимо понимать основные физические принципы влияния тропосферы и ионосферы на ГНСС-измерения.

Атмосферные эффекты при прохождении электромагнитной волны довольно разнообразны и обусловлены сложной структурой земной атмосферы. В общем случае атмосфера Земли может считаться средой, состоящей из двух больших областей: электрически нейтральной, находящейся возле земной поверхности (тропосфера, стратосфера) и расположенная выше электрически заряженной области – ионосферы. В большинстве подходов принято рассматривать влияние этих областей отдельно друг от друга. Несмотря на это, необходимо отметить существование взаимосвязи между ионосферой и тропосферой. В работах [4, 5] рассмотрены вопросы, касающиеся процессов протекающих в ионосфере Земли, вызванных не только изменениями геомагнитного поля и процессами на Солнце, но и состоянием нейтральной атмосферы. Современные исследования свидетельствуют о том, что степень воздействия источников, располагающихся в нижних слоях атмосферы, на состояние ионосферной плазмы выше, чем считалось до недавнего времени.

Установлено, что изменчивость электронной концентрации F-слоя, возникающая за счет метеорологических факторов, в условиях спокойной геомагнитной обстановки может достигать до 30% от фонового уровня [6]. В подобных исследованиях считается, что основным механизмом передачи энергии возмущения от тропосферы к ионосфере являются внутренние атмосферные волны [5, 7]. Источниками акустико-гравитационных волн (АГВ) могут являться нестационарные процессы в нейтральной атмосфере и литосфере Земли, такие как землетрясения, извержения вулканов, ураганы, грозы, струйные течения, солнечные затмения, терминатор и т. д. [4, 5]. Таким образом, АГВ, достигшие высот ионосферы, могут проявляться как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые оказывают значительное влияние на состояние ионосферной плазмы [8, 9].

При рассмотрении коэффициента преломления атмосферы в этих областях можно выделить регулярные и случайные составляющие. Основной проблемой является устранение регулярных эффектов, которые могут приводить к уменьшению точности ГНСС-измерений, связанных с тем, что скорость распространения сигнала в атмосфере не совпадает со скоростью света в вакууме, при этом длина искривленного из-за эффекта рефракции пути распространения сигнала больше, чем геометрическая длина.

В ионосфере, где фазовый коэффициент преломления в радиодиапазоне меньше единицы и зависит от частоты, данные эффекты приводят к групповому запаздыванию и фазовому опережению радиосигналов [10, 11]. Благодаря дисперсионным свойствам ионосферы существует возможность исключения ее влияния на основе измерений на разных несущих частотах [12 – 14].

В атмосфере коэффициент преломления описывается выражением [15]

$$n = \frac{c_1 p}{T} + \frac{c_2 p_w}{T} + \frac{c_3 p_w}{T^2} \pm \frac{c_4 \cdot 10^6 N_e}{f^2}, \quad (1.1)$$

где $c_1 = 77,6 \text{ К гПа}^{-1}$, $c_2 = 64,8 \text{ К гПа}^{-1}$, $c_3 = 3,776 \text{ К}^2 \text{ гПа}^{-1}$, $c_4 = 40,308 \text{ м}^3/\text{с}^2$;

p – парциальное давление сухого воздуха;

p_w – парциальное давление водяного пара;

N_e – электронная концентрация.

Если для тропосферы существенны второе и третье слагаемое (1.1), то для ионосферных высот доминирует последнее слагаемое. Измерение ионосферного дополнительного пути позволяет определять общее содержание электронов вдоль траектории радиолуча. При использовании ГНСС-измерений, для оценки полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, могут использоваться комбинации фазовых и кодовых измерений на двух частотах.

Получить выражение для ионосферного набег пути можно, учитывая для фазовой траектории в ионосфере только последнее слагаемое выражения (1.1) со знаком минус [15]

$$\Delta L_{phl,2} = -\frac{c_4}{f_{1,2}^2} I, \quad I = \int_s N_e ds, \quad (1.2)$$

где I – полное электронное содержание электронов вдоль фазового луча. Учитывая (1.2), полные псевдодальности вдоль фазовых траекторий для частот f_1 и f_2 можно представить в виде [15]

$$L_1 \cdot \lambda_1 = D_{true} - \frac{c_4}{f_1^2} I + \Delta L_0 + \sigma_{L1}, \quad L_2 \cdot \lambda_2 = D_{true} - \frac{c_4}{f_2^2} I + \Delta L_0 + \sigma_{L2}, \quad (1.3)$$

где D_{true} – истинное расстояние между приемником и спутником;

ΔL_0 – эффективное удлинение пути за счет влияния тропо-стратосферы, рассогласования часов, фазовой неоднозначности измерений и т.п.;

$\sigma_{L1,2}$ – случайные ошибки измерений.

Выражение для определения ПЭС по фазовым измерениям на двух частотах можно получить, разрешая систему уравнений (1.3) относительно I [15]

$$I = \frac{1}{c_4} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const_{1,2} + \sigma_L], \quad (1.4)$$

где L_1, L_2 – псевдодальности, измеренные фазовым методом;

$const_{1,2}$ – неоднозначность фазовых измерений;

σ_L – ошибка измерений фазы.

Обычно считается, что в результате применения специальных алгоритмов $const_{1,2}=0$. Измерения фазы в системе GPS выполняются с высокой точностью. Поэтому ошибка в определении ПЭС при 30-секундных интервалах усреднения не превышает 10^{14} электрон $\cdot$ м⁻² (или 0.01 TECU) [16, 17]. Для измерения ПЭС принята специальная единица TECU (Total Electron Content Unit), равная 10^{16} электрон $\cdot$ м⁻².

Аналогичным образом измерения ПЭС можно проводить на основании кодовых измерений псевдодальности. ГНСС-приемники производят измерения псевдодальностей P_1 и P_2 по Р-коду на двух частотах f_1 и f_2 . Эти псевдодальности соответствуют групповому пути радиоволны, когда в (1.1) необходимо использовать знак плюс перед последним слагаемым. Аналогично (1.3) получаем [15]:

$$P_1 = D_{true} - \frac{c_4}{f_1^2} I + \Delta P_0 + \sigma_{P_1}, \quad P_2 = D_{true} - \frac{c_4}{f_2^2} I + \Delta P_0 + \sigma_{P_2}, \quad (1.5)$$

Разрешая эти уравнения относительно I , получаем формулу для определения ПЭС по кодовым измерениям на двух частотах, аналогичную (1.4) [15]

$$I = \frac{1}{c_4} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma_P], \quad (1.6)$$

где σ_P – ошибка измерения дальности по Р-коду. Ошибки этого метода существенно выше, чем при фазовых измерениях [16]. При отсутствии фазовых измерений псевдодальности на вспомогательной частоте f_2 для определения ПЭС могут использоваться данные измерений псевдодальности P_1 по коду Р или

С/А и фазовые измерения на основной частоте f_1 . Выражение для определения ПЭС в данном случае примет вид [15]

$$I = \frac{f_1^2}{2c_4} (P_1 - L_1 \lambda_1 + \text{const}_1 + \sigma_{L_1} + \sigma_c), \quad (1.7)$$

где σ_c – ошибка измерений по коду Р или С/А. Ошибки кодово-фазовых измерений больше, чем у фазовых, и меньше, чем у чисто кодовых измерений ПЭС.

Приведенные выше формулы позволяют определить полное электронное содержание вдоль траектории радиолуча, наклоненного под углом места β к горизонту. Для сравнения данных разных спутников и экспериментов необходимо преобразование этого «наклонного» ПЭС I в эквивалентное «вертикальное» значение I_v ($\beta = 90^\circ$) при помощи соответствующих функций отображения. Таким образом, на данный момент ГНСС-измерения позволяют проводить мониторинг вертикального значения ПЭС на основе данных двухчастотных измерений со всей планеты. Получаемые при этом карты электронной концентрации IONEX позволяют анализировать поведение ионосферных неоднородностей и играют важную роль при анализе ионосферных процессов наравне с использованием других методов диагностики [18 – 20].

В тропосфере коэффициент преломления не зависит от частоты в диапазоне ГНСС-сигналов, а потому проявляется лишь эффект групповой задержки. При этом в тропосфере принято разделять вызванную задержку на гидростатическую (большую) и влажную (меньшую) компоненты. Для стандартных атмосферных условий общая задержка составляет приблизительно 2,4 м в зените и увеличивается с уменьшением угла возвышения спутника.

В общем случае, при прохождении радиосигнала сквозь трехмерную неоднородную тропосферу с коэффициентом преломления $n(\vec{r})$ (где $\vec{r}$ – радиус вектор), задержка в общем виде может быть записана как [10, 11, 21]

$$\Delta S = \int_0^D (n-1) d\sigma + \int_0^D d\sigma - L, \quad (1.8)$$

где L – расстояние между конечными точками измерения линий вдоль прямой;

D – длина траектории, искривленной на атмосферном участке вследствие рефракции;

σ – лучевая координата.

Интегрирование в (1.8) ведется вдоль лучевых траекторий, форма которых определяется лучевым уравнением

$$\frac{d}{d\sigma} \left(n \frac{dr}{d\sigma} \right) = g_N, \quad (1.9)$$

где g_N – градиент коэффициента преломления [21].

Коэффициент преломления воздуха n связан с индексом коэффициента преломления N соотношением $N = 10^6 \cdot (n-1)$ и является функцией абсолютной температуры T (К), парциального давления сухого воздуха P_d (гПа) и водяного пара P_{wv} (гПа) [22]

$$N = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left[K_2 \left(\frac{P_{wv}}{T} \right) + K_3 \left(\frac{P_{wv}}{T^2} \right) \right] Z_{wv}^{-1}, \quad (1.10)$$

где K_1, K_2, K_3 – определенные эмпирически коэффициенты;

Z_d, Z_w – коэффициенты сжатия для сухого воздуха и водяного пара, соответственно.

Эквивалентная формула представлена в работе [23]

$$N = k_1 \cdot R_d \cdot \rho + k_2' \cdot \frac{P_{wv}}{T} Z_{wv}^{-1} + k_3 \cdot \frac{P_{wv}}{T^2} \cdot Z_{wv}^{-1}, \quad (1.11)$$

где ρ – общая плотность воздуха;

$$k_2' = k_2 - k_1 \cdot \frac{R_d}{R_{wv}}, \quad (1.12)$$

где R_d, R_{wv} – универсальная газовая постоянная сухого воздуха и водяного пара соответственно.

Первая составляющая уравнения (1.12) является «гидростатической компонентой», вторая – «негидростатической», связанная только с влажностью воздуха.

$$k_1 = 77.604 \pm 0.014 \text{ К} \cdot \text{мбар}^{-1}; k_2 = 64.79 \pm 0.08 \text{ К} \cdot \text{мбар}^{-1};$$

$$k'_2 = 17 \pm 10 \text{ К} \cdot \text{мбар}^{-1}; k_3 = 377600 \pm 400 \text{ К}^2 \cdot \text{мбар}^{-1};$$

Согласно [22]

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \cdot \left[57.9 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0.52}{T} \right) - 9.4611 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{t}{T^2} \right] \quad (1.13)$$

$$Z_{wv}^{-1} = 1 + 1650 \cdot \frac{P_{wv}}{T^3} \left(1 - 0.01317 \cdot t + 1.75 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 1.44 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 \right) \quad (1.14)$$

где t – температура воздуха, °С;

P_d, P_{wv} – парциальное давление сухого воздуха и водяного пара, гПа;

T – температура воздуха, К.

Температура и парциальное давление в тропосфере в общем случае являются произвольной функцией координат. Следовательно, произвольной функцией координат является и пространственное распределение коэффициента преломления воздуха n , что создает существенные трудности при определении тропосферных поправок. Существующие модели стандартной атмосферы [24] построены на основе данных многолетних наблюдений за метеопараметрами. Эти зависимости являются результатами усреднения метеоданных по множеству метеостанций и позволяют определять распределение n по координатам. Основным недостатком стандартных моделей является то, что они не учитывают реальную метеорологическую обстановку, а позволяют получить лишь приближенные поправки. Для повышения точности моделирования могут использоваться калибровочные данные [25], реальные метеопараметры в точке наблюдения. Вклад влажности воздуха может оцениваться при помощи

радиометра водяного пара (РВП) [26], рамановского лидара [27], спектрального гигрометра [28]. При использовании РВП погрешность измерения оценивается на уровне 2...3 мм для зенитной задержки [29], но при этом существенным недостатком РВП является невозможность его использования при дожде.

1.3. Существующие методы диагностики тропосферы

Основной характеристикой тропосферной рефракции, как отмечалось выше, является коэффициент преломления. На сегодняшний момент существует достаточно много различных методик определения пространственных характеристик этого параметра. Данные методики можно разделить на контактные и неконтактные, суть которых сводится к определению коэффициента преломления на основе метеопараметров (температуры, влажности и давления) или же на основе прямых измерений. Очевидным преимуществом неконтактных методов является возможность определения рефракционных свойств среды распространения на всей трассе, а не только в пределах точки расположения измерительного пункта. Как следствие, неконтактные методы зондирования могут использоваться для определения уровня тропосферной рефракции и обнаружения зон опасных метеорологических явлений, где уровень рефракции будет существенно отличаться от стандартного значения.

Принцип работы контактных методов основан на вышеизложенных формулах определения коэффициента преломления на основе измерений атмосферных параметров с помощью метеорологических датчиков и непосредственно рефрактометрических измерений. Существующие приборы для определения коэффициента преломления путем измерения температуры давления и влажности [30, 31], позволяют получить погрешность в ± 1 N ед при условии, что ошибки измерения не будут превышать $\pm 0,8$ °C для температуры, $\pm 3,7$ мбар – давления воздуха и $\pm 0,22$ мбар водяного пара. Это говорит о необходимости особо тщательного измерения влажности [30].

Для непосредственного измерения диэлектрической проницаемости или коэффициента преломления атмосферы используют рефрактометры. Их измерения N более точны по сравнению с данными, полученными при расчете из метеопараметров. Особенностью этих приборов является их малая постоянная времени, что позволяет изучать быстрые флуктуации коэффициента преломления и дает возможность фиксировать слои с резкими перепадами N . Неоспоримым преимуществом использования рефрактометров является возможность изучения тонкой структуры вариаций коэффициента преломления [30, 58]. Исследование неоднородной структуры показателя преломления с использованием пространственно разнесенных рефрактометров приводится в [31 – 33].

Несмотря на довольно высокую разрешающую способность контактных методов, их основным недостатком является ограниченность в пространственной области. Запуск метеозондов для анализа является довольно затратным и чаще всего не производится больше 2 раз за день, что не дает возможности оценивать изменения поведения коэффициента преломления на протяжении суток. Использование неконтактных методов, которые лишены этого недостатка, является перспективным направлением для изучения изменчивости рефракционных свойств среды распространения в реальном масштабе времени.

Неконтактные методы диагностики имеют множество вариаций. Можно выделить следующие методы: радиометрический, радиопросвечиваний, радиолокационный, лазерный, акустический и радиоакустический. Несмотря на различные подходы, они все используют явления распространения, поглощения и рассеяния электромагнитных и звуковых волн в тропосфере [28, 29, 34 – 38]. Существующие неконтактные методы дистанционного зондирования тропосферы используются для предсказания погоды, исследования загрязнений, обеспечения безопасности воздушного сообщения и т. п. Все существующие неконтактные методы можно разделить на два подкласса: пассивные и активные [39]. В пассивных системах используется радиометрический метод [40, 55, 59]. Этот метод основан на приеме собственных излучений изучаемого объекта, например, излучений газа и аэрозольных компонент атмосферы или излучения Солнца.

Активные системы, в свою очередь, используют свои сигналы, излучаемые передатчиком и взаимодействующие со средой или мишенью. Рассмотрим краткие принципы существующих методов дистанционной диагностики.

Акустический метод зондирования тропосферы (акустическая эхо-локация) использует рассеяние акустических волн от турбулентностей в атмосфере [39, 41 – 43]. В результате взаимодействия происходит не только рассеяние волн, но и сильное их поглощение и рефракция. Это приводит к ограниченности использования акустического зондирования по высоте. Направленные вверх акустические излучатели непрерывно посылают звуковые импульсы и принимают эхо-сигналы, отраженные неоднородностями тропосферы. Источниками акустических неоднородностей в тропосфере являются неоднородности поля ветра и температуры, которые, в первую очередь, связаны с турбулентными движениями. Записи этих эхо-сигналов позволяют проследивать несколько находящихся один над другим неоднородных слоев в атмосфере. Таким образом, по времени задержки отраженного сигнала определяется дальность до рассеивателей, по мощности отраженного сигнала – интенсивность турбулентности, а по доплеровскому сдвигу частоты – проекция ветра на направление зондирования [44]. В работе [41] рассмотрена возможность использования акустического зондирования для идентификации особого термодинамического состояния атмосферного пограничного слоя (АПС), при котором наблюдается развитый процесс притока явного тепла в атмосферу и который поддерживается процессом турбулентного теплообмена в режиме контактной конвекции в приземном слое АПС.

Радиоакустический метод зондирования основан на измерении скорости распространения звуковых волн от неподвижных или движущихся относительно среды (воздуха) источников колебаний. Принцип радиоакустического измерения заключается в искусственном создании в атмосфере отражающей неоднородности в виде звуковой решетки. В настоящее время системы радиоакустического зондирования (РАЗ) позволяют дистанционно определять основные метеорологические величины (температуру, влажность воздуха,

скорость и направление ветра) и являются перспективным средством метеонаблюдений [45 – 50]. Характерной особенностью таких систем является объем рассеяния, что позволяет организовывать систематические измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя на сети метеорологических станций.

Акустооптический метод зондирования основан на излучении в тропосферу гармонического акустического колебания и немодулированного оптического луча [37]. Положение областей взаимодействия определяется пересечением диаграмм направленности излучателей и фотоприемников. Чтобы измерить разность фаз в акустической волне на отдаленном участке фиксированной длины, необходимы два фотоприемника. Из разности фаз рассчитывается скорость звука и, следовательно, температура в удаленной области. Радиальную составляющую скорости ветра можно получить, сравнив частоту модуляции рассеянного света в любом из фотоприемников с частотой излучаемого акустического колебания.

Лазерное зондирование тропосферы дает возможность определять характеристики воздушной среды на любом направлении лазерного луча и получить разнообразные сведения о свойствах тропосферы на различных высотах. Распространяясь по атмосферной трассе зондирования, лазерный импульс испытывает поглощение и рассеяние на молекулах и аэрозолях. Часть излучения, то есть рассеянное атмосферой обратно в направлении системы, может быть преобразовано в электрический сигнал, пропорциональный падающему световому потоку. Хорошее пространственно-временное разрешение обеспечивается малой длительностью и высокой частотой повторения импульсов лазера [37, 51] и позволяет детально исследовать облака, слои атмосферы и т. д. за короткое время, а также изучать пространственное распределение аэрозолей в атмосфере.

Радиометрический метод зондирования тропосферы основан на приеме собственного (теплого) излучения среды исследования и на взаимосвязи радиохарактеристик этого излучения с физическими параметрами среды [40, 52,

53]. Использование нескольких спектральных участков СВЧ диапазона дает возможность определять ряд физико-химических параметров атмосферы (температуру, влажность, водность облаков, давление, газовый состав, турбулентность и т. д.) [54]. Как и во всякой среде с потерями, распространение радиоволн в земной атмосфере сопровождается поглощением и тепловым радиоизлучением в виде шумов. Связь между радиояркостной температурой $T_{\text{я}}$ (величиной, пропорциональной интенсивности излучения) и метеорологическими характеристиками атмосферы выражается интегральным уравнением [55]

$$T_{\text{я}} = \int_0^{\infty} T(l) \nu(l) \exp\left[-\int_0^l \nu(l') dl'\right] dl, \quad (1.15)$$

где $T(l)$ и $\nu(l)$ – термодинамическая температура и коэффициент поглощения атмосферы вдоль траектории луча. Зависимость $T_{\text{я}}$ от длины волны входит в данное выражение через коэффициент поглощения.

Этот методы позволяют восстанавливать высотные профили температуры и влажности, по которым нетрудно рассчитать высотный ход коэффициента преломления. Однако профили распределения метеорологических параметров, в первую очередь, влажности, полученные таким путем, не обладают необходимой точностью и разрешением по вертикали.

Радиолокационный метод зондирования тропосферы основан на рассеянии радиоволн гидрометеорами [56 – 57], диэлектрическими неоднородностями воздуха [58 – 64], сопутствующими атмосферными явлениям, частицами аэрозоля и др. Отражения радиоимпульсов от турбулентных и инверсионных слоев в тропосфере впервые отмечены в 1936 г. Р. Колвеллом и А. Фрейдом (США) на средних и коротких волнах. Первые сообщения об обнаружении осадков с помощью радиолокаторов сантиметрового диапазона относятся к началу 1941 г. (Великобритания). В 1943 г. в США А. Бентом и др. были организованы первые оперативные наблюдения за ливнями и грозами [34]. В СССР В. В. Костаревым в 1943 г. начаты измерения скорости и направления ветра в высоких слоях атмосферы путём прослеживания движения шаров-зондов с пассивными

отражателями. При помощи радиолокаторов обнаруживаются облака, осадки, области повышенных градиентов температуры и влажности, ионизированные следы молниевых разрядов и др. Из радиолокационных наблюдений получают информацию о пространственном положении, перемещении, структуре, форме и размерах обнаруживаемых объектов, а также их физических свойствах [65]. При рассеянии радиоволн на частицах облаков и осадков в случае, когда размеры этих частиц r_0 малы по сравнению с длиной волны λ (рэлеевское рассеяние), величина радиолокационного сигнала $\sim r_0^6 / \lambda^4$. Столь сильная зависимость величины отражённого сигнала от размера частиц приводит к тому, что при радиолокационном наблюдении за облаками и осадками выделяются наиболее крупнокапельные области, поэтому радиолокационные изображения не всегда совпадают с визуальными размерами объекта. Интенсивность рассеянных сигналов резко убывает с увеличением λ , а на миллиметровых и более коротких волнах сигнал сильно ослабляется, что ограничивает диапазон частот метеорологических радиолокаторов, которые поэтому, как правило, работают в сантиметровых и длинноволновой части миллиметровых диапазонов волн [66].

Между средней мощностью отражённых сигналов и интенсивностью осадков установлены эмпирические соотношения, на основании которых определяют распределение интенсивности и количество выпадающих осадков в объеме радиолокационного обзора. Более высокая точность измерения интенсивности осадков и водности облаков достигается при измерении ослабления радиоволн. Для увеличения точности определения ослабления и рассеяния радиоволн используют двухволновые радиолокаторы. Если λ сравнима с размером частицы, закон рассеяния существенно отличается от рэлеевского, и при известной частотной зависимости ослабления радиоволн измерения отражённых сигналов на нескольких длинах волн позволяют оценить размеры частиц осадков. Для несферических частиц вероятность рассеяния зависит от их формы и ориентации [67, 68]. По степени деполяризации отражённых сигналов можно судить о форме частиц облаков и осадков [69, 70] и, следовательно, об их агрегатном состоянии [39, 71]. Движение рассеивателей приводит к смещению

частоты отражённых сигналов вследствие эффекта Доплера. Измерение доплеровского смещения частоты, а также других параметров спектра радиолокационных сигналов, отражённых от облаков и осадков, крупных частиц аэрозоля, искусственных рассеивателей, позволяет исследовать структуру различных движений в атмосфере (ветер, турбулентность, упорядоченные вертикальные потоки) [72].

С помощью высокочувствительных радиолокационных станций обнаруживаются области повышенных градиентов коэффициента преломления, связанные с образованием устойчивых слоев в приземном и пограничном слоях атмосферы, а также с зонами интенсивной турбулентности при "ясном" небе на высотах до 10...15 км и удалениях в десятки километров от РЛС [73].

Однако при широком спектре существующих методов основным недостатком данных систем все же остается ограниченность зоны охвата в пределах точки расположения системы. Альтернативой может выступать использование спутниковых систем, которые имеют большое покрытие и возможность исследования в труднодоступных точках планеты, где использование ранее приведенных методик может быть слишком затратным или неосуществимым.

Несмотря на разработанные спутниковые системы, созданные для диагностики Земли, такие как NOAA, CHAMP, GOCE и др., существует возможность использования спутниковых навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС) для проведения исследований тропосферы и ионосферы. На сегодняшний день ГНСС-технологии и аппаратура используется во многих областях деятельности, связанных с точным определением местоположения, навигацией, геодинамическим и экологическим мониторингом [4, 74 – 76]. Одним из важнейших факторов, который определяет исключительную значимость ГНСС, является глобальность их охвата, что имеет особую ценность при получении информации в прибрежных районах и в условиях «обрезанной» синоптической карты, когда обычные метеорологические и аэрологические данные над морями и неосвещенными районами суши отсутствуют.

К примеру, для определения параметров приземного слоя тропосферы может использоваться метод радиопросвечивания [77]. В его основе лежит взаимосвязь между мерой атмосферной рефракции и искажениями параметров сигнала (частоты и уровня) при движении источника. В ряде ранее проводимых работ по распространению сигналов над морем [78] отмечалась взаимосвязь интерференционной структуры сигнала с состоянием атмосферной рефракции, которая позволила определять профили коэффициента преломления в приводном слое атмосферы при помощи приема излучений ИСЗ на корабельную антенну, на которую приходят прямые и отраженные от поверхности моря сигналы [79]. Таким образом, в работах [78, 79] основой метода восстановления профиля было сравнение принятого сигнала ИСЗ с набором аналогичных зависимостей, аналитически рассчитанных для разных состояний атмосферы. В работе [80] предложена идея восстановления профиля $n(h)$ по доплеровской методике путем решения обратной задачи рефракции. Было показано, что при заданной точности отсчета доплеровской частоты ошибка восстановления профиля $n(h)$ составляет 20...30 N ед.

В работах, проведенных ИФА РАН, предложены методы восстановления профиля $n(h)$, основанные на получении полезной информации при помощи фазовых измерений сигналов навигационной системой «Навстар» и на новых математических методах решения обратных задач [76, 81]. В ИРЭ НАНУ был проведен цикл работ с использованием излучений ИСЗ «Транзит» по диагностике условий распространения радиоволн в диапазоне 400 МГц [82 – 85]. Данные про углы рефракции в каждом минимуме функций угла места источника были получены при помощи интерференционных зависимостей сигналов, принимаемых от ИСЗ [83]. Получаемые данные использовались в качестве исходных для нахождения эффективного градиента в приводном слое методом перебора заранее рассчитанных кривых [84], а также осуществлялась попытка решения обратной задачи рефракции [85]. Ошибка восстановления обеими методиками составляла примерно 15...20 N ед.

За последнее десятилетие начато довольно много программ, связанных с оперативной диагностикой состояния атмосферы Земли, что, несомненно, говорит об актуальности данной проблематики. Среди них можно выделить комплексную программу COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) [86]. Эта программа, направлена на исследования в области метеорологии, исследования ионосферы, климатологии и космической погоды с помощью спутников GPS в сочетании со спутниками на низкой околоземной орбите. Созвездие спутников является совместным американо-тайваньским проектом. В предложенной методике GPSRO (GPS Radio Occultation) используются спутники на низкой околоземной орбите, которые принимают сигналы со спутника GPS (Рис. 1.1).

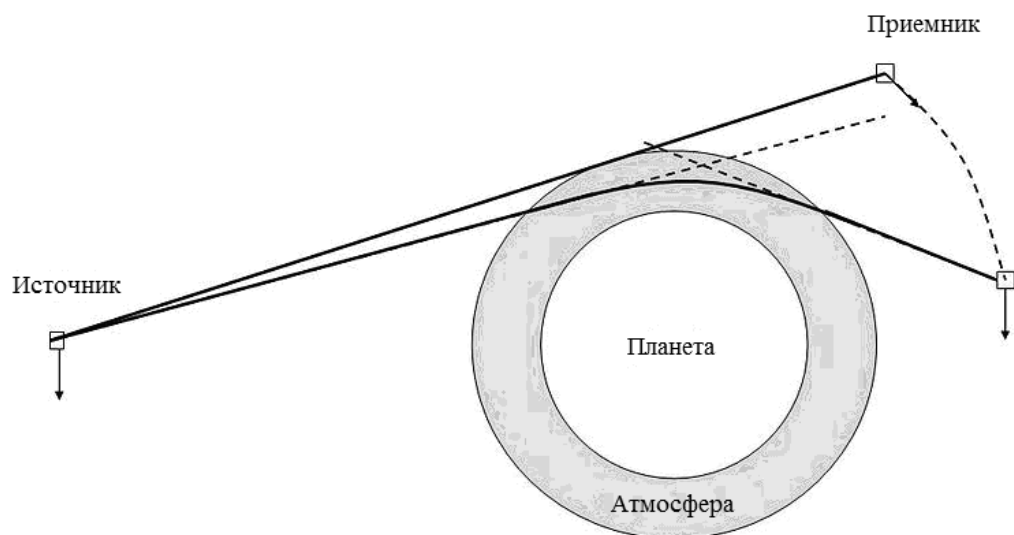


Рисунок 1.1 – Принцип работы GPSRO

GPSRO используется в качестве инструмента прогнозирования погоды, а также может быть использовано для мониторинга изменений климата. Сигнал должен пройти через атмосферу, преломляясь на этом пути. Коэффициент преломления зависит от температуры и концентрации паров воды в атмосфере. GPSRO составляет почти мгновенное изображение состояния атмосферы. Относительное положение между спутником GPS и низкоорбитальных околоземных спутников меняется со временем, что позволяет получать вертикальную развертку слоев атмосферы. GPSRO наблюдения также могут проводиться с самолетов или на высоких горных вершинах [87].

Для более детального анализа результатов полученных при помощи GPSRO используется ряд специализированных спутников, таких как:

- *CHAMP* (Challenging Minisatellite Payload) [88] – немецкий спутник, запущенный 15 июля 2000 года с космодрома Плесецк (Россия) и который использовался для измерения гравиметрического и магнитного поля Земли, оптического зондирования атмосферы, а также других геонаучных приложений;

- *GOCE* (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer* — «исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений») [89] — научно-исследовательский спутник, проект Европейского космического агентства. Запущен 17.03.2009, прекратил существование 11.11.2013. Главной полезной нагрузкой спутника был электростатический гравитационный градиометр, состоявший из 6 акселерометров и предназначавшийся для изучения гравитационного поля Земли и геоида. Данные со спутника GOCE нашли многочисленные применения, в том числе, при изучении опасных вулканических регионов и прояснении поведения океана. Динамика океана являлась одной из главных целей спутника. Сопоставляя полученную информацию о форме геоида с информацией о высоте поверхности океана, полученной высокоточными спутниками, учёные смогли проследить направление и скорость геострофических океанских течений.

- *GRACE* (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) [90] — спутниковая миссия, направленная на изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций, связанных, в частности, с процессами изменения климата. GRACE картографирует гравитационное поле, измеряя положение двух идентичных спутников, находящихся на полярной орбите на высоте 500 км. Спутники непрерывно обмениваются радиосигналами в микроволновом диапазоне, что позволяет с микронной точностью отслеживать изменения расстояния между ними. Собственное движение и ориентация спутников регистрируются с помощью приёмников GPS, акселерометров и звездных датчиков. Кроме того, спутники оснащены уголковыми отражателями для использования в спутниковой лазерной дальнометрии. Они пролетают над

каждым участком Земли приблизительно раз в месяц, что позволяет проследивать естественные перемещения воздушных масс (преимущественно связанные с круговоротом воды в природе).

Существующий этап развития ГНСС систем позволяет получать довольно обширные данные о состоянии тропосферы и ионосферы. Так, по данным ГНСС для ионосферы можно определять значения полного электронного содержания вдоль луча «приемник – ИСЗ» и его вариации, ошибки позиционирования и плотность сбоя навигационно-временных измерений, интенсивность мерцаний навигационного сигнала и др. Для тропосферы по данным ГНСС оценивают задержки, вызванные при прохождении сигнала, горизонтальные градиенты, зависящие от азимута. Подобные параметры можно найти на сайтах IGS в формате RINEX [91].

Основой для нахождения параметров тропосферы и ионосферы является определение псевдодальности. Псевдодальности в первом приближении можно рассматривать как геометрическое расстояние между спутником ГНСС и наземным приемником. Псевдодальность содержит в себе ряд ошибок, которые должны быть приняты во внимание при обработке [25]. Ошибки включают в себя отклонение часов, ионосферную и тропосферную задержки, многолучевость распространения. Исходя из этого, общее уравнение для псевдодальности можно записать в виде [92]

$$P_i^j = \rho_i^j - c\Delta t^j + c\Delta t_i + \Delta\rho_{i\ ion}^j + \Delta\rho_{i\ trop}^j + \beta_i^j + m_{P_i}^j, \quad (1.16)$$

где $P_i^j = c(t_i - \tau^j)$ - псевдодальность, измеренная при помощи i -го приемника;

c – скорость света в вакууме;

t_i – время прихода сигнала, который регистрируется i -ым приемником;

τ^j – время выхода сигнала, которые регистрируется временным блоком j -го ИСЗ;

ρ_i^j – геометрическое расстояние между спутником и вектором мгновенного местоположения $\vec{r}(\tau^j)$ и приемником (пунктом наблюдения) с вектором местоположения $\vec{R}(t_i)$, которое можно записать как

$$\rho_i^j = |\vec{r}(\tau^j) - \vec{R}(t_i)|, \quad (1.17)$$

Δt^j – отклонение часов j -го ИСЗ от системного времени GPS;

Δt_i – отклонение часов i -го приемника от системного времени GPS;

$\Delta \rho_{i \text{ ion}}^j, \Delta \rho_{i \text{ trop}}^j$ – поправки, которые учитывают задержку сигнала в пути от j -го ИСЗ до i -го приемника в ионосфере и тропосфере, соответственно;

$m_{p_i}^j$ – ошибки за счет многолучевости и дифракционных эффектов;

β_i^j – инструментальная ошибка i -го приемника;

Аналогичное уравнение записывается для фазовых измерений [92]

$$\lambda \Phi_i^j = \rho_i^j - c \Delta t^j + c \Delta t_i + \Delta \rho_{i \text{ ion}}^j + \Delta \rho_{i \text{ trop}}^j + \lambda N_i^j + \xi_i^j + m_{\Phi_i}^j, \quad (1.18)$$

где λ – длина волны сигнала на частоте несущей;

Φ_i^j – измеренная фаза сигнала, который пришел от j -го ИСЗ в i -й приемник в момент времени t_i ;

N_i^j – целочисленная фазовая неоднозначность (неизвестное начальное число полных фазовых циклов сигнала на частоте несущей на пути j -го ИСЗ до i -го приемника);

$m_{\Phi_i}^j$ – ошибка за счет многолучевости и дифракционных эффектов;

ξ_i^j – инструментальная ошибка i -го приемника в режиме фазовых измерений.

Координаты приемника X_i, Y_i, Z_i , которые определяются, связаны с ρ_i^j через уравнение [93]

$$\rho_i^j = \sqrt{(X^j - X_i)^2 + (Y^j - Y_i)^2 + (Z^j - Z_i)^2}, \quad (1.19)$$

где X^j, Y^j, Z^j – координаты ИСЗ, которые известны, благодаря эфемеридной информации, передающейся вместе с навигационным сигналом.

Так как измерения псевдодальности напрямую зависят от угла места и азимута, необходимо использовать функции отображения, которые производят пересчет зенитной задержки на произвольный угол возвышения спутника. Большинство функций отображения состоят из коэффициентов для гидростатической и влажной компоненты тропосферной задержки. Некоторые из исследованных схем параметризации включают дополнительно зависимость и от азимутального угла, принимая тот факт, что задержка является ассиметричной для всего пролета спутника. Учет от азимутального угла достигается путем принятия тропосферного градиента задержки [94]. Эта компонента получается как остаточный член, состоящий из той части тропосферной задержки, которая не учтена схемами, предполагающими отсутствие зависимости от азимутального угла. Модель аналогична той, которая использовалась MacMillan (1995) [95] и Bar-Sever et al. (1998) [96] для линейных горизонтальных тропосферных градиентов задержек.

Несмотря на большое количество функций отображения [93, 97], в большинстве из которых за основу взято большое количество статистических наблюдений, однозначного решения эта задача не получила. Основная проблема характерная для всех функций отображения, является их слабое соответствие реальным задержкам на малых углах места, что связано, в первую очередь, с тем, что функции отображения не учитывают реальные метеорологические изменения. Самым простейшим вариантом функции отображения является функция $\sin \beta$. Но учитывая довольно сложный механизм и большое количество факторов, влияющих на задержку сигнала ГНСС, были предложены усовершенствованные модели (табл. 1.1). По сравнению с моделями и функциями отображения, используемыми для отображения симметричной атмосферы, существует ряд моделей градиента и функций картирования для ассиметричной части, что отмечалось ранее [93].

Таблица 1.1 – Функции отображения наклонной тропосферной задержки [93]

Black&Eisner	$m(\beta) = \frac{1}{\sqrt{0.002001 + \sin^2 \beta}}$
Marini	$m(\beta) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + \frac{c}{\dots}}}}{\sin \beta + \frac{a}{\sin \beta + \frac{b}{\sin \beta + \frac{c}{\dots}}}}$
Marini & Murray	$m(\beta) = \frac{1 + \xi}{\sin \beta + \frac{\xi}{1 + \xi} \sin \beta + 0.015}$ где $\xi = \frac{0.002644}{g' \cdot T_k^z} \cdot e^{-0.14372h_0}$, $T_k^z = \frac{0.0022767}{g'} \cdot (P_0 + e_0 \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right))$, $g' = 1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot h_0$
Chao	$m(\beta) = \frac{1}{\sin \beta + \frac{a}{tg \beta + b}}$
Raquet	$m(\beta) = \frac{1}{\sin \beta} + k_m \cdot \left(0.53 - \frac{\beta}{180} \right)^3$, где k_m – эмпирически оцененный коэффициент;
Hartmann-Leitinger	$m(\beta) = \frac{1}{\sin(\beta)} \left[1 - \frac{0.85H_g}{a} ctg^2 \beta + 1.5 \left(\frac{0.85H_g}{a} \right)^2 ctg^4 \beta \right],$ где a – радиус Земли, H_g – высота центра тяжести вертикального столба воздуха.

Общим подходом для борьбы с симметричной частью задержки, является использование высотно-зависимых функций для отображения горизонтально-азимутальных зависимостей задержек. Геодезический азимут α и угол возвышения β между двумя точками (с геометрическим расстоянием S), могут быть связаны с локальной геодезической системой координат следующим образом [93]:

$$\begin{aligned} N_{geo} &= S \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, \\ E_{geo} &= S \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha, \\ h_{geo} &= S \cdot \sin \beta, \end{aligned} \quad (1.20)$$

где N_{geo} , E_{geo} , h_{geo} – северная, восточная и высотная компонента соответственно.

Из уравнения (1.20) вектор направления на точку может быть записан как [93]

$$\vec{x}(\beta, \alpha) \cong h \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot (\cos \alpha \cdot \vec{n} + \sin \alpha \cdot \vec{e}), \quad (1.21)$$

где $\vec{n}$ и $\vec{e}$ единичные вектора на север и восток соответственно.

Рассмотрим подробнее некоторые модели. В модели *Devis et al.* функция отображения может быть модернизирована с учетом градиентной модели как [93]:

$$d_{asym}(\varepsilon, \alpha) = m_{sym}(\varepsilon) \cdot \operatorname{ctg} \beta \cdot (G_N \cdot \cos \alpha + G_E \cdot \sin \alpha), \quad (1.22)$$

где $m_{sym}(\beta)$ – симметричная функция отображения (без учета азимута),

β' – преломленный угол возвышения,

G_N и G_E – градиенты задержки в северном и восточном направлении соответственно.

Используя приближенное соотношения между преломленным и непреломленным углом возвышения, который дан в модели *Bean and Dutton* (1966) [30], градиентная модель *Davis* в уравнении (1.22) будет иметь вид [93]

$$d_{asym}(\varepsilon, \alpha) = m_{sym}(\varepsilon) \cdot \operatorname{ctg} \varepsilon \cdot (1 - 10^{-6} N_s \cdot \csc^2 \varepsilon) \cdot (G_N \cdot \cos \alpha + G_E \cdot \sin \alpha), \quad (1.23)$$

где N_s – полная поверхностная рефракция.

Позже *MacMillan* (1995) [95] и *MacMillan and Ma* (1997) [98] приняли градиентную модель *Davis* в VLBI-анализ (Very Long Baseline Interferometry).

В модели *Chen and Herring* (1997) [99] показано, что градиентная функция отображения может быть примерно описана цепной дробью в виде $\sin(\beta) \operatorname{tg}(\beta)$ как [93]

$$m_{asymp}(\beta) = \frac{1}{\sin \beta \operatorname{tg} \beta + \frac{c_1}{\sin \beta \operatorname{tg} \beta + \frac{c_2}{\sin \beta \operatorname{tg} \beta + \dots}}}, \quad (1.24)$$

Они оставили только первый элемент [93]

$$m_{asymp}(\beta) = \frac{1}{\sin \beta \operatorname{tg} \beta + C}, \quad (1.25)$$

где

$$C = \frac{3 \int g_N \cdot h^2 dh}{2 \int g_N \cdot h(h + R) dh}, \quad (1.26)$$

где g_N – градиент коэффициента преломления,

h – высота,

R – радиус Земли.

Niell Hydrostatic Gradient Mapping Function. В модели *Niell* (2001) [93] предложено гидростатическую градиентную функцию отображения, основанную на той же идее, которая использовалась в IMF (Isobaric Mapping Function). Эта функция отображения требует доступ к информации из модели NWP (Numerical Weather Prediction). Функция отображения имеет следующий вид [93]

$$GMFh(\beta, \alpha_g, z_g) = MFh(\beta - z_g \cdot \cos(\alpha_g)), \quad (1.27)$$

где $GMFh$ – гидростатическая градиентная функция отображения,

MFh – произвольная азимутально-симметричная гидростатическая функция отображения,

β – угол возвышения при обсервации,

α_g – градиентный азимут с севера на восток,

z_g – градиентный зенитный угол.

Несмотря на разнообразные попытки учета особенностей поведения тропосферной задержки в разных регионах, основным недостатком большинства моделей остается их эмпирический характер. Невозможность учета реальных изменений условий распространения приводит к появлению некомпенсированных ошибок в ГНСС измерениях, особенно при наблюдении спутников на низких углах визирования.

Выводы к разделу 1

Проведен анализ современного состояния и тенденций развития технологий диагностики тропосферы. В настоящий момент диагностика условий распространения сигналов в тропосфере сводится к использованию контактных и неконтактных методов. При решении практических задач использование существующих подходов имеет ряд ограничений. Контактные методы, несмотря на высокую точность, требуют проведения измерений во многих точках вертикальных и горизонтальных разрезов по трассе, что весьма сложно реализуемо. Неконтактные методы диагностики хоть и позволяют проводить анализ всей трассы распространения сигналов, однако требуют, как правило, создания специальных источников излучения и приемников. Исходя из этого, актуальной оказывается разработка методов диагностики с использованием существующих источников электромагнитных волн.

Исходя из этого, в работе рассматривается использование глобальных навигационных спутниковых систем для диагностики условий распространения

сигналов на трассах, а также повышение точности и стабильности существующих систем за счет учета особенностей поведения среды распространения.

Проведенный анализ позволил сформулировать задачи, которые необходимо решить для развития общего подхода к созданию глобального информационного поля, обеспечивающего возможность диагностики атмосферных процессов и мониторинга подстилающей поверхности.

Основной целью работы является установление взаимосвязи между изменениями характеристик принимаемых сигналов от навигационных спутников и изменениями параметров атмосферы и поверхности. Поскольку диагностика ионосферных процессов при помощи систем глобальной навигации на основе двухчастотных измерений ПЭС неплохо изучена, то основное внимание уделяется изучению тропосферы, которая, не смотря на большое количество исследований, все еще остается основным источником ошибок наблюдения за счет сложности моделирования процессов протекающей в ней.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- экспериментально и теоретически исследовать суточные и сезонные изменения основных параметров тропосферы и создать модель их описания;
- создать измерительные комплексы, обеспечивающие возможность исследовать поведение излучений ИСЗ при распространении через атмосферу;
- разработать методики диагностики тропосферы и подстилающей поверхности на основании изменений характеристик принимаемых ГНСС-сигналов;
- разработать методики учета влияния условий распространения для повышения точности и стабильности существующих систем спутниковой навигации.

Решение этих задач рассматривается в настоящей работе, основу которой составляют экспериментальные исследования, проведенные с использованием специально созданных измерительных пунктов.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Ключевым моментом для решения ряда задач, связанных с точным позиционированием и диагностикой атмосферы при помощи систем глобальной навигации, является изучение влияния на распространения радиоволн тропосферных и ионосферных процессов, а также разработка моделей этих явлений и на их основе – методов коррекции ошибок. В предыдущем разделе показано, что тропосферная и ионосферная рефракция приводят к появлению ошибок измерения координат, однако в случае ионосферной рефракции задержки могут быть скомпенсированы при использовании двухчастотных режимов работы. В случае тропосферных задержек, которые зависят от пространственно-временного распределения коэффициента преломления по трассе, необходимо создание модели его описания. Таким образом, основной задачей данного раздела является экспериментальное изучение поведения коэффициента преломления тропосферы для различных регионов Украины и создание модели для его описания. Основные результаты представлены в работах [100 – 106].

2.1 Сезонная изменчивость высотных профилей коэффициента преломления тропосферы над сушей

Характер распространения радиоволн в тропосфере, приземном слое нейтральной атмосферы, определяется состоянием этого слоя и процессами, происходящими в нем. Атмосферные процессы, с одной стороны, обусловлены меняющимся режимом нагрева тропосферы Земли, в результате чего имеют место перемещения воздуха в вертикальном направлении. С другой стороны, из-за различия температур в разных областях земного шара происходят горизонтальные циркуляции воздушных масс. Все эти процессы сопровождаются

конденсацией водяных паров, появлением облаков, выпадением осадков. При этом наряду с упорядоченным перемещением воздушных масс имеет место и хаотичное турбулентное движение воздуха. Влияние атмосферы и атмосферных процессов проявляется в искривлении направлений распространения радиоволн, их рассеивании случайными неоднородностями среды, поглощении радиоволн.

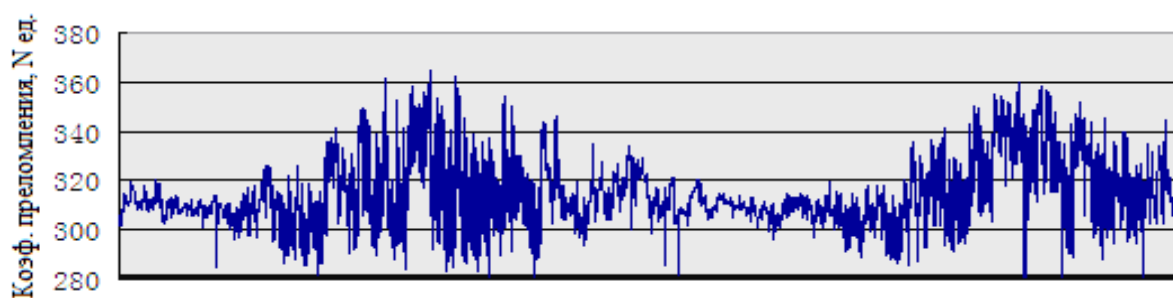
Полученные в работе [107] данные показывают, что в осенне-зимний период (ноябрь – февраль) градиент коэффициента преломления имеет значения, близкие к стандартной рефракции и малую изменчивость с высотой. В период с марта по октябрь динамика изменений становится больше, как и абсолютные значения градиента коэффициента преломления. Таким образом, усредненные значения говорят о повышенной рефракции в весенне-осенний период и даже о критической рефракции в летний сезон. Следует отметить, что сезонные изменения средних за месяц коэффициентов преломления с высотой становятся меньше. Это говорит о том, что на больших высотах рефракционные свойства тропосферы нормализуются.

С целью оценки условий распространения радиосигналов, которые зависят от коэффициента преломления [108, 109], необходимо создать модель его описания. Для изучения его статистических характеристик в различных типах местности, использовались данные для 10 областей Украины: Харьковской, Донецкой, Луганской – восток Украины; Одесской, Николаевской – юг, Черкасской, Кировоградской – центр; Волынской, Ровенской – запад; Львовской – горные районы. В каждой из областей были выбраны по 4 населенных пункта, в которых метеорологические станции измеряли стандартный набор метеорологических параметров: температуру (T), влажность(e), давление (P) с достаточной точностью. Для оценки значения коэффициента преломления использовалось следующее соотношение

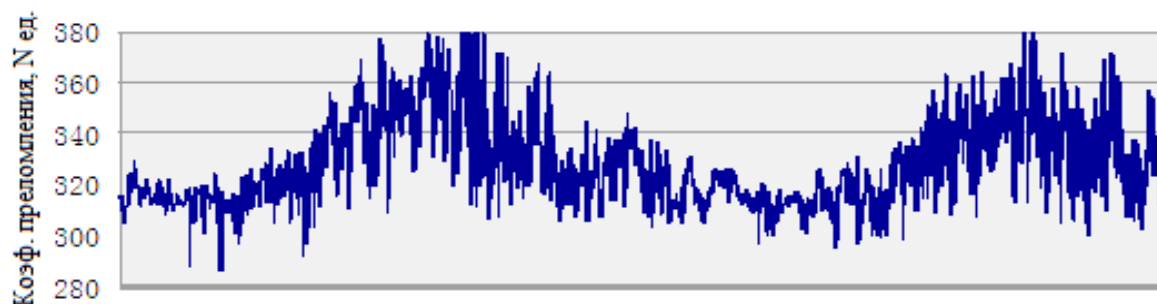
$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right). \quad (2.1)$$

На рис. 2.1 для нескольких населенных пунктов, относящихся к разным регионам по своим морфологическим особенностям, приведено поведение на

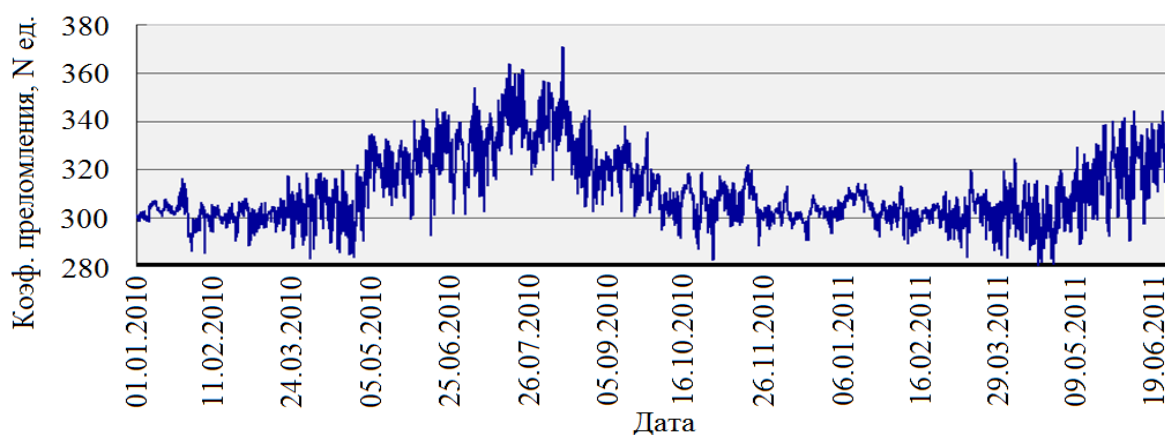
протяжении полутора лет (с 01.01.2010 по 30.06.2011) коэффициента преломления тропосферы. Шкалы времени и коэффициента преломления на рис. 2.1, а-в одинаковые. Видно, что для всех регионов Украины характерен сезонный ход зависимости коэффициента преломления. Максимальные значения его приходятся на летние месяцы – июнь-август. Как следствие в летний период в тропосфере наибольшая вероятность появления инверсионных слоев и повышенной рефракции [109], что приводит к наибольшим погрешностям измерения координат, по сравнению с другими сезонами.



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 – Сезонная зависимость коэффициента преломления тропосферы: а – г. Харьков, б – г. Черкасы, в – г. Одесса

Как видно из рис. 2.1, изменения коэффициента преломления на протяжении года является существенно нестационарным процессом. Гистограммы распределения коэффициентов преломления для различных регионов Украины за период с января 2010 г. по июнь 2011 г. приведены на рис. 2.2. Они показаны в нормированных координатах: плотность распределения нормированна по ее максимальному значению, а ось абсцисс является центрированной относительно среднего и нормированной на среднее значение. Следует отметить негауссов характер закона распределения коэффициента преломления для всех регионов. Формы плотности распределения для регионов, принадлежащих к разным группам, существенно отличаются и все они отличны от гауссового закона распределения. Поскольку периодичность процесса связана с его годовыми изменениями, то при построении гистограмм распределения, функций распределения, а также моментных характеристик необходимо выбирать для анализа интервалы, кратные годовому циклу. При этом выбор начального момента анализа не является существенным.

Если рассматривать отдельно изменения коэффициента преломления в период с ноября по апрель и с апреля по ноябрь, то окажется, что для каждого из этих периодов можно использовать для описания плотности распределения коэффициента преломления локально нормальное распределение:

$$\begin{aligned} P_0(N) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N0}} \exp\left(-\frac{(N - \bar{N}_0)^2}{\sigma_{N0}^2}\right) \\ P_1(N) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N1}} \exp\left(-\frac{(N - \bar{N}_1)^2}{\sigma_{N1}^2}\right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

где i – сезон, при чем 0 – отвечает зиме, 1 – лету;

$P_i(N)$ – плотность распределения для i -го сезона;

$\bar{N}_i, \sigma_{Ni}$ – среднее значение и среднеквадратичное отклонение коэффициента преломления для i -го сезона.

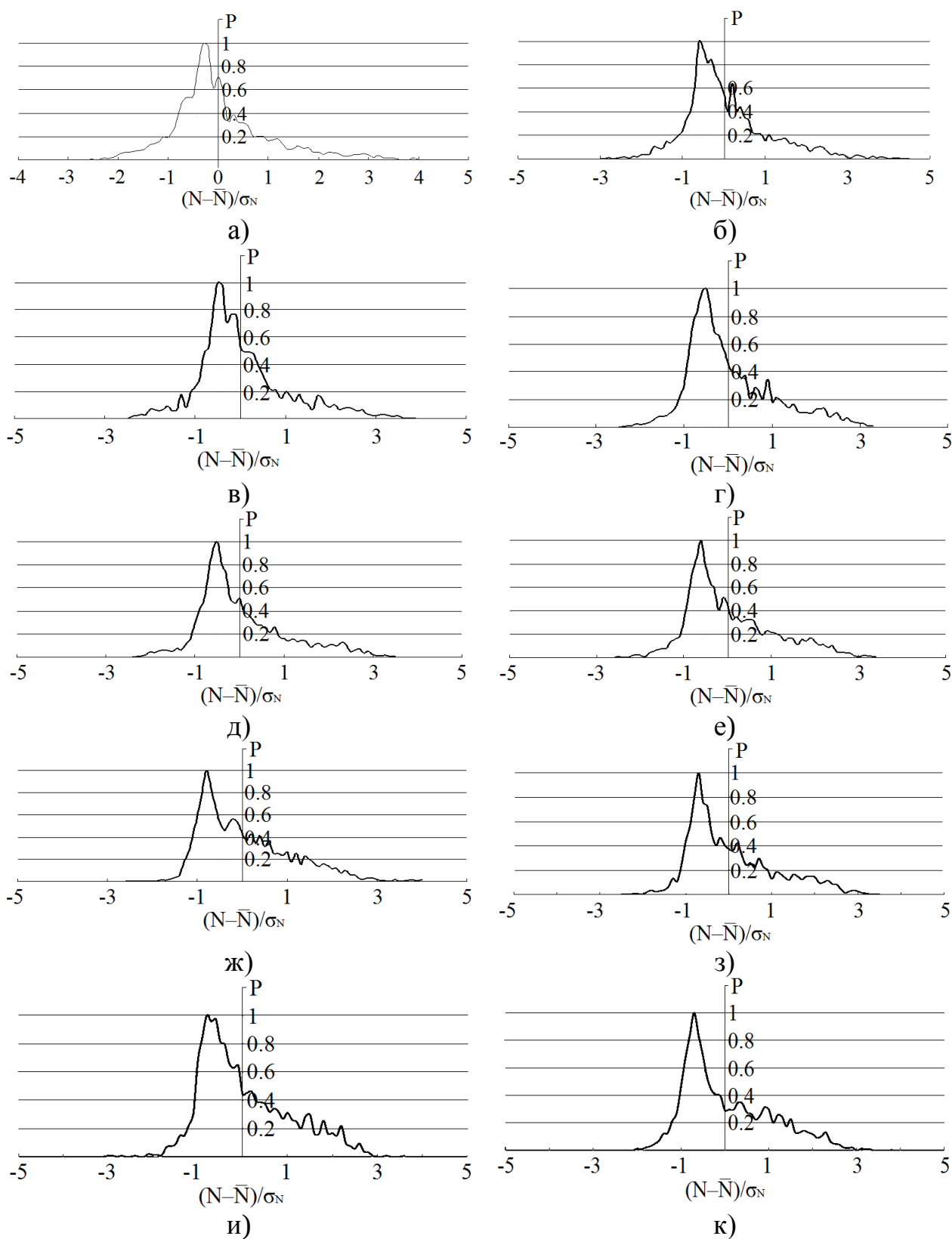


Рисунок 2.2 – Гистограммы распределения коэффициента преломления тропосферы в нормированных координатах для городов: а – Харьков, б – Луганск, в – Донецк, г – Кировоград, д – Черкасы, е – Николаев, ж – Одесса, з – Ровно, и – Луцк, к – Львов

В целом, для описания распределения коэффициента преломления за год можно использовать полигауссовы распределения [110], которые ранее применялись для описания помех в каналах связи [111, 112]. Для этого можно воспользоваться подходом, применяемым для описания нестационарных помех от морской поверхности [113] и отражений от «ясного неба» [114 – 116]. При этом используется математический аппарат вложенных полумарковских процессов [117, 118]. Безусловная плотность распределения значений коэффициента преломления будет определяться суперпозицией коэффициента преломления для каждого из сезонов (зимнего и летнего)

$$P(N) = P_0(n)P_0 + P_1(n)P_1 \quad (2.3)$$

где P_i – финальная вероятность существования процесса в i -ом фазовом состоянии.

Числовые характеристики распределения коэффициентов преломления в январе и июле для городов, находящихся в разных регионах и климатических зонах Украины, приведены в табл. 2.2, 2.3. Видно, что среднее $\bar{N}_i$ и среднеквадратичное σ_{N_i} значение коэффициентов преломления N зимой для всех регионов имеют значительно меньшие значения, чем летом. Коэффициенты асимметрии распределения коэффициента преломления летом и зимой сравнительно небольшие, что говорит о возможности описания распределения в пределах сезона нормальным законом. Зависимости числовых характеристик от высоты показаны на рис. 2.3, а результаты их аппроксимации линейной функцией в табл. 2.1. Видно, что летом и зимой существует выраженная высотная зависимость для средних значений коэффициента преломления, в то время, как для среднеквадратичных отклонений и коэффициента асимметрии она практически отсутствует. В то же время для лета характерна более резкая зависимость среднего значения коэффициента преломления с высотой – крутизна снижается приблизительно в 1,7 раза больше.

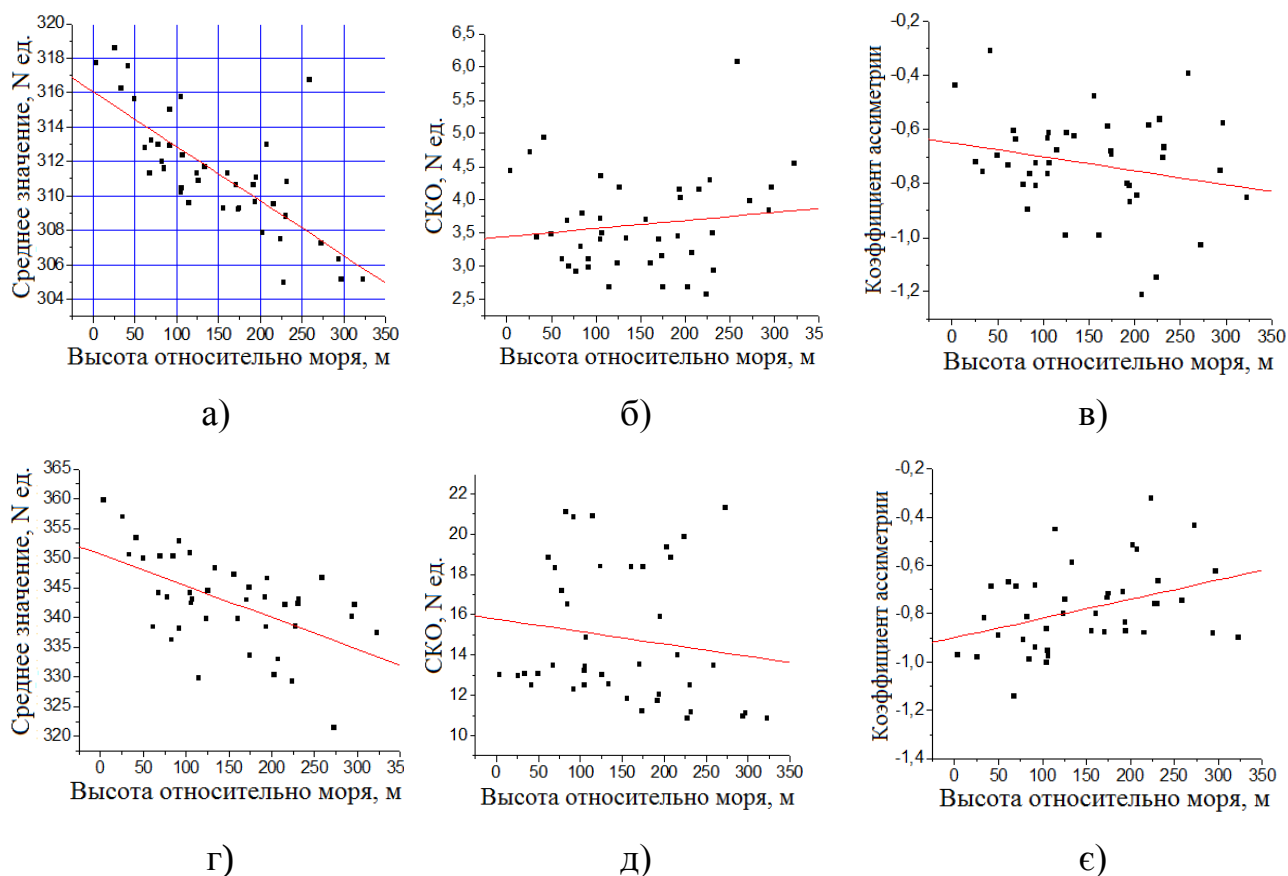


Рисунок 2.3 – Зависимость числовых характеристик от высоты относительно моря: а, б, в – январь; г, д, е – июль; а, г – средние значения; б, д – среднеквадратические отклонения; в, е – коэффициент асимметрии

Таблица 2.1 – Параметры аппроксимации зависимости числовых характеристик от высоты

	Параметры	Коэффициенты аппроксимации				
		A	B	R	N	P
Январь	Среднее, $\bar{N}$	316,0	-0,0316	-0,76	41	1,0E-4
	СКО, σ_N	3,45	0,0012	0,14	41	0,39
	Коэффициент асимметрии	-0,65	-5,17E-4	-0,23	41	0,15
Июль	Среднее, $\bar{N}$	350,6	-0,0532	-0,56	41	1,45E-4
	СКО, σ_N	15,77	-0,0062	-0,15	41	0,35
	Коэффициент асимметрии	-0,90	7,98E-4	0,38	41	0,015

Таблица 2.2 – Числовые характеристики распределения коэффициентов преломления в январе

Город	Высота над морем, м	$\bar{N}$, N ед.	σ_N , N ед.	Коэф. асим.	Регион
Купянск	83	312.0	3.3	-0.90	Восток
Изюм	78	313.0	2.9	-0.80	Восток
Лозовая	175	309.3	2.7	-0.69	Восток
Харьков	115	309.6	2.7	-0.68	Восток
Богодухов	203	307.9	2.7	-0.84	Восток
Луганск	62	312.8	3.1	-0.73	Восток
Красный Луч	273	307.3	4.0	-1.03	Восток
Рубежное	92	312.9	3.1	-0.81	Восток
Стаханов	208	313.0	3.2	-1.21	Восток
Славянск	124	311.3	3.0	-0.99	Восток
Мариуполь	70	313.2	3.0	-0.64	Юг
Константиновка	161	311.3	3.0	-0.99	Восток
Донецк	224	307.5	2.6	-1.15	Восток
Александрия	105	310.2	3.4	-0.76	Центр
Кировоград	171	310.6	3.4	-0.59	Центр
Светловодск	85	311.6	3.8	-0.77	Центр
Николаев	50	315.6	3.5	-0.70	Юг
Новый буг	92	315.0	3.0	-0.72	Юг
Первомайск	105	315.7	3.7	-0.63	Юг
Арциз	26	318.6	4.7	-0.72	Юг
Киция	4	317.7	4.4	-0.44	Юг
Котовск	259	316.7	6.1	-0.39	Юг
Одесса	42	317.6	4.9	-0.31	Юг
Корсунь-Шевченковский	106	310.5	4.4	-0.61	Центр
Смела	68	311.3	3.7	-0.61	Центр
Черкасы	216	309.5	4.2	-0.58	Центр
Умань	107	312.4	3.5	-0.73	Центр
Владимир-Волинский	194	309.7	4.2	-0.81	Запад
Камень-Каширский	174	309.2	3.2	-0.68	Запад
Ковель	192	310.6	3.5	-0.80	Запад
Луцк	232	310.8	2.9	-0.67	Запад
Львов	323	305.2	4.6	-0.85	Прикарпат.
Самбор	297	305.2	4.2	-0.58	Прикарпат.
Червоноград	294	306.3	3.8	-0.75	Прикарпат.
Стрый	228	305.0	4.3	-0.56	Прикарпат.
Ровно	231	308.8	3.5	-0.71	Запад
Сарны	195	311.1	4.0	-0.87	Запад

Таблица 2.3 – Числовые характеристики распределения коэффициентов преломления в июле

Город	Высота над морем, м	$\bar{N}$, N ед.	σ_N , N ед.	Коеф. асим.	Регион
Купянск	83	336.252	21.078	-0.815	Восток
Изюм	78	343.362	17.179	-0.910	Восток
Лозовая	175	333.665	18.339	-0.717	Восток
Харьков	115	329.810	20.886	-0.451	Восток
Богодухов	203	330.256	19.343	-0.515	Восток
Луганск	62	338.398	18.818	-0.671	Восток
Красный Луч	273	321.383	21.307	-0.436	Восток
Рубежное	92	338.151	20.850	-0.683	Восток
Стаханов	208	332.943	18.833	-0.534	Восток
Славянск	124	339.702	18.388	-0.801	Восток
Мариуполь	70	350.326	18.306	-0.687	Юг
Константиновка	161	339.710	18.379	-0.800	Восток
Донецк	224	329.261	19.831	-0.324	Восток
Александрия	105	344.193	13.232	-1.003	Центр
Кировоград	171	342.969	13.505	-0.875	Центр
Светловодск	85	350.281	16.503	-0.991	Центр
Николаев	50	349.916	13.063	-0.889	Юг
Новый буг	92	352.881	12.288	-0.940	Юг
Первомайск	105	350.905	12.477	-0.864	Юг
Арциз	26	356.921	12.946	-0.981	Юг
Киля	4	359.719	13.021	-0.970	Юг
Котовск	259	346.620	13.465	-0.747	Юг
Одесса	42	353.324	12.491	-0.686	Юг
Корсунь-Шевченковский	106	342.420	13.391	-0.952	Центр
Смела	68	344.159	13.478	-1.143	Центр
Черкасы	216	342.101	13.996	-0.879	Центр
Умань	107	343.031	14.850	-0.976	Центр
Владимир-Волынский	194	338.418	12.013	-0.837	Запад
Камень-Каширский	174	345.093	11.225	-0.735	Запад
Ковель	192	343.466	11.729	-0.710	Запад
Луцк	232	343.074	11.171	-0.667	Запад
Львов	323	337.445	10.842	-0.900	Прикарпат.
Самбор	297	342.140	11.120	-0.625	Прикарпат.
Червоноград	294	340.198	10.965	-0.880	Прикарпат.
Стрый	228	338.559	10.826	-0.760	Прикарпат.
Ровно	231	342.318	12.501	-0.758	Запад
Сарны	195	346.587	15.888	-0.872	Запад

В зимний период максимальные значения среднего по регионам отличаются от минимальных примерно на 3%, в то время, как в летний период на 6%. При группировке морфологически подобных точек использовались предварительные оценки корреляции коэффициента преломления для разных городов.

Для коэффициентов преломления характерно наличие сильных суточных и сезонных зависимостей (рис. 2.4), обусловленных суточной и сезонной сменой поведения температуры, давления и влажности (рис. 2.5). Ось абсцисс на рис. 2.4 отображает время, а ось ординат – значение коэффициента преломления в N ед. Зимой для всех городов независимо от их места нахождения коэффициент преломления тропосферы около $310 N$ ед. В то же время летом максимальные его значения зависят от места расположения города. Для приморских городов (Одессы, Евпатории, Севастополя, Феодосии) и Запорожья он достигает $400 N$ ед., в то время как для других городов составляет около $360 N$ ед. Суточные колебания температуры для городов с континентальным климатом больше, чем для приморских городов. Следует отметить, что для зимнего периода значения температур сильно отличаются (примерно на $10...15^{\circ}\text{C}$) для северных и южных регионов Украины (рис. 2.5). В то же время для коэффициентов преломления эта разница существенно меньше при сохранении суточных зависимостей. Это означает, что для коэффициента преломления характерен более сложный механизм формирования его сезонных и суточных зависимостей, в котором помимо влияния температурных изменений существенную роль играют изменения влажности и давления. Сильная нестационарность поведения коэффициента преломления, характерна для всех городов и всех регионов приводит к тому, что статистики его распределения отличаются от стандартных гауссовых моделей, как отмечалось ранее. Это иллюстрируется на рис. 2.6, 2.7, где приведены функции распределения за весь период наблюдения.

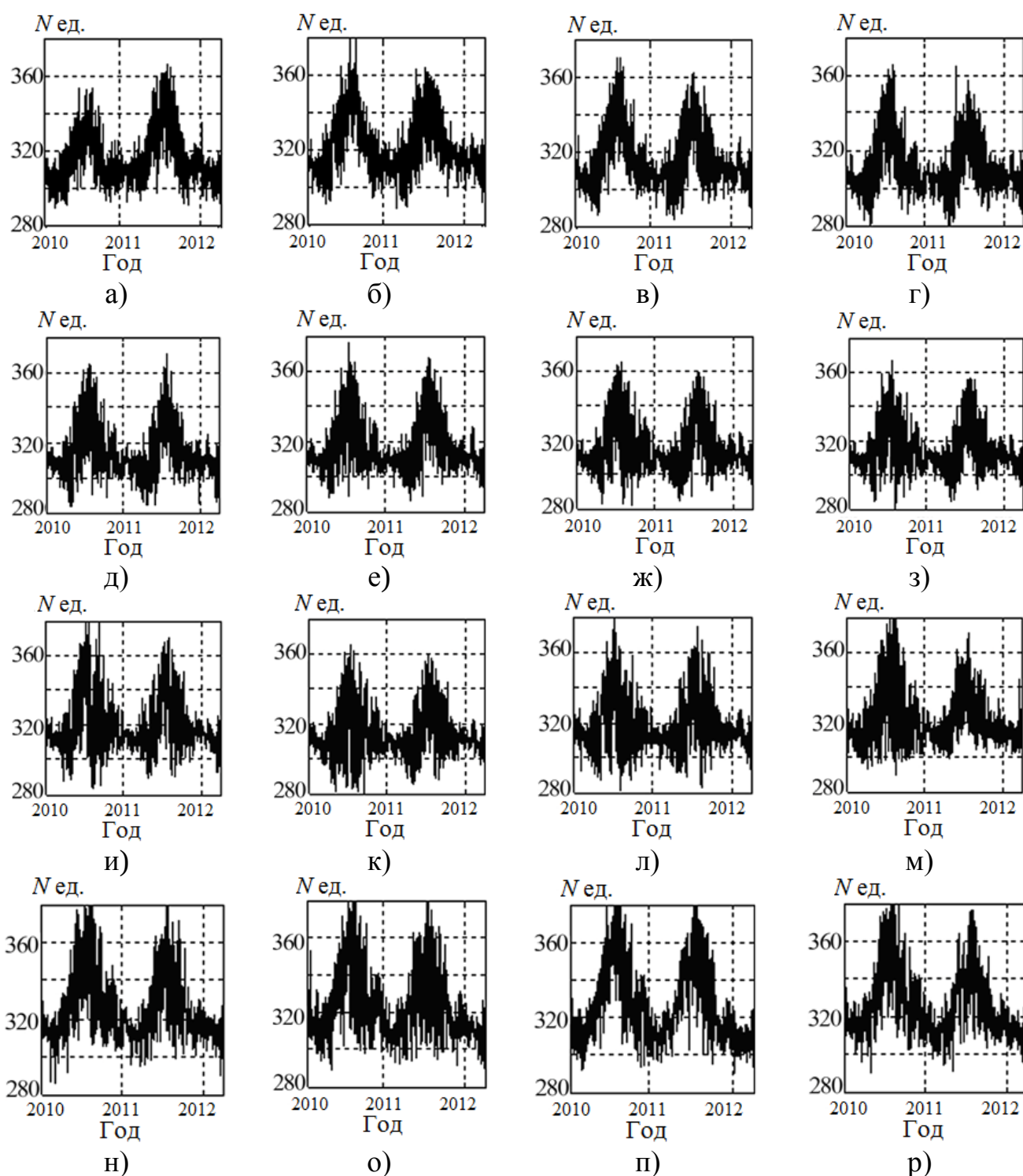


Рисунок 2.4 – Сезонная и суточная зависимость коэффициента преломления для городов Украины с 2010 по 2012 гг.: а – Мукачево, б – Яворив, в – Дунаивцы, г – Винница, д – Киев, е – Чернигов, ж – Кировоград, з – Лубны, и – Запорожье, к – Харьков, л – Луганск, м – Измаил, н – Одесса, о – Евпатория, п – Севастополь, р – Феодосия

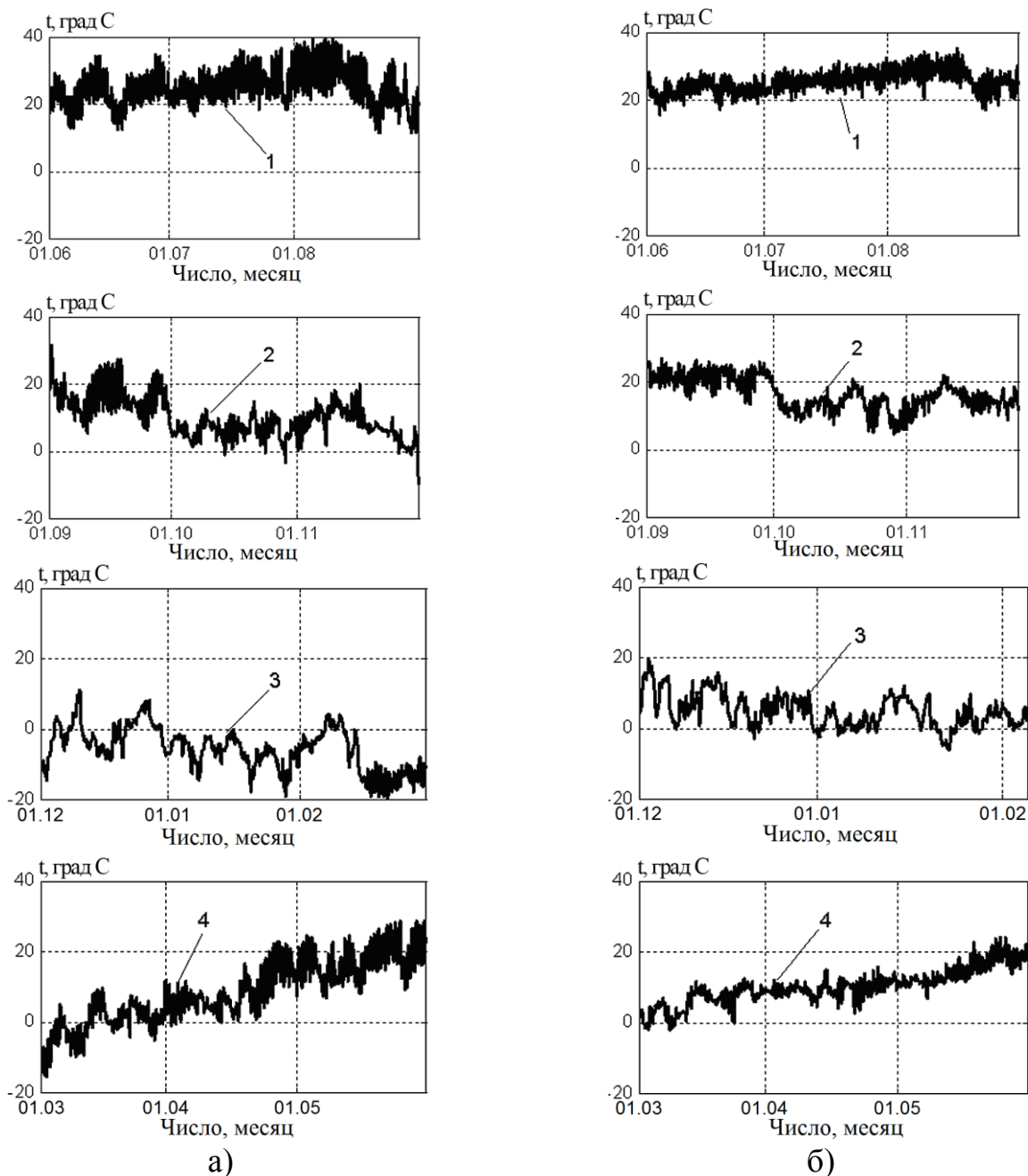


Рисунок 2.5 – Суточные и сезонные зависимости температуры с 01.06.2010 по 01.06.2011: а – Харьков, б – Севастополь: 1 – лето, 2 – осень, 3 – зима, 4 – весна

Функции распределения, приведенные на рис. 2.6, получены при усреднении коэффициентов преломления тропосферы в скользящем окне шириной 5 отсчетов (0,525 суток), а на рис. 2.7 – в окне шириной 65 отсчетов (8,125 суток). Они приведены в масштабах линеаризирующих нормальный закон распределения. Ось абсцисс является центрированной относительно среднего m_N и нормированной на среднеквадратическое отклонение σ_N коэффициента преломления $(N - m_N) / \sigma_N$.

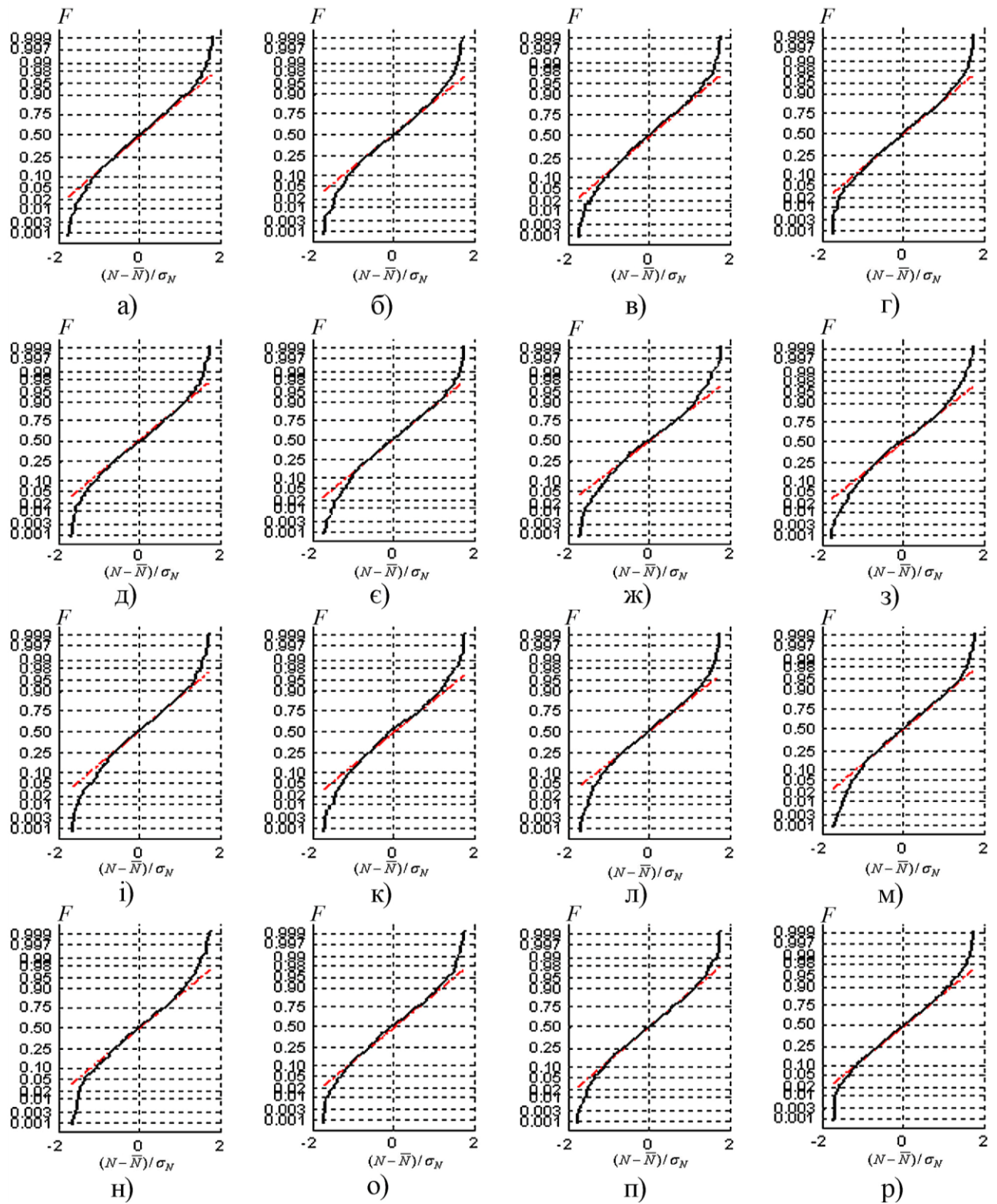


Рисунок 2.6 – Интегральные функции распределения коэффициента преломления для городов Украины за период с 01.01.2010 по 01.01.2012 при усреднении в скользящем окне в 5 значений: а – Мукачево, б – Яворов, в – Дунаицы, г – Винница, д – Киев, е – Чернигов, ж – Кировоград, з – Лубны, и – Запорожье, к – Харьков, л – Луганск, м – Измаил, н – Одесса, о – Евпатория, п – Севастополь, р – Феодосия

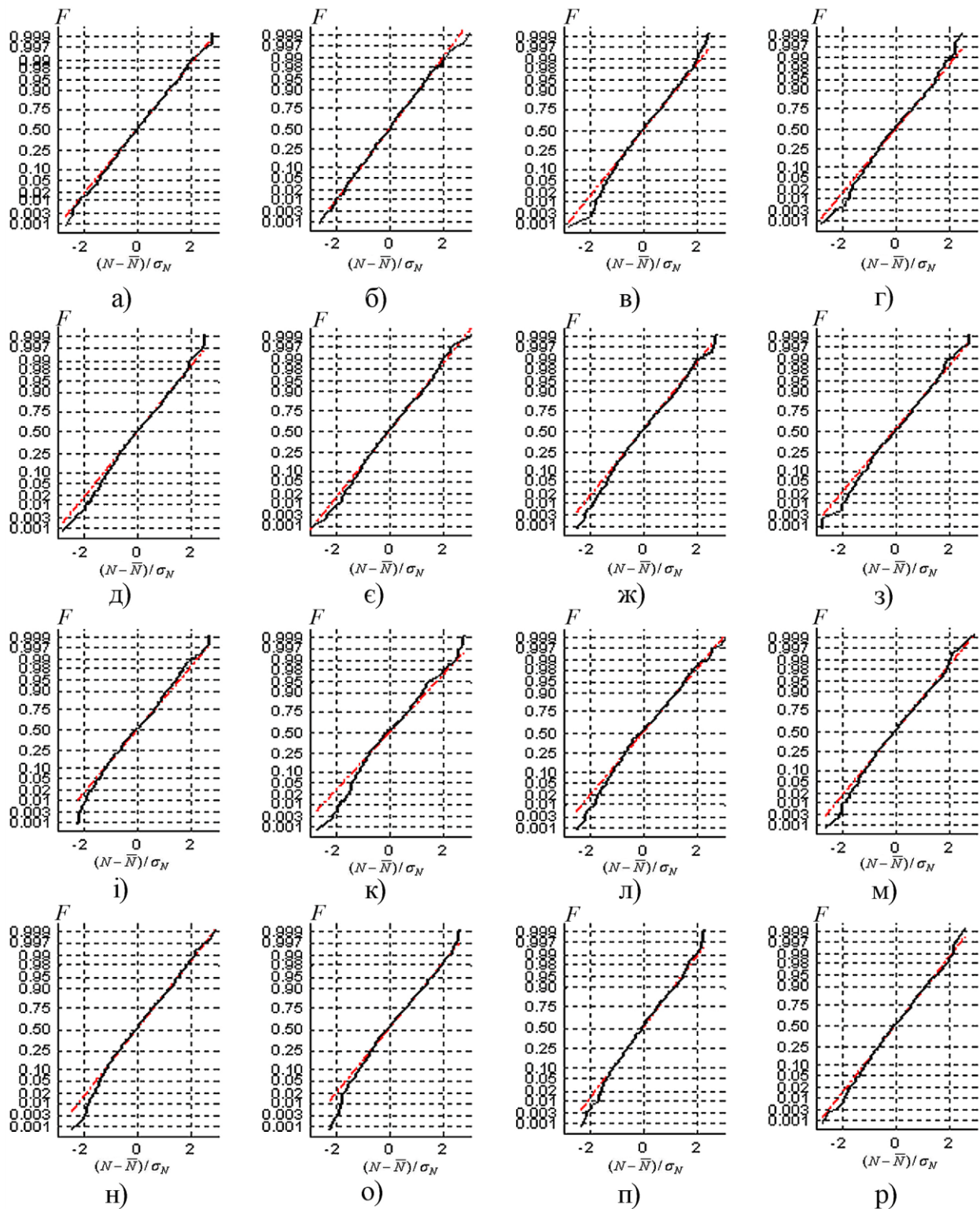


Рисунок 2.7 – Интегральная функция распределения коэффициента преломления для городов Украины за период с 01.01.2010 по 01.01.2012 при усреднении в скользящем окне в 65 отсчетов: а – Мукачеве, б – Яворов, в – Дунайцы, г – Винница, д – Киев, е – Чернигов, ж – Кировоград, з – Лубны, и – Запорожье, к – Харьков, л – Луганск, м – Измаил, н – Одесса, о – Евпатория, п – Севастополь, р – Феодосия

В табл. 2.4 приведены числовые характеристики (среднее, среднеквадратичное значение, а также коэффициенты асимметрии k_a и эксцесса k_e) для этих городов за период в два года с 01.01.2010 по 31.12.2011, а также средняя за этот период температура $\bar{t}$ °С.

Таблица 2.4 – Числовые характеристики для городов Украины

	m	σ	k_a	k_e	$\bar{t}$	Тип местности
Мукачево	318,00	13,44	0,77	3,09	11,528	Гористая местность, высоты 500...1000 м
Яворов	323,84	14,65	0,68	3,02	9,339	
Дунаевцы	318,36	14,89	0,78	3,06	9,730	
Винница	312,69	13,91	0,93	3,58	8,308	
Киев	315,97	13,82	0,94	3,71	9,372	Низина, лесостепь, высоты 0...100 м
Чернигов	318,02	13,70	0,95	3,59	8,264	
Лубны	316,02	12,75	0,88	3,57	8,983	
Кировоград	316,96	14,11	0,92	3,48	9,185	
Запорожье	320,81	14,96	1,04	3,95	10,207	Равнинная местность, степь, высоты 100...200 м,
Харьков	314,68	13,00	0,92	4,01	9,212	
Луганск	320,41	13,95	0,92	3,80	9,763	
Измаил	323,87	13,92	1,02	4,04	11,460	Приморские города
Одесса	327,43	16,39	0,96	3,57	11,448	
Евпатория	329,77	17,44	0,93	3,51	13,353	
Севастополь	334,70	19,86	0,81	2,97	14,339	
Феодосия	328,29	16,04	0,98	3,71	13,183	

Необходимо отметить, что для приморских городов характерны большие средние и среднеквадратичные значения коэффициента преломления. Для всех распределений наблюдается затянутый «хвост» в сторону больших значений, а также более острая вершина, чем для нормального закона распределения. Это иллюстрирует рис. 2.8, на котором кривыми 1 – 6 представлены плотности распределения коэффициентов преломления по 16 городам системы наземно-космического обеспечения Украины (СНКОУ).

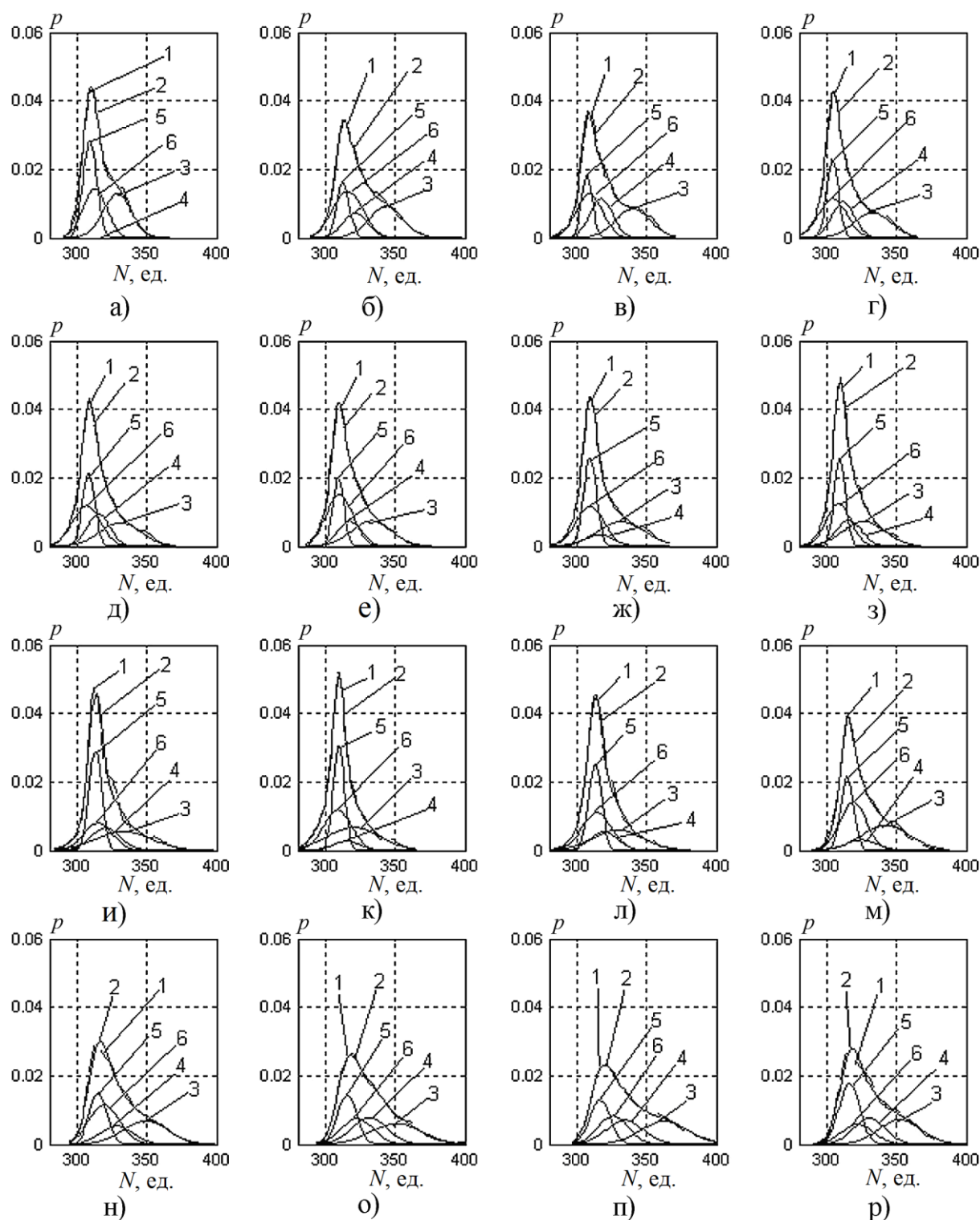


Рисунок 2.8. – Плотность распределения коэффициента преломления для городов Украины по сезонам: а – Мукачеве, б – Яворов, в – Дунаевцы, г – Винница, д – Киев, е – Чернигов, ж – Кировоград, з – Лубны, и – Запорожье, к – Харьков, л – Луганск, м – Измаил, н – Одесса, о – Евпатория, п – Севастополь, р – Феодосия: 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация, 3 – лето, 4 – осень, 5 – зима, 6 – весна

2.2 Математическое формулирование имитационной модели коэффициента преломления

Одной из наиболее информативных характеристик случайного процесса является закон распределения вероятностей. В качестве первого приближения его считали гауссовым. Реальные распределения экспериментальных данных, как было показано ранее, отличаются от нормального закона, что говорит о необходимости использования полигауссового распределения. Негауссовы плотности распределения впервые были использованы для описания сигналов, рассеянных поверхностями суши, моря или гидрометеорами в случаях, когда элемент пространственно-временного разрешения системы меньше характерных размеров неоднородностей на море, обусловленных периодом морских волн, а для участков суши – размерами участков с однородным покрытием [119 – 121]. Сначала модели негауссовых процессов создавались в классе стационарных случайных процессов путем нелинейного преобразования нормального случайного процесса [121 – 123]. В рамках такого подхода были построены модели сигналов с логнормальным и вейбуловским распределениями, создана теория оптимального приема сигналов на фоне стационарных шумов с негауссовым распределением [123]. Однако для большинства наблюдаемых в природе процессов негауссовость статистик обусловлена их нестационарным характером. Это стимулировало создание моделей в классе нестационарных процессов, а также использование вложенных полумарковских процессов [118, 124 – 128]. Предложенный подход оказался достаточно продуктивным для описания статистик рассеянных морем, "ясным небом", а также участками суши сигналов [118, 128] и позволил развить теорию приема сигналов на фоне нестационарных негауссовых помех [128]. Представляется целесообразным использование предложенного подхода для описания сезонного поведения коэффициента преломления тропосферы.

Статистическое описание поведения коэффициента преломления основано на использовании вложенных двухкомпонентных случайных процессов $\{\overline{S}(t), \theta(t)\}$, в которых одна компонента $\overline{S}(t)$ непрерывна, другая $\theta(t) = \nu_i$

дискретна, а t – время. Эти компоненты являются зависимыми и, в общем случае, не марковскими. Это означает, что не накладывается никаких ограничений на распределение времен существования процесса в каждом из фазовых состояний. В каждый момент времени процесс находится в одном из $K = 4$ возможных фазовых состояний $H_i \in \nu_1 \dots \nu_K$ (ν_1 – лето, ν_2 – осень, ν_3 – зима, ν_4 – весна), причем полагается известным исходное состояние $\theta_0 = \nu_i$ в момент времени $t = 0$. Поскольку смена времен года является детерминированным процессом, то матрица одношаговых вероятностей перехода $(\pi) = \|\pi_{ij}\|$, где $i, j = \overrightarrow{1..K}$, имеет вид:

$$(\pi) = \|\pi_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Каждому ненулевому элементу π_{ij} матрицы вероятности перехода можно сопоставить случайную величину T_{ij} с плотностью распределения $f_{ij}(t)$, которую будем называть временем ожидания в состоянии до перехода в состояние ν_i , причем в нашем случае ν_j , как видно из соотношения (2.4), возможны только переходы $\nu_i \Rightarrow \nu_j$, причем $j = (i+1)_{\text{mod}4}$. Если величины T_{ij} распределены по экспоненциальному закону, то такой процесс будет марковским. В нашем случае трудно ожидать, чтобы длительность каждого из сезонов года подчинялся экспоненциальному закону распределения. На практике, во многих случаях такое предположение не выполняется, и тогда процесс, у которого смена состояний описывается марковской цепью, а плотность распределения времен существования в каждом из них отличается от экспоненты, относится к классу полумарковских. Внутри каждого из ν_i состояний процесс будем считать квазистационарным, что описывается плотностью распределения значений $[P_i(S)]$ и спектром $[S_i(\omega)]$. Рассмотрим систему Ξ , которая может находиться в одном и только одном фазовом состоянии из множества состояний E и эволюция которой осуществляется следующим образом.

1) В начальный момент $t=0$ система находится в одном из фазовых состояний множества E , например, в состоянии $i \in E(0, 4)$ в течение некоторого случайного времени θ_0 , после чего мгновенно переходит в состояние $j \in E$. При этом время θ_0 , проведенное системой в состоянии i до перехода в $j = (i+1)_{\text{mod } 4}$, случайная величина с произвольной функцией распределения $f_{ij}(t)$. Находясь в i -ом состоянии, поведение системы описывается плотностью распределения значений коэффициента преломления и его спектром, учитывающим особенности временного поведения коэффициента преломления внутри каждого из сезонов.

2) Переход системы из состояния i в состояние $j = (i+1)_{\text{mod } 4}$ происходит с вероятностью $\pi_{ij} = 1$, причем $\sum_{i \in E} \pi_{ij} = 1$ для каждого $i \in E$.

3) В состоянии j система будет находиться случайное время θ_1 и будет описываться своей плотностью распределения $[P_j(s)]$ и спектром $(S_j(\omega))$, после чего перейдет в следующие фазовое состояние $\mathcal{A}$.

Математической моделью системы, описывающей сезонное поведение коэффициента преломления, являются вложенные процессы, один из которых, определяет изменение фазовых состояний $\mathcal{A}$ и является, в общем случае, полумарковским. Второй – определяет поведение системы внутри фазового состояния и в большинстве практически интересных случаев может описываться эргодичным гауссовым процессом. Отказ от требования экспоненциальности распределения времени существования в каждом из состояний и является главным отличием полумарковского процесса от цепи Маркова. При этом теряется изящество и простота, свойственные теории цепей Маркова, но появляется возможность охватить более широкий класс процессов, описание которых невозможно с помощью цепей Маркова. Так, очевидно, что среднее время продолжительности каждого из периодов года будет зависеть как от географического положения точки на земной поверхности, так и активности Солнца, при этом суммарное время существования всех фазовых состояний T_i

определяется периодом вращения Земли вокруг Солнца, то есть продолжительностью земного года T_Y

$$\sum_{i=1}^4 T_i = T_Y \quad (2.5)$$

Алгоритм моделирования поведения коэффициента преломления на протяжении года имеет следующую структуру.

1) Задается исходное состояние, в котором находится процесс в момент $t = 0$ (пусть для определенности H_i).

2) Определяется время нахождения процесса в i состоянии до перехода в j состояние, для чего генерируется случайное число T_{ij} , имеющее плотность распределения $f_{ij}(t)$. В течение этого времени генерируется случайная величина $\vec{S}_{ij}(t)$, имеющая плотность распределения $P_i(\vec{S})$ и спектр $\vec{S}_i(\omega)$.

3) Производится изменение состояния $H_i \rightarrow H_j$ и процесс вычисления повторяется.

Чаще всего необходимо знание функций распределения и спектров коэффициента преломления, который описывается рассмотренной моделью на интервале наблюдения $(t, t + T_0)$. Определение спектра $S(\omega, T_0)$ и плотности распределения значений $P(S, T_0)$ для произвольного времени наблюдения T_0 весьма затруднительны. Однако на практике интересны два предельных случая: малых $T_0 \leq \min_{i \in E} (\overline{T_{ij}})$ и больших $T_0 \geq \max_{i \in E} (\overline{T_{ij}})$ времен наблюдения. При малых временах наблюдения практически никогда не происходит изменения состояния, и плотность распределения значений процесса, его спектр и все числовые характеристики соответствуют его начальному состоянию

$$\overline{P(S)} = \overline{P_i(S)}; \quad \overline{S(\omega)} = \overline{S_i(\omega)}; \quad (2.6)$$

причем если выбор начальной точки наблюдения не существен, то эти характеристики реализуются с вероятностями, определяемыми финальными вероятностями каждого из состояний. При больших временах наблюдения плотность распределения значений, спектр и все числовые характеристики,

например, моменты порядке M_m , определяются как средневзвешенное характеристик в каждом из состояний с весами, определяемыми финальными вероятностями их наличия

$$\overrightarrow{P(S)} = \sum_{i=1}^K P_i \overrightarrow{P_i(S)} ; \overrightarrow{S(\omega)} = \sum_{i=1}^K P_i \overrightarrow{S(\omega)} ; \overrightarrow{M_m} = \sum_{i=1}^K P_i \overrightarrow{M_{im}}, \quad (2.7)$$

где M_{im} « m » момент для i -го состояния и в целом M_m , а P_i – финальные вероятности существования процесса в i -ом состоянии [112],

$$P_i = \frac{T_i}{\sum_{j=1}^K T_j}, \quad (2.8)$$

где T_i – среднее время существования фазового состояния (сезона), среднее время нахождения процесса в i -ом состоянии до перехода в одно из следующих состояний равно

$$\overline{T_i} = \sum_{j=1}^K \pi_{ij} \overline{T_{ij}}, \quad (2.9)$$

а среднее время нахождения в i -том состоянии до перехода в j имеет вид:

$$\overline{T_{ij}} = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt. \quad (2.10)$$

Продолжительность каждого из сезонов года может определяться по данным многолетних метеорологических наблюдений.

2.3 Экспериментальные исследования плотности распределения коэффициента преломления

Для экспериментальных исследований представляет интерес выяснение возможности использования локально гауссовых распределений для описания статистики коэффициента преломления в пределах сезона. С этой целью был выбран период наблюдения с 01.06.2010 по 01.06.2011, который был разбит на 4 сезона: с 01.12.2010 по 01.03.2011 – зима, с 01.03.2011 по 01.06.2011 – весна, с 01.06.2010 по 01.09.2010 – лето и с 01.09.2010 по 01.12.2010 – осень. Для каждого

из сезонов по 16 городам, в которых размещены пункты СНКОУ, были построены плотности распределения (рис. 2.8, кривые 3 – 6).

Видно, что для сезонов характерно существенное отличие числовых характеристик, как средних значений, так и дисперсий. Наибольшие значения дисперсий характерны для летнего периода, маленькие для зимы (кривые 3 и 5, рис. 2.8). Для весны и осени значения дисперсии имеют примерно одинаковую величину (кривые 4 и 6, рис. 2.8). Кроме приморских регионов и Закарпатья, для других регионов Украины характерны примерно одинаковые средние значения коэффициента преломления для зимнего периода и весны. Для приморских городов средние значения коэффициента преломления весной выше, чем в зимний период. Для Закарпатья средние значения весной и осенью примерно одинаковые, причем они больше, чем зимой. На рис. 2.9 приведены плотности распределения коэффициентов преломления для разных сезонов и городов, а также их аппроксимация нормальным законом, который имеет такие же числовые характеристики, как и экспериментальные данные. Из каждой группы городов было выбрано по одному городу: горный – Яворов, лесостепной полосы – Харьков, приморский город – Севастополь и город лесостепной полосы на берегу большой реки – Киев. Видно удовлетворительное качественное соответствие экспериментально полученной для каждого из сезонов плотности распределения значений коэффициента преломления нормальному закону. Это же обстоятельство подтверждают приведенные на рис. 2.10 в масштабе, линеаризующем нормальный закон распределения, интегральные функции распределения.

Числовые характеристики для каждого из сезонов по городам СНКОУ представлены в табл. 2.5. Следует отметить, что небольшие значения коэффициента асимметрии и близость коэффициента эксцесса значением, характерным гауссовой плотности распределения позволяют предположить, что для описания плотностей распределения коэффициента преломления внутри каждого из сезонов можно использовать стандартные гауссовы модели.

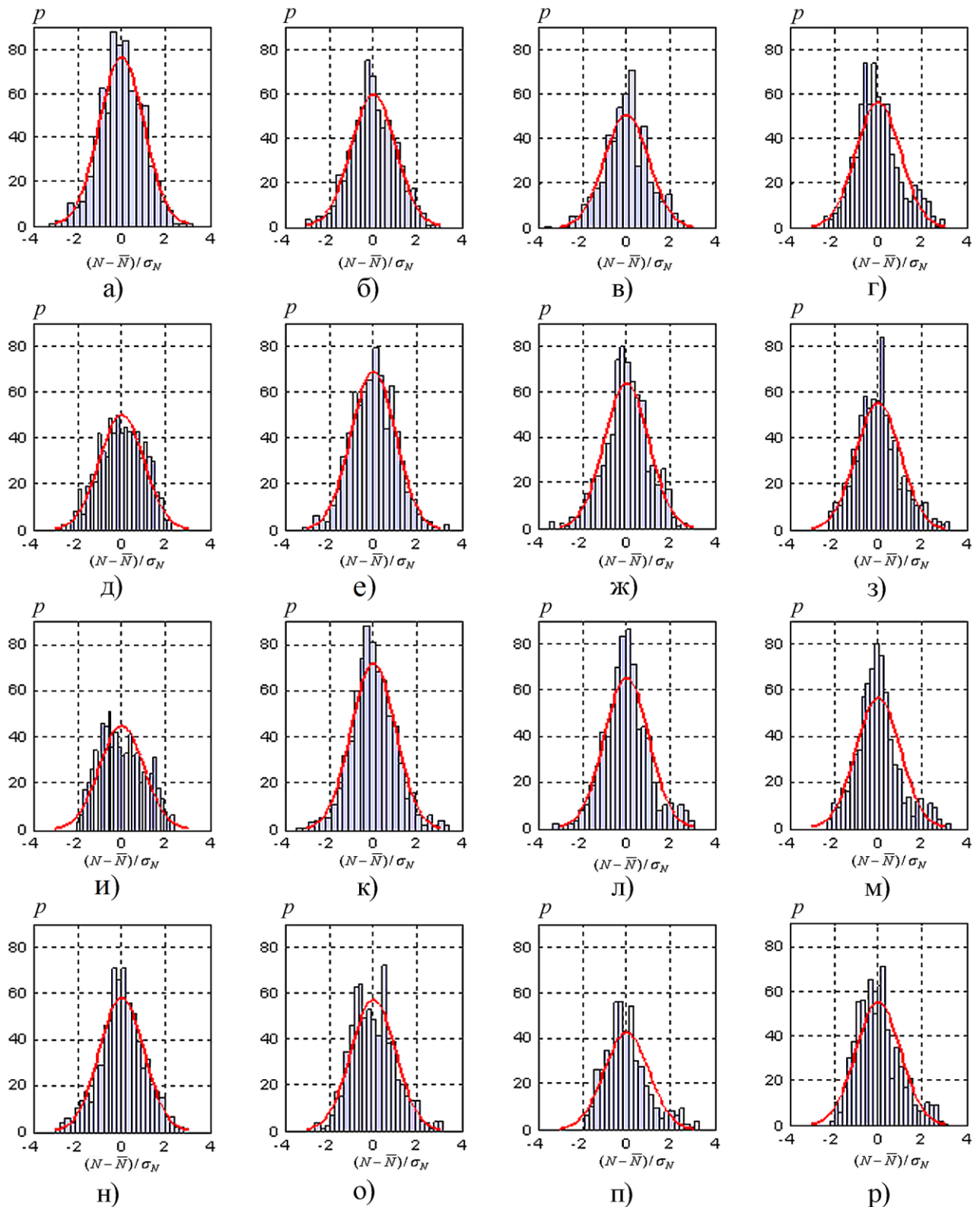


Рисунок 2.9 – Плотность распределения коэффициента преломления для городов Украины: а, б, в, г – Яворов; д, ж, з, е – Киев; и, к, л, м – Харьков; н, о, п, р – Севастополь; а, д, и, н – лето; б, е, к, о – осень; в, ж, л, п – зима; г, з, м, р – весна

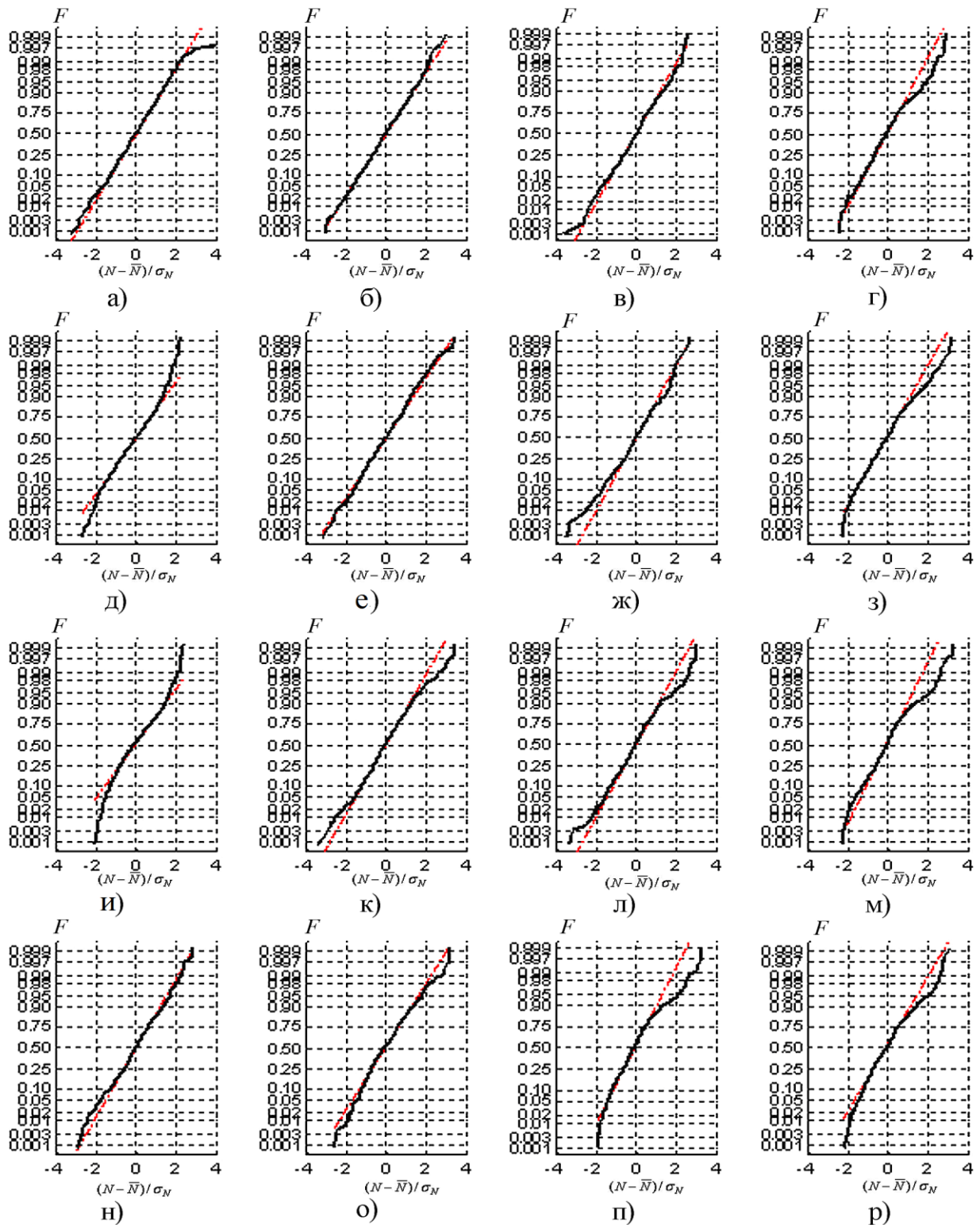


Рисунок 2.10 – Интегральная функция распределения коэффициента преломления для городов Украины: а, б, в, г – Яворов; д, ж, з, е – Киев; и, к, л, м – Харьков; н, о, п, р – Севастополь; а, д, и, н – лето; б, е, к, о – осень; в, ж, л, п – зима; г, з, м, р – весна

Таблица 2.5 – Числовые характеристики плотности распределения по сезонам для различных городов Украины.

Город	Лето				Осень				Зима				Весна			
Параметр	m	σ	k_a	k_e	m	σ	k_a	k_e	m	σ	k_a	k_e	m	σ	k_a	k_e
Мукачево	328,7	10,4	-0,3	2,8	313,1	8,9	0,5	3,3	309,0	4,9	-0,1	3,7	312,7	8,6	0,7	3,1
Яворов	343,2	12,5	0,08	3,7	321,4	8,9	0,0	2,9	312,7	4,4	0,1	3,2	316,0	10,9	0,4	3,1
Дунаевцы	340	12,6	-0,4	2,9	317,5	8,4	0,3	3,2	307,1	3,9	-0,2	3,5	309,0	9,6	0,1	3,6
Винница	332,7	13,5	-0,2	2,5	311,7	8,3	0,1	3,4	304,0	4,2	0,0	3,0	304,4	10,4	0,5	4,7
Киев	331	15,0	-0,1	2,3	315,4	8,3	0,0	3,1	308,1	4,4	-0,2	3,3	307,0	10,0	0,4	3,1
Чернигов	333	14,5	-0,2	2,7	317,4	8,6	0,0	2,9	309,1	4,0	-0,5	3,7	310,0	9,8	0,4	3,2
Лубны	326,7	15,2	-0,1	2,4	315,8	9,3	0,1	3,5	309,3	4,0	-0,1	3,5	308,6	8,9	0,3	3,2
Кировоград	331,8	17,2	-0,3	2,3	316,1	10,5	0,0	3,4	309,3	4,6	0,5	3,9	309,6	10,2	0,5	3,7
Запорожье	333,2	20,1	0,0	2,3	320,5	11,1	0,5	6,5	313,1	4,5	1,3	5,3	315,1	10,5	0,5	3,6
Харьков	320,3	19,0	0,25	2,2	315,4	10,1	0,2	3,8	309,5	4,0	0,3	3,7	308,8	10,1	0,6	3,6
Луганск	329,4	18,0	0,16	2,5	319,4	10,1	0,2	3,6	313,0	4,6	0,4	4,1	314,4	10,9	0,6	3,2
Измаил	342	17,6	-0,3	2,9	324,8	11,5	0,1	3,0	314,5	4,6	0,0	3,8	319,0	9,6	0,6	2,9
Одесса	348,9	16,5	0,10	3,0	328,4	11,9	0,7	3,6	315,3	6,4	0,4	3,0	319,7	11,2	0,6	3,2
Евпатория	346,6	18,5	0,2	3,0	327,1	12,8	0,6	3,6	311,3	7,0	0,9	3,9	318,3	11,6	0,6	3,5
Севастополь	357,6	17,3	-0,1	3,1	329,4	13,7	0,4	3,1	311,4	7,4	0,8	3,7	320,9	11,1	0,6	3,1
Феодосия	352,1	15,4	0,1	3,4	330,5	11,5	0,5	3,2	316,3	7,4	0,8	3,8	322,0	11,6	0,6	3,1

Числовые характеристики линейных аппроксимаций (среднее значение a , наклон b , получаемый при этом коэффициент корреляции R , среднеквадратичная погрешность σ , количество точек N аппроксимации и вероятность отторжения найденной аппроксимации P) приведены в табл. 2.6.

$$N = a + b h, \quad \sigma_N = a + b h, \quad (2.11)$$

Следует отметить, что в экспоненциальной модели тропосферы

$$N = N_0 \exp(\alpha h) \approx N_0 (1 + \alpha h). \quad (2.12)$$

Тогда из (2.11, 2.12) можно записать, что

$$N_0 \approx a, \quad \alpha \approx b/a. \quad (2.13)$$

Таблица 2.6 – Аппроксимация зависимости среднего и среднеквадратического значения коэффициента преломления от высоты

	Коэффициент преломления				СКО			
	Лето(1)	Осень(2)	Зима(3)	Весна(4)	Лето(1)	Осень(2)	Зима(3)	Весна(4)
R	-0.44	-0.67	-0.84	-0.72	-0.43	-0.67	-0.66	-0.20
σ	8.52	4.56	2.11	4.38	2.32	1.41	0.96	1.27
a	342.8	325.7	315.81	321.65	16.49	11.79	6.17	11.31
b	-0.047	-0.046	-0.035	-0.051	-0.012	-0.014	-0.009	-0.0027
b/a	-1,4e-4	-1,4e-4	-1,1e-4	-1,6e-4	7,3e-4	1,2e-4	1,5e-4	2,4e-4
N	32	32	16	32	32	32	16	32
P	0.011	0.0001	0.0001	0.0001	0.014	0,0001	0,005	0,27

Теоретически ожидаемые значения декремента падение коэффициента преломления с высотой $\alpha \approx 1.36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. Полученные при обработке высотных зависимостей коэффициентов преломления значения декрементов затухания $\alpha \approx -b/a$, как видно из табл. 2.6, удовлетворительно соответствуют теоретически ожидаемым оценкам. Летом и осенью оценки отличаются от ожидаемых значений более, чем на +3%. Чуть больше различия зимой (–19%) и весной (+18%). Для высотной зависимости среднеквадратического значения получены примерно такие же значения декремента затухания для осени (–12%) и зимы (+10%). Для летнего периода значение ниже (–46%), а весной – выше (+76%). Следует отметить, что для лета и весны вероятности отвергнуть гипотезы линейной аппроксимации несколько выше, чем для зимы и осени. Это, возможно, связано с большей динамикой тропосферных процессов осенью и летом, когда часто возникают ситуации повышенной рефракции и наличия инверсионных слоев [116, 118, 129]. На рис. 2.11, 2.12 показано поведение первых двух моментов (среднего значения и среднеквадратического отклонения) по сезонам на протяжении полутора лет.

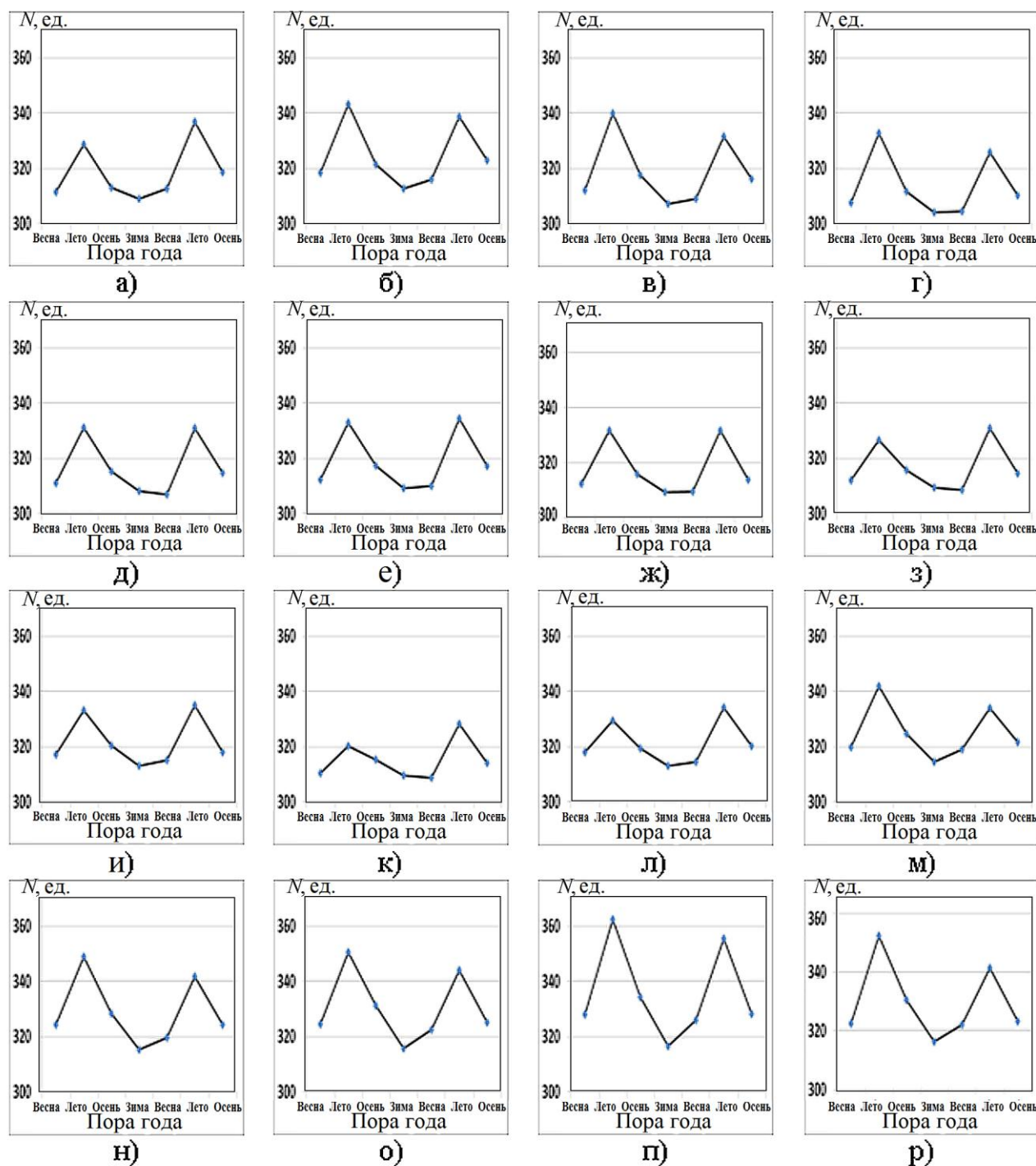


Рисунок 2.11 – Зависимость среднего значения коэффициента преломления по сезонам: а – Мукачево, б – Яворов, в – Дунаевцы, г – Винница, д – Киев, е – Чернигов, ж – Кировоград, з – Лубны, и – Запорожье, к – Харьков, л – Луганск, м – Измаил, н – Одесса, о – Евпатория, п – Севастополь, р – Феодосия

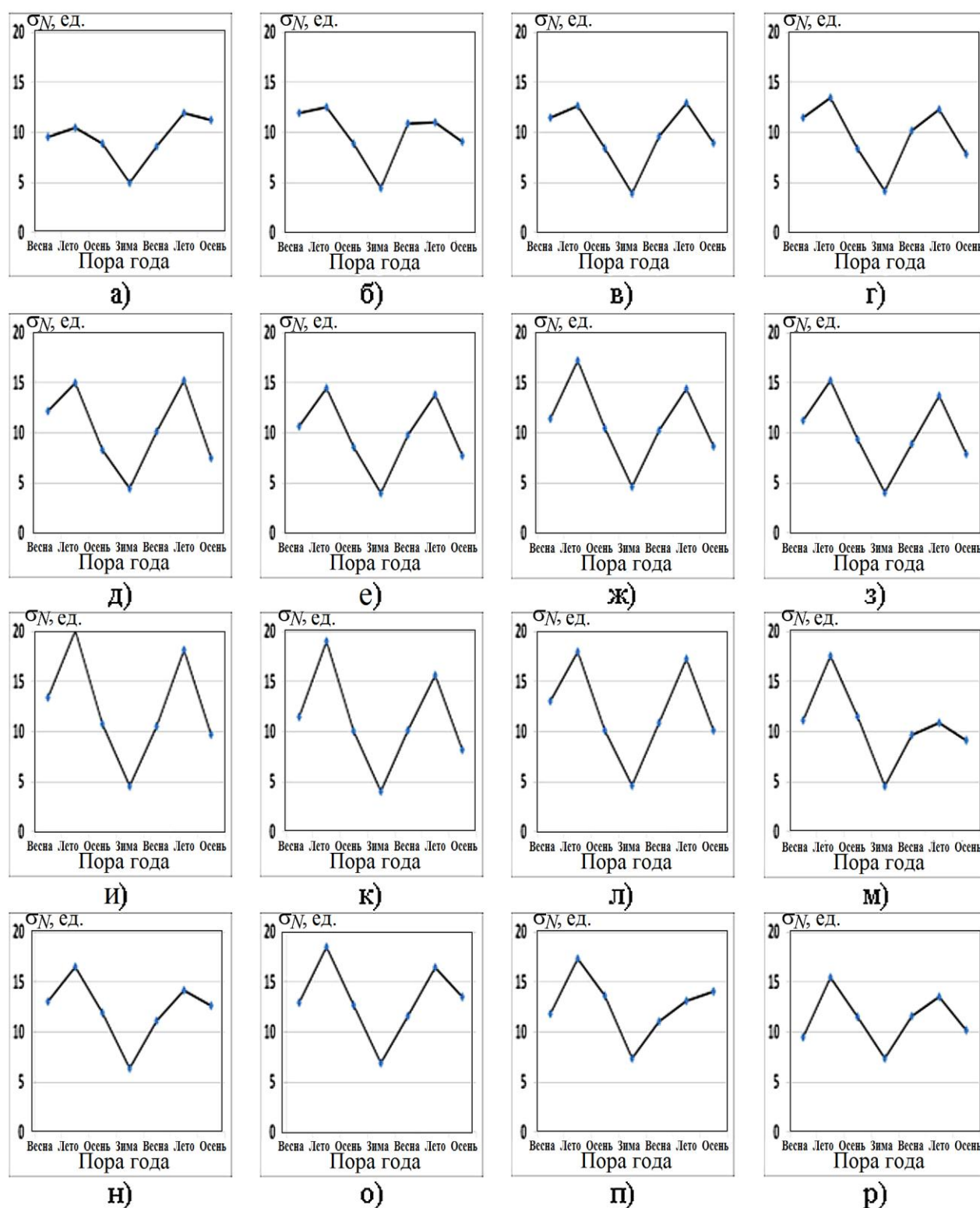


Рисунок 2.12 – Зависимость среднеквадратического отклонения коэффициента преломления по сезонам: а – Мукачеве, б – Яворов, в – Дунаевцы, г – Винница, д – Киев, е – Чернигов, ж – Кировоград, з – Лубны, и – Запорожье, к – Харьков, л – Луганск, м – Измаил, н – Одесса, о – Евпатория, п – Севастополь, р – Феодосия

В то время, когда среднее значение коэффициента преломления по сезонам отличается не более чем на 20%, среднеквадратичные значения в зиму и летом отличаются в 2...3 раза. Видно, что для приморских городов (г. Одессы, г. Евпатории, г. Севастополя, г. Феодосии) в 2010 г. году значения этих характеристик летом выше, чем в 2011 г. Для городов лесостепной зоны (г. Запорожья, г. Харькова, г. Луганска, г. Измаила), также среднеквадратичное значение коэффициента преломления оказывается выше летом 2010 г., чем в аналогичный период 2011 г. Для других сезонов они имеют примерно одинаковые значения. Особенности поведения характеристик коэффициента преломления могут быть связаны с влиянием солнечной активности на земную атмосферу, которая наиболее сильно влияет на процессы летом и имеет 11-летний цикл колебаний (см. разд. 3).

2.3.1. Использование метода наименьших квадратов для аппроксимации экспериментальных данных

В предыдущем подразделе экспериментально установлено, что для описания плотностей распределения коэффициентов преломления в течение сезона i можно использовать локально-гауссовую плотность $p_i(N)$

$$p_i(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N_i}} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{(N - \bar{N}_i)}{\sigma_{N_i}} \right)^2 = f(N, \bar{N}_i, \sigma_{N_i}), \quad (2.14)$$

где $\bar{N}_i$, σ_{N_i} - среднее значение и среднеквадратичное отклонение коэффициента преломления в течение $i \in (1, 4)$ сезона. С учетом (2.7)

$$p(N) = \sum_{i=1}^4 P_i p_i(N), \quad (2.15)$$

в котором $p_i(N)$ локально-гауссовая плотность распределения (2.14) для i -го сезона. Пусть $\hat{p}(N)$ экспериментально полученная плотность распределения

коэффициентов преломления в i сезоне. Для каждого сезона она описывается гауссовским законом распределения. Нужно найти для (2.15) коэффициенты

$$P = (P_1 P_2 P_3 P_4)^*, \quad (2.16)$$

которые минимизируют функционал

$$\delta = \min_{P_i, i \in (1,4)} \left(\sum_{j=1}^k \left(\hat{p}(N_j) - \sum_{i=1}^4 P_i p_i(N_j) \right)^2 \right). \quad (2.17)$$

С учетом того, что

$$\sum_{i=1}^4 P_i = 1, \quad (2.18)$$

можно записать

$$P_4 = 1 - \sum_{i=1}^3 P_i. \quad (2.19)$$

Тогда (2.17) преобразуется к виду

$$\delta = \min_{P_i, i \in (1,4)} \left(\sum_{j=1}^k \left(\left(\hat{p}(N_j) - p_4(N_j) \right) - \sum_{i=1}^3 P_i \left(p_i(N_j) - p_4(N_j) \right) \right)^2 \right). \quad (2.20)$$

Обозначив

$$\begin{aligned} \vec{p}^* &= (p_4(N_1) p_4(N_2) \dots p_4(N_k))^*, \\ y(N_j) &= \hat{p}(N_j) - p_4(N_j), \\ Y &= (y(N_1) y(N_2) \dots y(N_k))^*, \\ X &= \begin{pmatrix} p_1(N_1) p_1(N_2) \dots p_1(N_k) \\ p_2(N_1) p_2(N_2) \dots p_2(N_k) \\ p_3(N_1) p_3(N_2) \dots p_3(N_k) \end{pmatrix}^* - \vec{p}_4(111), \end{aligned} \quad (2.21)$$

можно записать решение соотношения (2.17) относительно P в виде системы нормальных уравнений по методу наименьших квадратов [128, 131] в виде:

$$P = (X^* X)^{-1} (X^* Y), \quad (2.22)$$

проверка значимости (качества предсказания) множественного уравнения регрессии осуществляется путем вычисления начальной σ_y^2 и остаточной σ_o^2 дисперсий по формулам [132]

$$\sigma_o^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (y(N_j) - \hat{y}(N_j))^2}{k-5} ; \quad \sigma_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (y(N_j) - \bar{y}(N_j))^2}{k-1}, \quad (2.23)$$

которые сравнивают с помощью критерия Фишера [131]

$$F = \sigma_y^2 / \sigma_o^2 \quad (2.24)$$

Результаты вычислений вероятностных характеристик P_i , а также критерия Фишера с использованием соотношений (2.21) - (2.24) представлены в табл. 2.7. В качестве дисперсии для сравнения бралась остаточная дисперсия аппроксимации экспериментальной плотности распределения полигауссовой моделью при одинаковых парциальных весах сезонных компонентов: $P_i = 0,25$ при $i \in (1,4)$. Таким образом, критерий Фишера в этом случае позволяет оценить насколько оправдано использование неравных весов (продолжительностей разных сезонов) по сравнению с использованием одинаковой их длительности. Для городов, критерий Фишера для которых имеет большие значения целесообразно использовать полигауссову аппроксимацию с неравными весами сезонов. Для тех же городов, для которых критерий Фишера незначительно отличается от единицы, можно использовать одинаковый вес. В случае, когда плотности распределения коэффициентов преломления весной и осенью близки или одинаковы, происходит вырождение четырехкомпонентной плотности распределения в трехкомпонентную, например, как это произошло для Мукачево.

Таблица 2.7 – Полигауссовая аппроксимация плотности распределения

	P_1	P_2	P_3	P_4	σ_o^2	F_0	Тип местности
Мукачево	0,34	0	0,35	0,31	7,5e-7	4,19	Горная местность, высота 500...1000 м
Яворов	0,29	0,16	0,18	0,37	3,6e-7	5,81	
Дунаивцы	0,27	0,24	0,18	0,31	9,4e-7	3,1	
Винница	0,25	0,22	0,24	0,29	2,3e-7	1,26	
Киев	0,26	0,20	0,24	0,3	2,4e-7	2,17	Низина, лесостепь, высота 0...100 м
Чернигов	0,27	0,16	0,20	0,37	3,8e-7	3,61	
Лубны	0,28	0,18	0,26	0,28	3,4e-7	1,65	
Кировоград	0,31	0,09	0,3	0,3	3,6e-7	5,19	
Запорожье	0,28	0,18	0,33	0,21	2,1e-6	1,67	Равнинная местность, степь, высота 100...200 м
Харьков	0,32	0,07	0,31	0,3	4,0e-7	6,45	
Луганск	0,27	0,14	0,29	0,3	9,0e-7	1,77	
Измаил	0,32	0,09	0,25	0,34	4,0e-7	2,48	
Одесса	0,28	0,16	0,24	0,32	8,7e-7	1,21	Приморские города
Евпатория	0,28	0,25	0,25	0,22	1,6e-7	2,31	
Севастополь	0,29	0,24	0,24	0,23	1,4e-7	4,0	
Феодосия	0,28	0,22	0,33	0,17	7,5e-7	1,95	

Качественную картину дает рис. 2.8, на котором показаны экспериментально полученные плотности распределения коэффициента преломления, его распределение по сезонам, и аппроксимация экспериментальных данных полигауссовой моделью.

2.3.2. Оценка моментных характеристик коэффициента преломления при представлении его плотности распределения полигауссовой статистикой

Для вычисления начальных моментов полученной полигауссовой модели коэффициента преломления можно использовать соотношение

$$m_k = \sum_{i=1}^4 P_i m_{k_i}, \quad (2.25)$$

которое для моментов первого $k = 1$ и второго $k = 2$ порядков имеет вид

$$m_1 = m_N = \sum_{i=1}^4 P_i m_{N_i}, \quad (2.26a)$$

$$M_2 = m_2 - m_1^2 = \sum_{i=1}^4 P_i (\sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^2) - \left(\sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} \right)^2, \quad (2.26б)$$

где m_k , M_k начальный и центральный моменты k -го порядка.

Для центральных моментов третьего $k=3$ и четвертого $k=4$ порядков соотношение имеет вид

$$M_3 = m_3 - 3m_1 m_2 + 2m_1^3, \quad M_4 = m_4 - 4m_3 m_1 + 6m_2 m_1^2 - 3m_1^4. \quad (2.27)$$

Учитывая то, что для гауссовского процесса $M_{3i} = 0$, можно записать соотношение для начального и центрального третьего моментов в i -ом сезоне

$$m_{3i} = 3m_{1i} m_{2i} - 2m_{1i}^3 + M_{3i} = 3m_{1i} \sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^3 = m_{1i} (3\sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^2), \quad (2.28)$$

$$M_3 = m_3 - 3m_1 m_2 + 2m_1^3 = \sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} (3\sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^2) - 3 \sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} \sum_{i=1}^4 P_i (\sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^2) + 2 \left(\sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} \right)^3. \quad (2.29)$$

Для гауссового распределения плотности [134] имеем

$$M_{4i} = 3M_{2i}^2 = 3\sigma_{N_i}^4. \quad (2.30)$$

Тогда начальный четвертый момент можно записать в виде:

$$m_{4i} = 3\sigma_{N_i}^4 + 6m_{1i}^2 \sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^4. \quad (2.31)$$

С учетом (2.17) получим:

$$\begin{aligned} M_{4i} = & \sum_{i=1}^4 P_i (3\sigma_{N_i}^4 + 6m_{1i}^2 \sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^4) - 4 \left(\sum_{i=1}^4 P_i (3\sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^2) m_{1i}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} \right) + \\ & + 6 \left(\sum_{i=1}^4 P_i (\sigma_{N_i}^2 + m_{1i}^2) \right) \left(\sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} \right)^2 - 3 \left(\sum_{i=1}^4 P_i m_{1i} \right)^4. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Для вычисления коэффициентов асимметрии k_a и эксцесса k_e можно использовать соотношение [132]

$$k_a = \frac{M_3}{\sqrt{M_2^3}}, \quad \gamma = k_e = \frac{M_4}{M_2^2} - 3, \quad (2.33)$$

в котором для центральных моментов второго, третьего и четвертого порядка используются соотношения (2.28, 2.29, 2.32).

Полученные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса для полигауссовой аппроксимации можно сопоставить с рассчитанными по экспериментальным данным $\{\hat{m}_N, \hat{M}_{2N}, \hat{k}_{aN}, \hat{k}_{eN}\}$ путем вычисления невязок по моментным характеристикам, которые нужно привести в одинаковой квадратичной мере, т. е. проводить сопоставление в пространстве L_2 :

$$\begin{aligned} \Delta_{m_N} &= (1 - m_N / \hat{m}_N)^2, \quad \Delta_{M_{2N}} = \left| 1 - M_{2N} / \hat{M}_{2N} \right|, \\ \Delta_{k_a} &= \sqrt[3]{(1 - k_{aN} / \hat{k}_{aN})^2}, \quad \Delta_{k_e} = \sqrt{\left| 1 - k_{eN} / \hat{k}_{eN} \right|} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Тогда расстояние в L_2 между теоретической полигауссовой моделью коэффициента преломления и экспериментальными данными определится как

$$\Delta = \frac{\Delta_{m_N} + \Delta_{M_{2N}} + \Delta_{K_{aN}} + \Delta_{k_{eN}}}{4} \quad (2.35)$$

Когда нужно сопоставить несколько аппроксимаций плотности распределения, например j и i , то можно предложить следующий критерий

$$\begin{aligned} \Delta_{m_N}^i &= (1 - m_N^i / \hat{m}_N)^2, \quad \Delta_{M_{2N}}^i = \left| 1 - M_{2N}^i / \hat{M}_{2N} \right|, \quad \Delta_{k_a}^i = \sqrt[3]{(1 - k_{aN}^i / \hat{k}_{aN})^2}, \quad \Delta_{k_e}^i = \sqrt{\left| 1 - k_{eN}^i / \hat{k}_{eN} \right|}, \\ \delta_{M_{2N}}^{ji} &= \frac{\Delta_{M_{2N}}^j}{\Delta_{M_{2N}}^i}, \quad \delta_{k_{aN}}^{ji} = \frac{\Delta_{k_{aN}}^j}{\Delta_{k_{aN}}^i}, \quad \delta^{ji} = \frac{\delta_{m_N}^{ji} + \delta_{M_{2N}}^{ji} + \delta_{k_{aN}}^{ji} + \delta_{k_{eN}}^{ji}}{4}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Для оценки интегральной характеристики качества аппроксимации по моментам нужно провести статистическое усреднение характеристик по ансамблю $\langle \delta^{ji} \rangle$, $\langle \Delta \rangle$. Результаты вычисления моментов, их расхождения с экспериментом и полученные критерии качества при аппроксимации полигауссовой плотностью распределения для ситуаций одинаковой продолжительности сезонов, и разной, полученные при аппроксимации по МНК, приведены в табл. 2.8, 2.9.

Таблица 2.8 – Моменты экспериментальных данных для разных аппроксимаций

Город	Среднее значение			Среднеквадратическое значение			Коэффициент асимметрии			Коэффициент эксцесса		
	Эксперимент	Равновесная	МНК	Эксперимент	Равновесная	МНК	Эксперимент	Равновесная	МНК	Эксперимент	Равновесная	МНК
Мукачево	316,5	315,9	316,8	133,6	129,1	143,3	0,68	0,69	0,70	2,8	3,37	3,1
Яворов	324,1	323,3	324,2	243,4	235,5	260,9	0,78	0,83	0,67	3,2	3,3	3,0
Дунайцы	319,3	318,4	319,1	264,6	255,1	267,6	0,77	0,91	0,80	2,9	3,3	3,1
Винница	313,2	313,2	313,0	230,3	229,7	233,8	0,92	0,94	0,93	3,4	3,7	0,7
Киев	315,4	315,4	315,1	196,7	165,9	200,0	0,94	0,95	0,93	3,7	4,2	4,2
Чернигов	317,4	317,3	317,2	190,8	190,2	206,4	0,94	0,97	0,90	3,6	4,1	3,9
Лубны	315,1	315,1	315,1	156,9	156,4	165,4	0,96	0,96	0,97	4,0	4,5	4,4
Кировоград	316,7	316,7	317,0	216,8	216,1	241,4	0,95	1,04	1,06	3,6	4,5	4,2
Запорожье	320,5	320,4	320,5	225,1	224,3	233,6	1,16	1,10	1,18	4,6	5,1	5,1
Харьков	313,5	313,5	313,1	167,9	167,2	184,8	1,03	0,74	0,85	4,6	5,1	5,2
Луганск	319,1	319,1	318,8	182,9	182,4	188,8	1,09	0,90	0,96	4,6	4,7	4,8
Измаил	325,1	325,1	325,8	248,0	247,5	279,0	1,00	1,07	1,04	3,6	4,2	3,9
Одесса	328,1	328,0	328,2	312,1	311,4	331,3	0,96	0,85	0,85	3,5	3,5	3,4
Евпатория	331,2	330,1	330,9	348,3	342,8	359,4	0,93	0,87	0,82	3,6	3,6	3,4
Севастополь	336,3	334,8	336,3	461,7	458,5	489,0	0,80	0,83	0,74	2,9	3,2	2,9
Феодосия	330,3	330,2	330,4	325,6	325,1	346,4	0,84	0,74	0,75	3,3	3,2	3,1

Таблица 2.9 – Критерии качества экспериментальных данных для разных аппроксимаций.

Город	Критерий качества			Город	Критерий качества		
	Эксперимент	Равновесная	МНК		Эксперимент	Равновесная	МНК
Мукачево	0,13	0,11	1,20	Запорожье	0,12	0,11	1,43
Яворов	0,09	0,15	4,10	Харьков	0,19	0,19	0,36
Дунайцы	0,19	0,10	4,45	Луганск	0,13	0,12	0,34
Винница	0,09	0,24	0,33	Измаил	0,14	0,12	0,55
Киев	0,14	0,10	2,79	Одесса	0,09	0,13	0,42
Чернигов	0,11	0,11	0,52	Евпатория	0,06	0,12	4,80
Лубны	0,08	0,10	1,02	Севастополь	0,10	0,08	∞
Кировоград	0,18	0,19	0,48	Феодосия	0,08	0,13	0,27

Анализ приведенных данных по моментным характеристикам, полученным экспериментально и в ходе проведения аппроксимации полигауссовыми распределениями с равномерными для всех сезонов вероятностями и вероятностями, минимизирующими дисперсию погрешности аппроксимации, показывает, что они достаточно близки.

2.3.3. Аппроксимация плотности распределения коэффициента преломления функциями Кравченко – Рвачева

В отличие от математических моделей, которые используют для описания плотности распределения коэффициента преломления полигауссово представление, реальные его значения финитны. Это является предпосылкой применения атомарной функции (АФ) $ur(x)$ [133–137]. Она является финитной дифференцируемой функцией, имеющей колоколообразный вид, такой, что её производная может быть представлена, в свою очередь, из двух колоколообразных функций, каждая из которых представляет собой сдвинутую и сжатую копию исходной функции с точностью до масштабного коэффициента. Обобщением $ur(x)$ являются АФ Кравченко – Рвачева [133, 135, 136]. В настоящее время АФ находят широкое применение в теории аппроксимации, численном анализе, цифровой обработке сигналов, вейвлет-анализе и других областях [139, 140]. Функция $ur(x)$ является чётной. Она возрастает на отрезке $[-1,0]$, убывает на отрезке $[0,1]$ и ограничивает единичную площадь. Кроме того, $ur(1-x) = 1-ur(x)$ при $x \in [0,1]$.

Хорошие аппроксимационные свойства функции $ur(x)$ основаны на том факте, что с помощью линейной комбинации сдвигов-сжатий $ur(x)$ можно представить алгебраический многочлен любой степени [133]. Поэтому представляет интерес выяснение возможности использования уникальных свойств функции Кравченко – Рвачева [133, 136–138] для описания плотности распределения коэффициента преломления внутри каждого из сезонов года. Функция $ur(x)$ может рассматриваться как свертка бесконечного числа прямоугольных импульсов и быть записана через Фурье-преобразование характеристической функции, которую для этого случая можно записать через произведение характеристических функций прямоугольных импульсов $p(\xi_3)$ [133, 137]:

$$\text{up}(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_R \prod_{j=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{t}{2^j}\right) \exp(it\xi) dt. \quad (2.37)$$

На основе атомарной функции $\text{up}(x)$ (2.37) вычислены значения параметров функций Кравченко – Рвачева. В качестве исходных данных для аппроксимации использованы числовые характеристики (среднее значение и среднеквадратичное отклонение) коэффициентов преломления, полученные по экспериментальным данным для каждого из сезонов. На рис. 2.13 показана плотность распределения коэффициента преломления для Полтавы в течение года, а также ее аппроксимация функцией Кравченко – Рвачева (рис. 2.13, А) с таким же средним и среднеквадратичным значением, и функциями Гаусса (рис. 2.13, Б). Дисперсия погрешности аппроксимации при этом имеет значение $1.08 \cdot 10^{-5}$.

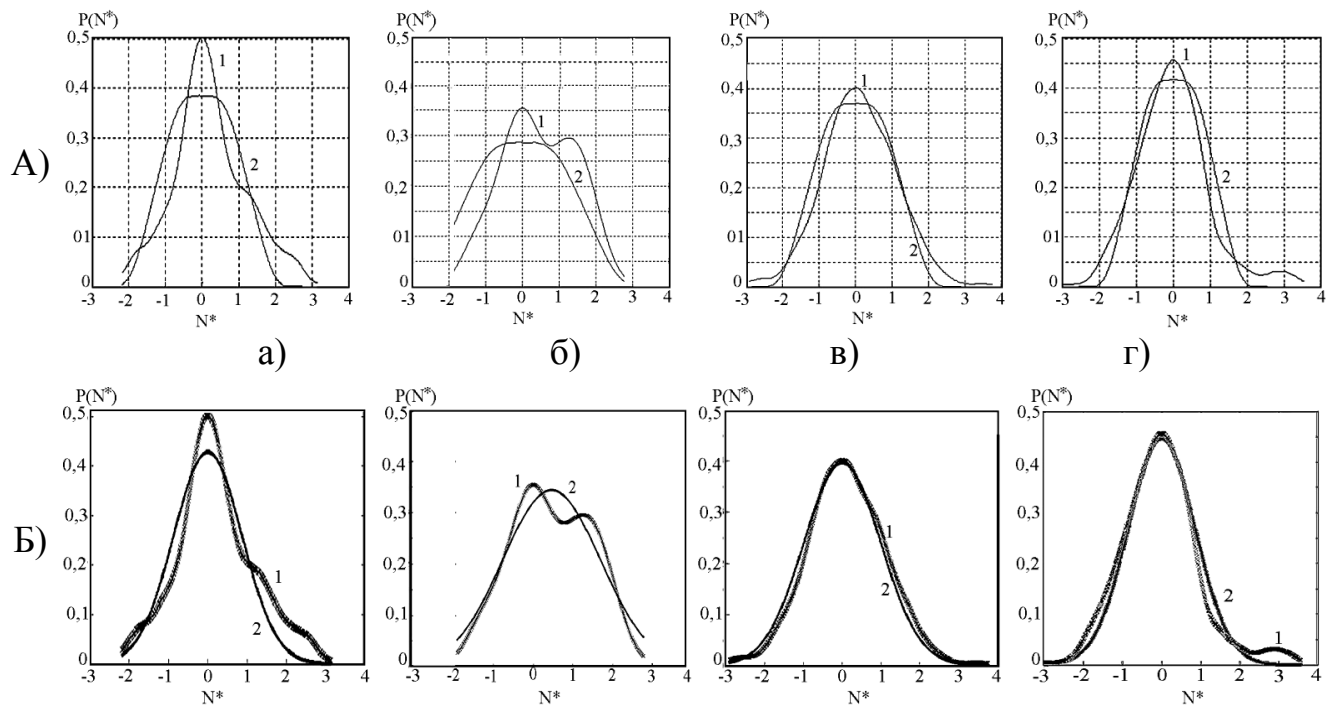


Рисунок 2.13 – Плотность распределения коэффициента преломления для Полтавы, где $N^* = (N - \bar{N}) / \sigma_N$: а) весна, б) лето, в) осень, г) зима (1 – эксперимент; 2 – аппроксимация функцией Кравченко – Рвачева (А) и Гаусса (Б))

Плотности распределения коэффициента преломления тропосферы для каждого из сезонов с 01.03.2010 по 01.03.2011, с 01.03.2011 по 01.03.2012 и за год в целом, а также их аппроксимации функциями Кравченко – Рвачева для г. Харьков и г. Смела приведены на рис. 2.14, А, В, и функциями Гаусса – рис. 2.14, Б, Г. Финальные вероятности для каждого из сезонов брались одинаковыми – 0,25.

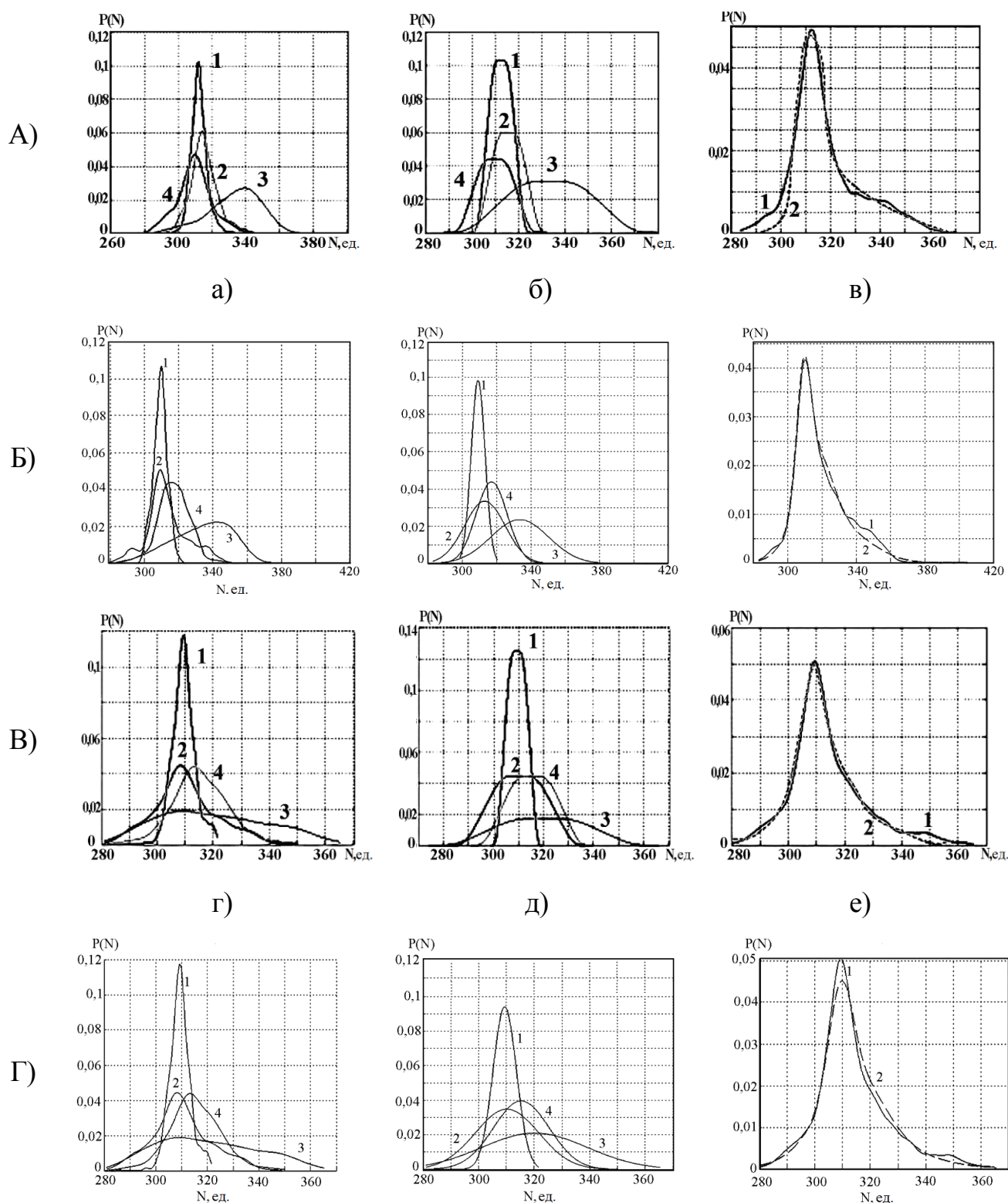


Рисунок 2.14 – Плотности распределения коэффициента преломления и их аппроксимация функциями Кравченко – Рвачева (А, В) и функциями Гаусса (Б, Г): плотности по сезонам а – в – г. Смела; г – е – г. Харьков; 1 – зима, 2 – весна, 3 – лето, 4 – осень; а, г – эксперимент; б, д – аппроксимация; результат – в, е, 1 – эксперимент, 2 – аппроксимация

Статистическая проверка предположения о распределении позволяет «активно» оценить, обеспечивает ли принятая модель достаточно точное описание наблюдаемых данных. Обычно стандартная проверка включает следующие основные этапы [138]:

- На основе полученных данных вычисляется некоторое число, называемое критерием согласия.
- Определяется вероятность получения вычисленного критерия при условии, что модель выбрана правильно. Часто это выполняется путем обращения к таблице процентилей распределения критерия.
- Если вероятность получить вычисленное значение критерия мала, то полагается, что принятая статистическая модель не дает правильного описания данных. Обычно считается «малой» вероятность, начиная с 0.10, 0.05 или даже меньше. Если вероятность вычисленного, не «мала», то данные не дают оснований считать, что принятая модель не подходит.

Следует отметить, что хотя эта методика и позволяет отбросить модель как неправильную, она не позволяет доказать, что модель верная. Результат проверки в значительной мере зависит от количества имеющихся данных: чем данных больше, тем больше шансов отбросить неправильную модель. Много методов требуют точного знания каждого параметра статистической модели.

Одним из наиболее часто употребляемых критериев для проверки допущений о законе распределения есть критерий хи-квадрат, который может использоваться для проверки любого распределения, в том числе нормального и экспоненциального [138]. Проверка допущения с использованием критерия хи-квадрат основана на вычислении функционала

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(M_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (2.38)$$

где M_i число наблюдений в каждом из i интервалов, E_i – математическое ожидание числа наблюдений в каждом из интервалов согласно модели, которая анализируется, k – число дифференциальных карманов по которым распределяются данные. Тогда

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(p_i - \hat{p}_i)^2}{\hat{p}_i}, \quad (2.39)$$

где p_i – экспериментальная плотность распределения, $\hat{p}_i$ – плотность распределения согласно модели.

Таким образом, по этому критерию определяется расхождение между теоретической моделью и экспериментом, которая нормируется на теоретическое значение плотности распределения для этого кармана. При таком подходе желательно выбирать ширину кармана таким образом, чтобы вероятности попадания в них были примерно одинаковыми. Однако это не всегда удается реализовать. Во многих случаях используют одинаковые карманы. При этом используемый критерий для малых уровней вероятностей слабо учитывает малость их величины. Неучет отличий вероятностных распределений от используемых для расчета моделей при малых уровнях вероятностей приводит к существенным погрешностям в оценке рабочих характеристик систем. Необходим такой критерий проверки гипотез о виде экспериментального закона распределения, который позволяет одинаково хорошо оценивать отличия экспериментально полученных распределений от теоретических моделей как при больших, так и малых уровнях значимости.

2.4. Новые подходы к проверке гипотез о законах распределения случайной величины

Пусть имеется экспериментально полученная гистограмма распределения коэффициента преломления и интегральная функция распределения. Необходимо проверить несколько гипотез.

1) Возможность аппроксимации экспериментальных данных совокупностью нескольких нормальных законов распределения (полигауссово представление случайной величины)

$$\hat{p}(N) = \sum_{i=1}^k a_i \varphi_i(N); \hat{F}(N) = \sum_{i=1}^k a_i \Phi_i(N), \quad (2.40)$$

где $\varphi_i(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N_i}} \exp\left(-\frac{(N - m_{N_i})^2}{\sigma_{N_i}^2}\right)$ – локально нормальная плотность распределения коэффициента преломления для i -го фазового состояния (времени года) со средним значением m_{N_i} и среднеквадратичным отклонением σ_{N_i} , а $\Phi_i(N)$ – его интегральное распределение: $\Phi_i(N) = \int_0^N \varphi_i(N) dN$, a_i – коэффициенты аппроксимации, которые определяются методом наименьших квадратов и обеспечивают минимизацию нормы разности между экспериментально полученной плотностью распределения $p(N)$ и аппроксимирующей функцией

$$\hat{p}(N): \frac{\partial}{\partial a_i} \left\| (p(N) - \hat{p}(N))^2 \right\| = 0.$$

Для проверки гипотезы, насколько удачно аппроксимация, основанная на модели, описывает экспериментальные данные, проверяется величина расхождения (норма) между интегральной функцией экспериментальных данных, преобразованной обратной функцией аппроксимирующей модели и линейной функцией. Если $\hat{F}(N) = y$ – аппроксимация интегральной функции распределения, например, коэффициента преломления N , то $\hat{F}^{-1}(y)$ – обратная ей функция. Очевидно, что при точном совпадении аппроксимирующей модели с экспериментом, точки лягут на прямую $y = N$, поскольку

$$\hat{F}^{-1}(y) = \hat{F}^{-1}(F(N)) = N. \quad (2.41)$$

2) Построив зависимость $y = \hat{F}^{-1}(F(N))$ и оценив ее отклонение от прямой $y = N$, можно судить об отличии полученной экспериментально функции распределения от используемой для ее аппроксимации. Этим проверяется гипотеза о возможности ее описания используемой аппроксимирующей моделью $\hat{F}(N)$. Сравнение происходит в пространстве, сформированном путем

отображения экспериментального распределения $F(N)$ функцией, обратной аппроксимирующей функции $\hat{F}^{-1}(F(N))$

$$\delta^2 = \left\| \left(N - \hat{F}^{-1}(F(N)) \right) \right\|^2 = \int_0^{\infty} \left(N - \hat{F}^{-1}(F(N)) \right)^2 dN. \quad (2.42)$$

В качестве примера рассмотрим использование предложенного подхода для аппроксимации экспериментальных данных по коэффициентам преломления тропосферы. Используем следующие модели:

- 1) полигауссову аппроксимацию;
- 2) аппроксимацию набором функций Кравченко – Рвачева.

Сравнение моделей распределения с экспериментальными данными. Для сравнения моделей распределения с экспериментальными данными необходимо рассчитать реальные и аппроксимирующие функции распределения коэффициента преломления. Для каждой вероятности от 0.01 до 0.95 с шагом 0.01 можно получить соответствующие значения коэффициента преломления N (реальные), N^{*1} (для функции Гаусса) и N^{*2} (для функции Кравченко – Рвачева). На рис. 2.15 показаны зависимости N от N^* для Смелы и Полтавы за период с 01.03.2010 по 01.03.2011. Полученные при аппроксимации методом наименьших квадратов дисперсии погрешности аппроксимации функциями Гаусса и Кравченко – Рвачева приведены в табл. 2.10. Финальные вероятности для каждого из сезонов брались одинаковыми – 0.25. Анализ приведенных данных показывает, что для аппроксимации плотности распределения коэффициента преломления тропосферы можно использовать как функции Гаусса, так и Кравченко – Рвачева, но дисперсия погрешности аппроксимации, которая получена при использовании полигауссовой модели несколько ниже, чем при использовании функций Кравченко – Рвачева, хотя летом лучшие результаты дает использование для аппроксимации функций Кравченко – Рвачева. К аналогичным выводам можно прийти, анализируя применимость каждой из этих гипотез с использованием предложенного нами подхода. Качественную картину сравнения иллюстрирует рис. 2.15.

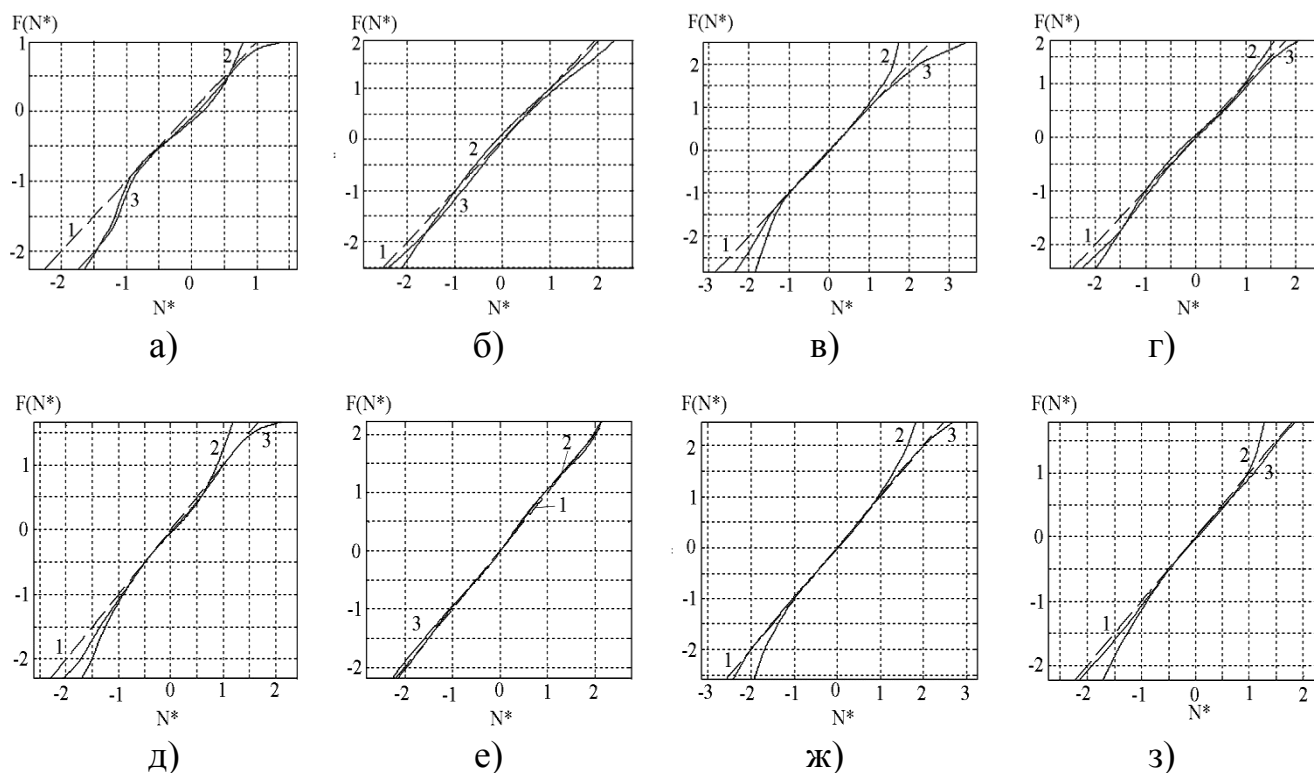


Рисунок 2.15 – Зависимости N от N^* с 01.03.2010 по 01.03.2011 для г. Смела: а – весна, б – лето, в – осень, г – зима; для г. Полтава: д – весна, е – лето, ж – осень, з – зима; (1 – $y = x$, 2 – функции Кравченко – Рвачева, 3 – функции Гаусса)

Таблица 2.10 – Погрешность аппроксимации плотности распределения коэффициента преломления тропосферы набором функций Гаусса или Кравченко – Рвачева

Город	Год	Дисперсия погрешности аппроксимации	
		Гаусс	Кравченко – Рвачева
г. Полтава	2011	9.22e-6	6.28e-5
	2012	9.85e-6	7.69e-5
г. Смела	2011	2.89e-5	9.62e-4
	2012	2.96e-5	8.43e-4
г. Черкасы	2011	2.89e-5	9.19e-4
	2012	3.07e-5	2.94e-4
г. Сумы	2011	2.87e-5	4.43e-4
	2012	3.02e-5	1.38e-4
г. Харьков	2011	2.96e-5	9.72e-4
	2012	3.07e-5	0.44e-4

Количественные оценки дисперсии отклонения экспериментальных данных от линейной зависимости при использовании в качестве обратной функции гауссовой аппроксимации или функции Кравченко – Рвачева приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11 – Дисперсии отклонения функций распределения экспериментальных данных

Город	Год	Дисперсия ошибки							
		Гауссова функция				Функция Кравченко – Рвачева			
		Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима
Смела	2010	0.1223	0.1073	0.1831	0.0609	0.1404	0.0913	0.1156	0.1155
	2011	0.0873	0.1200	0.0343	0.0402	0.1563	0.1551	0.1202	0.1455
Полтава	2010	0.0605	0.0434	0.0323	0.0311	0.1322	0.0284	0.1394	0.1241
	2011	0.0673	0.0987	0.0568	0.0738	0.1546	0.1291	0.1384	0.0613

Как видно, аппроксимации с использованием функций Гаусса и Кравченко – Рвачева дают расхождение с экспериментом на «хвостах» распределений (см. рис. 2.15). Наибольшие различия экспериментальных данных от гауссовой модели наблюдаются летом и в переходные сезоны (весной и осенью). В тоже время при аппроксимации функцией Кравченко – Рвачева наибольшие различия также наблюдаются в переходные сезоны (весной и осенью) и зимой. В случае, если построенная по предлагаемой методике «обращения» функции распределения кривая лежит при больших значениях (в нашем случае – коэффициента преломления) выше прямой, то экспериментальная функция распределения имеет более высокий, чем модель, уровень «хвоста» распределения. Если же она лежит ниже, то экспериментальные данные имеют меньший уровень, чем модель. Из приведенных на рис. 2.15 зависимостей видно, что функции Кравченко – Рвачева имеют почти во всех случаях (за исключением лета) уровень «хвостов» распределения ниже, чем полученные экспериментально. Это означает, что при заданных уровнях значимости коэффициента преломления, полученные по модели его оценки, будут несколько занижены относительно

реальных значений. В тоже время функции Гаусса имеют практически для всех сезонов более высокий уровень хвостов, чем реальные данные.

Для сопоставления качества аппроксимации, получаемого при использовании различных моделей, можно использовать сравнение дисперсий отклонения экспериментальных распределений, преобразованных обратной функцией, проверяемой модели, от линейной зависимости с использованием критерия Фишера [131]. Используя соотношение критерий Фишера и данные табл. 2.11, можно увидеть, что функции Гаусса дают несколько лучшие результаты при аппроксимации коэффициентов преломления осенью. В то же время функции Кравченко – Рвачева в ряде случаев зимой, весной и летом лучше описывают поведение его функции распределения.

Выводы к разделу 2

С целью оценки условий распространения радиосигналов, которые зависят от коэффициента преломления, предложена модель его описания. Проведена морфологическая группировка различных городов, с использованием предварительных оценок корреляции коэффициента преломления, и показаны его характерные сезонные зависимости. Проведены экспериментальные исследования по 10 областям Украины, и показано, что формы плотности распределения для регионов, принадлежащих к разным группам, существенно отличаются, и все они отличны от гауссового закона распределения. Статистики коэффициента преломления тропосферы для каждого из сезонов года могут описываться локально гауссовыми моделями. При этом средние значения и среднеквадратичные отклонения минимальны для зимы и максимальны для лета. Показано, что летом и зимой существует выраженная высотная зависимость для средних значений коэффициента преломления в то время, как для среднеквадратических значений и коэффициента асимметрии она практически отсутствует.

Установлено влияние солнечной активности на моментные характеристики распределений коэффициента преломления в летний период. Показано наличие сильных суточных и сезонных зависимостей коэффициента преломления, обусловленных суточной и сезонной изменчивостью поведения температуры, давления и влажности.

Впервые показана возможность использования для описания нестационарного поведения коэффициента преломления в течение сезона вложенных полумарковских процессов. Впервые предложено использование атомарных функций для описания плотности распределения коэффициента преломления. Показано преимущество использования функций Кравченко – Рвачева для летнего сезона по сравнению с полигауссовой моделью. При этом одна из компонент является дискретной полумарковской цепью, которая описывает изменение фазовых состояний системы, связанное с изменением сезонных характеристик. Вторая – непрерывная и описывает процессы внутри фазового состояния. Предложенный подход позволяет сконструировать статистические модели для широкого класса сигналов и процессов, что учитывает их нестационарность. Впервые рассмотрена возможность использования для описания распределений коэффициента преломления в различные сезоны финитных атомарных функций Кравченко – Рвачева и их комбинаций с гауссовыми функциями.

Предложен новый подход к проверке гипотез о законе распределения случайной величины. Он основан на вычислении отклонения значений экспериментальной функции распределения, преобразованных обратной функцией от используемой для их аппроксимации, относительно линейной. Оценку значимости этого отклонения для разных проверяемых гипотез осуществляют при помощи критерия Фишера. Показано, что функции Кравченко – Рвачева имеют почти во всех случаях (за исключением лета) уровень «хвостов» распределения ниже, чем полученные экспериментально, что говорит о заниженных уровнях значимости коэффициента преломления, полученных по модели его оценки, относительно реальных значений.

РАЗДЕЛ 3

ДИАГНОСТИКА АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПОВЕРХНОСТИ

РАЗДЕЛА НА ОСНОВАНИИ GPS / ГЛОНАСС ИЗМЕРЕНИЙ

На сегодняшний момент вопрос использования спутниковых систем для исследования различных типов поверхности (моря, почвогрунтов, льдов, снежного покрова) и разных состояний атмосферы [141] становится все более актуальным за счет глобальности покрытия и увеличения точностей систем. В предыдущем разделе было изучено поведение приземного значения коэффициента преломления тропосферы на протяжении нескольких сезонов для различных городов Украины и предложена модель его описания. Так как тропосферная задержка является наиболее сложно компенсируемой ошибкой в ГНСС измерениях за счет большого количества факторов влияющих на нее, то возникает необходимость установления взаимосвязи между ГНСС-измерениями и изменениями коэффициента преломления. В данном разделе рассматривается возможность обнаружения зон осадков и изменений пространственного распределения коэффициента преломления тропосферы по навигационной информации, а также использования сигналов ИСЗ для диагностики подстилающей поверхности. Основные результаты раздела опубликованы в работах [142 – 153].

3.1 Обнаружение метеорологических образований на основе ГНСС-измерений

Многие метеорологические явления могут носить опасный характер, поэтому на сегодняшний день вопрос о диагностике атмосферы является весьма актуальным. Эффективность работы радиолокационной техники существенно зависит от свойств среды, в которой распространяются электромагнитные волны. Свойства среды принято описывать с помощью пространственно-временных

зависимостей радиофизических характеристик. На работу РЛС, расположенных вблизи поверхности Земли, наибольшее влияние оказывают радиофизические характеристики тропосферы и подстилающей поверхности, которые связаны с метеорологическими условиями и синоптической обстановкой. Таким образом, реальные условия распространения электромагнитных волн радиодиапазона определяются составом и состоянием атмосферных газов, гидрометеообразований, мелко- и крупномасштабных неоднородностей.

В связи с развитием радиолокационной техники, а соответственно и повышением требований к качеству РЛС, с усложнением решаемых с их помощью задач возрастает и число факторов, которые должны учитываться при проектировании. Как следствие, в настоящее время при решении задач радиолокации приходится учитывать все более тонкие явления, сопровождающие распространение радиоволн в тропосфере.

Трассы распространения радиолокационных сигналов большинства РЛС различного назначения находятся в тропосфере. Ее радиофизические свойства характеризуются коэффициентом преломления n , связанным с диэлектрической проницаемостью тропосферы. Наличие газов и водяных паров приводит к поглощению энергии радиоволн сантиметрового, миллиметрового и более короткого диапазонов, рассеянию и, в конечном счете, к ослаблению их при распространении даже в «чистой» тропосфере.

В реальных же условиях в тропосфере всегда присутствуют включения из жидких и твердых частиц в виде облаков, осадков, туманов – гидрометеообразований или гидрометеоров, а также в виде пыли и т. п. Указанные включения, особенно гидрометеообразования, вызывая поглощение и рассеяние радиоволн рассматриваемых диапазонов, могут существенно влиять на работу РЛС различного назначения.

Возможны различные подходы к классификации гидрометеообразований, однако при решении поставленной задачи, сводящейся фактически к задаче исследования распространения радиоволн в статистически неоднородной среде, целесообразной является классификация, основанная на группировании

гидрометеообразований по размерам и физическим свойствам образующих их частиц с учетом приемлемости гипотезы о сферичности частиц. К опасным метеорологическим образованиям можно отнести [154] сильный дождь, ливень, сильный снегопад, сильные пылевые (песчаные) бури, большой град.

Для мониторинга таких метеорологических явлений обычно используются средства авиационно-космического наблюдения в различных диапазонах длин волн, что весьма затратно. Представляет интерес использование для этого существующих систем, например, спутниковых систем глобальной навигации. Физической предпосылкой к использованию излучений навигационных ИСЗ является зависимость измеряемых псевдодальностей, т. е. электрической длины пути принимаемых от спутников сигналов, от диэлектрических характеристик среды распространения.

3.1.1 Особенности поведения сигналов ГНСС при наличии на трассе метеообразований

Как известно, для решения навигационной задачи необходимо знание значений псевдодальности минимум до 4 спутников. На практике же количество видимых спутников, каждый из которых просвечивает толщу атмосферы под различными азимутальными углами и углами места, значительно больше. Тропосферная рефракция и наличие неоднородностей тропосферы, например, в виде насыщенных влагой облаков, будут приводить к увеличению значения псевдодальности до навигационного спутника и появлению ошибок измерения координат. Удлинение электрического пути электромагнитной волны, которая распространяется через атмосферу, будет определяться диэлектрической проницаемостью среды, которая, в первую очередь, зависит от запаса влаги.

Для льда действительная и мнимая часть коэффициента преломления практически не зависят от длины волны (в сантиметровом диапазоне). Погонное затухание льда определяется соотношением [155]:

$$\gamma = \frac{3\pi}{\lambda\rho} c_1 W, \quad (3.1)$$

где λ – длина волны;

ρ – плотность;

$c = \text{const}$;

W – водность.

Кроме того, удлинение электрической длины пути приводит к появлению дополнительного фазового набегу волны, распространяющейся через осадки. Таким образом, наличие влаги в метеорологическом явлении, которое просвечивается сигналом ИСЗ, влияет на амплитуду и фазовое запаздывание.

В случае дождя геометрические характеристики его зон зависят от интенсивности и климатических условий в районе выпадения [156, 157]. Отметим, что дожди в зоне их выпадения распределены неравномерно, особенно дожди с интенсивностью 40 мм/ч и более.

В [155] показано, что зависимость коэффициента ослабления от интенсивности дождя при больших ее значениях имеет почти линейный характер. Изменение псевдодальности Δr за счет прохождения электромагнитной волны через зону с повышенным влагозапасом W протяженностью Δl_0 составит $\Delta r = \delta r \Delta l_0$, причем при малых углах протяженность зоны будет примерно соответствовать ее горизонтальным размерам, которые составляют для дождей около 5 км. Можно записать выражение [153] для оценки максимального прироста псевдодальности $\max \Delta r$ до ИСЗ за счет наличия осадков на трассе распространения:

$$\max \Delta r [\text{м}] = 10^{-3} l_0 W_{\max} [\text{г/м}^3] (n' - 1) \quad (3.2)$$

где $W_{\max}$ – максимальная водность осадков;

$$l_0 = \begin{cases} h_y / \sin \beta \leq h_x \\ h_x \end{cases} \quad \text{– длина пути радиоволны в осадках;}$$

$\{h_x, h_y\}$ – мощность облачности в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
 β – угол места ИСЗ.

Используя данные по коэффициентам преломления, связь водности W с интенсивностью осадков I , а также зависимость максимального количества осадков от их средней интенсивности, оценен ожидаемый прирост псевдодальности от интенсивности осадков и угла места ИСЗ (рис. 3.1) [150].

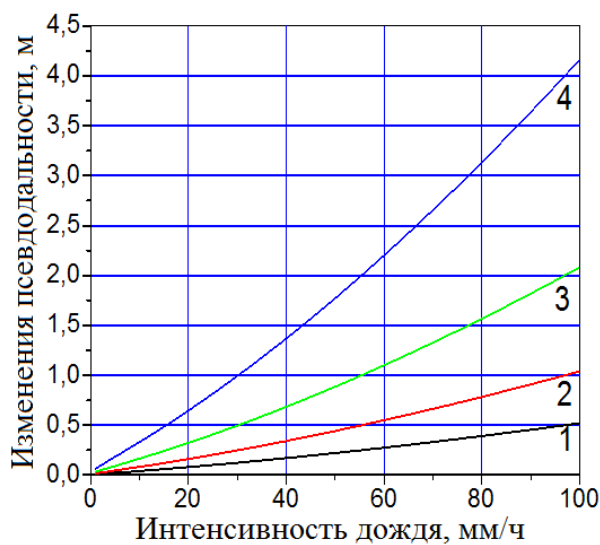


Рисунок 3.1 – Зависимость прироста псевдодальности от интенсивности осадков и размера их зоны: 1 – $l_0=5$ км, 2 – $l_0=10$ км, 3 – $l_0=20$ км, 4 – $l_0=40$ км

Поскольку чувствительность к наличию облачности увеличивается при малых углах места из-за роста длины пути в осадках, то измерялась псевдодальность ИСЗ при их радиозаходах и радиовосходах. На рис. 3.2 приведено среднеквадратичное изменение флуктуаций псевдодальности до ИСЗ системы GPS, полученное путем устранения с измеренной псевдодальности тренда, связанного с перемещением спутника. Для устранения трендовых изменений псевдодальности до спутника от измеренной псевдодальности отнималось предыдущее значение, определялась невязка между полученными значениями и их линейной аппроксимацией, которые после возведения в квадрат сглаживались в скользящем окне с шириной 4...8 отсчетов. Видно, что при наличии мощных кучевых облаков и зон дождя увеличивается среднее значение флуктуаций псевдодальности.

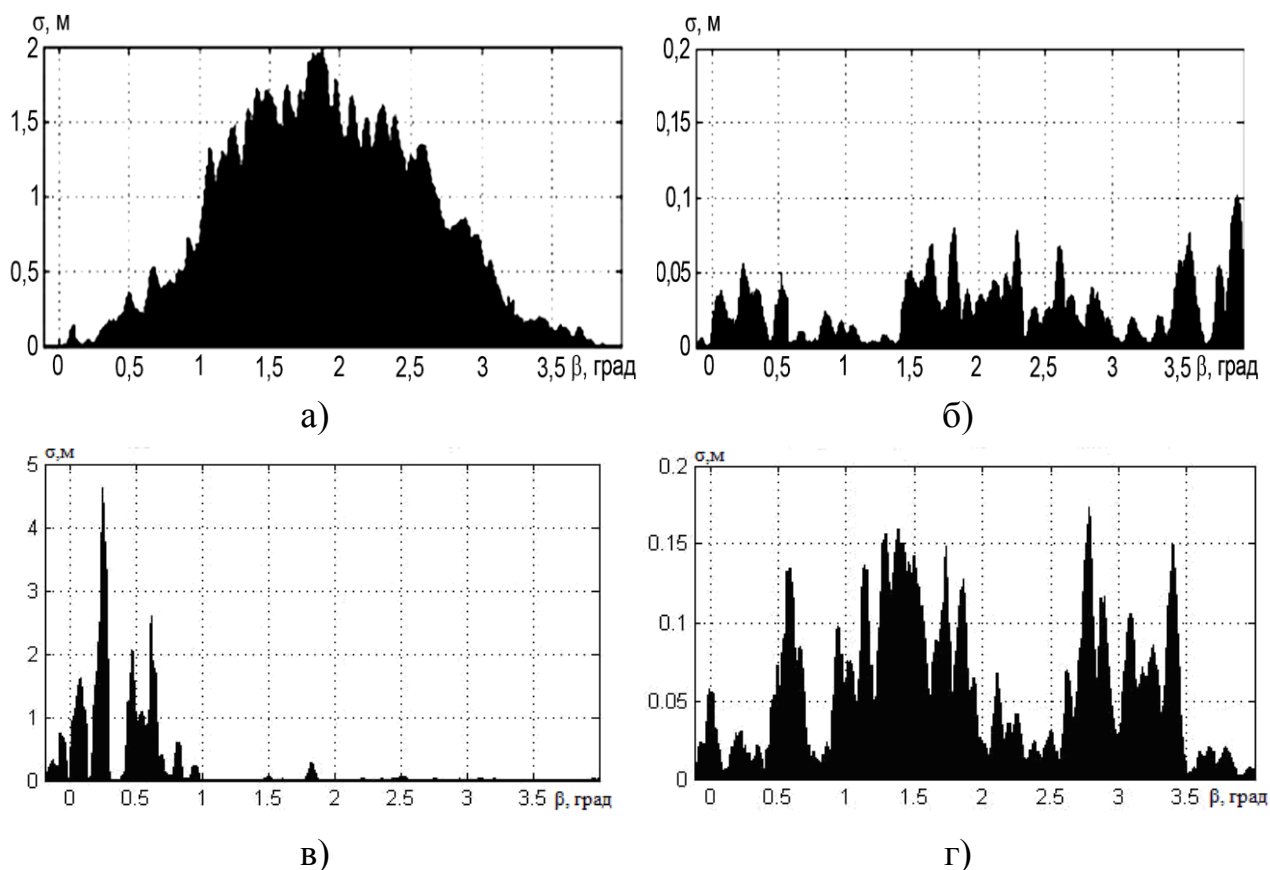


Рисунок 3.2 – Среднее значение флуктуаций псевдодальности от угла наблюдения спутника: а) слоисто-кучевые облака 6 баллов, нижняя кромка основного яруса 1000-1500 м, влажность 66 %; б) ясная погода, 0 баллов, влажность 89 %; в) гроза с осадками, облачность 7 - 8 баллов, высота основного яруса 2000 – 2500 м, влажность 74 %; г) облачность 6 баллов, высота основного яруса 100 - 1500 м, влажность 57 %

Увеличение высоты расположения облаков также сказывается на углах, под которыми наблюдаются наибольшие флуктуации псевдодальности.

На рис. 3.3 показаны приращения псевдодальностей, полученные в дни, когда наблюдались осадки и при их отсутствии. Для вычисления поправки псевдодальности необходима информация о времени решения (т. е. время за которое измерены псевдодальности к спутнику) t_i , быстрые «бортовые» эфемериды спутников, измеренные i -е псевдодальности по j -му КА (R_{ij}), положение точки установки опорной антенны ($X_{\text{оп}}, Y_{\text{оп}}, Z_{\text{оп}}$). Время решения t_i определяется сразу по одномерному решению. Системы ГЛОНАСС и GPS один раз в час обновляют бортовые эфемериды, информация по ним присутствует в кадре навигационного сообщения. Таким образом, принимая бортовые

эфемериды, рассчитываются координаты j -ого спутника на моменты времени t_i ($X_{\text{KAij}}, Y_{\text{KAij}}, Z_{\text{KAij}}$), а затем псевдодальности в момент времени t_i относительно точки установки опорной антенны. Далее рассчитываются поправки к псевдодальностям на момент времени t_i для j -го спутника $\delta_{ij} = R_{ij} - D_{ij}$, путем их вычитания из измеренных псевдодальностей. Так как координатная информация рассчитывается на основании измеренных псевдодальностей до всех видимых спутников, то при распространении через зону осадков увеличение псевдодальности приводит к уменьшению измеренной высоты. Погрешность измерения высоты из-за распространения радиоволн сквозь зону осадков может маскировать суточное изменение метеорологических параметров. При этом сравниваются высоты, полученные с использованием измерений одних и тех же спутников в одно и то же время.

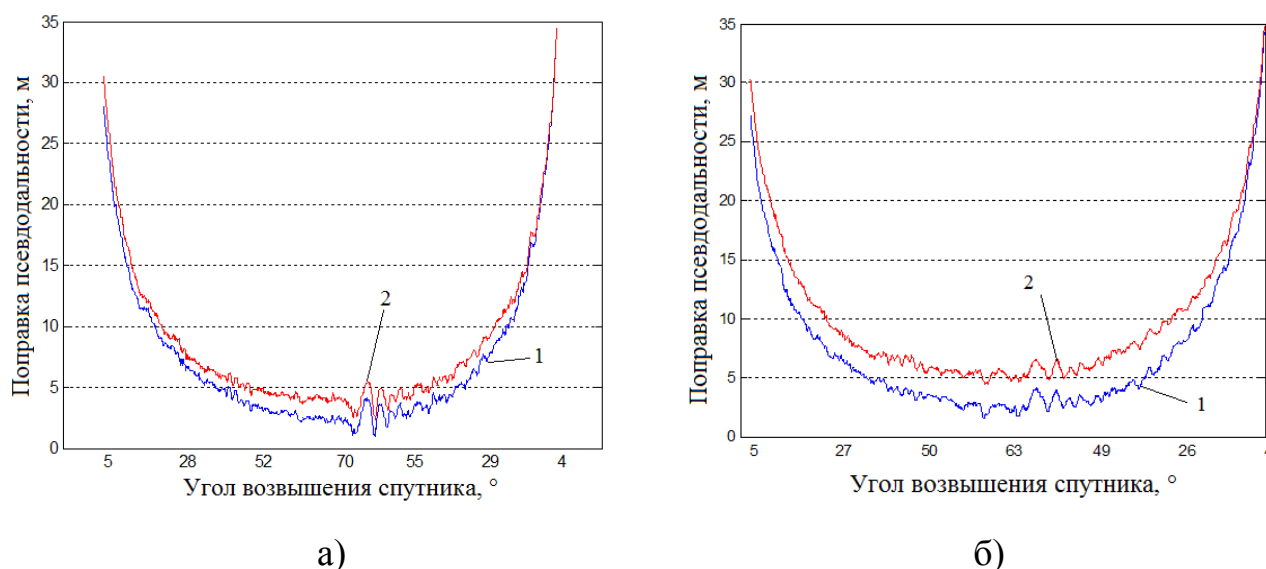


Рисунок 3.3 – Приращение псевдодальностей при осадках (2) и без них (1) (г. Харьков): а) GPS 6: 1 – 2012.05.04 - 2012.05.05; 2 – 2012.05.05 - 2012.05.06; б) GPS 3: 1 – 2012.05.06 - 2012.05.07; 2 – 2012.05.05 - 2012.05.06

На рис. 3.4 показаны суточные изменения приземного значения коэффициента преломления (рис. 3.4, а) и относительной влажности (рис. 3.4, б) при ливне и его отсутствии, а на рис. 3.5 – изменение измеренной высоты, долготы и широты при прохождении дождя. Из рис. 3.4 видно, что наличие дождя приводит к постепенному возрастанию значения индекса коэффициента преломления, пока ливень не переходит в состояние грозы. При этом видно, что с увеличением коэффициента преломления возрастает разница между измеряемыми высотами.

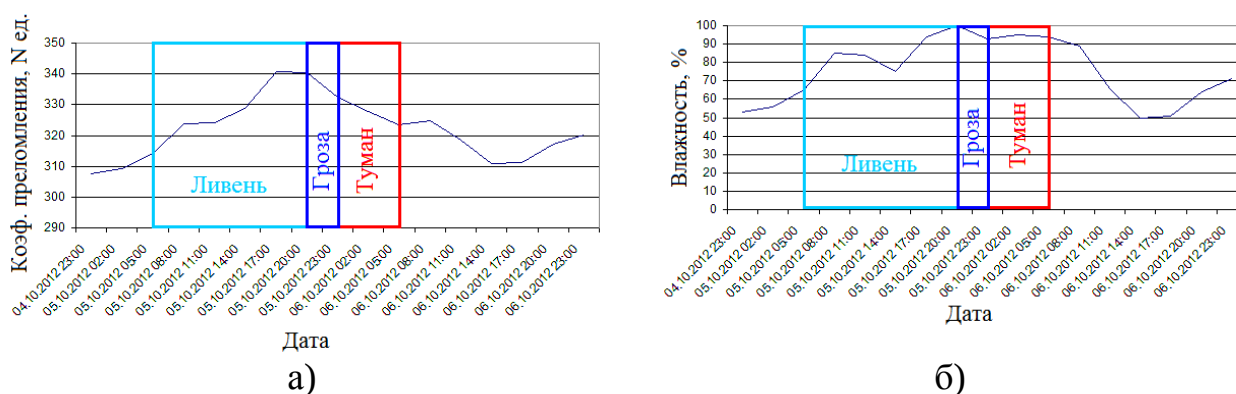


Рисунок 3.4 – Изменение коэффициента преломления (а) и влажности (б)

2012.10.05 – 2012.10.06

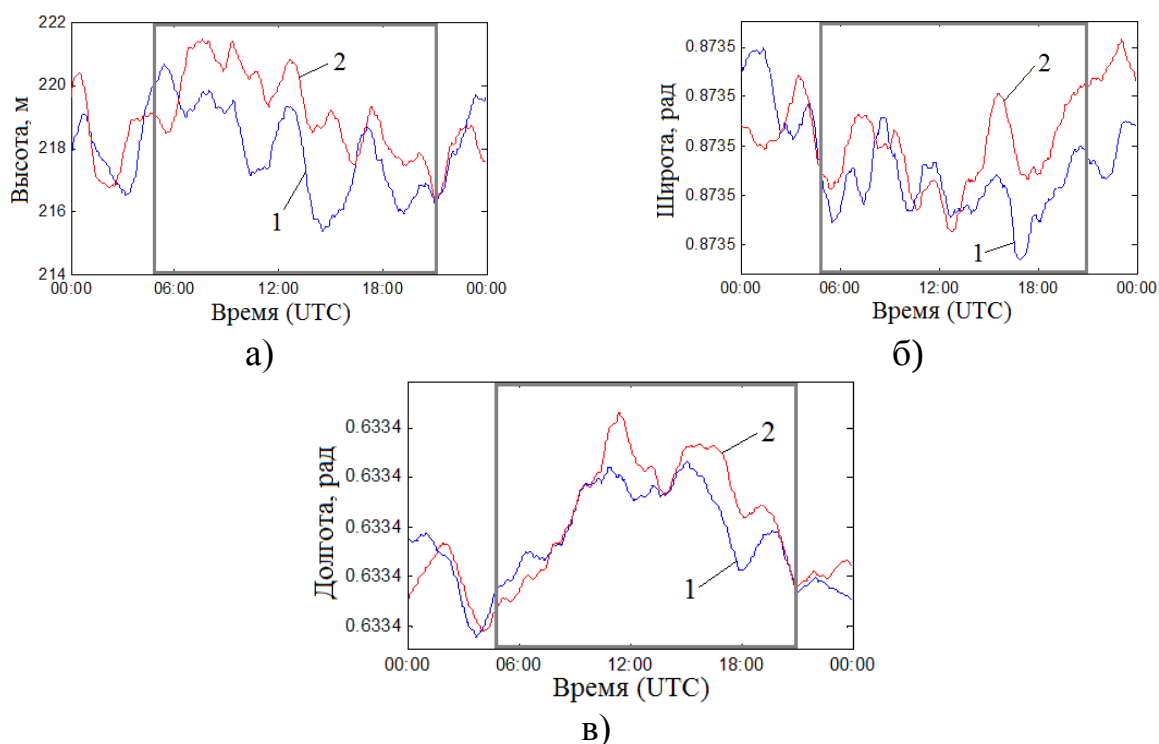
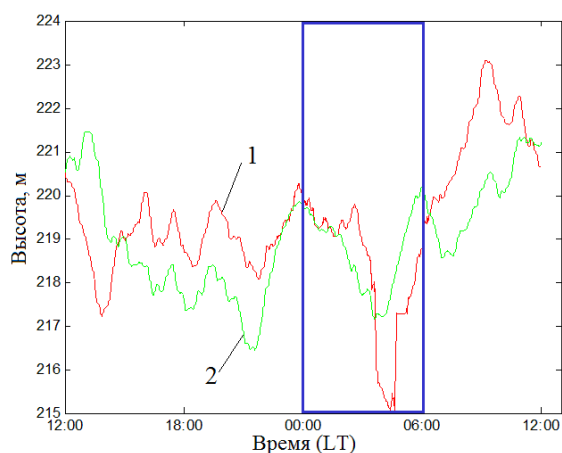


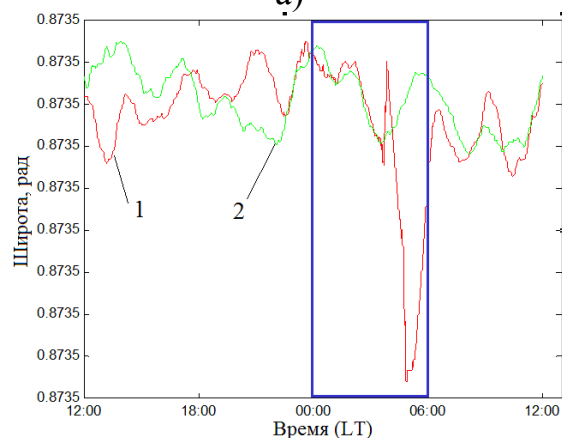
Рисунок 3.5 – Изменение измеренных значений координат 2012.10.05-06 за счет выпадения осадков (1 – при наличии осадков, 2 – ясная погода): а) высота; б) широта, в) долгота

Проведенные исследования показывают, что максимальное возрастание задержки наблюдается при грозовых ливнях. Туман, несмотря на высокую влажность воздуха, дает значительно меньший вклад в увеличение задержки и может сопровождаться снижением коэффициента преломления тропосферы.

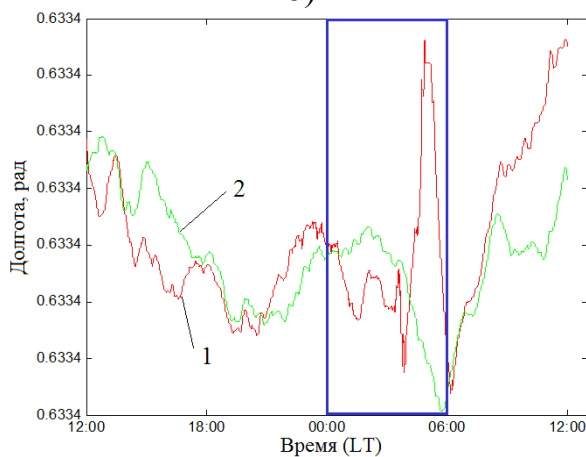
Отметим, что при интенсивных осадках наблюдается снижение уровня сигналов принимаемых спутников. Для примера приведены изменения координат (рис. 3.6) и их флуктуаций (рис. 3.7), рассчитанных как разница между «сырыми» данными и сглаженными в оконном фильтре.



а)

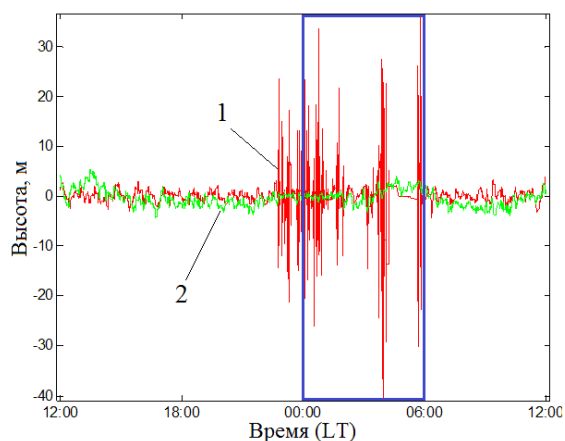


б)

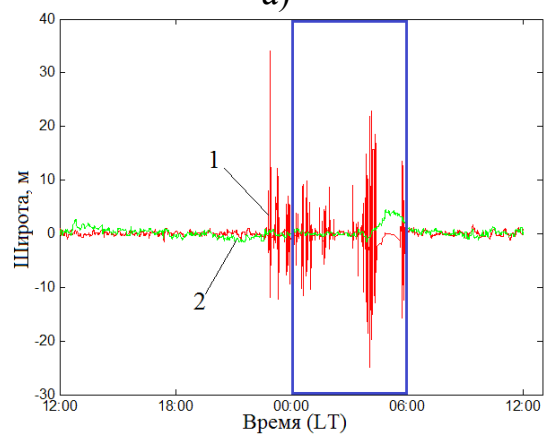


в)

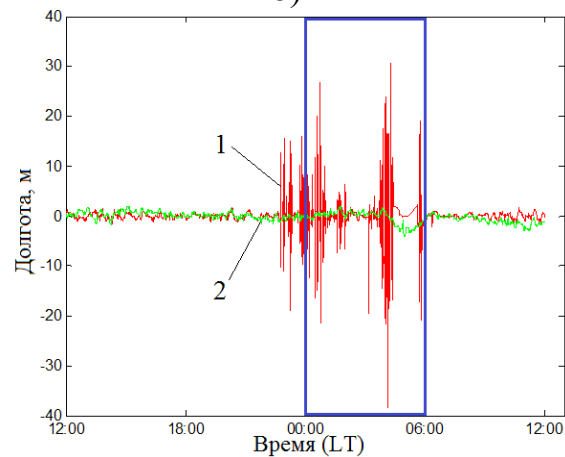
Рисунок 3.6 – Трендовая компонента координат во время дождя и при его отсутствии: 1 – 20-21.07.2015 – грозовой ливень, 2 – 21-22.07.2015 – нормальная погода: а) высота, б) широта, в) долгота



а)



б)



в)

Рисунок 3.7 – Флуктуационная компонента координат во время дождя и при его отсутствии при существенном снижении уровня сигнала от спутников GPS: 1 – 20-21.07.2015 – грозовой ливень, 2 – 21-22.07.2015 – нормальная погода: а) высота, б) широта, в) долгота

Анализировалось 2 дня, в один из которых в 00:00 по местному времени был ливневый дождь. Видно, что флуктуационная компонента координат в отличии от трендовой реагирует на появление осадков с самого начала наблюдения метеоявления. В трендовой составляющей выразительный перепад координат отмечается ближе к окончанию дождя. Таким образом, можно сделать вывод, что для обнаружения зон выпадения осадков, существует необходимость использовать не только сравнение изменений псевдодальностей и координат, а также поведение уровня сигналов, принимаемых от спутников (см. разд. 4).

3.1.2 Анализ пространственного изменения коэффициента преломления по данным GPS

Ранее было показано, что изменения измеряемой высоты при помощи приемников ГНСС коррелируют с изменениями приземного значения коэффициента преломления. Логично предположить, что существует связь между коэффициентом преломления тропосферы и поведением плоскостных координат. Для выявления подобной связи было выбрано 10 городов вокруг г. Харьков с шагом около 40° , в котором проводилось накопление навигационной информации (рис. 3.8).

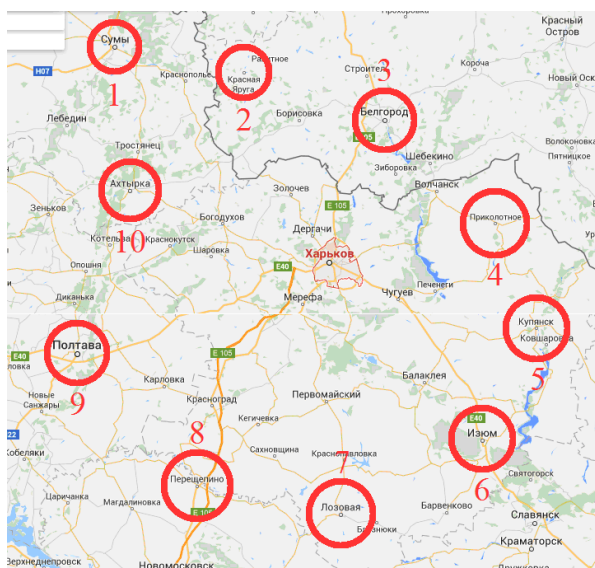


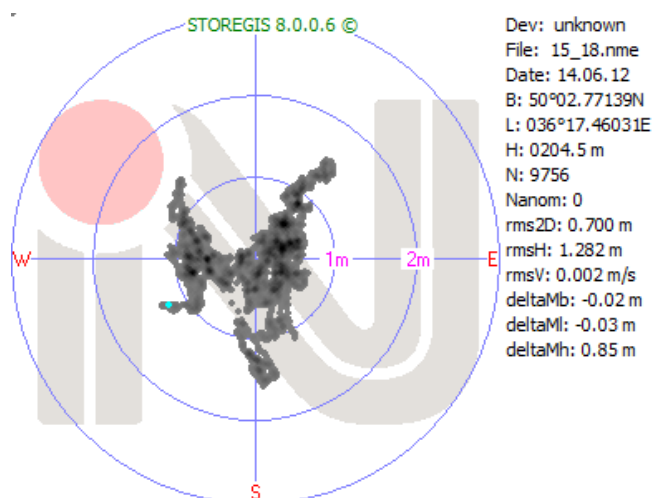
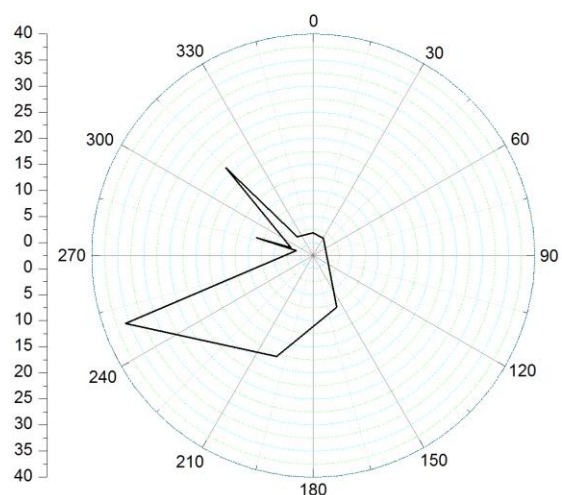
Рисунок 3.8 – Расположение городов для оценки коэффициента преломления: 1 – Сумы, 2 – Красная Яруга, 3 – Белгород, 4 – Приколотное, 5 – Купянск, 6 – Изюм, 7 – Лозовая, 8 – Пережечи́но, 9 – Полтава, 10 – Ахтырка

В исследуемых городах оценивались приземные коэффициенты преломления тропосферы, на основании данных метеостанций о влажности, давлении и температуре, которые измерялись с 3 часовым интервалом.

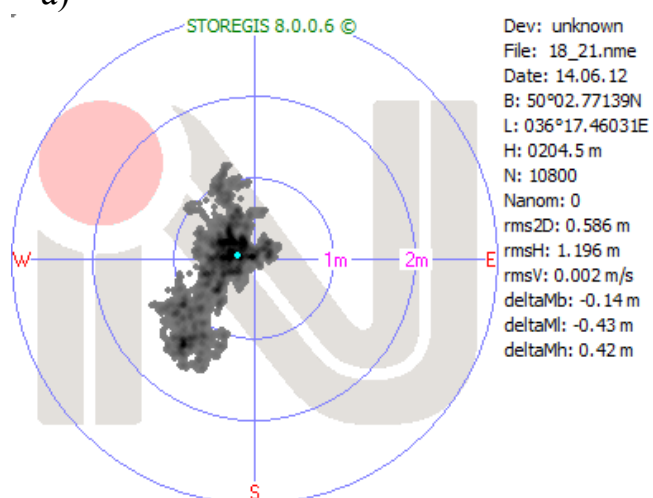
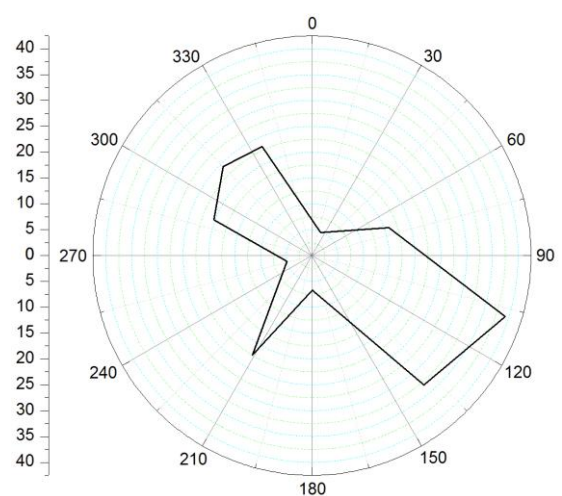
Полученные навигационные данные измерялись с частотой 1 Гц и представляют собой накопления на 3-х часовых интервалах времени между измерениями коэффициента преломления. Таким образом, для анализа использовались данные об изменениях коэффициента преломления между соседними измерениями и сопоставлялись с полученными мишенями координат.

В случае, если происходило уменьшение значения коэффициента преломления для какого-то из городов за период наблюдения, то полученное значение бралось по модулю и азимутальный угол в направлении города менялся на 180° . Для анализа были выбраны несколько дней в летний период, когда могли наблюдаться флуктуации плоскостных координат на протяжении суток. На рис. 3.9 показано изменение плоскостных координат и коэффициента преломления в полярных координатах.

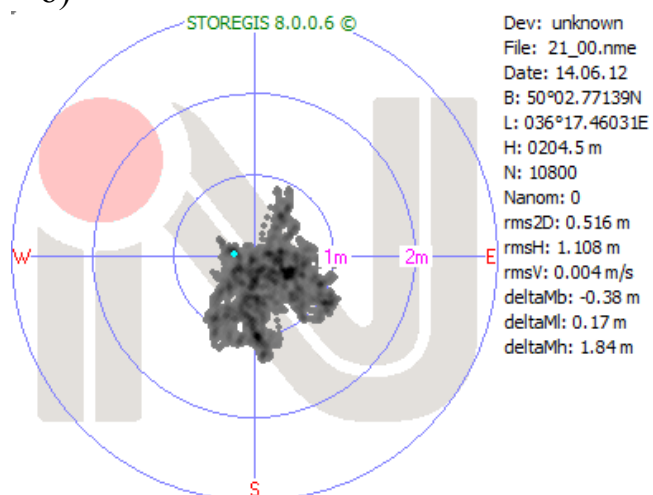
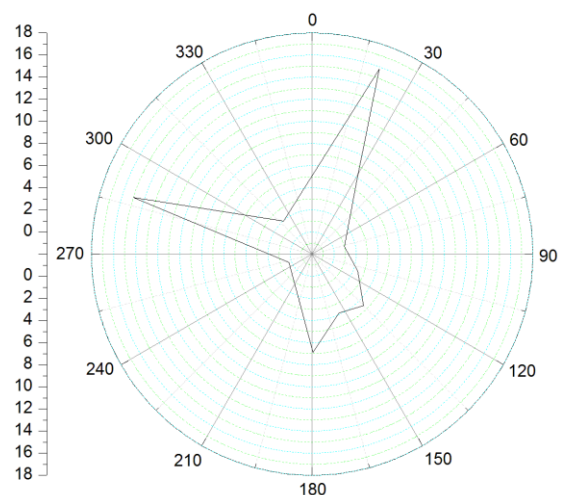
Видно, что поведение плоскостных координат во многих случаях обратно поведению коэффициента преломления, что отмечалось ранее в предыдущем подразделе. При увеличении значения коэффициента преломления в определенном направлении, как правило, происходит смещение измеряемых координат в противоположную сторону. Таким образом, на основании смещения плоскостных координат относительно реального местоположения, за счет неравномерного воздействия тропосферы для различных направлений, можно проводить качественную оценку пространственного изменения коэффициента преломления. Поскольку при дождях происходит возрастание коэффициента преломления, то данные об изменениях плоскостных координат могут использоваться для грубого анализа направления на зону выпадения осадков.



a)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Изменение коэффициента преломления (слева) и плоскостных координат (справа) 14.06.2012 на 3-х часовых интервалах: а) 15:00 – 18:00; б) 18:00 – 21:00; в) 21:00 – 00:00

3.2 Модель функции отображения тропосферной задержки

На данный момент существует большое количество высокоточных приемников спутниковых навигационных сигналов различных систем. Однако доминирующим фактором, который может вносить значительные ошибки при измерении местоположения объекта, является пространственно-временная неоднородность распределения электромагнитных волн в атмосфере и в частности в тропосфере. Наиболее удобным и достоверным способом учета тропосферной ошибки при расчете координат пользователя псевдодальномерным методом является использование тропосферной модели. Как следствие, возникла необходимость анализа ограничений существующих математических моделей тропосферы и предложения новой модели, которая учитывает региональные особенности поведения коэффициента преломления. На сегодняшний день устранение ионосферной задержки реализуется за счет использования двухчастотных режимов работы приемников. Однако в отличие от ионосферы, которая является частотно-зависимой средой, в тропосфере подобный подход не реализуем, поэтому компенсация тропосферной задержки оказывается значительно сложнее, так как ее состояние в приземной части зависит от большого количества факторов.

Для описания параметров тропосферы существует целый ряд математических моделей, по которым производится расчет поправок: модель Saastamoinen [158], Hopfield [159], MOPS [160] и т. д. Основной недостаток данных моделей состоит в том, что они основаны на глобальном распределении метеорологических параметров и не учитывают их региональные отклонения.

Как отмечалось в разделе 1, рефракция радиоволн в атмосфере определяется не абсолютным значением коэффициента преломления, а скоростью его изменения с высотой, то есть вертикальным градиентом коэффициента преломления. В нижних слоях пространственно-временные изменения коэффициента преломления с высотой возникают в большей степени за счет соответствующих изменений температуры и влажности воздуха.

3.2.1 Модель функции отображения

Влияние тропосферы на задержку сигнала, который распространяется от ГНСС к пользователю, учитывается с использованием модели зенитной тропосферной задержки, причем отдельно для гидростатической и влажной компонент задержек. Далее полученные результаты пересчитываются в наклонные задержки с использованием функций отображения (см. раздел 1).

Предложенные на сегодняшний день функции отображения являются эмпирическими, слабо учитывающими физические особенности трасс распространения, поэтому целесообразно предложить такую функцию отображения, которая была бы обусловлена физической моделью среды распространения и позволяла бы учитывать ее рефракционные свойства. Предложенная функция отображения должна зависеть от значения градиента коэффициента преломления, т. е. учитывать разные рефракционные ситуации от сферической Земли (при $g_N = 0$) до «плоской» Земли при критической рефракции ($g_N = -0,157 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м). Одной из общепринятых моделей учета рефракционных свойств тропосферы в допущении ее сферически-слоистой структуры является эквивалентный радиус Земли [161]. Учет влияния атмосферной рефракции при линейной зависимости показателя преломления N от высоты проводится с помощью введения эквивалентного радиуса Земли a_e .

Значение эквивалентного радиуса Земли определяется условием сохранения относительной кривизны между радиолучем и поверхностью Земли в действующих и эквивалентных условиях распространения радиоволны:

$$a_e = \frac{a}{1 + a \cdot g_N}, \quad (3.3)$$

где $a = 6371$ (км) – радиус Земли.

При нормальной рефракции, когда $g_N = -0,04 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м, эквивалентный радиус Земли принимает значение $a_e = 8549,841$ км.

Будем считать, что рефракция учитывается введением эквивалентного

радиуса Земли. Распространение радиоволн происходит в сферически-слоистой тропосфере с эффективной толщиной $h_э$, при этом толщину тропосферы будем считать зависящей от широты и сезона [162]. Схематическое изображение задачи показано на рис. 3.10.

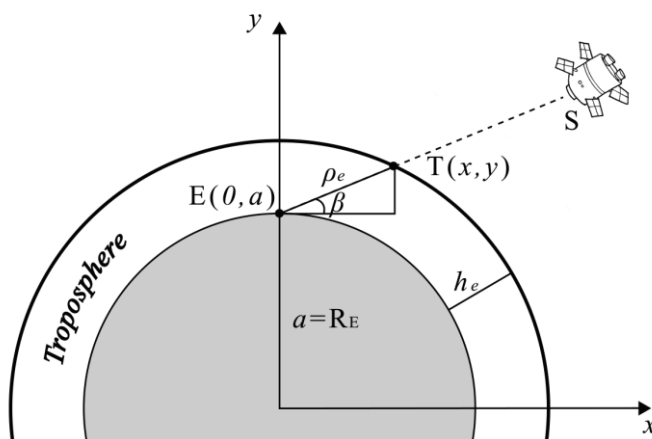


Рисунок 3.10 – Распространение сигнала в тропосфере

В зависимости от угла возвышения спутника (точка S) будет изменяться наклонная дальность пути распространения сигнала в тропосфере (ET). Записывая уравнение для точки T, которая лежит на верхней границе тропосферы (в рамках рассмотренной модели сферически-слоистой тропосферы) через уравнения окружности:

$$x^2 + y^2 = (a_э + h_э)^2 \quad (3.4 \text{ а})$$

и уравнение луча ET:

$$y = a_э + x \operatorname{tg} \beta, \quad (3.4 \text{ б})$$

получаем систему уравнений, которая позволяет изучать значения наклонной дальности распространения луча в тропосфере ρ :

$$\rho = \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{2h_э}{a_э} + \frac{h_э^2}{a_э^2} \right)} \right) a_э \sin \beta \quad (3.5)$$

где x, y – координаты в плоскости приема;

$a_э$ – эквивалентный радиус Земли;

$h_э$ – толщина слоя тропосферы.

Из соотношения (3.5) видно, что при угле возвышения спутника $\beta \rightarrow 90^\circ$ тропосферная задержка определяется эффективной толщиной слоя тропосферы $\rho \rightarrow h_s$ причем при любых a_s в том числе и при $a_s \rightarrow \infty$, когда градиент коэффициента преломления становится критическим, то есть $g_N \rightarrow -0.157 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м. При малых углах возвышения ($\beta \rightarrow 0^\circ$) тропосферная задержка $\rho \rightarrow \sqrt{2h_s a_s + h_s^2} \approx \sqrt{2h_s a_s}$, т. е. равна дальности прямой видимости. При критической рефракции, когда $g_N \rightarrow -0.157 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м, Земля становится «плоской» и $a_s \rightarrow \infty$, а тропосферная задержка приобретает вид $\rho \approx \sin \beta \rightarrow \infty$.

Предлагаемая функция отображения имеет вид:

$$m_e = \frac{\rho_s}{h_s} = \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{2h_s}{a_s} + \frac{h_s^2}{a_s^2} \right)} \right) \frac{a_s}{h_s} \sin \beta. \quad (3.6)$$

Это означает, что если сравнивать ее со стандартной функцией отображения, полученной для модели «плоской» Земли, для которой $m = (\sin \beta)^{-1}$, то при зенитных углах $\beta \rightarrow 90^\circ$, обе функции отображения дают одинаковые значения $\delta = \frac{m_e}{m} \approx 1$ при любых градиентах преломления (рис. 3.11). Наиболее сильные отличия функций отображения начинаются при малых углах возвышения спутника ($\beta \rightarrow 0^\circ$) при рефракции, отличной от критической, когда Земля сферическая, а не плоская.

Для сопоставления предложенной модели с известными рассчитывалась зависимость $\delta = \frac{m_e(\beta)}{m(\beta)}$ для разных высот тропосферы (в полярных широтах, средних и тропических), а также при различных градиентах коэффициента преломления g_N (рис. 3.11).

$$m(\beta) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + (\sin \beta)^2}}. \quad (3.7)$$

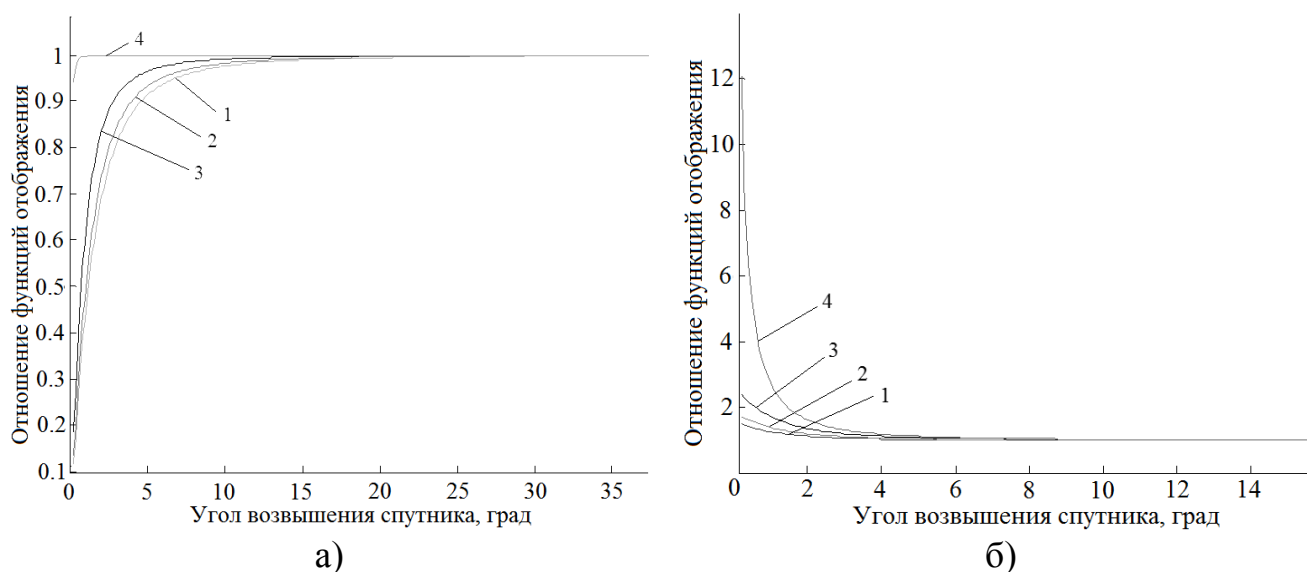


Рисунок 3.11 – Зависимость δ для различных градиентов коэффициента преломления g_N (1 – $g_N = 0$; 2 – $g_N = -0,04 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м; 3 – $g_N = -0,1 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м; 4 – $g_N = -0,1568 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м): а) модель $1/\sin \beta$, б) модель Black&Eisner [163]

Из приведенных рисунков видно, что наблюдаются существенные отличия предложенной функции от функции $1/\sin \beta$ при нормальной рефракции начинаются с 15° , а для функции Black&Eisner с 5° . На 3° функция $1/\sin \beta$ дает значения в 2 раза превышающие реальные тропосферные задержки. На рис. 3.12 для примера представлено поведение сравниваемых функций отображения, при этом для предлагаемой функции отображения $g_N = -0,06 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м.

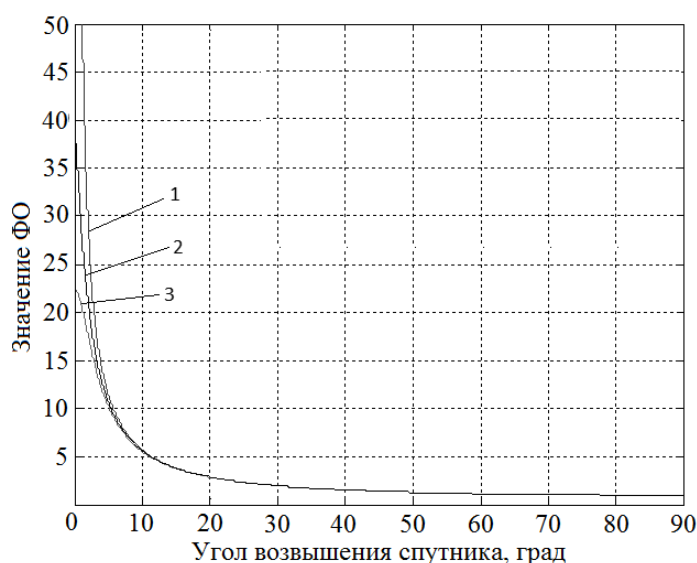


Рисунок 3.12 – Угловая зависимость функций отображения: 1 – $1/\sin(\beta)$, 2 – предложенная ФО, 3 – ФО Black&Eisner

Для апробации предложенной функции отображения и сравнения характера ее поведения с реальными задержками, которые возникают в тропосфере, проводились параметрическая аппроксимация экспериментальных данных и подбор градиента коэффициента преломления для h_z , который рассчитывался из следующего соотношения:

- высота тропосферы в зависимости от широты:

$$h_{\varphi} = h_{90} + (h_0 - h_{90}) \cdot \cos^2 \varphi; \quad (3.8 \text{ а})$$

- сезонная зависимость толщины тропосферы:

$$h_{\varphi}(n) = h_{\varphi} + \Delta h(1 + \cos 2\pi \frac{n-173}{365,25}), \quad (3.8 \text{ б})$$

где $\Delta h = 1$ км;

h_{90} – высота слоя тропосферы в полярных широтах;

h_0 – высота слоя тропосферы в тропических широтах;

φ – широта места наблюдения;

n – номер дня в году.

Данные соотношения получены путем гармонической аппроксимации значений высоты в тропосфере от полярных широт до экватора и учитывают сезонную изменчивость эффективной толщи тропосферы – летом она больше, чем зимой. Они, вместе с выражением (3.6), позволяют оценить тропосферную задержку, а также поведение функции отображения в зависимости от географического положения и рефракционных свойств тропосферы.

Экспериментальные данные, которые используются для сравнения с теоретическими расчетами, получены при помощи специально развернутых в 4 городах Украины (г. Харьков, г. Сумы, г. Смела, г. Полтава) измерительных пунктов, описанных в приложении А.1. Используемые совместно с приемниками антенны позволяли принимать сигналы даже при небольших отрицательных углах наблюдения GNSS-спутников. По полученным данным производился расчет поправок псевдодальностей, метод вычисления которых был описан ранее [109]. Сравнение предложенной функции отображения проводилось с наиболее используемой в реальных измерениях функцией Black&Eisner (рис. 3.13).

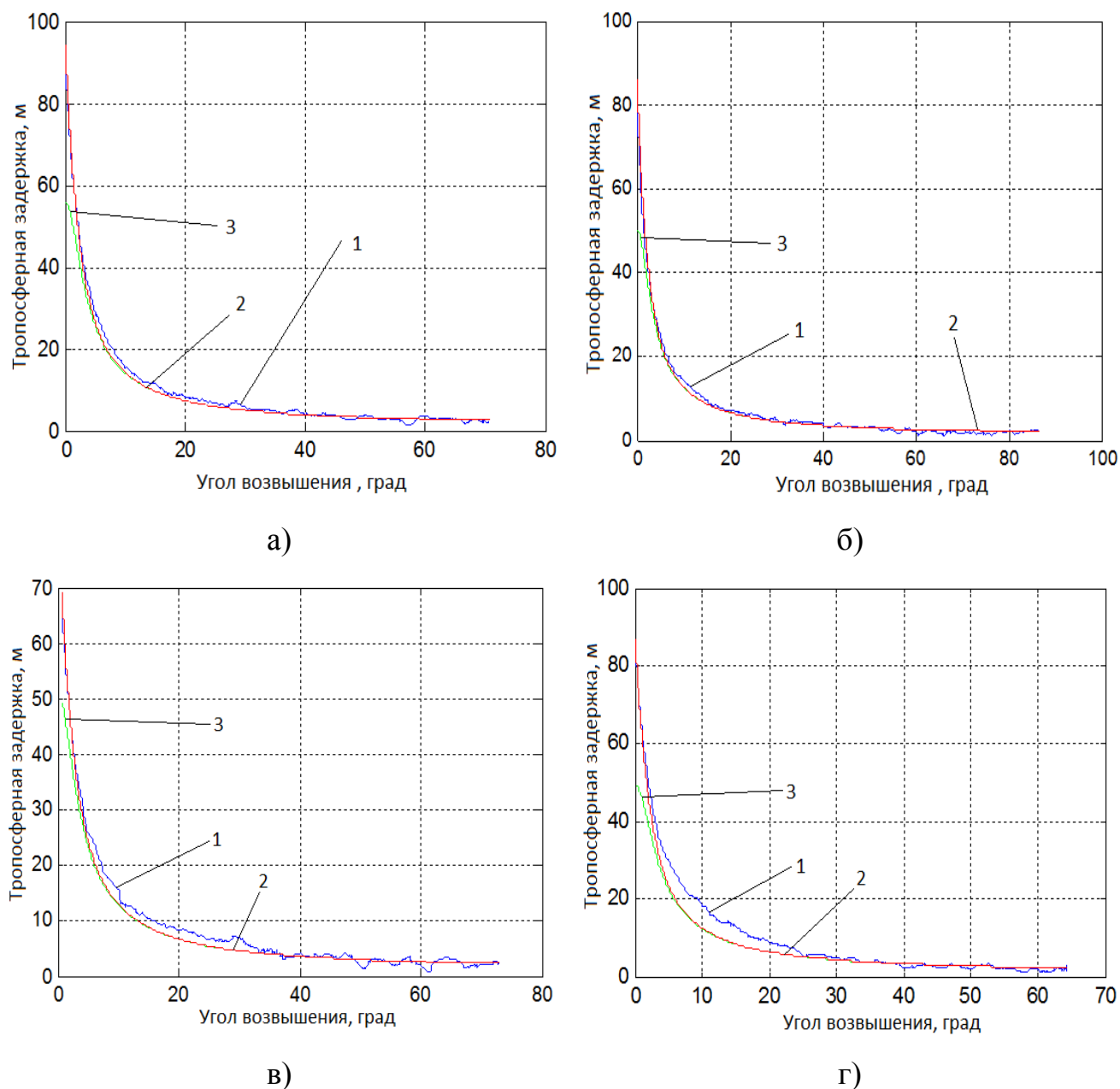


Рисунок 3.13 – Сравнение экспериментальных данных (1) с предложенной функцией отображения (2) и функцией отображения Black&Eisner (3):
а) 2012.07.06 20:19:21 – 2012.07.06 23:19:14 ($N = 337.5 - 340$ N ед.);
б) 2012.02.26 15:02:27 – 2012.02.26 18:32:54 ($N = 306$ N ед.);
в) 2012.04.30 16:59:15 – 2012.04.30 19:34:00 ($N = 314.5 - 313.5$ N ед.);
г) 2012.03.27 03:33:21 – 2012.03.27 06:29:51 ($N = 307 - 306$ N ед.)

На рис. 3.14 представлены отклонения предложенной функции отображения и модели Black&Eisner от реальных данных.

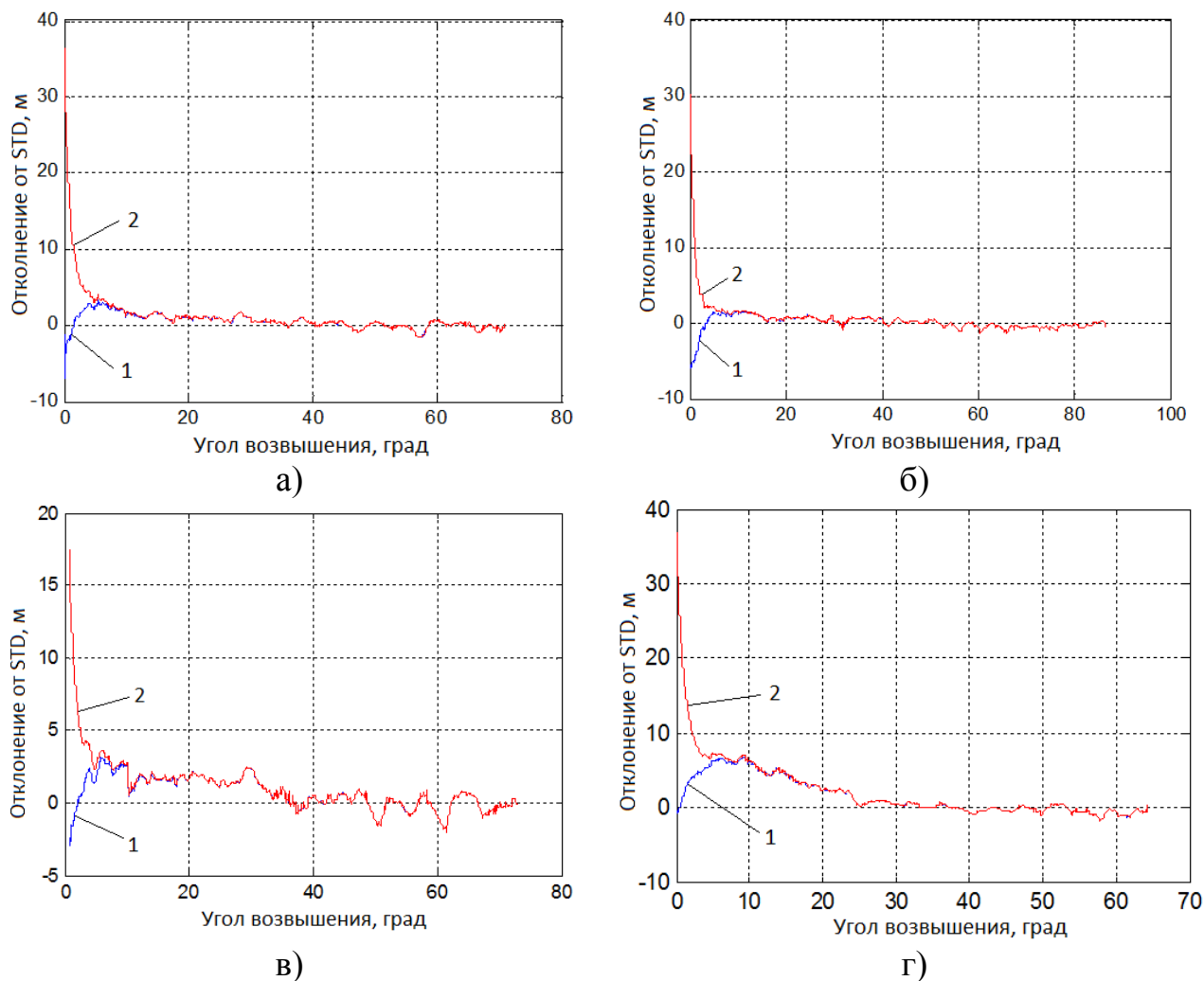


Рисунок 3.14 – Отклонения экспериментальных данных от теоретически рассчитанных функций отображения (1 – предложенная функция отображения, 2 – функция отображения Black&Eisner): а) 2012.07.06 20:19 – 2012.07.06 23:19; б) 2012.02.26 15:42 – 2012.02.26 18:32; в) 2012.04.30 16:59 – 2012.04.30 19:34; г) 2012.03.27 3:33 – 2012.03.27 6:29

Ошибка синхронизации часов аппаратуры спутника и пользователя устранялась при решении навигационной задачи. Таким образом, полученные поправки псевдодальности представляют собой аддитивную смесь тропосферной и ионосферной задержки. Для анализа использовались приращение псевдодальности с учтенной ионосферной задержкой, которые сравнивались с теоретически рассчитанным по моделям значениями функции отображения для

весеннего и летнего периода, когда флуктуации коэффициента преломления значительно изменялись от минимальных до максимальных значений соответственно. Из полученных результатов видно, что в отличие от эмпирической модели Black&Eisner, предложенная модель функции отображения позволяет точнее описать поведение наклонной тропосферной задержки на малых углах (ниже 5°). Поведение обеих функций схоже до 5° возвышения спутника, которые обычно и используются для решения навигационной задачи.

3.2.2 Решение обратной задачи по нахождению градиента коэффициента преломления тропосферы

Используя тот факт, что на малых углах возвышения тропосферная задержка становится чувствительна к изменениям рефракционных свойств среды распространения, появляется возможность решения обратной задачи. Для этого, проводился подбор градиента при помощи нахождения соответствующего ему минимального отклонения от реальных тропосферных задержек, полученных путем вычитания из приращений псевдодальностей дополнительных ошибок, возникающих при распространении от навигационных спутников (НС). Для сравнения выбирался участок функции, соответствующий значениям углов до 25° градусов, так как на низких углах увеличивается толщина слоя, через который проходит сигнал от НС. Значения градиента коэффициента преломления полученные при помощи предлагаемой функции отображения сравнивались с значениями, полученными из эмпирического соотношения, связывающего индекс коэффициента преломления и его градиент. В работе [109] было показано, что примерно с половины октября по начала апреля рефракционные свойства тропосферы близки к стандартным (коэффициент преломления имеет величину около 310 N ед. , а его градиент $-0,04 \cdot 10^{-6} \text{ N ед./м}$). Однако с апреля по первую половину октября, особенно в летние месяцы, наблюдается возрастание как коэффициента преломления до 355 N ед. , так и его градиента до

$-0,06 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м. Для оценки значений градиента по измеренным у поверхности земли значениям коэффициента преломления использовалось эмпирическое соотношение [109]:

$$g_N = 0.084 - 3.97N \cdot 10^{-4} \text{ [Н ед./м]}. \quad (3.9)$$

Исходя из этого соотношения, были получены значения градиента коэффициента преломления на основе метеорологических данных, предоставляемых раз в 3 часа. Сравнения градиентов преломления рассчитанных по метеорологическим данным и полученных по модели проводились как в зимние, так и в летние периоды. На рис. 3.15 представлены результаты, полученные при сравнении реальных и прогнозируемых по модели тропосферных задержек.

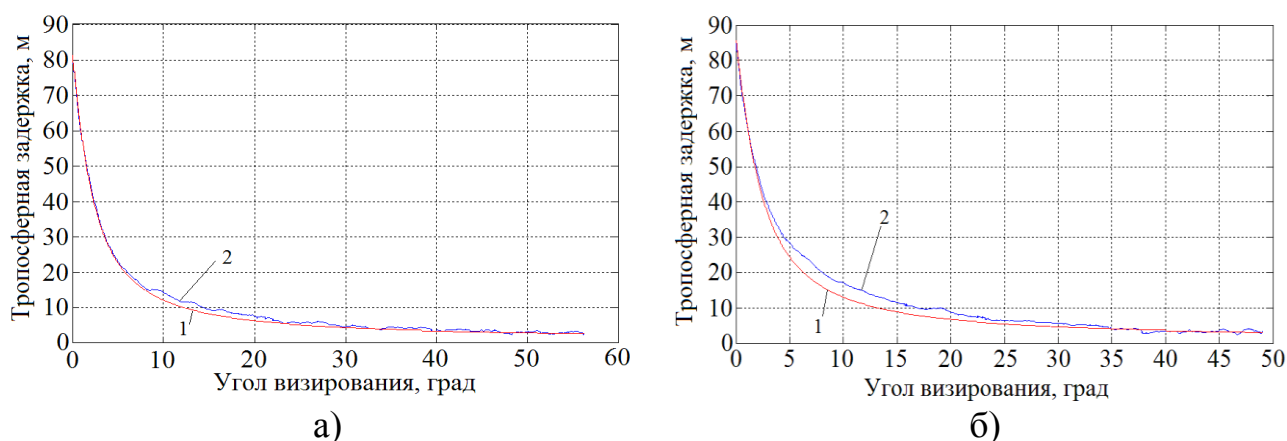


Рисунок 3.15 – Смоделированные (1) и реальные (2) тропосферные задержки: а) 27.01.2013 GPS02 $g_N = -0.038 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м (рассчитанное по метеорологическим параметрам), полученное оптимальное по модели $g_N = -0.04 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м; б) 06.06.2012 GPS02 $g_N = -0.051 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м (рассчитанное по метеорологическим параметрам), полученное оптимальное по модели $g_N = -0.0504 \cdot 10^{-6}$ Н ед./м

Из полученных результатов видно, что рассчитанные по эмпирической формуле и предлагаемой модели данные о градиенте коэффициента преломления довольно хорошо согласуются. Таким образом, имея данные по коэффициенту преломлению и его градиенту под разными азимутальными углами можно воссоздавать структуру среды распространения на основе данных полученных в навигационных сообщениях. Результаты расчетов представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Оценка g_N по формуле и предложенной модели

Дата	Индекс коэффициента преломления, (N ед.)	g_N рассчитанное по формуле (3.10) (N ед./м)	g_N рассчитанное по модели (N ед./м)
2012.07.06	321	– 0,0458	– 0,0466
2012.06.06	340	– 0,051	– 0,0504
2013.01.27	309	– 0,038	– 0,04
2014.01.29	311	– 0,039	– 0,0396
2014.01.30	311,5	– 0,0391	– 0,0392
2014.03.07	307	– 0,0371	– 0,0372
2014.03.08	305	– 0,0361	– 0,0356

3.3 Влияние Солнца на атмосферу

Изучение влияния Солнца на атмосферу Земли проводится довольно давно. Однако если влияние Солнца на ионосферу Земли изучено довольно хорошо, то взаимодействие с нижней атмосферой остается не достаточно изученным. В данном подразделе анализируется влияние Солнца на сигналы ГНСС, а также поведение тропосферы при изменении солнечной активности [171].

3.3.1 Влияние солнечной активности на тропосферу

Большинство существующих на данный момент исследований в основном были направлены на изучение поведения ионосферы, свойства которой напрямую зависят от влияния Солнца. Для этого использовались оптические методы, методы частичных отражений, вертикального зондирования, некогерентного рассеяния, спутниковые методы и т. д. При рассмотрении влияния солнечного излучения на тропосферу считается, что космическое излучение влияет на процесс формирования облачности путем возможного создания ядер конденсации в воздухе. То есть уровень ионизирующего излучения влияет на

количество аэрозолей в атмосфере, которые играют роль при образовании облаков. Таким образом, считается, что 11-ти и 22-х летние циклы солнечной активности изменяют уровень облачности на 3 – 4 % [165].

По оценкам, изменение солнечной постоянной на 1 % приводит к изменениям температуры воздуха приблизительно на 0.6°C . В рамках эмпирической модели [166] оценка вклада солнечной активности в наблюдаемые изменения температуры воздуха в XX ст. составляет 60 – 70 %.

В работах [166 – 168] была предложена физическая модель влияния солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли. Ключевая концепция модели – влияние гелиогеофизических возмущений на параметры земной климатической системы [166 – 168]. Основным агентом солнечной активности, оказывающим влияние на погодно-климатические характеристики тропосферы, являются параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, которые определяют геомагнитную активность и влияют на изменения электрического поля высокоширотной атмосферы. При росте уровня солнечной активности происходит уменьшение радиационного выхолаживания высокоширотных областей, рост температуры нижней и средней тропосферы, перестройка термобарического поля, уменьшение среднего меридианного градиента температуры между полярными и экваториальными областями, которые определяют меридиональный перенос тепла [168]. Важно то, что фазовый переход водяного пара и выделение скрытого тепла в соответствии с рассматриваемым механизмом, приводит лишь к незначительному повышению температуры в областях формирования облачности.

Исследовано влияние солнечной активности на коэффициент преломления приземного слоя. Для его оценок использовались многолетние данные штатных метеостанций по температуре, давлению и влажности для г. Сумы и г. Полтава.

При рассмотрении трендовых изменений солнечной активности и приземного коэффициента преломления тропосферы можно отметить схожий характер поведения. Для примера на рис. 3.16 приведены данные о солнечной

активности, начиная с 2008 года, когда начался новый 11-летний солнечный цикл [169, 170]. Изменение солнечной активности представлено числом Вольфа. Основная кривая представляет собой сглаженные значения, предсказанные для всего 24-го солнечного цикла, а пунктирные кривые – среднеквадратическое отклонение.

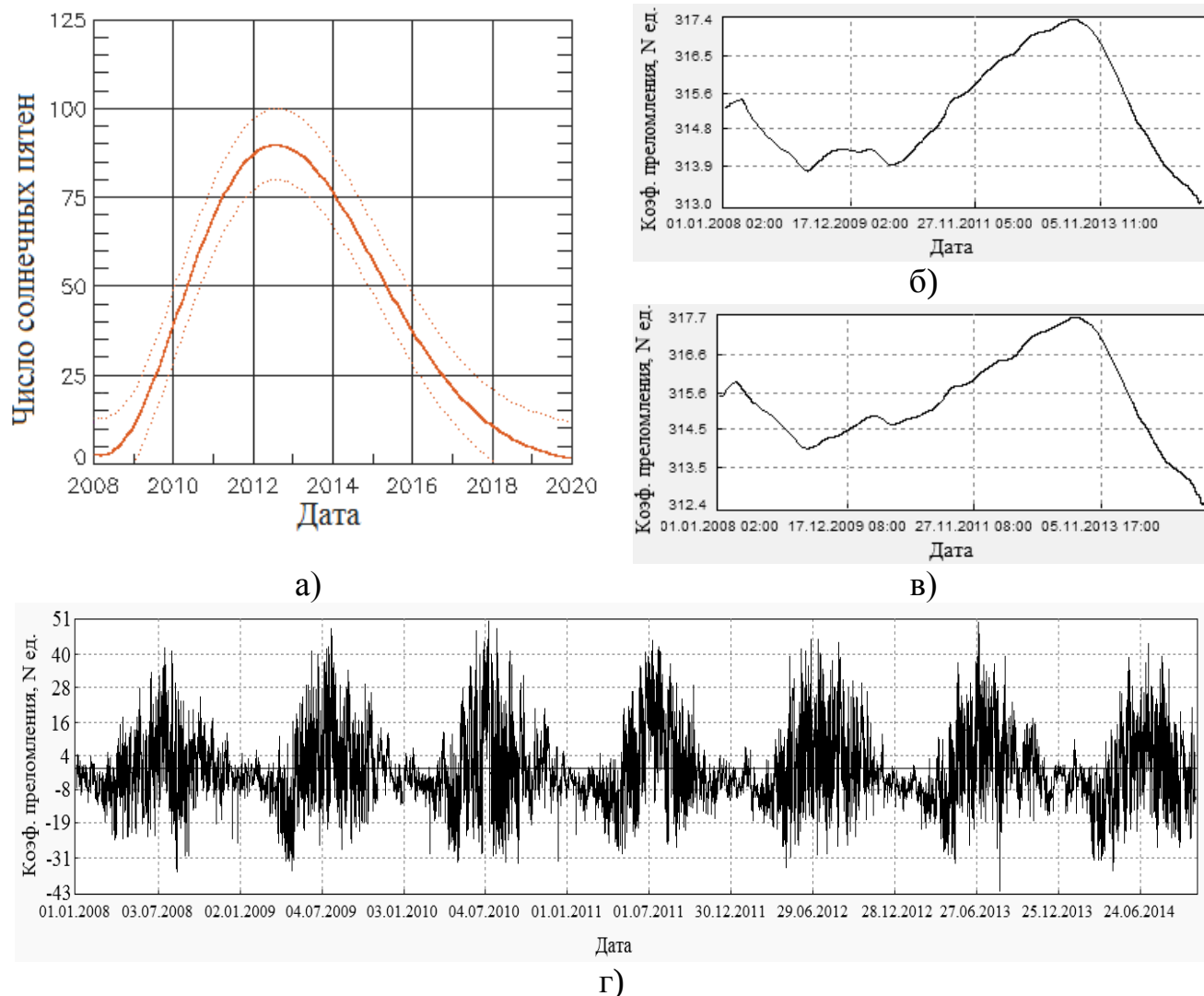


Рисунок 3.16 – Изменения солнечной активности (а) и приземного значения трендовой составляющей коэффициента преломления тропосферы в г. Сумы (б) и г. Полтава (в) за период с 2008 по 2015 гг., а также флуктуационной компоненты (г)

Видно, что повышение солнечной активности в начале 11-летнего цикла сопровождается аналогичным возрастанием трендовой составляющей коэффициента преломления в приземном слое, а начиная с 2013 г. – снижением трендовой компоненты для исследуемых городов. При этом флуктуационная

составляющая (имеющая аналогичный характер для исследуемых городов), связанная с сезонными изменениями метеорологических параметров, довольно стабильна.

3.3.2 Влияние солнечных затмений на ГНСС-измерения

Так как солнечная активность провоцирует изменения среды распространения сигналов, то целесообразно проанализировать, какое влияние оказывает солнечное затмение на ГНСС-измерения. Для оценки влияния Солнца на ГНСС-измерения использовались данные навигационных накоплений, приходящиеся на период солнечного затмения, на нескольких приемниках. В ряде работ, посвященных изучению солнечных затмений и связанных с ними процессов, обычно изучаются изменения в ионосфере, где отмечается, что при солнечном затмении происходит уменьшение концентрации электронов, уменьшение критических частот слоев F1 и F2, что характерно для ночной ионосферы [172, 173]. Динамические процессы при конкретном затмении существенно зависят от возмущенности Солнца и околоземной среды, времени суток, а также метеорологической обстановки. Ранее проведенные исследования [172] показывают, что при прохождении солнечного затмения происходит охлаждение и уменьшается давление воздуха приземного слоя, а также происходит генерация акустико-гравитационной волны (АГВ) в атмосфере, что приводит к взаимодействию систему тропосфера-ионосфера-магнитосфера.

Рассматривается затмение, проходившее 20.03.2015, которое носило частичный характер в точке наблюдения (0,55 – размер максимальной фазы) и проходило в период с 11:09 по 13:21 LT (09:09 – 11:21 UTC). Для оценки солнечной активности в исследуемом промежутке времени использовались данные об изменениях индекса геомагнитной активности K_p и D_{st} (рис. 3.17), которые позволяют оценивать геомагнитную обстановку. Из рис. 3.17, а видно, что индекс K_p постепенно снижался от 6 – состояния магнитной бури (за два дня до затмения) до примерно 2 – состояния слабо возмущенного магнитного

поля, во время затмения. После затмения он флуктуировал в небольших пределах вблизи 2-3 единиц, снизившись от 2 к утру 22.03.2015 03:00 почти до 1, после чего к 09:00 произошел его резкий рост до 7 – состояния магнитной бури. Индекс D_{st} (рис. 3.17, б) во время затмения и после него имел небольшую отрицательную величину (менее 50), потому необходимо учитывать, что затмение проходило на фоне релаксирующей геокосмической бури, что может приводить к отклонениям от аналогичных солнечных затмений, проходивших ранее.

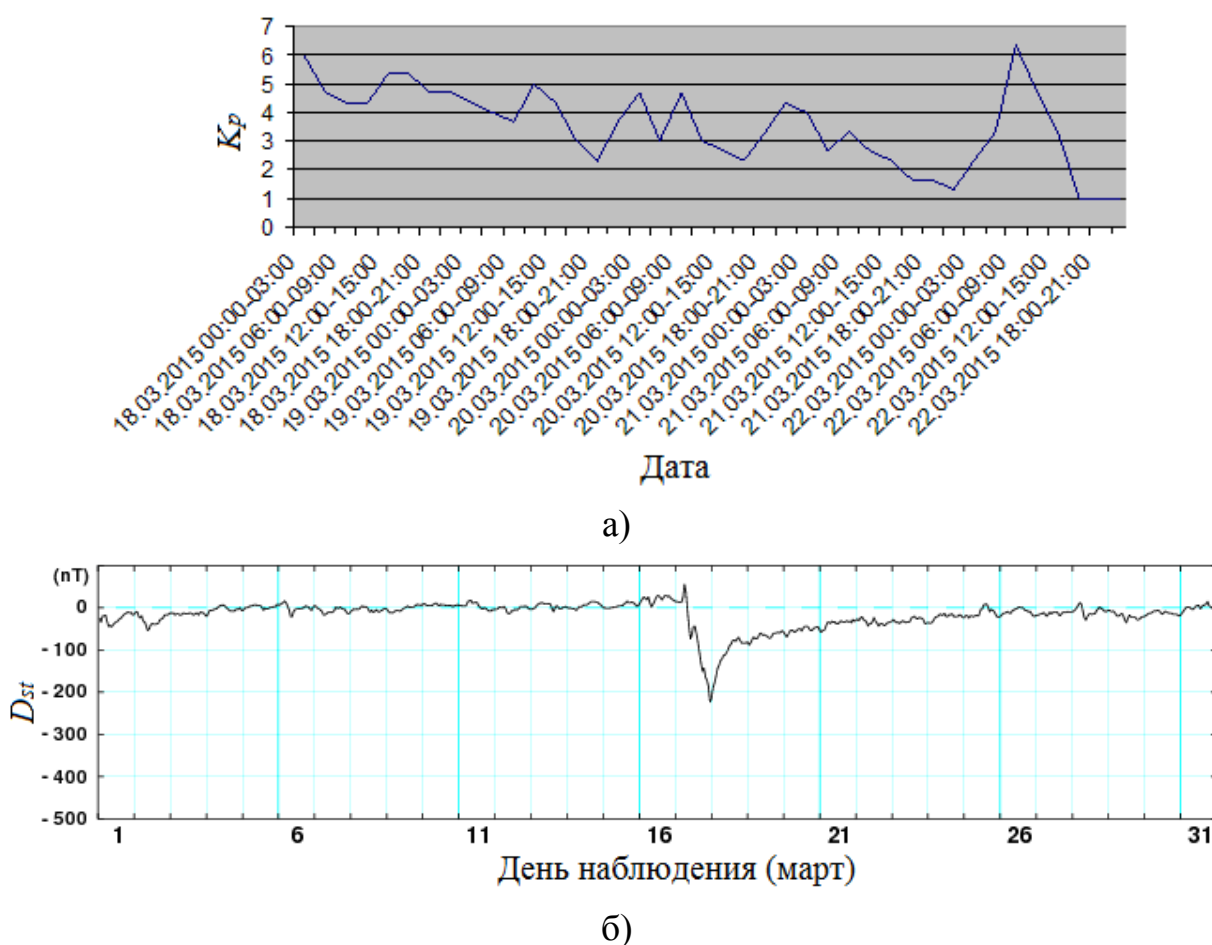


Рисунок 3.17 – Поведение геомагнитных индексов при Солнечном затмении 20.03.2015: а) индекс K_p , б) индекс D_{st}

В работе [173] отмечается, что эффект солнечного затмения 20.03.2015 существенно отличается от солнечных затмений 11.08.1999, 31.05.2003, 03.10.2005, 29.03.2006, 01.08.2008, а также 4.01.2011, наблюдения за которыми проводились вблизи г. Харькова.

Основным параметром, определяющим поведение тропосферы, является коэффициент преломления, изменения которого приведено на рис. 3.18. Данные

коэффициента преломления были рассчитаны из метеопараметров, измеренных непосредственно в точке измерения (рис. 3.19) прибором, описанным в приложении А4.



Рисунок 3.18 – Изменение коэффициента преломления за период с 19.03.2015 по 25.03.2015

Видно, что рассчитанный по метеорологическим индекс коэффициент преломления имеет схожее по характеру поведение, присущее соседним дням. На рис. 3.20 приведены изменения температуры и влажности непосредственно в момент прохождения затмения. Поведение метеорологических параметров соответствует описанному ранее в других работах [173, 174].

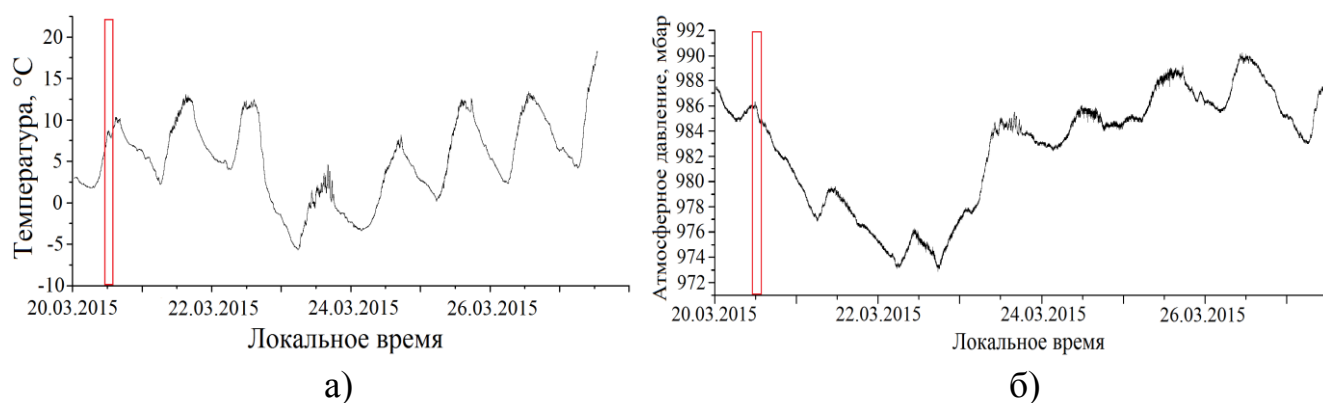


Рисунок 3.19 – Изменение температуры (а) и давления (б) с 20.03.2015 по 27.03.2015

В работе [174] отмечалось резкое снижение коэффициента преломления при прохождении затмения 29 марта 2006 г., связанное с повышением температуры воздуха, которое было обусловлено направлением ветра. Как следствие происходило снижение уровня сигнала на загоризонтной трассе на 2 дБ. На рис. 3.20 представлены изменения соотношения сигнал шум для

спутников GPS 30 и GPS 27 в день затмения и 2 последующих. Спутник GPS30 совершал полный пролет (до зенитных углов) вдоль движения тени, а GPS 27 проходил под низким углом, с возвышением относительно точки приема до 17 градусов, поперек движения тени.

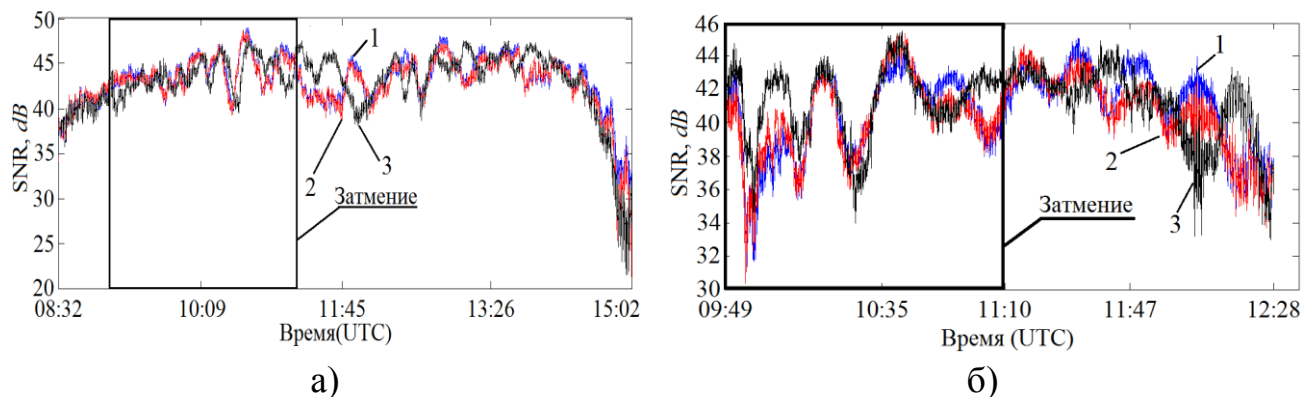


Рисунок 3.20 – Изменения соотношения сигнал / шум для сигналов GPS30 (а) и GPS27 (б): 1 – 20.03.2015; 2 – 21.03.2015; 3 – 22.03.2015

Необходимо отметить, что тень двигалась с юго-запада на северо-восток (рис. 3.21). Более темный участок соответствует прохождению полного затмения.

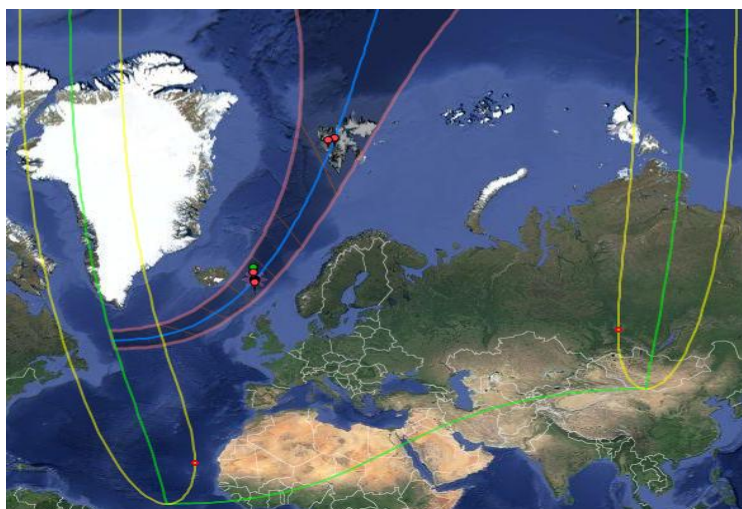


Рисунок 3.21 – Траектория тени при солнечном затмении 20.03.2015

Несмотря на то, что поведение коэффициента преломления в период затмения не имеет принципиальных отличий с соседними днями, при рассмотрении поведения флуктуаций измеряемых координат видно, что во время наблюдения солнечного затмения происходит характерное снижение измеряемой высоты на всех приемниках (рис. 3.22), а также характерные изменения по широте и долготе (рис. 3.23), не присущие двум последующим дням в аналогичный промежуток времени.

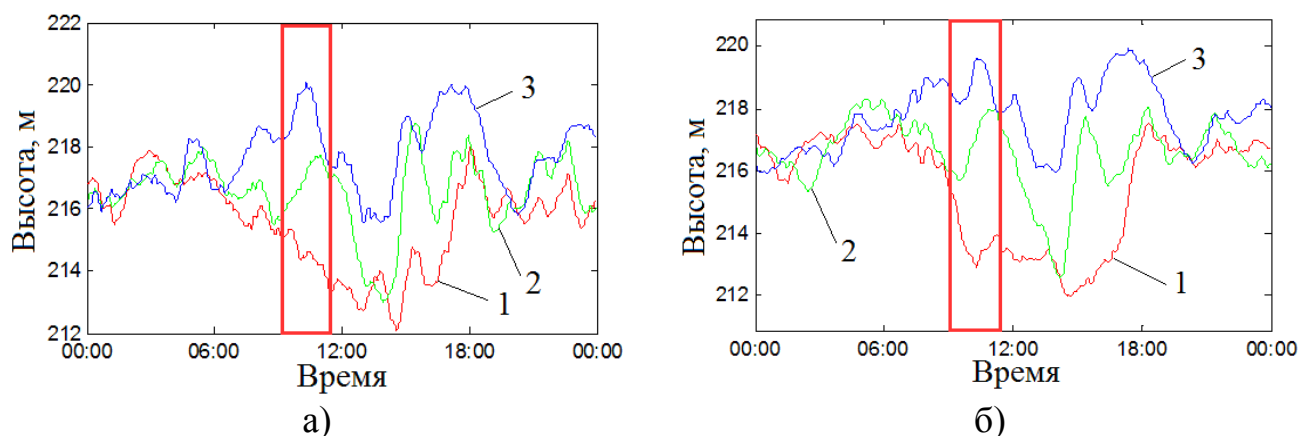


Рисунок 3.22 – Флуктуации измеряемой высоты за период 2015.03.20 – 2015.03.22: а) приемник 1, б) приемник 2: 1 – 20.03.2015, 2 – 21.03.2015, 3 – 22.03.2015

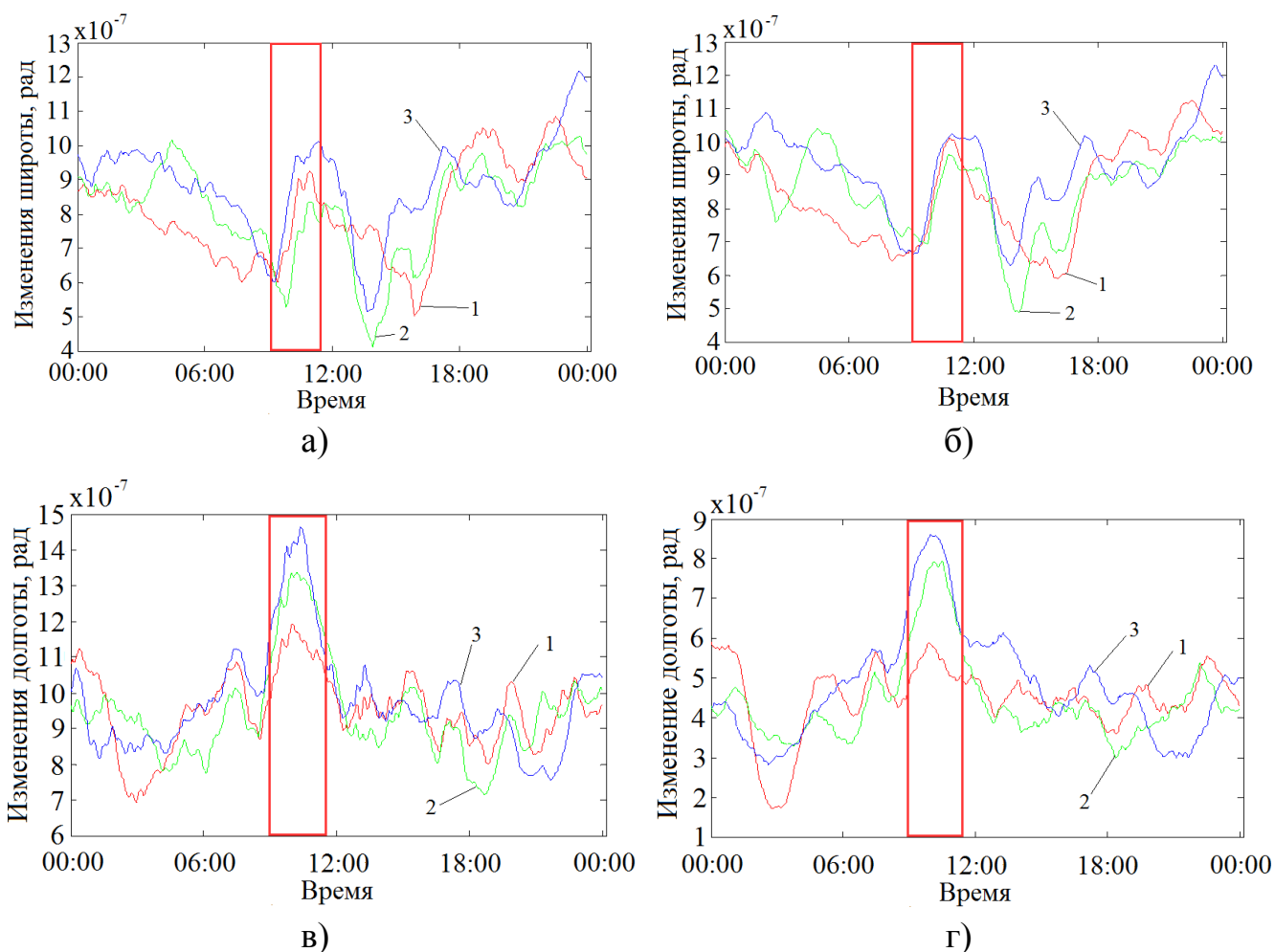


Рисунок 3.23 – Флуктуации измеряемой широты (а, б) и долготы (в, г) за период с 2015.03.20 – 2015.03.22: а, в) приемник 1, б, г) приемник 2: 1 – 20.03.2015, 2 – 21.03.2015, 3 – 22.03.2015

Подобное поведение может объясняться тем, что в отличие от ионосферных процессов тропосферные будут гораздо более инерционными, что может приводить к несвойственному поведению измеряемых координат, как, например при обычном заходе Солнца. Однако при рассмотрении плоскостных координат (рис. 3.24), видно, что для дня прохождения затмения разброс координат меньше, что может быть обусловлено уменьшением влияния солнечной активности на состояние атмосферы, как в ночное время.

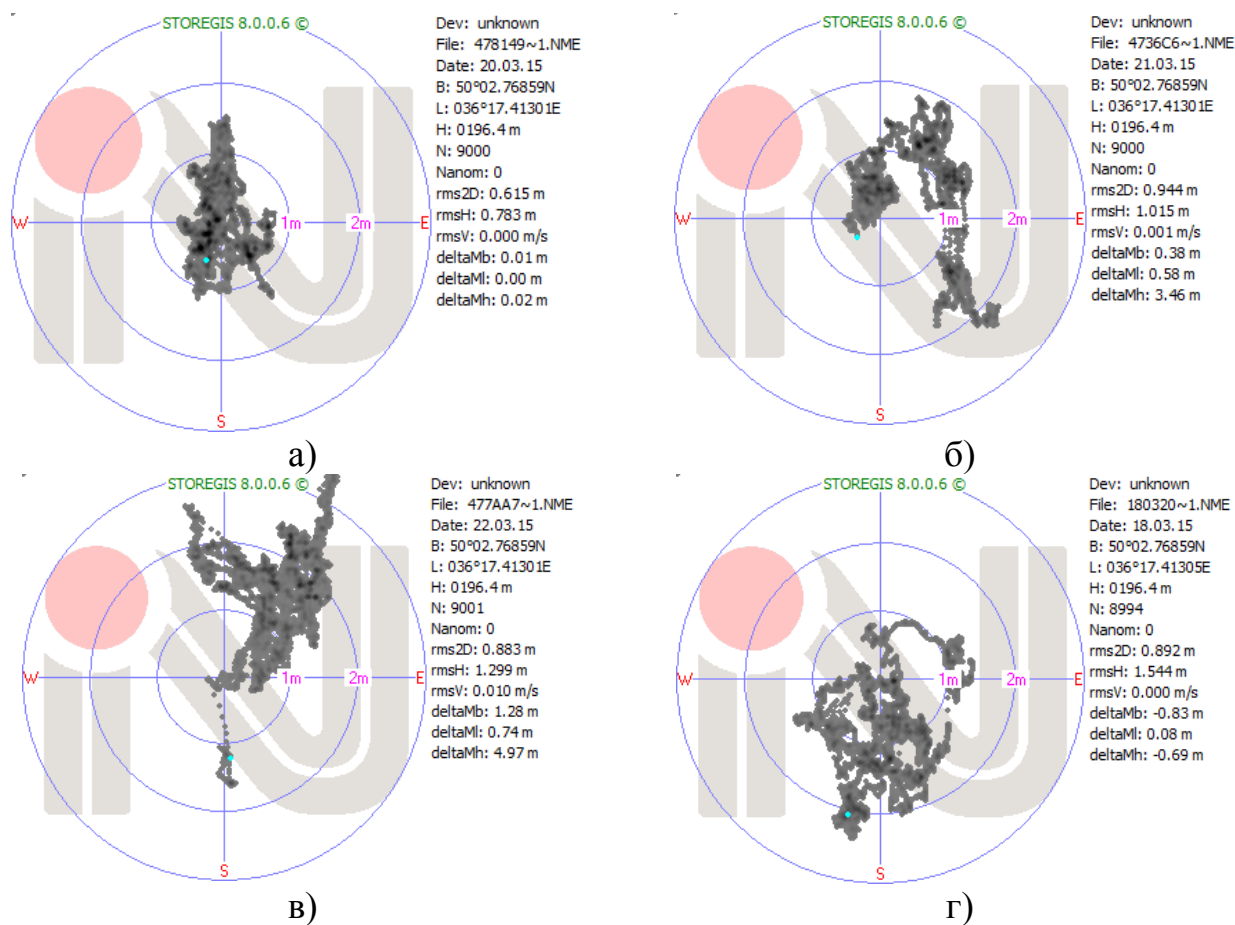


Рисунок 3.24 – Флуктуации плоскостных координат во время локального затмения в точке проведения накоплений 20.03.2015 (а) и в аналогичное время в последующие дни 21.03.2015 (б), 22.03.2015 (в), 18.03.2015 (г)

Для оценки влияния ионосферы на изменения координат было проанализировано изменение значения вертикальной полной электронной концентрации по земному шару на основании карт IONEX [175], также для зоны прохождения полного затмения и вблизи точки измерения. На рис. 3.25 представлено сравнение среднего значения интегрального TECU для соседних двух дней (19.03.2015 и 21.03.2015) с днем прохождения затмения (20.03.2015).

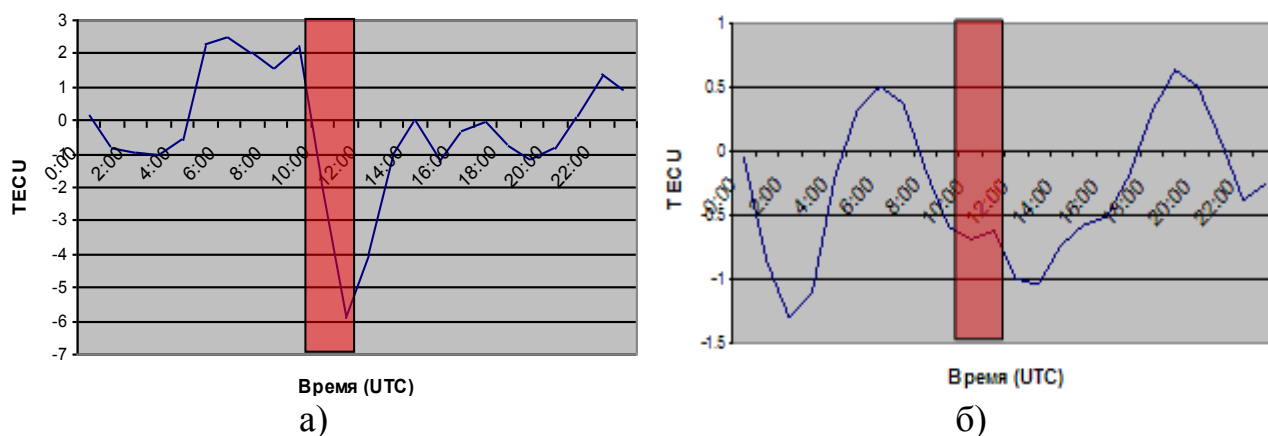


Рисунок 3.25 – Сравнение изменений VTEC за сутки: а) в точке проведения измерений, б) по всей карте

Из полученных результатов видно, что локальные изменения VTEC в точке проведения исследований имеют ярко выраженное снижение концентрации электронов, которое прослеживается и для всей ионосферы, но в значительно меньших масштабах из-за локализации эффекта затмения. Это говорит о том, что изменение VTEC имеет неравномерный характер и требует корректировки в зависимости от географического положения. Таким образом, можно сделать вывод, что при прохождении солнечного затмения в точке проведения наблюдений будут наблюдаться изменения координатной информации несвойственные обычным суточным флуктуациям. Это связано с тем, что ионосферная составляющая задержки принимаемых ГНСС сигналов более чувствительна к локальным эффектам затмения, что проявляется в резком снижении электронной концентрации. В тоже время тропосферная задержка менее подвержена влиянию затмения из-за инерционности протекающих в ней процессов, т. е. изменению метеорологических параметров, а следовательно, и коэффициента преломления, что предъявляет особые требования к точности измерения координат при наблюдении затмения.

3.4 Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы

В настоящее время широкую популярность приобретает использование навигационных систем не только для навигации, но и других задач, таких, например, как анализ атмосферных процессов, который рассматривался в предыдущих подразделах. Целесообразно исследование возможности использования ГНСС не только для диагностики среды распространения, но и подстилающей поверхности вблизи точки приема. Физической предпосылкой для такой диагностики может служить тот факт, что при передаче навигационного сообщения от спутника на приемной стороне регистрируются как прямые, так и отраженные поверхностью сигналы, несущие информацию о ее свойствах и характеристиках. Анализируя поведение соотношения сигнал / шум в точке наблюдения при низких углах возвышения спутника и при различных его азимутах, можно обнаруживать отражающие точки на земной поверхности, а также проводить оценку типа поверхности и степени ее шероховатости в заданном направлении [176 – 178].

Сигнал в точке приема при наличии многолучевости в канале распространения может быть записан в виде суммы гармонических компонент. Множитель ослабления сигнала V в точке приема при малых углах визирования источника $\theta \approx \sin \theta$ представим в виде:

$$V(\theta) = \left| 1 + \sum_{j=1}^m \dot{\rho}_j \exp(i2\pi\chi_j \sin \theta) \right|, \quad (3.10)$$

где $\dot{\rho}_j$ – комплексный коэффициент отражения, характеризующий величину сигнала от дополнительного источника по отношению к прямому сигналу, $\chi_j = 2h_j / \lambda$ – частота, определяемая набегом фазы $\varphi_j = 2\pi\chi_j \sin \theta$ от j отражающей области, располагающейся на высоте h_j относительно приемника. Из соотношения (3.10) видно, что из-за изменения угла визирования источника θ ,

которое наблюдается при вертикальных разрезах поля над поверхностью раздела, вследствие перемещения искусственного спутника Земли (ИСЗ) системы глобальной навигации, а также высоты расположения инверсионных отражающих слоев тропосферы в спектре флуктуаций множителя ослабления появляются компоненты, частота которых связана с угловым положением источника. Это означает, что используя спектральный анализ можно по частоте компоненты определить угловое положение источника, а по ее интенсивности – коэффициент отражения. В качестве отражающих областей могут выступать приподнятые инверсионные слои тропосферы или блестящие точки на земной поверхности. Из соотношения (3.10) видно, что наличие дополнительных, кроме зеркального, отражений приводит к обогащению спектра частотами $\chi_j = h_j / \lambda$ и их комбинациями $\chi_j - \chi_l$. Следует отметить, что если высота приемника относительно отражающей области на поверхности h_j (или инверсионного слоя тропосферы) превышает высоту приемника относительно среднего уровня земной поверхности h_0 , то частоты $\chi_j \geq \chi_0$ выше, чем соответствующие области зеркального отражения. В противном случае они имеют более низкие частоты $\chi_j \leq \chi_0$. Спектральное разложение амплитуды принимаемого сигнала может использоваться для оценки количества областей отражения и их характеристик: угловых координат и коэффициентов отражения с использованием подходов, разработанных в [179, 180]. Рассмотрим ситуацию, когда сигнал ИСЗ отражается от блестящих точек на земной поверхности (рис. 3.27). При этом углы прихода прямого и отраженного луча будут одинаковы по абсолютной величине.

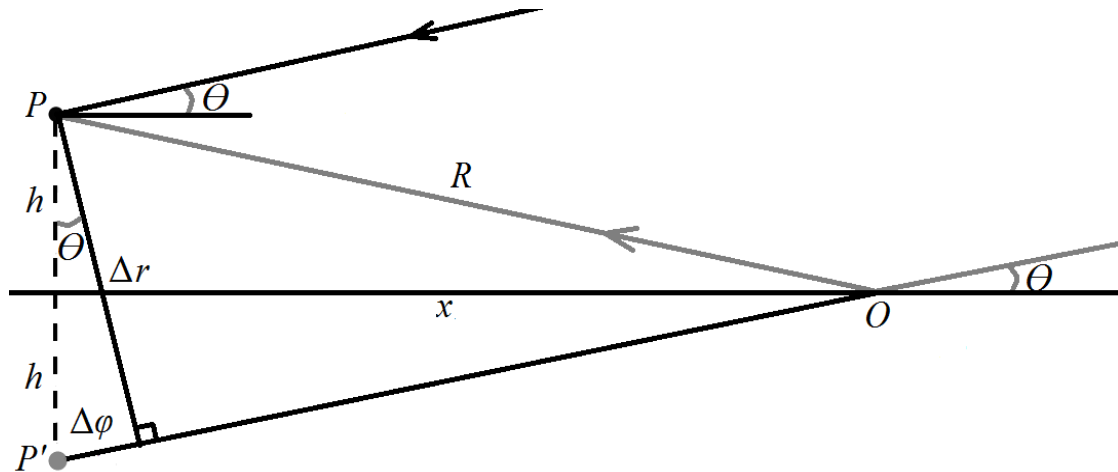


Рисунок 3.26 – Прием луча, отраженного от блестящей точки на земной поверхности: P – точка приема, O – отражающая точка, θ – угол визирования ИСЗ, h – высота расположения приемной антенны, x – расстояние до отражающей точки

У отраженного сигнала дополнительный относительно прямого луча набег фаз:

$$\Delta\varphi = K\Delta r = 2h \cdot \sin \theta \cdot K = \frac{2h \cdot 2\pi}{\lambda} \sin \theta. \quad (3.11)$$

Частота F , представленная как производная по $\Delta\varphi$, примет вид:

$$\omega = \frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot 2h \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta. \quad (3.12)$$

Поскольку $\frac{\partial \Delta\varphi}{\partial t} = 2\pi F$, получим

$$F = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \frac{2h}{\lambda} \cos \theta, \quad (3.13)$$

где $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{V}{R_o}$ – угловая частота движения спутника, здесь R_o – высота орбиты спутника ($\approx 26\,600$ км), а V – скорость его движения (≈ 3.9 км/с), F – частота осцилляций сигнала, причем $F = 1/\Delta t = 1/T$, а Δt – время, за которое фаза

изменится на 2π . Отсюда получаем

$$T = \frac{1}{F} = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda}{2h}. \quad (3.14)$$

То есть при малых углах возвышения спутника, составляющего для высоты расположения антенны в г. Харьков около 30 м, период флуктуаций сигнала составляет около 24 с., возрастая до 48 с. при углах около 60° . Это означает, что частота флуктуаций составляет около 0,04 Гц на нулевых углах, уменьшаясь до 0.02 Гц для углов спутника около 60° . Снижение высоты расположения приемника относительно отражающей области приводит к увеличению периода, а значит, к снижению частоты флуктуаций.

При столь небольшом количестве выборок для оценки периода перспективным является использование современных методов вейвлет-анализа [181 – 184]. Кроме того, необходимо учитывать, что при возрастании высоты расположения приемника частота флуктуаций будет возрастать, и когда она превысит половину частоты обновления информации приемником (для нашего случая $F_0 = 1/T_0 = 0,5$ Гц), то начнет проявляться строб-эффект, и это необходимо учитывать при оценке высот:

$$h = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda}{2T_0} = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda F_0}{2}. \quad (3.15)$$

Таким образом, при высотах размещения приемника более 350 м частота обновления информации приемником (1 Гц) становится недостаточной для правильной оценки частоты его флуктуаций.

При столь малом количестве точек дискретизации можно использовать для оценки периода (а значит, и относительной высоты) метод счета нуль-пересечений. Суть подхода состоит в нахождении отсчетов флуктуационной компоненты сигнала, между которыми она меняет знак, и уточнение временного интервала между переходами через нуль с использованием интерполяции. Другими словами, определяется временной интервал, на котором происходит изменение разности фаз прямого и отраженного сигналов на 2π . Пусть для

определенности фиксируются переходы через нуль от отрицательного значения сигнала к положительному, хотя это и не принципиально. С таким же успехом можно считать интервал между переходами от положительного значения к отрицательному. Примем что $\{S_i, S_{i+1}\}$ – значения сигнала в i и $(i+1)$ моменты времени, причем $S_i \leq 0$, а $S_{i+1} \geq 0$, а $\{S_{i+k}, S_{i+k+1}\}$ – значения сигнала в $(i+k)$ и $(i+k+1)$ моменты времени, причем $S_{i+k} \leq 0$, а $S_{i+k+1} \geq 0$.

Тогда период флуктуаций T может быть определен как

$$T = \left(k - 1 + \left(\frac{S_{i+1}}{S_{i+1} + S_i} + \frac{S_{i+k+1}}{S_{i+k+1} + S_{i+k}} \right) \right) T_0. \quad (3.16)$$

Приближенную оценку может дать использование целого количества отсчетов, т. е.

$$T \approx kT_0. \quad (3.16a)$$

Соотношения (3.16) и (3.16a) можно использовать для оценки по частоте флуктуаций принятого сигнала относительно высоты точки отражения:

$$h = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda}{2T}. \quad (3.17)$$

При движении спутника по орбите происходит перемещение по дистанции области отражения. Положение центра области отражения на подстилающей поверхности определяется через ее относительную высоту $h(x)$ по отношению к приемнику $\frac{h(x)}{x} = \operatorname{tg} \theta$. Расстояние до нее определится как

$$x = h(x) \operatorname{ctg} \theta, \quad (3.18)$$

где $h(x)$ – высота расположения антенны по отношению к высоте точки отражения, а x – расстояние до центра области отражения. Поскольку высота размещения антенны относительно земной поверхности для г. Харьков и г. Сумы составляла примерно 30 м, что при возвышении спутника $10...20^\circ$ дает расстояние до области отражения равное 170...82 м, а при $1...2^\circ$ – соответственно

1720...860 м. Для г. Полтава расположение антенны относительно земной поверхности составляло около 8 м. Соответственно при возвышении спутника $10...20^\circ$ дальность до точки отражения будет составлять примерно 45...22 м, а при $1...2^\circ$ – 458...230 м. При этом угол визирования области отражения на поверхности будет совпадать с углом визирования спутника.

В формирование поля в точке приема основной вклад вносят точки, располагающиеся внутри зоны, существенной для распространения, с радиусом r [184]:

$$r = \sqrt{\lambda R}. \quad (3.19)$$

Для близкорасположенных к приемнику отражающих поверхностей эти размеры составляют единицы метров (4...6 м), а для удаленных – десятки (10...40 м). Следует отметить, что такие размеры имеет зона существенная для распространения, при сечении эллипсоида перпендикулярно направлению распространения сигнала. Пересечение эллипсоида с подстилающей поверхностью даст размеры радиуса зоны существенной для распространения r' на поверхности Земли:

$$r' = r \sin^{-1} \theta = \sqrt{\lambda R} \sin^{-1} \theta. \quad (3.19a)$$

Он составит 24...36 м при угле $20...10^\circ$ и 600...2400 м при углах $2...1^\circ$. Это означает, что если отражающие элементы имеют размеры, превышающие размеры этой зоны, то отражение от них происходит с малыми потерями.

Если отражающая площадка имеет размеры меньшие размеров зоны Френеля на поверхности, то уровень отраженного от нее сигнала будет пропорционален отношению их площадей [185], и коэффициент отражения можно определить как

$$\rho_i = \frac{S_i}{\pi \lambda R} \sin^{1/2} \theta = \frac{S_i}{\pi \lambda h} \sin^{3/2} \theta, \quad (3.20)$$

где S_i – площадь i -ой отражающей площадки, а ρ_i – коэффициент отражения от нее. Если $S_{i\max} [dB]$ и $S_{i\min} [dB]$ – уровень сигнала в дБ в максимуме и минимуме

лепестка поля, то коэффициент отражения

$$\rho_i \approx 0,1(S_{i_{\max}}[dB] - S_{i_{\min}}[dB]) / 2 \quad (3.20a)$$

определяется глубиной интерференционных замираний.

Из соотношения (3.13) можно определить ширину интерференционного лепестка $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2h \cos\theta}, \quad (3.21)$$

которая определяется углом визирования спутника, а также относительной высотой точки отражения.

Ширина интерференционного лепестка, для наших высот расположения антенн составляет около $0,2^\circ$ для Харькова и Сум и $0,7^\circ$ для Полтавы. Соотношение (3.21) позволяет по измерениям ширины интерференционного лепестка оценить относительную высоту точки отражения:

$$h_i = \frac{1}{\Delta\theta_i} \frac{\lambda}{2 \cos\theta}. \quad (3.22)$$

Таким образом, измеряя ширину каждого интерференционного лепестка можно оценивать относительную высоту области отражения, а по глубине провалов – коэффициент отражения, а значит, и размеры отражающей площадки.

Для нахождения точек отражения и анализа типа подстилающей поверхности использовались «сырые» данные базы записей навигационных сигналов ГНСС. В экспериментах использовались одностотные приемники СН-4719 разработки ООО «Навис-Украина», размещенные в трех городах Украины: г. Сумы, г. Харьков и г. Полтава. Панорама местности этих городов представлена на рис. 3.27. Сигнал спутника ГНСС записывался с момента захвата приемником и до момента его потери. При анализе полученных соотношений сигнал / шум для различных спутников, учитывалось, что в ГНСС спутники разбиты на отдельные группы, с одинаковыми траекториями орбит. К примеру, для системы GPS спутники обращаются по круговым орбитам с одинаковой высотой и

периодом обращения для всех спутников. Наклонение орбиты (55°) является также общим для всех спутников системы. Единственным отличием спутниковых орбит является долгота восходящего узла или точка, в которой плоскость орбиты спутника пересекает экватор (данные точки отстоят друг от друга приблизительно на 60°). Следовательно, несмотря на одинаковые параметры орбит, спутники обращаются вокруг Земли в шести различных плоскостях, по 4 аппарата в каждой.



а)



б)



в)

Рисунок 3.27 – Панорама местности из точки расположения приемника:
а) г. Харьков, б) г. Сумы, в) г. Полтава

Таким образом, получив один и тот же эффект на различных спутниках, можно сделать вывод о наличии стабильной области отражения, а по частоте флуктуаций, азимуту и углу места можно оценить его местоположение.

На рис. 3.28 приведены примеры амплитуд сигналов для различных групп спутников, траектория движения которых происходит под одним и тем же азимутальным направлением. Для разделения стабильной и флуктуационной компонент использовался известный алгоритм «гусеница» [184 – 187].

В основе метода лежит предположение, что исходный временной ряд является суммой нескольких рядов. Тогда при некоторых условиях можно определить по виду собственных чисел, собственных и факторных векторов, что это за слагаемые и какой набор элементарных матриц соответствует каждому из них. Суммируя элементарные матрицы внутри каждого набора и переходя от результирующих матриц к ряду, получают разложение ряда на аддитивные слагаемые, например, на сумму тренда, периодики и шума или на сумму низкочастотной и высокочастотной составляющих [185 – 187].

Таким образом, целью метода является разложение временного ряда на интерпретируемые аддитивные составляющие, при этом метод не требует стационарности ряда, знания модели тренда, а также сведений о наличии в ряде периодических составляющих и их периодах. С использованием рассмотренного подхода получены трендовые и флуктуационные компоненты амплитуд сигналов спутников, представленных на рис. 3.28, 3.29. В отличие от атмосферы, влияющей на изменение условий распространения сигналов ГНСС как в течении суток, так и в зависимости от времени года, подстилающая поверхность менее подвержена суточным и сезонным изменениям и оказывает на характер поведения сигналов (для спутников, находящихся на одних и тех же орбитах) примерно одинаковое влияние. Так, для примера приведены 3 случая, для азимутальных направлений $\sim 183^\circ$ (спутники GPS01 и GPS11), $\sim 190^\circ$ (спутники GPS03 и GPS10), $\sim 55^\circ$ (спутники GPS02 и GPS17). Для анализа выбирались заходы спутников в летний и зимний период, начиная с 20° возвышения спутника и, заканчивая потерей сигналов при заходе спутника за горизонт. Для летнего и зимнего сезонов при заходах выделялись характерные участки, где флуктуации амплитуды значительно увеличивались и изменялась частота.

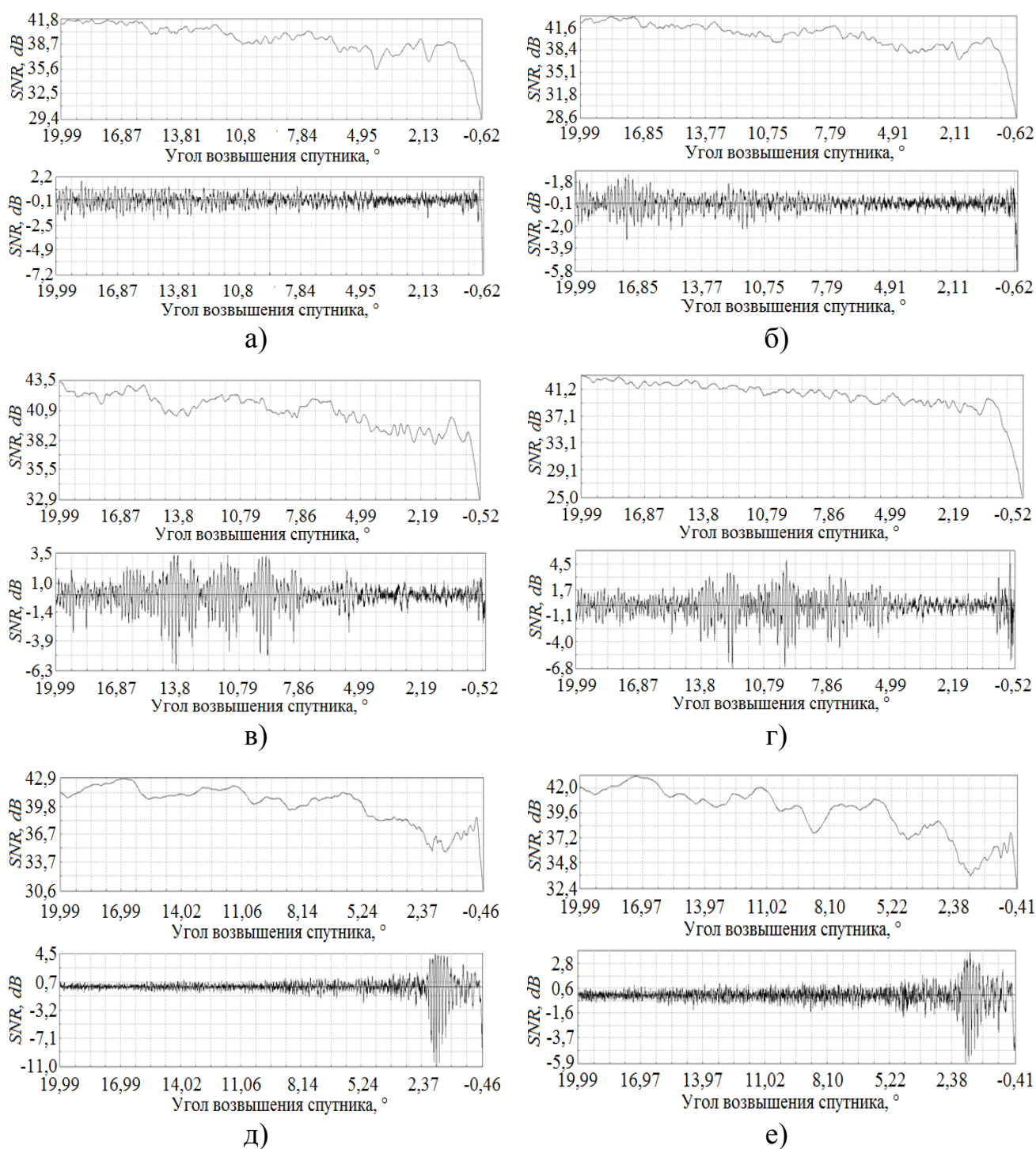


Рисунок 3.28 – Трендовые (верхние кривые) и флуктуационные (нижние кривые) составляющие амплитуд сигналов для спутников (г. Сумы): а) GPS 01 (26.02.2012); б) GPS 11 (26.02.2012); в) GPS 03 (24.02.2012); г) GPS 10 (24.02.2012); д) GPS 02 (24.02.2012); е) GPS 17 (24.02.2012)

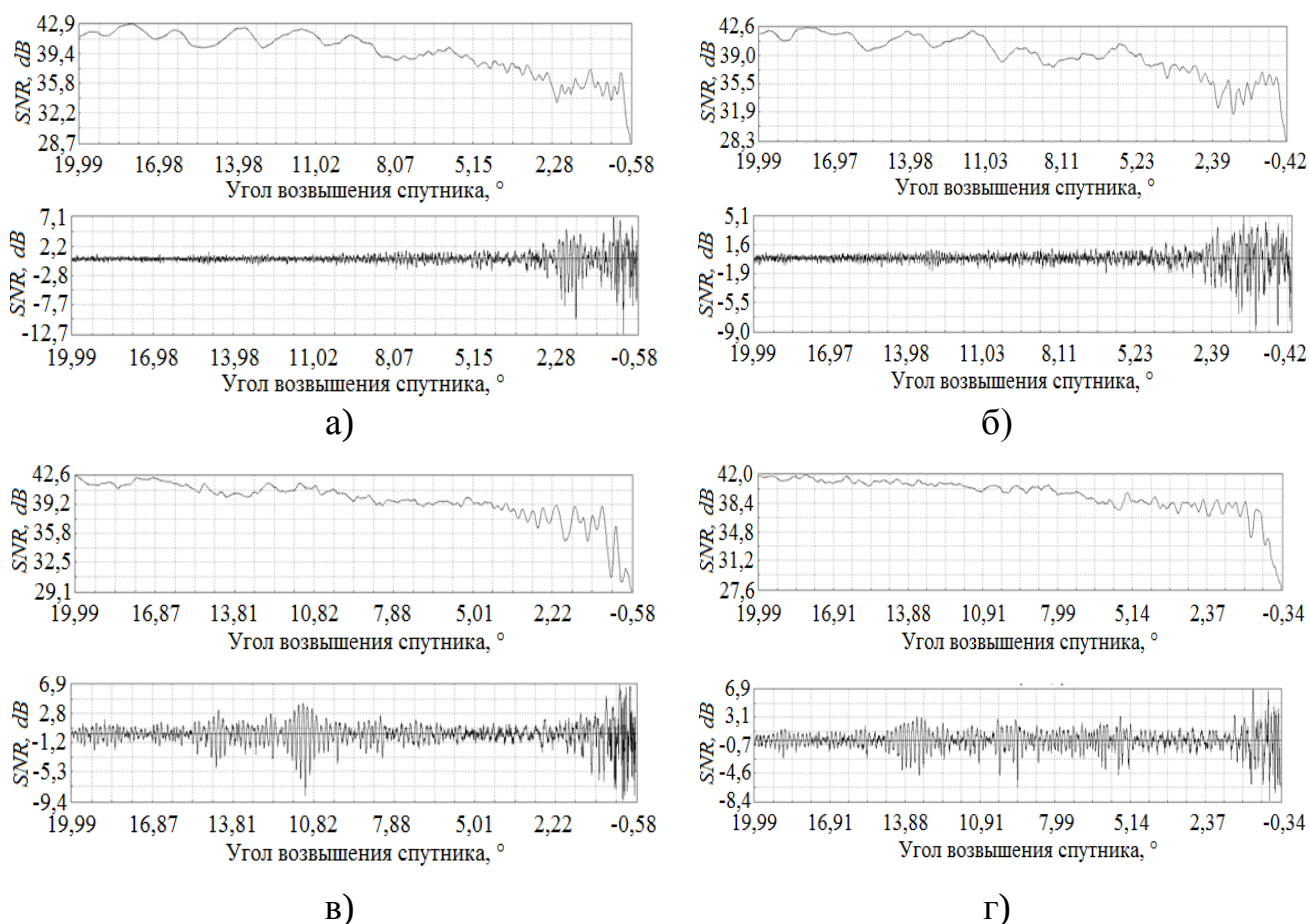


Рисунок 3.29 – Трендовые (верхние кривые) и флуктуационные (нижние кривые) составляющие амплитуд сигналов для спутников (г. Сумы): а) GPS 02 (21.06.2012); б) GPS 17 (23.06.2012); в) GPS 03 (22.06.2012); г) GPS 10 (22.06.2012)

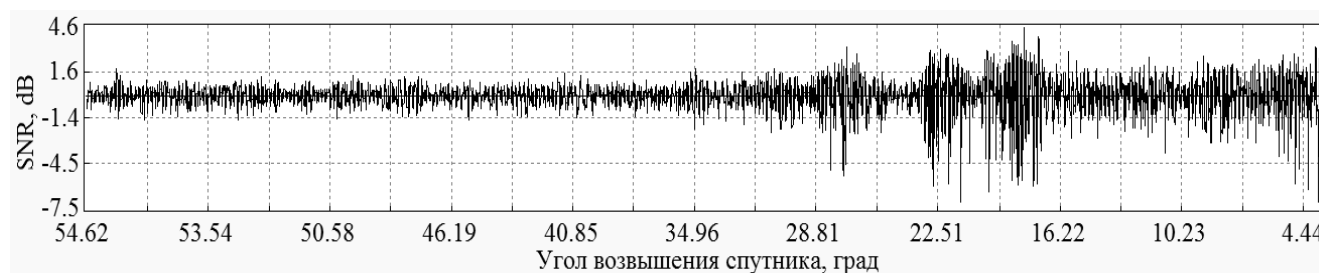
Наличие характерных участков при различных рефракционных условиях (динамика и амплитуда изменения коэффициента преломления в летний период существенно больше, чем в зимний) носит стабильный характер для всех спутников, что свидетельствует об устойчивости эффекта. Из приведенных рисунков видно, что изменения флуктуационной компоненты довольно четко повторяются для различных спутников, что может свидетельствовать о наличии точек отражения, приводящих к подобным изменениям сигнала. Видно, что для спутников с азимутальным углом 55° появляются существенные флуктуации при низких углах спутника, что, скорее всего, соответствует отражению от крыш домов в ближней зоне, когда лесная посадка в дальней зоне никак не влияет на флуктуационную компоненту.

В случае со спутниками, расположенными под азимутальным углом в 183° , видны несколько выбросов, имеющих одинаковую частоту, что вызвано отражением от зоны застройки домами, расположенной в этом направлении.

Для измерительного пункта с относительно низким расположением антенны (г. Полтава) наблюдалось возрастание амплитуды флуктуационной компоненты, которое сопровождалось падением уровня сигнала трендовой составляющей из-за затенения деревьями в ближней зоне (рис. 3.30).



а)



б)

Рисунок 3.30 – Поведение сигнала спутника GPS 15 для г. Полтава при затенении трассы деревьями (азимут – 210°): а) трендовая компонента, б) флуктуационная компонента

Для нахождения параметров отражающих областей земной поверхности был проведен спектральный анализ амплитуд сигналов спутников и рассчитаны параметры предполагаемых точек отражения для г. Харьков, г. Сумы и г. Полтава (рис. 3.31). В качестве примера приведено несколько участков панорам, на которых выделены азимутальные углы, соответствующие анализируемым участкам. Кроме того, приведены спектры, соответствующие полному анализируемому сигналу, а также спектру участков сигнала, характерных для зон отражения.

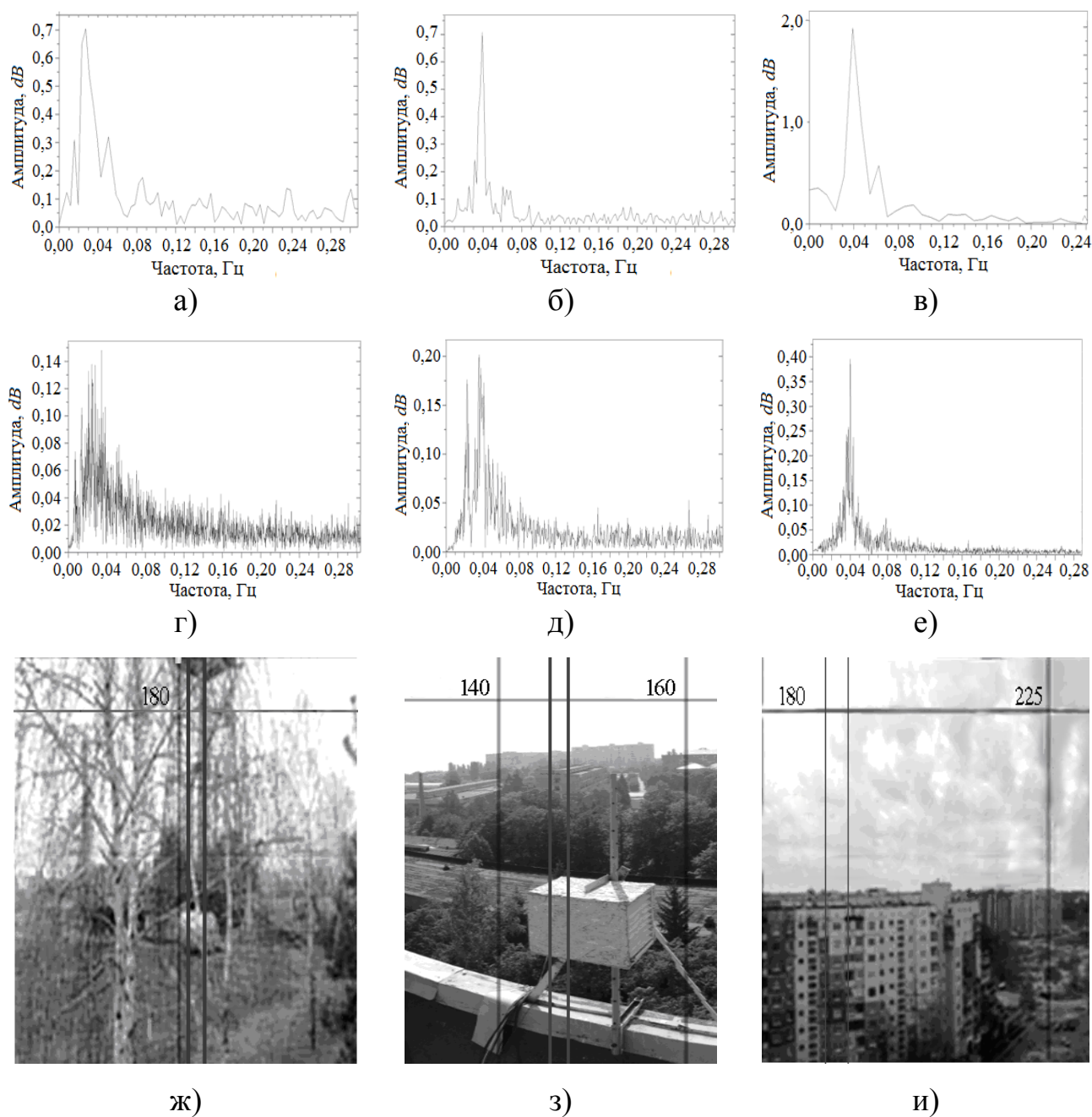


Рисунок 3.31 – Анализ точек отражения для г. Полтава GPS 26 (а, г, ж), г. Харьков GPS 09 (б, д, з), г. Сумы GPS 03 (в, е, и): а – в) спектр участка соответствующего предполагаемой точке отражения, г – е) спектр полного пролета спутника, ж – и) панорама местности

Таким образом, путем анализа спектральных компонент, установив взаимосвязь между спектральными компонентами и соответствующими им высотами отражающих областей, можно сделать предположения о рельефе местности.

Таблица 3.2 – Результаты анализа точек отражения

Спутник	Азимут	Угол места	Период флуктуаций	Коэф. отражения	Площадь отраж. участка, м	Высота отраж. участка, м	Расстояние до отраж. участка, м
GPS 02 Харьков	56.5°	4.4 ... 5.5°	0.049° (0.137 Гц)	0.183	162 ... 116	117	391 ... 311
	55.5°	7.1 ... 8.7°	0.35° (0.19 Гц)	0.21	91 ... 67.25	165	241 ... 196
	55°	9.6 ... 10.2°	0.029° (0.23 Гц)	0.17	47 ... 43	199	178 ... 166
GPS 14 Харьков	56°	8.3 ... 10°	0.03° (0.215 Гц)	0.3	103 ... 78	196	205 ... 170
GPS 09 Харьков	146.5°	8.2 ... 11°	0.177° (0.037 Гц)	0.25	87.4 ... 56.5	32.7	210 ... 155
GPS 12 Харьков	148°	7.3 ... 9.9°	0.166° (0.04 Гц)	0.194	80.7 ... 51.3	34.9	235 ... 171
GPS 26 Харьков	183°	4.8 ... 7.6°	0.1405° (0.0475 Гц)	0.22	171 ... 86	41.2	358 ... 225
GPS 01 Харьков	183°	6.7 ... 9.9°	0.138° (0.048 Гц)	0.205	96.9 ... 54.2	42	255 ... 172
GPS 01 Полтава	181°	10.6 ... 11.5°	0.28° (0.023 Гц)	0.45	107.5 ... 95.2	20.9	42.5 ... 39.3
GPS 26 Полтава	182°	9.4 ... 10.5°	0.22° (0.027 Гц)	0.415	118 ... 100.5	23.4	48.2 ... 43
GPS 02 Сумы	56°	0.85 ... 2.13°	0.142° (0.047 Гц)	0.8	2780 ... 701	41.3	2022 ... 808
GPS 03 Сумы	190°	9.33 ... 10.18°	0.17° (0.039 Гц)	0.42	30.9 ... 35.5	34.4	182 ... 167
	190.5°	11 ... 11.8°	0.16° (0.042 Гц)	0.41	39.6 ... 27.9	36.6	154 ... 143
	191.3 °	13.9 ... 14.7°	0.176° (0.038 Гц)	0.49	26.1 ... 24.1	32.9	121 ... 114
GPS 10 Сумы	193.5°	6.89 ... 7.9°	0.168° (0.04 Гц)	0.4	60.5 ... 49.3	34.7	248 ... 216
	192.5°	9.3 ... 10.1°	0.166° (0.04 Гц)	0.59	57 ... 50.5	34.8	183 ... 168
	191.5°	12.1 ... 13.9°	0.16° (0.042 Гц)	0.515	33.7 ... 27.5	36.6	140 ... 121

Из полученных результатов видно, что предложенные выше теоретические расчеты довольно хорошо совпадают со значениями для рассматриваемых областей отражения. Отметим, что для г. Полтава, где антенна располагалась довольно низко по отношению к окружающей застройке, имели место случаи, когда невозможно было выделить определенные участки из-за зашумленности принимаемых сигналов, что вызвано окружающей растительностью.

Поскольку на поведение принимаемого сигнала влияет шероховатость

подстилающей поверхности, целесообразно проанализировать поведение дисперсии флуктуационной компоненты для оценки типа подстилающей поверхности в азимутальном направлении, с которого принимается сигнал.

При исследовании типа подстилающей поверхности анализировались пролеты спутников под различными азимутальными углами и углами возвышения спутников. Видно, что для г. Сумы доминирующим типом местности является застройка, в то время как в г. Полтава преобладает открытая местность, без высотных застроек. Для Харькова проанализированы уровни флуктуаций, как для местности с высотной застройкой, так и равнинной местности. На рис. 3.32 для примера приведены результаты оценок (г. Харьков) в летний период (330 N ед.). Пролеты спутников разбиты на несколько участков по 5° , связанных с перемещением спутника и изменением характера поведения сигнала. Из полученных результатов можно сделать вывод, что местности с равнинным характером имеют дисперсию флуктуационной компоненты примерно в 3 раза меньше, чем зоны застройки. Однако в ряде случаев отмечается нехарактерное поведение уровней флуктуаций, которое может быть вызвано появлением дополнительной области отражения на определенных углах.

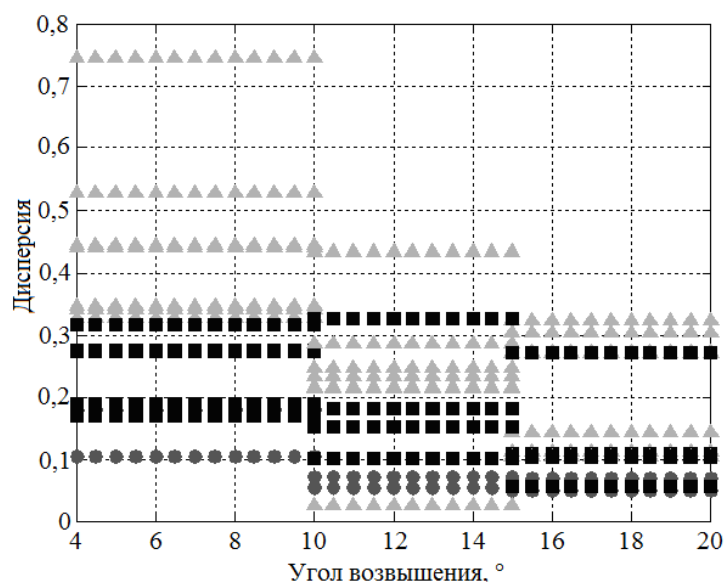


Рисунок 3.32 – Уровни дисперсии для различных типов местности (● – поля, ■ – дома на уровне расположения антенны, ▲ – дома ниже уровня расположения антенны) в зависимости от угла возвышения

Выводы к разделу 3

Впервые предложена методика дистанционной диагностики тропосферы и определения зон выпадения осадков на трассе распространения сигналов от навигационных спутников. Показано, что изменения псевдодальностей может быть использовано для оценки интенсивности дождя. Показано, что наличие на трассе ливней приводит к уменьшению измеряемой высоты, что связано с возрастанием влажной компоненты тропосферной задержки и изменению рефракционных условий на трассе распространения. Показано, что при прохождении сильных ливней в зоне проведения измерений, может наблюдаться сильное снижение уровня сигналов от навигационных спутников, что приводит к искажению координатной информации и должно быть учтено при анализе данных.

Впервые предложена методика диагностики подстилающей поверхности суши и точек отражения на ней в условиях городской застройки при помощи излучений навигационных спутников. Показано, что наличие точек отражения может приводить к возникновению характерных флуктуаций из-за интерференции прямого и отраженного луча, которые отмечаются для различных спутников, движущихся примерно по одинаковой траектории. Спектральный анализ флуктуационной составляющей принимаемого сигнала может использоваться для определения характеристик областей отражения. Показано, что городская застройка приводит к увеличению уровня флуктуаций примерно в 3 раза по сравнению с местностью без строений.

Впервые предложена модель функции отображения, учитывающая сферичность атмосферы через градиент коэффициента преломления. Показано, что предложенная модель более точно описывает поведение тропосферной задержки на малых углах возвышения спутников, где начинают сказываться рефракционные эффекты в тропосфере, чем эмпирические модели, в которых не учитываются особенности региона и метеобстановка. Показана возможность ее использования для решения обратной задачи по нахождению градиента

коэффициента преломления тропосферы, обеспечивающего минимизацию расхождения экспериментальных и модельных данных по тропосферным задержкам.

Анализ поведения координатной информации при наблюдении солнечного затмения 20.03.2015 показал, что могут наблюдаться изменения координатной информации, полученные при помощи ГНСС, несвойственные для соседних дней. Экспериментально показано, что ионосферный отклик, выражающийся в снижении вертикальной концентрации электронов, происходит непосредственно в момент прохождения затмения в отличие от более инерциальной тропосферы, что приводит к затянутым хвостам в изменениях координатной информации. Впервые установлено, что изменение солнечной активности на протяжении 11-летнего цикла проявляется в изменениях трендовой составляющей индекса коэффициента преломления тропосферы.

РАЗДЕЛ 4

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГНСС

В предыдущих разделах рассмотрена возможность диагностики атмосферных процессов с использованием данных получаемых при помощи ГНСС. Однако на практике большой интерес представляет рассмотрение задач коррекции координатной информации, получаемой при помощи навигационных спутников с целью снижения ошибок, связанных с условиями распространения радиоволн. В данном разделе рассматриваются экспериментальные исследования влияния условий распространения на ошибки измерения координат и способы коррекции на основании их анализа. Основные результаты раздела опубликованы в работах [188 – 196].

4.1 Интерполяционный метод формирования дифференциальных поправок в системах глобальной навигации

4.1.1 Интерполяционный метод формирования дифференциальных поправок при определении координат

Как известно, одним из наиболее эффективных способов уменьшения ошибок определения координат в ГНСС является использование дифференциального метода [197 – 199]. Его суть сводится к использованию дополнительного (базового) приемника, местоположение которого известно с довольно высокой точностью. Предполагается, что приемники находятся на таком расстоянии друг от друга, что условия распространения сигналов ГНСС к ним существенно не отличаются. При этом можно считать, что характер поведения координатных ошибок будет аналогичным. На практике же данное предположение является не совсем корректным, так как приемники должны

наблюдать одинаковое созвездие спутников для аналогичного решения навигационной задачи. Несмотря на это, поправки могут быть введены не только на этапе коррекции координат, но и этапе определения псевдодальности до конкретных спутников. Однако необходимо отметить, что при разносе измерительных пунктов на 100...200 км, что имело место в данных исследованиях, не всегда удается получить устойчивые значения коррекции. Альтернативой выбора ближайшей корректирующей станции, которая может давать далеко не лучший вариант коррекции, может выступать использования системы опорных точек, что реализуемо за счет широкой сети референсных станций.

Основная идея интерполяционного метода коррекции состоит в вычислении поправки определения координат или псевдодальности для роверной станции, которая находится внутри треугольника, образованного базовыми корректирующими станциями. Увеличение количества корректирующих станций позволит добиться более достоверной поправки. Данный метод даст более устойчивое значение поправки при дифференциальной коррекции.

Изначально такой подход использовался для прогнозирования поведения коэффициента преломления в произвольной точке пространства [200]. Необходимость нахождения корректируемой станции внутри треугольника, образованного корректирующими станциями, обосновано проанализированными ранее различными схемами построения. Из проведенных ранее исследований [200] видно, что при нахождении за пределами системы точность прогноза существенно снижается.

Выбор опорных точек может быть основан на предварительной оценке корреляции коэффициентов преломления между опорными точками и точкой прогноза. Для проведения экспериментальных исследований была создана сеть из 3 референсных станций, оборудованных навигационными приемниками NAVIS СН-4719, описанными в приложении А. Базовые приемники были размещены в г. Харьков (широта – $50^{\circ} 02.771$, долгота – $36^{\circ} 17.460$), г. Сумы (широта –

50° 54.663, долгота – 34° 50.335), г. Смела (широта – 49° 12.100, долгота – 31° 51.995) и обеспечивали получение поправок с помощью линейной интерполяции на точку прогноза в г. Полтава (широта – 49° 37.282, долгота – 34° 39.098). В выбранных опорных пунктах, с использованием методики, изложенной в [200], была проведена оценка корреляции коэффициентов преломления на основании результатов систематических измерений (8 раз в сутки) метеорологических параметров (температуры, давления и влажности) при помощи штатных метеостанций, расположенных в исследуемых точках. Полученные за период измерений значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициенты корреляции между опорными точками

Месяц	Коэффициент корреляции между коэффициентами преломления в г. Полтаве – г. Харьков	Коэффициент корреляции между коэффициентами преломления в г. Полтава – г. Сумы	Коэффициент корреляции между коэффициентами преломления в г. Полтава – г. Смела	Коэффициент корреляции между реальными и прогнозируемыми коэффициентами преломления
Январь	0.81	0.88	0.60	0.81
Февраль	0.95	0.95	0.81	0.94
Март	0.85	0.82	0.74	0.87
Апрель	0.35	0.40	0.25	0.36
Май	0.78	0.75	0.54	0.79
Июнь	0.62	0.54	0.33	0.63
Июль	0.62	0.52	0.17	0.56

Видно, что в некоторых случаях коэффициенты, полученные интерполяционным методом, имеют большее значение, чем в опорных точках, особенно в летний период, когда суточные изменения коэффициента преломления более динамичны и индивидуальны для различных точек пространства. Это свидетельствует о том, что коррекция при помощи интерполяционного метода позволит лучше, чем стандартный

дифференциальный метод, устранить ошибку определения координат и достичь более стабильного результата.

Для анализа были произведены накопления навигационных данных и метеоданных за 1,5 года, что позволило сопоставлять экспериментальные результаты в различные сезоны и соответственно при различных поведеньях приземного коэффициента преломления.

Если систему координат разместить в 1-й опорной точке, то уравнение для оценки поправки к оцененному приемником ГНСС значению высоты в прогнозируемой точке $\{x, y\}$ в предположении, что она лежит на плоскости, проходящей через три опорные точки, можно записать в виде:

$$\Delta Z(t) = \frac{\Delta(t) - \Delta_A(t)x - \Delta_B(t)y}{\Delta_C(t)}, \quad (4.1)$$

где

$$\Delta_A(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \Delta Z_1(t) \\ 1 & \Delta y_{12} & \Delta Z_2(t) \\ 1 & \Delta y_{13} & \Delta Z_3(t) \end{vmatrix}; \quad \Delta_B(t) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & \Delta Z_1(t) \\ \Delta x_{12} & 1 & \Delta Z_2(t) \\ \Delta x_{13} & 1 & \Delta Z_3(t) \end{vmatrix};$$

$$\Delta_C(t) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & 1 \\ \Delta x_{13} & \Delta y_{13} & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta(t) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & \Delta Z_1(t) \\ \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & \Delta Z_2(t) \\ \Delta x_{13} & \Delta y_{13} & \Delta Z_3(t) \end{vmatrix};$$

где ΔZ , ΔZ_i – коррекция измерений высоты в прогнозируемой и опорных точках, а $\Delta x_{i,j} = x_i - x_j$, $\Delta y_{i,j} = y_i - y_j$ – разница координат по плоскости между i и j опорными точками, причем $j = 1$, $i = 2, 3$. Следует отметить, что опорные точки должны располагаться не на одной прямой, чтобы отсутствовало условие для вырождения уравнений (4.1). При этом разница координат в декартовой системе между опорными пунктами i и j (взаимные координаты) вычисляется по их долготе β_i , β_j и широте φ_i , φ_j

$$\Delta y_{ij} = (\varphi_i - \varphi_j) \cdot a$$

$$\Delta x_{ij} = (\beta_i - \beta_j) \cdot a \cos((\varphi_i + \varphi_j) / 2) \quad (4.2)$$

где $a = 6,37 \cdot 10^6$ м – радиус Земли.

Соотношения (4.1) и (4.2) были использованы для вычисления поправок по результатам измерений, полученных в 4 измерительных пунктах, взаимное положение которых схематически представлено на рис. 4.1. Необходимо отметить, что использование подобного подхода предполагает, что корректируемая и корректирующие станции имеют примерно одинаковую высоту расположения. При существенных вариациях высот для коррекции необходимо вносить поправки, получаемые в каждом из пунктов, с использованием экспоненциальной модели [200].

Разнос между измерительными пунктами был от 140 км до 400 км. Высота установки антенн составляла около 30 м относительно поверхности Земли.



Рисунок 4.1 – Схематическое расположение прогнозируемого и опорных (базовых) пунктов, а также их расстояние до г. Полтава: 1 – г. Харьков – 130,9 км; 2 – г. Сумы – 147,5 км, 3 – г. Смела – 197,0 км, 4 – г. Полтава

При исследованиях были проанализированы варианты формирования текущей поправки, а также использования для вычислений поправок сглаженных данных, фильтрами с разными размерами окон, что позволило определить влияние этого параметра на ошибку определения координат.

Для испытания метода было выбрано 15 дней таким образом, чтобы они приходились на разные сезоны года. Характер изменения коэффициента преломления за этот период представлен на рис. 4.2. На нем же вертикальными линиями отмечены используемые для обработки дни измерений. Диапазон изменений коэффициента преломления за этот период превышал 60 N ед. Анализ поведения коэффициента преломления показал, что зимой и ранней весной

колебания коэффициента преломления не превышали 10 N ед. В середине весны и летом изменения коэффициента преломления достигали 55 N ед., при суточных изменениях до 40 N ед. При этом следует отметить, что максимальные значения коэффициента преломления, как правило, приходятся на ночь.

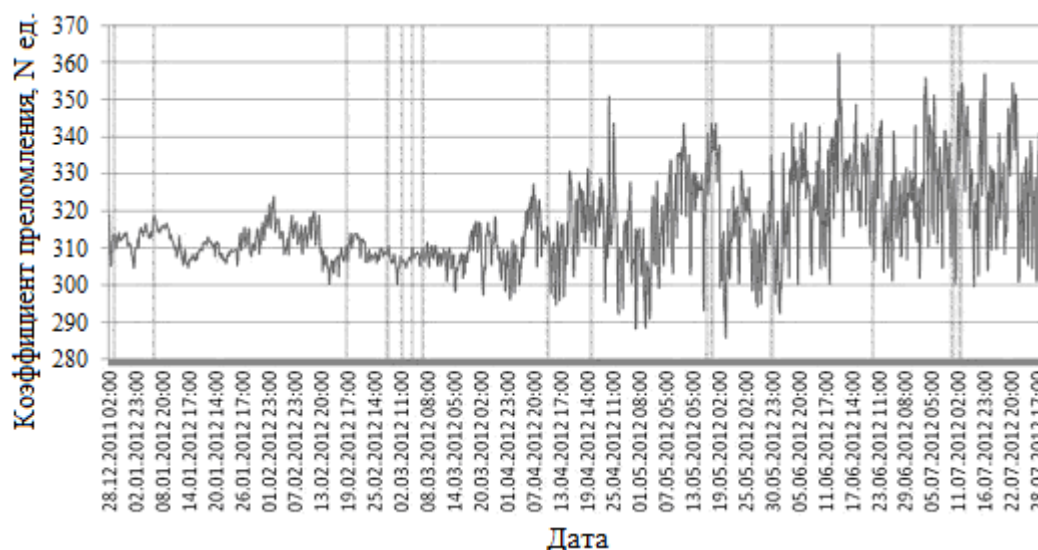


Рисунок 4.2 – Изменения индекса коэффициента преломления за период измерения для г. Полтава

На рис. 4.3, приведены прогнозируемые для г. Полтава по измеренным данным в г. Харьков, г. Смела и г. Сумы ошибки определения высоты и реальные (истинные) ошибки в г. Полтава, полученные с использованием экспериментальных данных и соотношений (4.1) для различных интервалов сглаживания. Если во входных данных отдельные выбросы ошибки измерения высоты достигали 10 м, то после сглаживания редкие интенсивные выбросы отсутствуют, а ошибки координат существенно уменьшаются. Видно удовлетворительное соответствие прогноза реально получаемым ошибкам, причем следует отметить, что увеличение интервала сглаживания оценок в окне от 6 минут (361отсчет) (рис.4.3, б), до 1 час (3601отсчет) (рис.4.3, в) улучшает качество прогноза. Поведение прогнозируемых и истинных ошибок не только высоты, но и плоскостных координат (широты и долготы) показано на рис.4.4.

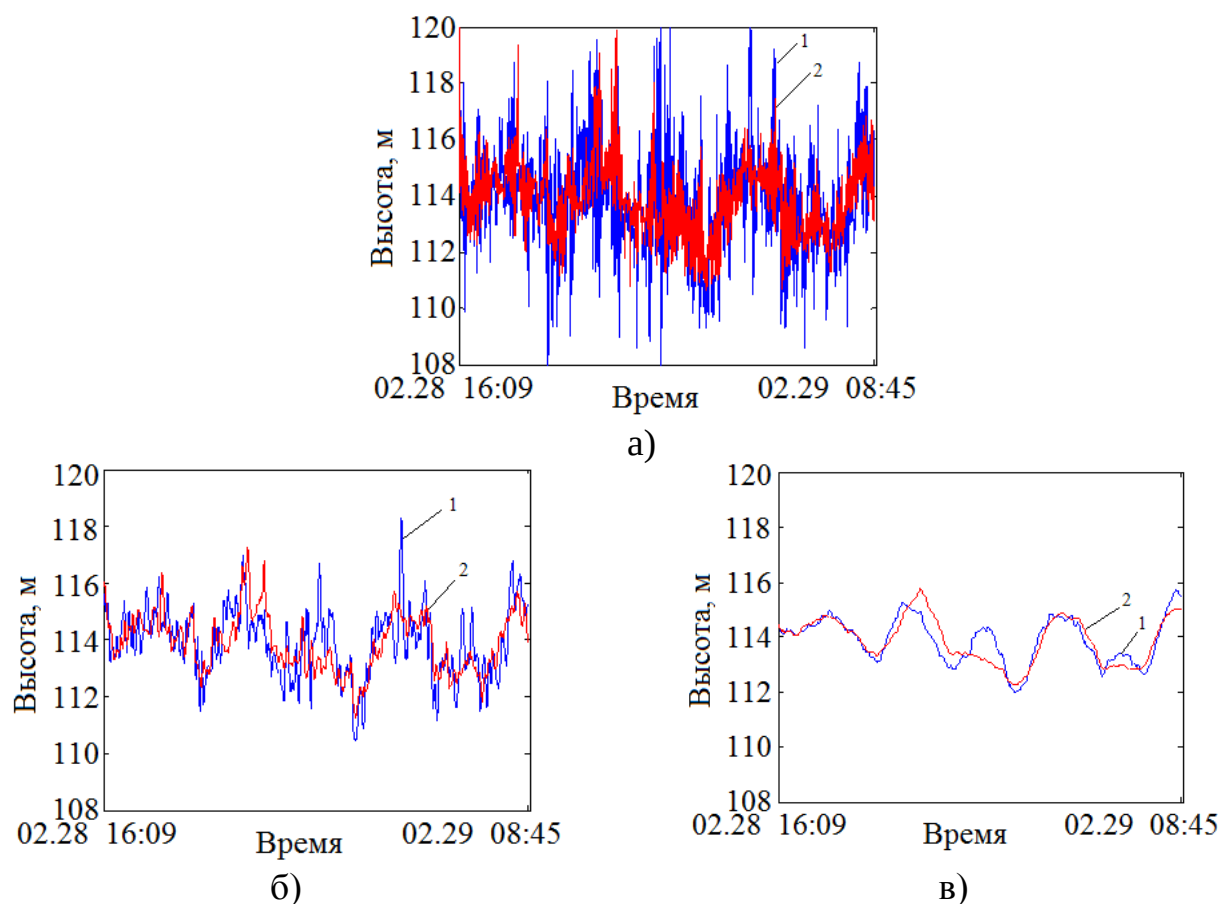


Рисунок 4.3 – Реальные (1) и прогнозируемые (2) данные измерения высоты для г. Полтава за период с 28.12.2011 по 29.12.2011: а – без фильтрации; б – при фильтрации в скользящем окне 361 отсчет (6 минут); в – при фильтрации в скользящем окне 3601 отсчет (1 час)

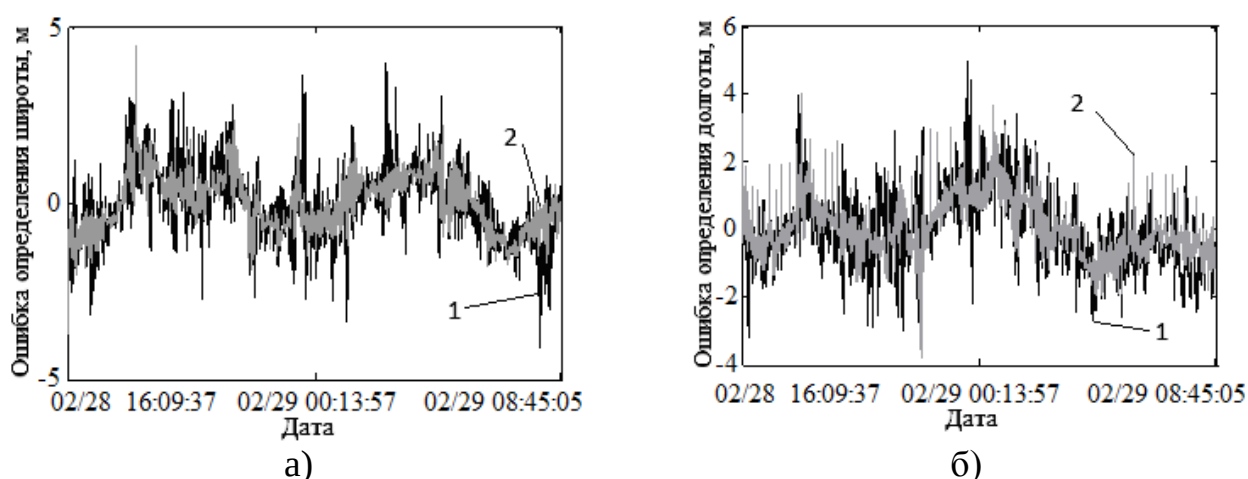


Рисунок 4.4 – Реальные (1) и прогнозируемые (2) ошибки определения широты (а) и долготы (б) для г. Полтава за период с 28.02.2012 по 29.02.2012

Для количественного анализа эффективности предложенного метода полученные значения прогноза ошибок координат и высоты, а также полученные экспериментально истинные ошибки были использованы для вычисления коэффициентов корреляции и критерия Фишера [201] для разных размеров скользящего окна сглаживающего фильтра. Высокое значение коэффициента корреляции будет свидетельствовать о довольно точном прогнозе поправки. В тоже время значение критерия Фишера (Φ) показывает, во сколько раз уменьшается остаточная дисперсия σ_{i+1}^2 при оценивании на $i+1$ шаге, по сравнению с i шагом σ_i^2

$$\Phi = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{i+1}^2}. \quad (4.3)$$

В нашем случае можно сравнивать начальную дисперсию процесса с дисперсией невязки между истинными значениями X и прогнозируемыми Y

$$\begin{aligned} \sigma_i^2 &= \sigma_x^2 = \langle (X - \bar{X})^2 \rangle, \\ \sigma_{i+1}^2 &= \langle ((X - \bar{X}) - (Y - \bar{Y}))^2 \rangle = \langle (X - \bar{X})^2 \rangle + \langle (Y - \bar{Y})^2 \rangle - 2\langle (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) \rangle. \end{aligned} \quad (4.4)$$

С учетом соотношений (4.4) выражение (4.3) запишем в виде

$$\sigma_{i+1}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\sigma_x \sigma_y R. \quad (4.5)$$

Тогда (4.3) с учетом (4.5) можно записать в виде

$$\Phi = (1 + \gamma^2 - 2\gamma R)^{-1}, \quad (4.6)$$

где $\gamma = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ – отношение среднеквадратичных отклонений выходного процесса и прогнозируемого.

При прогнозировании стремятся достичь того, чтобы полученный процесс был максимально похож на выходной. Для этого необходимо, чтобы, хотя бы моменты у этих процессов были одинаковы. Если $\sigma_x \approx \sigma_y$, то (4.6) примет следующий вид, в котором видна связь между коэффициентом корреляции и коэффициентом Фишера задается соотношением

$$\Phi \approx \frac{1}{2(1 - R)}. \quad (4.7)$$

Из приведенного соотношения видно, что чем выше корреляция между спрогнозированными и реально полученными данными, тем больше будет уменьшаться дисперсия ошибки определения координат. Значения коэффициентов корреляции и критерия Фишера для различных измерений до фильтрации и после фильтрации в скользящих окнах 361 отсчет и 3601 отсчет приведены в табл. 4.2. Из проведенных ранее исследований [202] было определено, что координаты долготы и широты по отдельности практически не коррелированы со средним за сутки коэффициентом преломления в приземных слоях тропосферы в отличие от измерений высоты. Это обусловлено тем, что тропосферная рефракция приводит к появлению ошибки измерения дальности, которая трансформируется в ошибку определения высоты расположения объекта, в то время как ошибка плоскостных координат обусловлена азимутальной неоднородностью (изменчивостью) коэффициента преломления.

Таблица 4.2 – Коэффициенты корреляции между реальными и прогнозируемыми данными и критерий Фишера для разных размеров скользящего окна

Дата	R_0	F_0	R_1	F_1	R_2	F_2
2011.12.28 – 2011.12.29	0,618	1,29	0,855	3,38	0,944	15,68
2012.01.05 – 2012.01.06	0,647	2,40	0,905	6,19	0,980	47,12
2012.02.28 – 2012.02.29	0,457	1,16	0,671	3,09	0,845	13,25
2012.03.01 – 2012.03.02	0,464	1,33	0,671	3,85	0,905	19,69
2012.03.03 – 2012.03.04	0,511	1,38	0,711	3,85	0,935	34,14
2012.03.05 – 2012.03.06	0,426	1,09	0,663	3,11	0,854	13,29
2012.04.09 – 2012.04.10	0,484	1,23	0,688	3,13	0,885	13,25
2012.04.19 – 2012.04.20	0,557	1,26	0,727	3,43	0,888	23,36
2012.05.15 – 2012.05.16	0,719	2,05	0,832	4,04	0,930	12,32
2012.05.16 – 2012.05.17	0,650	1,69	0,795	3,64	0,940	17,38
2012.05.30 – 2012.05.31	0,686	1,88	0,819	3,97	0,957	22,35
2012.06.22 – 2012.06.23	0,428	1,15	0,610	2,61	0,833	13,09
2012.07.10 – 2012.07.11	0,710	1,93	0,828	3,95	0,953	18,01
2012.07.11 – 2012.07.12	0,697	1,94	0,820	4,01	0,965	29,71

R_0, F_0 – коэффициент корреляции и критерий Фишера без фильтрации;

R_1, F_1 – коэффициент корреляции и критерий Фишера после фильтрации в скользящем окне № 1 (361 отсчет);

R_2, F_2 – коэффициент корреляции и критерий Фишера после фильтрации в скользящем окне № 2 (3601 отсчет).

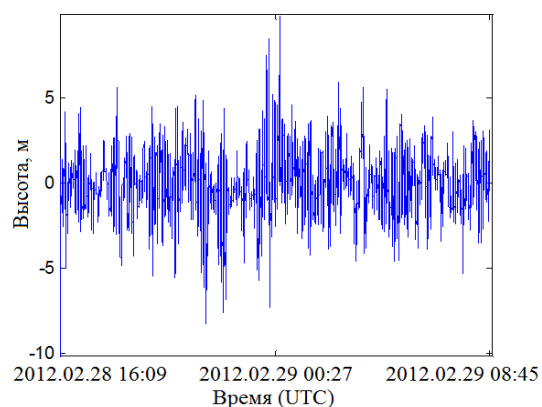
В зимний период наблюдаются меньшие флуктуации коэффициента преломления, что сопровождается меньшими значениями ошибки определения высоты. В летний же период при больших изменениях коэффициента преломления использование интерполяционного метода позволяет повысить устойчивость поправки благодаря достаточно высокой корреляции результата интерполяции с точкой прогноза, чем при использовании 1 базовой станции. Это обусловлено тем, что в отличие от зимнего периода, когда коэффициент корреляции между городами значительно выше, в весенне-летний период характер поведения коэффициента преломления в разных опорных точках может существенно отличаться, и поэтому использование данных в нескольких точках повышает устойчивость прогноза.

Анализ приведенных в табл. 4.2 значений коэффициентов корреляции и критерия Фишера показывает, что имеются дни, для которых коэффициенты корреляции меньше 0,5. При этом значения критерия Фишера так же малы. Как правило, это дни переходного сезона года, в основном весной, когда земля после зимы начинает прогреваться и могут возникать динамичные изменения коэффициента преломления. Их отклонение от стандартных моделей поведения и является причиной ухудшения прогноза ошибок определения координат. Из полученных результатов видно, что увеличение размера скользящего окна сглаживающего фильтра приводит к росту корреляции между обрабатываемыми данными, а так же к увеличению значений критерия Фишера. Видно, что коэффициент корреляции может достигать 0,98, а критерий Фишера – 47 единиц, при сглаживании фильтром с размером скользящего окна 3601 отсчет (интервал в 1 ч.) (табл. 4.3). Отметим, что при использовании стандартного метода дифференциальной коррекции будет возникать систематическая погрешность, связанная с сезонными флуктуациями координат, среднее значения которых для разных сезонов будет отличаться.

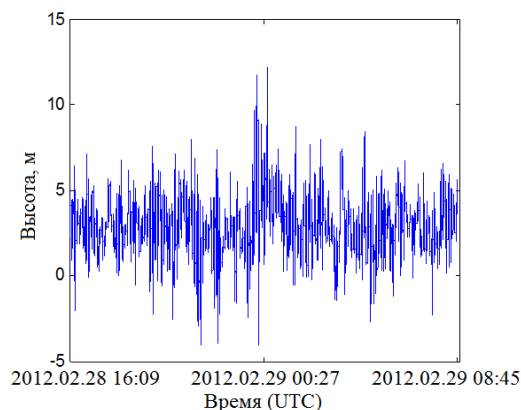
Таблица 4.3 – Уменьшение ошибок измерения высоты

Дата	Уменьшение ошибки σ_0 / σ_1 при использовании интерполяционного метода	Уменьшение ошибки σ_0 / σ_1 при использовании интерполяционного метода (после фильтрации в скользящем окне размером 361 отсчет)	Уменьшение ошибки σ_0 / σ_1 при использовании интерполяционного метода (после фильтрации в скользящем окне 3601 отсчетов)	Уменьшение ошибки σ_0 / σ_1 при использовании г. Харьков, как опорной точки	Уменьшение ошибки σ_0 / σ_1 при использовании г. Сумы, как опорной точки	Уменьшение ошибки σ_0 / σ_1 при использовании г. Смела, как опорной точки
2011.12.28 – 2011.12.29	1,14	1,84	3,96	0,97	0,95	1,11
2012.02.28 – 2012.02.29	1,08	1,76	3,69	1,08	0,74	0,87
2012.04.09 – 2012.04.10	1,11	1,77	3,64	1,13	0,79	0,91
2012.05.16 – 2012.05.17	1,30	1,91	4,17	1,31	0,96	1,07
2012.07.10 – 2012.07.11	1,39	1,98	4,24	1,42	1,00	1,08
2012.07.11 – 2012.07.12	1,39	2,00	5,45	1,43	1,13	1,06
2012.05.30 – 2012.05.31	1,37	1,99	4,72	1,38	1,02	1,15
2012.05.15 – 2012.05.16	1,43	2,01	3,51	1,46	1,15	1,06
2012.03.05 – 2012.03.06	1,04	1,76	3,64	1,02	0,70	0,83
2012.06.22 – 2012.06.23	1,07	1,61	3,61	1,06	0,79	0,91

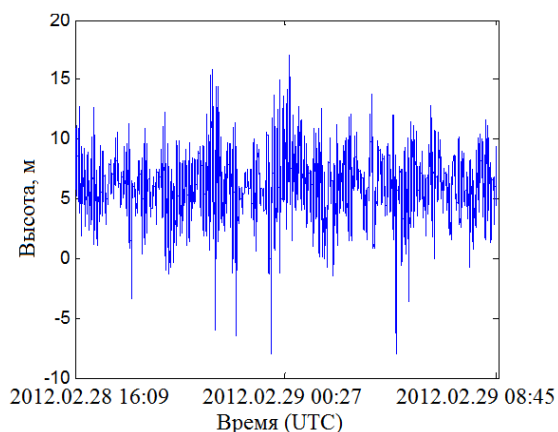
На рис. 4.5 показаны результаты, полученные при введении дифференциальных поправок, с помощью интерполяции данных 3 опорных пунктов, а также стандартным методом. Результаты, полученные для плоскостных координат, имеют аналогичный вид. Анализ приведенных данных показывает, что метод позволяет снизить ошибку измерения координат по отношению к ошибкам, полученным при использовании стандартных методов коррекции. Использование сглаженных данных позволяет получить ошибку измерения высоты не больше 2 м, связанную, в большей степени, с суточными колебаниями метеопараметров, в то время как при использовании стандартного метода, она может достигать 10...15 м.



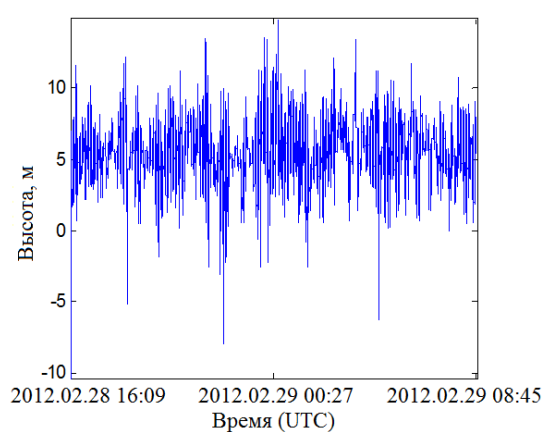
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.5 – Результаты уменьшения ошибки измерения высоты за период с 28.02.2012 - 29.02.2012: а – интерполяционный метод; б, в, г – стандартный дифференциальный метод; б – г. Полтава – г. Харьков; в – г. Полтава – г. Сумы; г – г. Полтава – г. Смела.

В табл. 4.4 приведены значения среднеквадратического отклонения и среднее значения для ошибок измерения плоскостных координат (долготы и широты) после внесения поправок с использованием прогнозируемых данных и стандартных дифференциальных поправок с использованием одной опорной точки. Из полученных результатов видно, что предложенный метод по сравнению со стандартным методом дифференциальной коррекции, как правило, уменьшает дисперсию ошибки координат для текущих значений на 20...25%. Причем меньшие выигрыши получаются зимой, когда и стандартный метод дает неплохой результат, а большие – летом и осенью, когда использование трехточечной опорной схемы дает выигрыш до 40%.

Таблица 4.4 – Значение ошибки после внесения поправки в измерения широты (Ш) и долготы (Д)

Дата		Интерполяционный метод	Дифференциальная коррекция с использованием в виде опорного г. Харьков	Дифференциальная коррекция с использованием в виде опорного г. Сумы	Дифференциальная коррекция с использованием в виде опорного г. Смела
2011.12.28 – 2011.12.29	Ш	$\sigma = 0.864$ $m=0$	$\sigma = 1.046$ $m=0.287$	$\sigma = 1.055$ $m=0.910$	$\sigma = 0.814$ $m=0.833$
	Д	$\sigma = 0,830$ $m=0$	$\sigma = 0,968$ $m= 0,832$	$\sigma = 1,034$ $m= 2,362$	$\sigma = 0,874$ $m= 2,035$
2012.02.28 – 2012.02.29	Ш	$\sigma = 0.719$ $m=0$	$\sigma = 0.683$ $m=0.166$	$\sigma = 1.013$ $m=1.395$	$\sigma = 0.969$ $m=0.905$
	Д	$\sigma = 0.769$ $m=0$	$\sigma = 0.763$ $m=0.899$	$\sigma = 1.065$ $m=0.858$	$\sigma = 0.972$ $m=0.573$
2012.04.09 – 2012.04.10	Ш	$\sigma = 0.746$ $m=0$	$\sigma = 0.726$ $m=0.141$	$\sigma = 1.119$ $m= -0.889$	$\sigma = 0.933$ $m=0.660$
	Д	$\sigma = 0,771$ $m=0$	$\sigma = 0,780$ $m= 0,938$	$\sigma = 1,169$ $m=0,533$	$\sigma = 0,951$ $m= 0,612$
2012.05.16 – 2012.05.17	Ш	$\sigma = 0.787$ $m=0$	$\sigma = 0.759$ $m=0.254$	$\sigma = 1.150$ $m=-0.730$	$\sigma = 1.001$ $m=0.152$
	Д	$\sigma = 0,787$ $m=0$	$\sigma = 0,785$ $m= 0,933$	$\sigma = 1,173$ $m=-0,354$	$\sigma = 0,982$ $m= 0,322$
2012.05.15 – 2012.05.16	Ш	$\sigma = 0.824$ $m=0$	$\sigma = 0.806$ $m=0.316$	$\sigma = 1.180$ $m=-0.004$	$\sigma = 1.046$ $m=-0.087$
	Д	$\sigma = 0,743$ $m=0$	$\sigma = 0,739$ $m= 0,813$	$\sigma = 1,119$ $m= 0,956$	$\sigma = 0,956$ $m= 1,411$
2012.03.05 – 2012.03.06	Ш	$\sigma = 0.735$ $m=0$	$\sigma = 0.757$ $m=0.378$	$\sigma = 0.971$ $m=0.122$	$\sigma = 0.880$ $m=0.934$
	Д	$\sigma = 0,729$ $m=0$	$\sigma = 0,725$ $m= 0,796$	$\sigma = 1,009$ $m= 0,250$	$\sigma = 0,903$ $m= 0,850$
2012.06.22 – 2012.06.23	Ш	$\sigma = 0.718$ $m=0$	$\sigma = 0.721$ $m=0.254$	$\sigma = 1.032$ $m=0.242$	$\sigma = 0.863$ $m=1.159$
	Д	$\sigma = 0,753$ $m=0$	$\sigma = 0,745$ $m= 0,786$	$\sigma = 1,063$ $m= 0,242$	$\sigma = 0,905$ $m= 1,159$
2012.07.10 – 2012.07.11	Ш	$\sigma = 0.750$ $m=0$	$\sigma = 0.724$ $m=0.312$	$\sigma = 1.049$ $m=2.359$	$\sigma = 0.955$ $m=2.378$
	Д	$\sigma = 0.747$ $m=0$	$\sigma = 0,734$ $m=0,885$	$\sigma = 1,034$ $m=1,165$	$\sigma = 0,912$ $m=0,979$
2012.07.11 – 2012.07.12	Ш	$\sigma = 0.786$ $m=0$	$\sigma = 0.781$ $m=0.325$	$\sigma = 1.041$ $m=0.779$	$\sigma = 0.911$ $m=0.791$
	Д	$\sigma = 0,783$ $m=0$	$\sigma = 0,776$ $m=0,907$	$\sigma = 1,071$ $m=1,693$	$\sigma = 0,915$ $m=2,076$

σ – СКО ошибки определения координат, м;

m – математическое ожидание ошибки, м.

Кроме того, коррекция ошибок определения координат с использованием одной опорной точки, может приводить к появлению систематической ошибки, в то время как в трехточечном методе она отсутствует, или значительно меньше (см. табл. 4.4). При анализе эффективности использования интерполяционного метода были рассчитаны значения квантилей на уровнях обеспечения 0.9 и 0.99, которые приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 - Результирующие средние значения квантилей на уровнях 0.9 и 0.99 для предложенного интерполяционного метода и стандартного дифференциального метода коррекции координат

Координата	Изначальная ошибка		Ошибка после коррекции интерполяционным методом		Ошибка после коррекции стандартным дифференциальным методом с использованием в качестве опорной точки г. Харьков		Ошибка после коррекции стандартным дифференциальным методом с использованием в качестве опорной точки г. Сумы		Ошибка после коррекции стандартным дифференциальным методом с использованием в качестве опорной точки г. Смела	
	X0.9	X0.99	X0.9	X0.99	X0.9	X0.99	X0.9	X0.99	X0.9	X0.99
Высота	9,643	11,827	1,959	3,866	4,963	6,913	8,400	10,873	7,61	9,76
Долгота	2,448	3,534	1,009	2,094	1,837	2,860	2,132	3,586	2,163	3,617
Широта	2,301	3,435	0,921	1,987	1,121	2,219	1,996	3,438	1,917	3,225

X0.9 – квантиль на уровне обеспечения 0.9, м;

X0.99 – квантиль на уровне обеспечения 0.99, м.

Анализ данных, приведенный в табл. 4.5 показывает, что присутствующие после коррекции редкие anomalно большие ошибки при определении координат значительно меньше при использовании интерполяционного метода. Из усредненных результатов видно, что на уровне 0.9 предложенный метод позволяет уменьшить амплитуду максимальных выбросов в 4.5 раза, а на уровне 0.99 – в 3 раза.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что использование интерполяционного метода формирования коррекции позволяет добиться стабильной поправки, которая дает корректировку не хуже, чем полученная стандартным дифференциальным методом. При этом пропадает необходимость выбора опорной точки, так как при использовании ближайшей референсной станции, которая предположительно должна давать хорошую коррекцию, результирующая поправка не всегда хорошо коррелирована с реальными ошибками и может давать систематическую ошибку.

4.1.2 Интерполяционный метод коррекции псевдодальностей

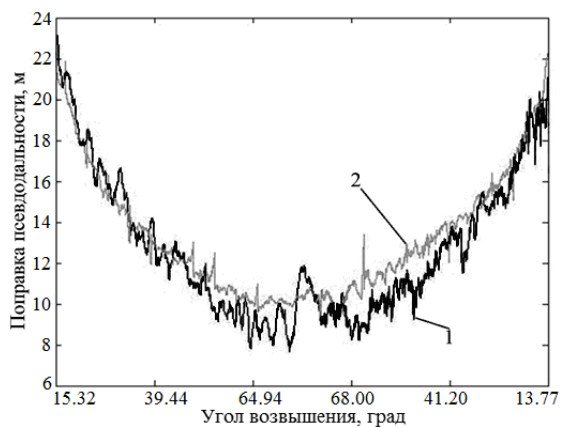
Так как координатная информация является результатом решения навигационной задачи, в которой используются измеренные псевдодальности до различных спутников, то для получения более точных измерений можно применять коррекцию самих псевдодальностей. Для этого, по аналогии с координатами в соотношениях (4.1) и (4.2) нужно заменить ошибку координат на ошибку псевдодальности $\Delta Z \rightarrow \Delta r$. При введении дифференциальных поправок наиболее перспективным является использование дифференциальных поправок псевдодальностей до конкретного спутника, одновременно наблюдаемого в опорной и измеряемой точках. Для того, чтобы их получить, необходимо знать координаты опорных точек. Тогда с учетом того, что эфемериды спутников также известны, можно посчитать дальность до наблюдаемого спутника. Имея псевдодальности к нескольким спутникам, а также истинные дальности, можно получить дифференциальные поправки псевдодальности, которые учитывают дополнительную задержку сигнала в тропосфере, ионосфере и ошибку в измерении места положения спутника, а также синхронизации шкал часов. Последняя ошибка может устраняться при решении навигационной задачи. Впервые подобный подход был использован в работе [26] для анализа тропосферных и ионосферных ошибок.

Для сравнения дифференциальных коррекций изменения псевдодальностей к измерительным пунктам в г. Харьков, г. Сумы, г. Смела были выбраны 4 спутника GPS с номерами 01, 09, 28, 32, сигналы которых в приблизительно одно и тоже время (14.01.12 с 9:00 до 11:00) принимались измерительными пунктами в исследуемых городах (см. табл. 4.6). Для анализа выбирались данные при углах возвышения спутников до 20 градусов.

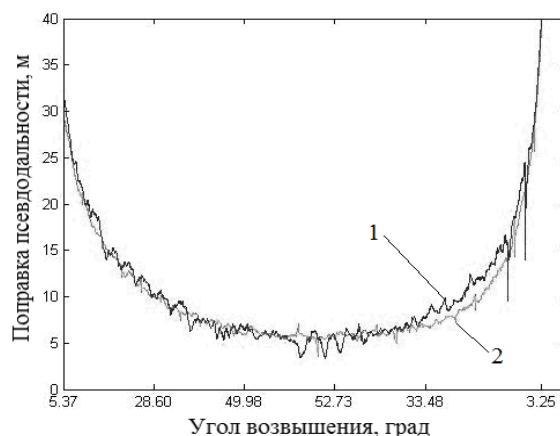
Таблица 4.6 – Числовые характеристики регрессионных зависимостей дифференциальных поправок для пар городов за 14.01.12

	Харьков - Смела		Харьков - Сумы		Смела - Сумы	
	Время	R	Время	R	Время	R
GPS 01 восход	09:27:35 10:07:22	0,992	09:14:23 10:04:00	0,997	09:14:23 10:00:59	0,989
GPS 09 восход	09:09:05 10:15:23	0,994	09:01:14 10:17:33	0,993	09:01:14 10:18:04	0,996
GPS 09 заход	10:15:23 11:21:22	0,959	10:18:04 11:40:31	0,942	10:18:04 11:31:49	0,993
GPS 28 восход	09:37:06 10:25:52	0,981	09:28:15 10:26:10	0,968	09:28:15 10:30:49	0,994
GPS 28 заход	10:28:02 11:17:22	0,978	10:28:02 11:45:50	0,987	10:30:50 11:50:12	0,992
GPS 32 восход	09:31:36 10:08:37	0,967	09:31:36 10:07:30	0,998	09:39:15 10:00:46	0,973

Следует отметить, что уже при малых углах места сразу после восхода или перед заходом наблюдается высокая корреляция поправок псевдодальностей. Это говорит о том, что при увеличении угла места и выходе спутника в рабочую зону углов измерения корреляция будет еще больше, так как при малых углах сильно влияют условия распространения радиоволн – тропосфера и ионосфера. На рис. 4.6 показаны реальные и прогнозируемые при помощи интерполяционного метода значения полученной дифференциальной поправки к измерению псевдодальности, а на рис. 4.7 – качественная картина поведения ошибок полученных дифференциальных поправок псевдодальности.

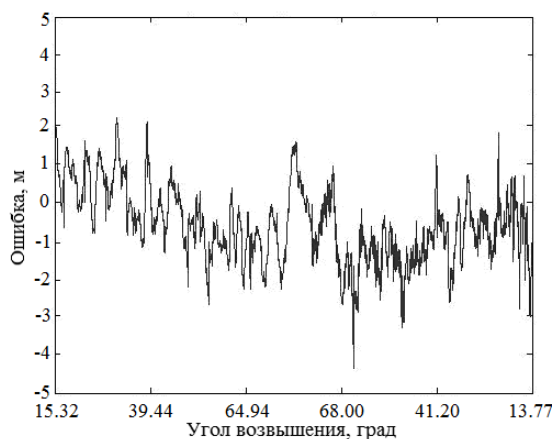


а)

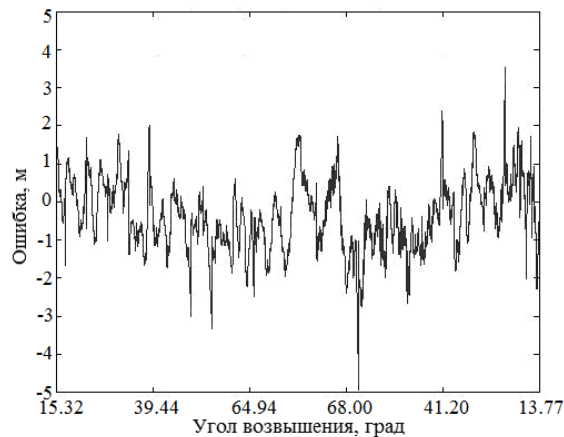


б)

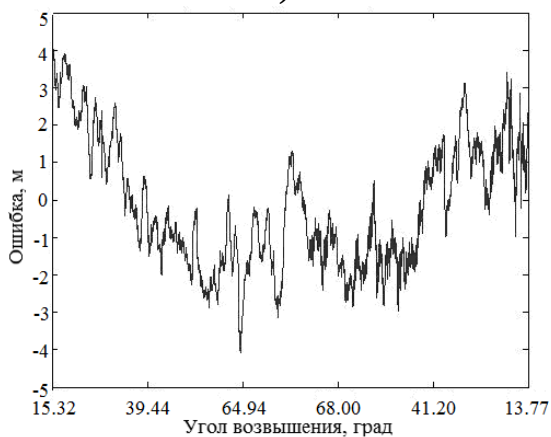
Рисунок 4.6 – спрогнозированные (2) и экспериментально полученные (1) дифференциальные поправки к измерению псевдодальности:
а) 11.07.2012 -12.07.2012 б) 23.02.2012 - 24.02.2012



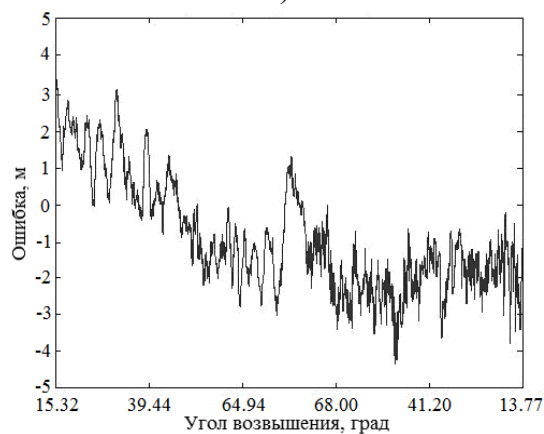
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 – Результаты уменьшения ошибки измерения псевдодальности за период с 11.07.2012 - 12.07.2012: а – интерполяционный метод, б, в, г – стандартный дифференциальный метод с использованием пар городов: б – Харьков - Полтава, в – Сумы - Полтава, г – Смела – Полтава

Из рисунков видно, что использование предлагаемого метода позволяет получать меньшие ошибки после внесения поправки, а следовательно увеличивает точность определения псевдодальности. В табл. 4.7 приведены количественные характеристики: коэффициент корреляции R , математическое ожидание m и среднеквадратическое отклонение σ .

Из табл. 4.7 видно, что использование интерполяционного метода для коррекции псевдодальностей позволяет получить достаточно высокую корреляцию с реальными данными. Значение остаточной ошибки измерений σ после введения коррекции при этом не превышало 1.26, тогда как при использовании 1 опорной точки это значение могло возрасти в 2.5 раза.

Из этого следует, что интерполяционный метод позволяет получить более устойчивые значения по сравнению со значениями, полученными при помощи стандартного дифференциального метода. Интерполяционный метод дает более устойчивый результат, который слабее зависит от выбора опорных точек.

Таблица 4.7 – Числовые характеристики дифференциальных поправок

Дата	Интерполяционный метод	Стандартный дифференциальный метод		
		Харьков - Полтава	Сумы - Полтава	Смела - Полтава
1	2	3	4	5
2012.07.11 (21:26) – 2012.07.12 (03:00)	$R = 0.983$ $m = -0.504$ $\sigma = 1.393$	$R = 0.982$ $m = -0.353$ $\sigma = 1.318$	$R = 0.960$ $m = -0.06$ $\sigma = 2.009$	$R = 0.976$ $m = -0.657$ $\sigma = 1.759$
2012.01.05 (10:30-15:30)	$R = 0.963$ $m = -0.617$ $\sigma = 0.979$	$R = 0.967$ $m = -0.385$ $\sigma = 0.924$	$R = 0.931$ $m = -0.186$ $\sigma = 1.668$	$R = 0.898$ $m = -0.586$ $\sigma = 1.557$
2012.04.22 (03:00-08:00)	$R = 0.976$ $m = -0.271$ $\sigma = 1.107$	$R = 0.980$ $m = -0.179$ $\sigma = 1.119$	$R = 0.932$ $m = 0.037$ $\sigma = 1.927$	$R = 0.939$ $m = -0.353$ $\sigma = 1.595$
2011.12.29 (01:01) – 2011.12.29 (06:08)	$R = 0.990$ $m = -0.551$ $\sigma = 1.212$	$R = 0.996$ $m = -0.041$ $\sigma = 3.663$	$R = 0.988$ $m = 0.915$ $\sigma = 2.021$	$R = 0.963$ $m = -0.634$ $\sigma = 1.860$
2012.06.13 (23:23) – 2012.06.14 (04:45)	$R = 0.981$ $m = 0.587$ $\sigma = 1.082$	$R = 0.985$ $m = 0.859$ $\sigma = 1.532$	$R = 0.972$ $m = -0.036$ $\sigma = 1.001$	$R = 0.955$ $m = 0.342$ $\sigma = 1.765$

Продолжение таблицы 4.7

1	2	3	4	5
2012.05.31 (00:20) – 2012.05.31 (05:47)	$R = 0.988$ $m = -0.518$ $\sigma = 1.260$	$R = 0.989S$ $m = -0.298$ $\sigma = 1.139$	$R = 0.969$ $m = -0.064$ $\sigma = 1.930$	$R = 0.974$ $m = -0.789$ $\sigma = 1.785$
2012.02.28 (20:29) – 2012.02.29 (01:46)	$R = 0.984$ $m = 0.294$ $\sigma = 1.328$	$R = 0.985$ $m = 0.260$ $\sigma = 1.691$	$R = 0.971$ $m = -1.499$ $\sigma = 2.060$	$R = 0.968$ $m = -0.092$ $\sigma = 1.750$
2012.05.17 (00:10) – 2012.05.17 (6:45)	$R = 0.990$ $m = -0.376$ $\sigma = 1.101$	$R = 0.992$ $m = -0.262$ $\sigma = 0.972$	$R = 0.971$ $m = 0.179$ $\sigma = 1.808$	$R = 0.978$ $m = -0.437$ $\sigma = 1.618$
2012.02.23 (20:50) – 2012.02.24 (02:07)	$R = 0.988$ $m = 0.442$ $\sigma = 1.060$	$R = 0.988$ $m = 0.299$ $\sigma = 1.325$	$R = 0.976$ $m = -1.578$ $\sigma = 1.638$	$R = 0.969$ $m = 0.189$ $\sigma = 1.684$
2012.06.22 (22:44) – 2012.06.23 (04:12)	$R = 0.990$ $m = -0.391$ $\sigma = 1.168$	$R = 0.990$ $m = -0.193$ $\sigma = 1.112$	$R = 0.959$ $m = -0.027$ $\sigma = 2.175$	$R = 0.977$ $m = -0.647$ $\sigma = 1.649$
2012.01.05 (00:22) – 2012.01.05 (05:33)	$R = 0.972$ $m = 0.639$ $\sigma = 1.260$	$R = 0.982$ $m = 0.265$ $\sigma = 1.248$	$R = 0.947$ $m = -2.985$ $\sigma = 3.125$	$R = 0.938$ $m = 0.389$ $\sigma = 1.763$

R – коэффициент корреляции;

m – математическое ожидание ошибки, м;

σ – СКО ошибки, м.

4.2 Устранение аномально-высоких ошибок при определении координат ГНСС

4.2.1 Устранение аномально-высоких ошибок при измерении пространственных координат

При проведении регулярных ГНСС измерений видно, что в измеряемых координатах иногда могут наблюдаться аномально-высокие выбросы, которые могут существенно превышать средний уровень ошибок определения координат и повторятся несколько раз в сутки с определенной периодичностью. Одной из причин их появления может быть многолучевость в канале распространения радиоволн между ГНСС и приемником, которая может появиться как следствие отражения от приподнятых инверсионных слоев тропосферы, образующихся за

счет испарений земли и температурных инверсий, особенно летом и в переходные сезоны (осенью и весной). Другой причиной возникновения аномально-высоких выбросов может быть изменение количества спутников в созвездии, используемых в решении навигационной задачи. Подобные выбросы могут достигать 10...20 м и, несмотря на относительно большой период повторения, могут быть опасны, особенно при использовании приемников ГНСС в авиации. Как и в случае коррекции координат, устранение аномально-высоких выбросов требует разработки специальных методов обработки. Целью данного подраздела является анализ методов обработки сигналов, которые позволяют уменьшать вероятность прохождения на выход системы измерения координат аномально высоких выбросов и тем самым уменьшить вероятность использования такой информации для принятия решений.

Так как обычные методы фильтрации не позволяют качественно устранять аномальные выбросы, то для улучшения качества фильтрации целесообразно воспользоваться дополнительным информационным параметром о начале и конце выброса, который необходимо исключить. В качестве такого параметра может выступать первая и вторая производные, которые оценивают скорость и ускорение изменения информационного параметра (высоты, долготы, широты). Также для уменьшения уровня шума при фильтрации и более точного выявления выброса стоит увеличить размер фильтрующего окна до 256 отсчетов. На рис. 4.7 представлены результаты фильтрации (верхний график) и поведение первой и второй производной (средний и нижний график соответственно).

Для анализа проверялись 2 фильтра, дополненные алгоритмом вычисления производной: медианная фильтрация и скользящее среднее. Если скользящее окно, которое используется для медианной фильтрации и вычисления скользящего среднего, имеет k отсчетов, то для вычисления производной используется такой же интервал в k отсчетов.

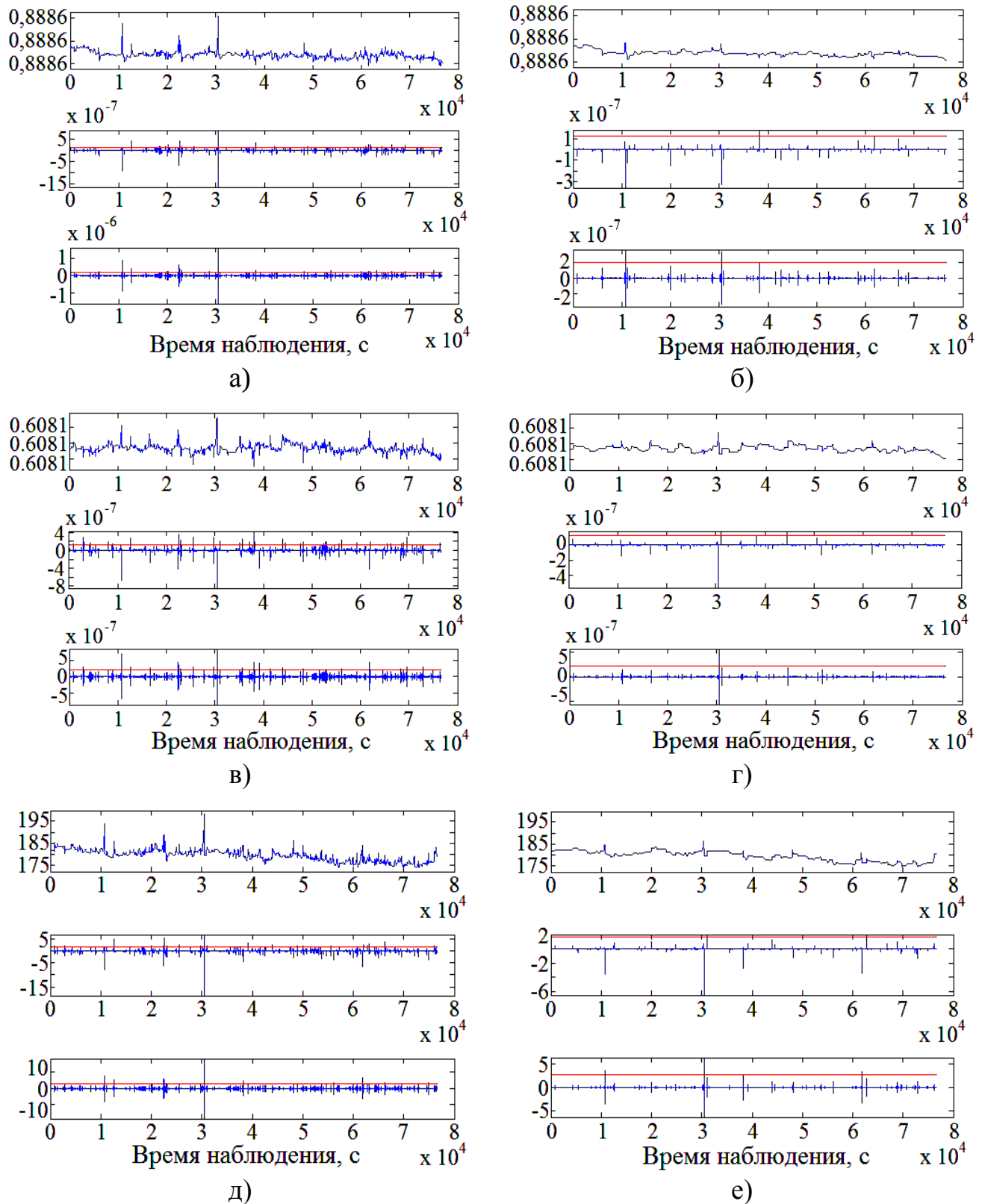


Рисунок 4.7 – Удаление импульсной помехи с использованием медианной фильтрации (верхний график – изменение координат, средний – первая производная, нижний – вторая производная): г. Сумы за период 2012.01.04–05: а, б, в, – $k=16$; г, д, е – $k=256$; а, б – широта; в, г – долгота; д, е – высота

Как видно из приведенных рисунков, дополнение каналами производных позволяет повысить вероятность обнаружения выбросов и исключения их из реализации.

При анализе признаками импульсной помехи будем считать следующее.

1) Значительное, в сравнении с оценкой скользящего среднего информационного параметра, возрастание его значения, то есть $\hat{S}_i / \sigma_i \geq \alpha_0$, где $\sigma_i \approx \frac{1}{l} \sum_i^l S_i$, а l – интервал оценивания среднего значения $l \geq k$. Отметим, что окно сглаживания k выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, снизить уровень шума, а с другой, оно не должно существенно искажать импульсную помеху. Это означает, что окно должно быть равно или меньше длительности импульсной помехи. Для определения длины окна сглаживания можно экспериментально изучить распределение длительности выбросов.

2) Увеличение информационного параметра происходит резко, то есть скорость изменения значительно увеличивается $\hat{S}_i - \hat{S}_{i-k} \geq \alpha_1$. Характерно, что на переднем фронте происходит резкий положительный скачек производной, а на заднем – отрицательный. Тогда на заднем фронте $\hat{S}_{i+n-k} - \hat{S}_{i+m} \geq \alpha_1$ – конец импульсной помехи длительностью m отсчетов. Для промежуточных значений $m - \hat{S}_{i+n-k} - \hat{S}_{i+m} \leq \alpha_1$, тогда при i – начало выброса, а при $i+m$ – его конец. Следовательно, для значений $i-k$ до $i+m$ значения определяются интерполяцией левого (до импульса помехи) и правого (после импульса помехи) значениями. Для выбора порога α_1 необходимо изучить распределение значений производной во время выбросов.

На рис. 4.8 представлены результаты фильтрации реальных координат при использовании предложенного подхода. Как и при обычной фильтрации, количественная оценка эффективности устранения импульсной помехи производилась на основании статистических характеристик сигналов на входе и выходе, а также квантилей аномально-высоких значений ошибок определения координат.

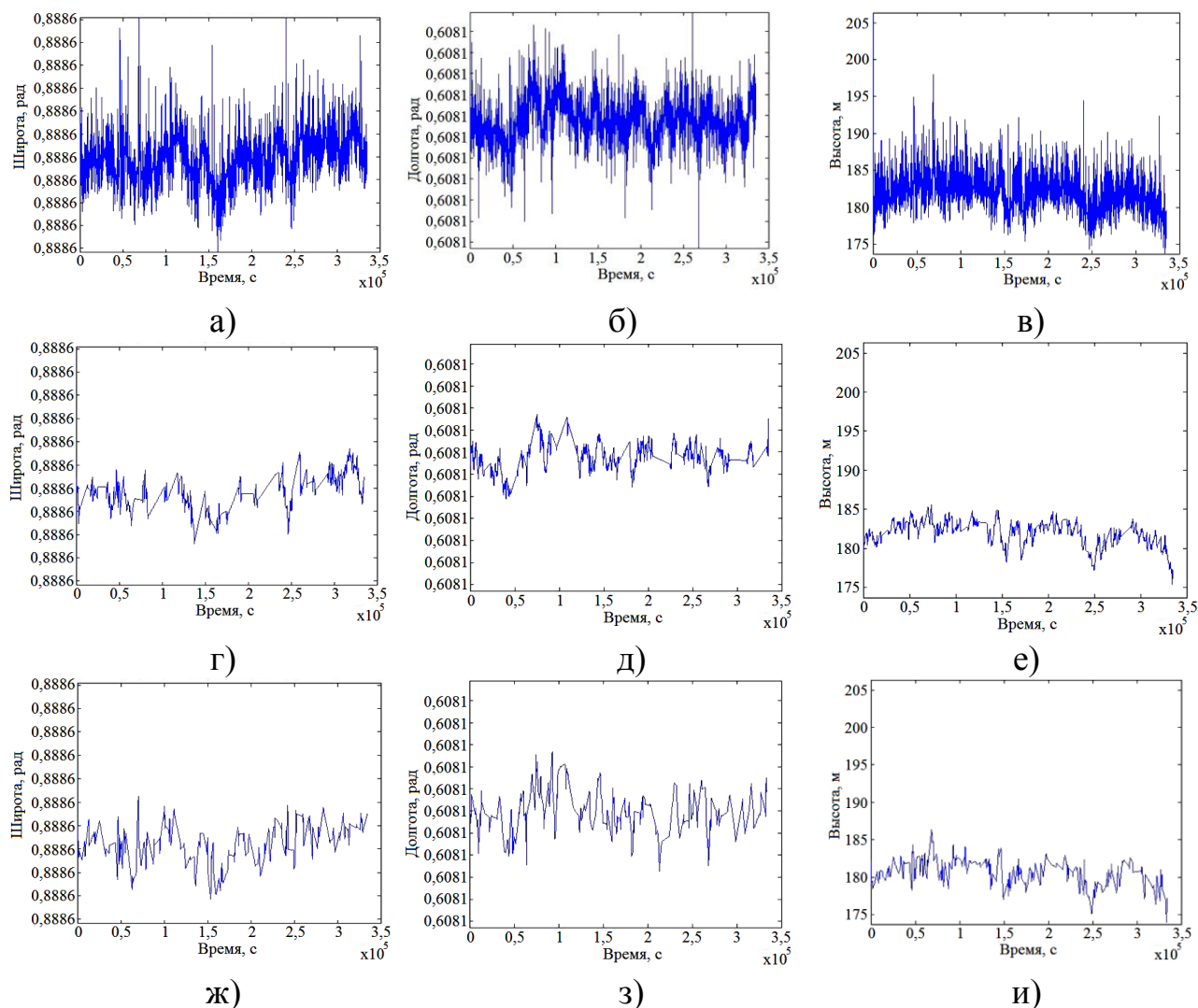


Рисунок 4.8 – Результаты экспериментальной проверки алгоритмов медианной (г, д, е) и НЧ фильтрации (ж, з, и) с каналом определения производной при устранении импульсной помехи для г. Сумы за период 2012.07.05–09: а, г, ж – широта; б, д, з – долгота; в, е, г – высота; а, б, в – входные данные

На рис. 4.9 показаны плотности (верхние кривые) и интегральные функции (нижние кривые) распределения ошибок определения информационных параметров на входе и выходе системы. По оси абсцисс значения центрированы относительно среднего и нормированы на среднеквадратичное отклонение. Следует отметить, что после применения алгоритмов фильтрации функция распределения сужается, а в плотности распределения появляется дискретная (узкая дельта-подобная) компонента.

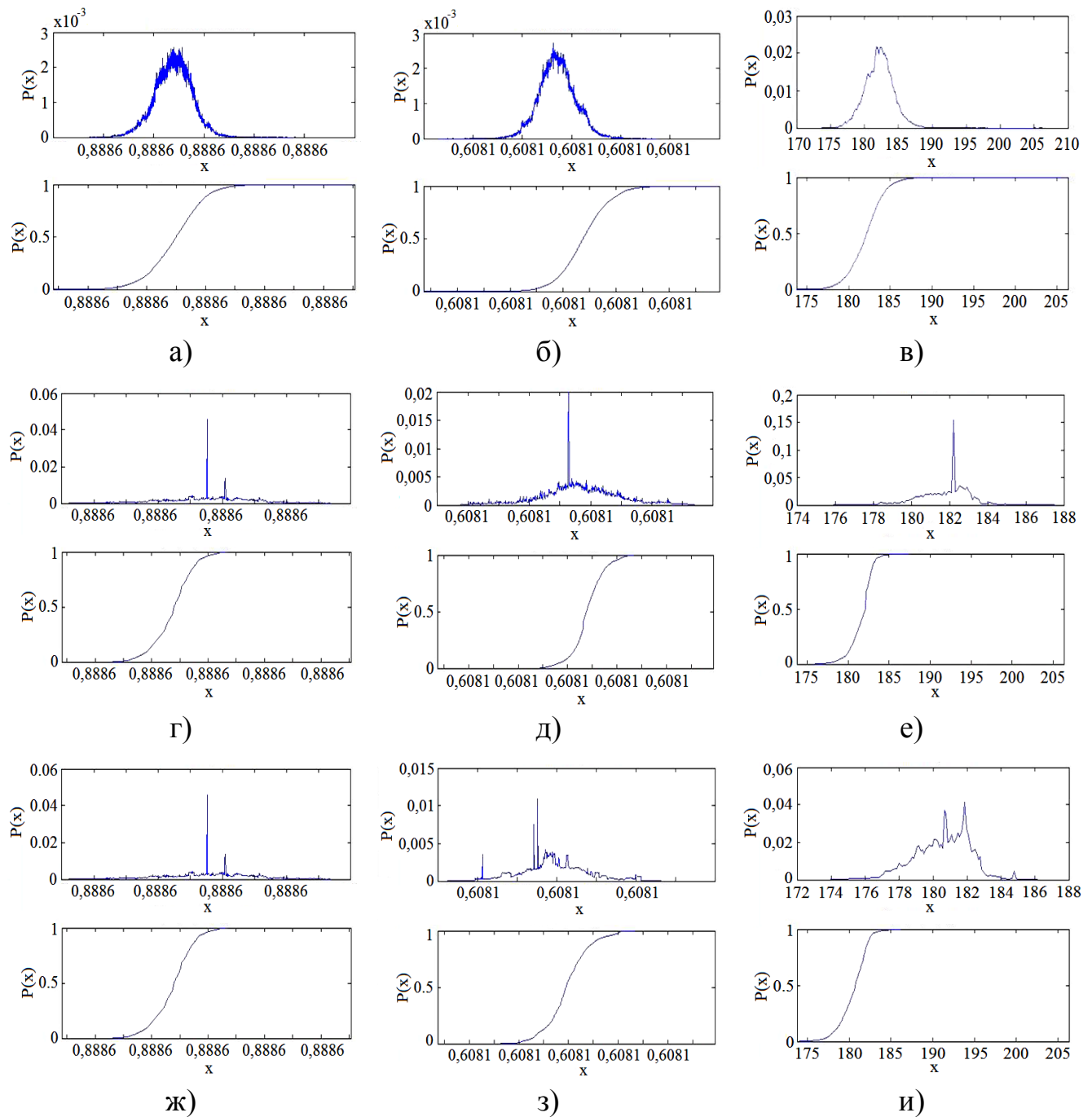


Рисунок 4.9 – Плотности распределения (верхние кривые) и интегральные функции распределения (нижние кривые) сигнала на входе и выходе алгоритмов медианной (г, д, е) и НЧ фильтрации (ж, з, и) с каналом производной для г. Сумы за период 2012.05.07–09: а, г, ж – ширина; б, д, з – долгота; в, е, и – высота; а, б, в – входные данные

Оценены квантили на уровнях обеспеченности 0.9 и 0.99, которые позволяет

проанализировать эффективность предложенных алгоритмов. Они представлены в табл. 4.8. Коэффициент преломления изменялся в пределах от 307 до 350 N ед.

Таблица 4.8 – Отношение значений квантилей на уровнях 0.9 и 0.99 для функций распределения ошибок определения информационных параметров

Город Сумы с 05.07.2012 14:30 по 09.07.2012 11:14	Информационный параметр	Значение	Значение после фильтрации	
			Медианная	Скользящее среднее
	Широта	$X_{0,9i}/X_{0,90}$	0,608	0,325
		$X_{0,99i}/X_{0,990}$	0,634	0,459
	Долгота	$X_{0,9i}/X_{0,90}$	0,746	0,253
		$X_{0,99i}/X_{0,990}$	0,660	0,545
	Высота	$X_{0,9i}/X_{0,90}$	0,563	0,235
		$X_{0,99i}/X_{0,990}$	0,489	0,441

Видно, что алгоритм среднего скользящего с использованием дополнительного канала первой производной позволяет снизить величину выбросов на уровне обеспеченности 0,99 до 0,44...0,54 от уровня выходного процесса (в нормированных координатах) и до 0,235...0,325 на уровне 0,9. Для медианного фильтра на уровне 0,99 достигается снижение ошибки до 0,489...0,66 и до 0,563...0,746 на уровне 0,9.

4.2.2 Использование особенностей поведения сигналов ГНСС при малых углах наблюдения для повышения точности измерений

Обычно при ГНСС-измерениях координат используются углы места спутника больше $5...10^\circ$. Это обуславливается тем, что при низких углах места, возникают большие ошибки, связанные с условиями распространения радиоволн через слои ионосферы и тропосферы, а также многолучевостью в канале распространения. Увеличение толщи ионосферы и тропосферы, через которые вынуждены проходить сигналы от спутников, приводит к некомпенсированным ошибкам, а также к более сильному влиянию дополнительного отражения.

Анализируя уровень флуктуаций принятых сигналов под малыми углами с момента восхода и до момента захода спутника за горизонт, можно производить исключение из решения навигационной задачи спутников, для которых

наблюдается повышенный уровень флуктуаций сигнала, превышающий заранее заданный порог. Поскольку при малых углах сильнее проявляются атмосферные эффекты и многолучевость, то анализируя поведения сигнала при малых углах места можно отбраковывать спутники с большим уровнем флуктуаций, не вдаваясь в детали, чем эти флуктуации вызваны.

На рис. 4.10 приведены два радиовосхода спутников GPS, где видно, что могут наблюдаться различные варианты поведения уровней сигналов. Зимой уровень флуктуаций сигнала – невязка относительно скользящего среднего не превышает ± 3 дБ. Летом за счет влияния атмосферных процессов могут наблюдаться более существенные флуктуации сигналов, достигающие 15 дБ.

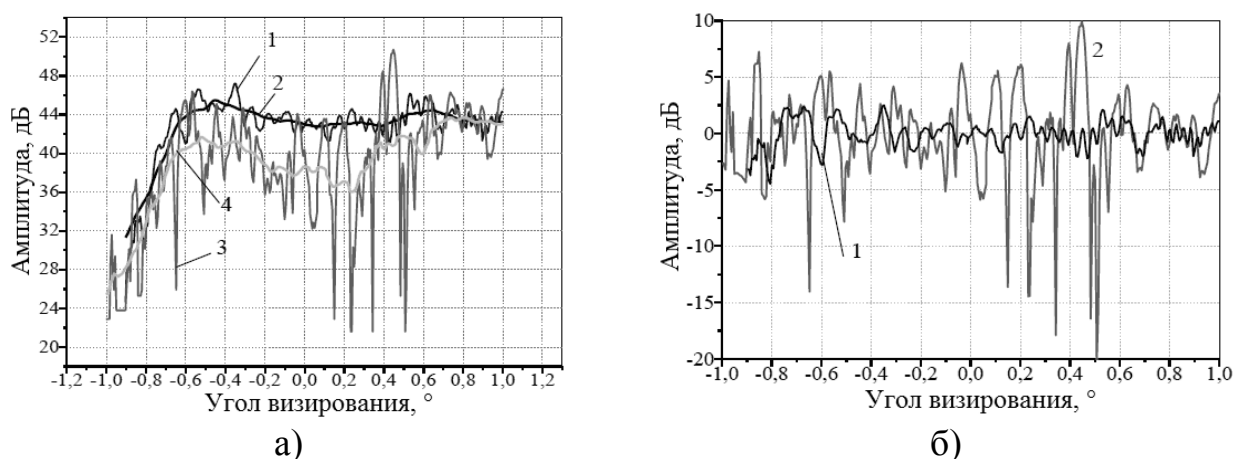


Рисунок 4.10 – Поведение сигнала GPS при радиовосходе: а) 1 – декабрь, 2 – скользящее среднее по 40 точкам, 3 – май, 4 – скользящее среднее по 40 точкам; б) невязка: 1 – декабрь, 2 – май

Таким образом, последовательным исключением из решения навигационной задачи отдельных спутников можно добиться отсутствия выбросов по высоте. После исключения из навигационного решения спутников, с которыми связаны выбросы, дальнейшее исключение спутников не дает улучшения точности. Для примера приведено измерение высоты в г. Сумы (см. рис. 4.11) Во время выброса по высоте в обработке участвовали спутники GPS15 – заходящий, GPS29 – восходящий, GPS20 и GPS32 – пролетающие над линией горизонта. Поведение уровней сигналов для исследуемых спутников приведено на рис. 4.12.

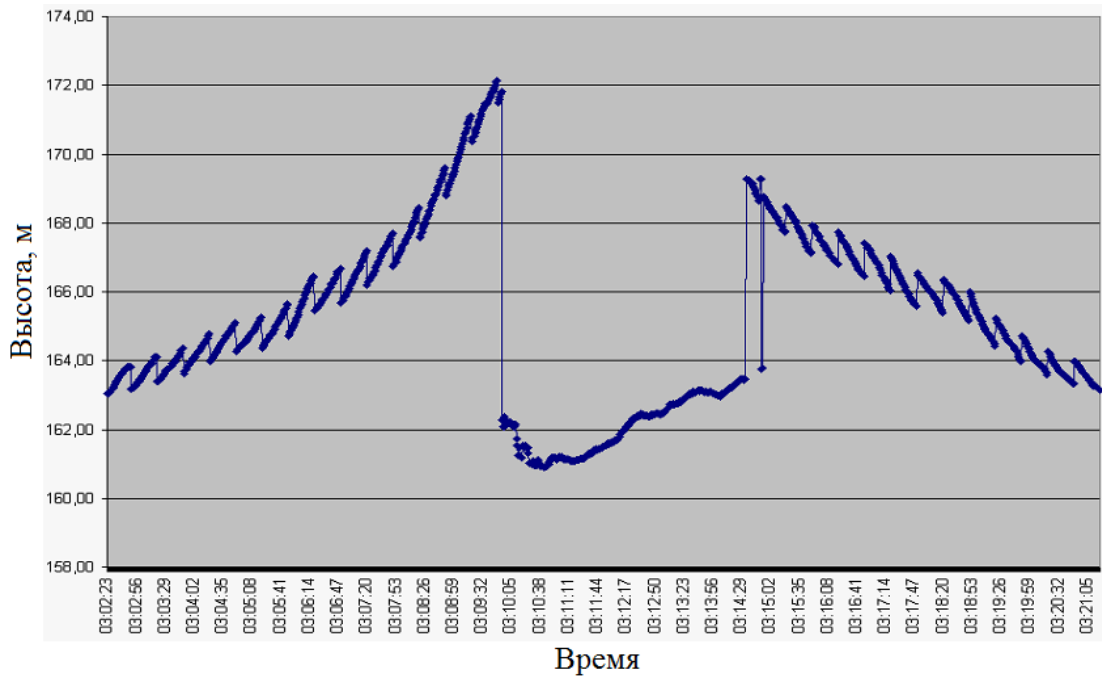


Рисунок 4.11 – Зависимость высота по результатам решения навигационной задачи в пункте приема г. Сумы

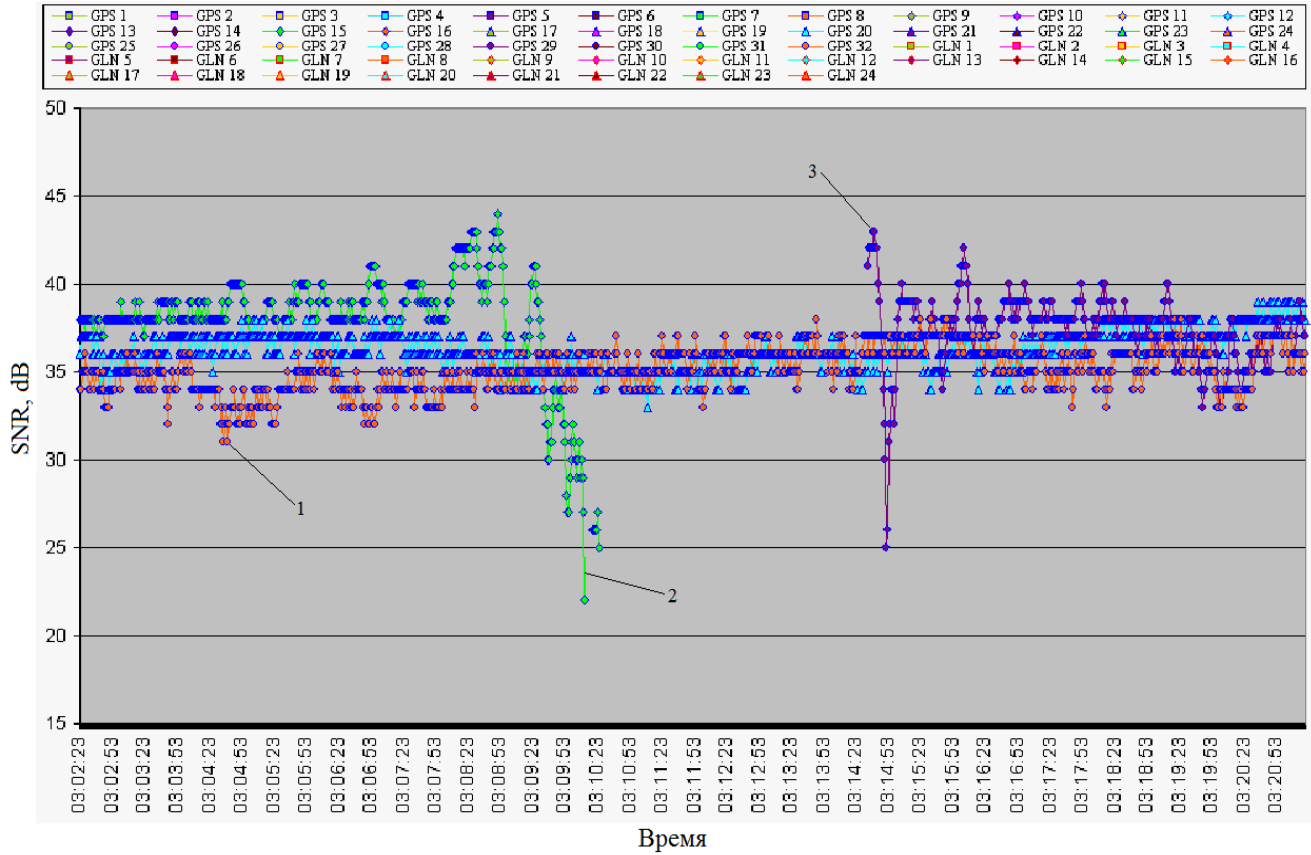


Рисунок 4.12 – Уровни сигналов для анализируемых спутников:
1 – GPS 32, 2 – GPS 15, 3 – GPS 29

Видно, что при заходе соотношение сигнал/шум для спутника снижается на 10-15 дБ, что сопровождается существенным увеличением флуктуаций сигнала. На рис. 4.13 приведены результаты исключения спутников из решения навигационной задачи. Как видно из представленных рисунков, исключение спутника GPS15 приводит к исчезновению первого перепада по высоте, а исключение GPS29 – к исчезновению второго перепада, что свидетельствует о влиянии заходящих и восходящих спутников на появление аномальных перепадов при измерении высоты. Исключение же спутников GPS20 и GPS32 не приводит ни к каким изменениям и не влияет на общее решение навигационной задачи. На основании этого можно сделать вывод, что на аномальные выбросы имеют влияние спутники, которые восходят и заходят. Спутники, которые пролетают над линией горизонта, не оказывают влияния на выбросы.

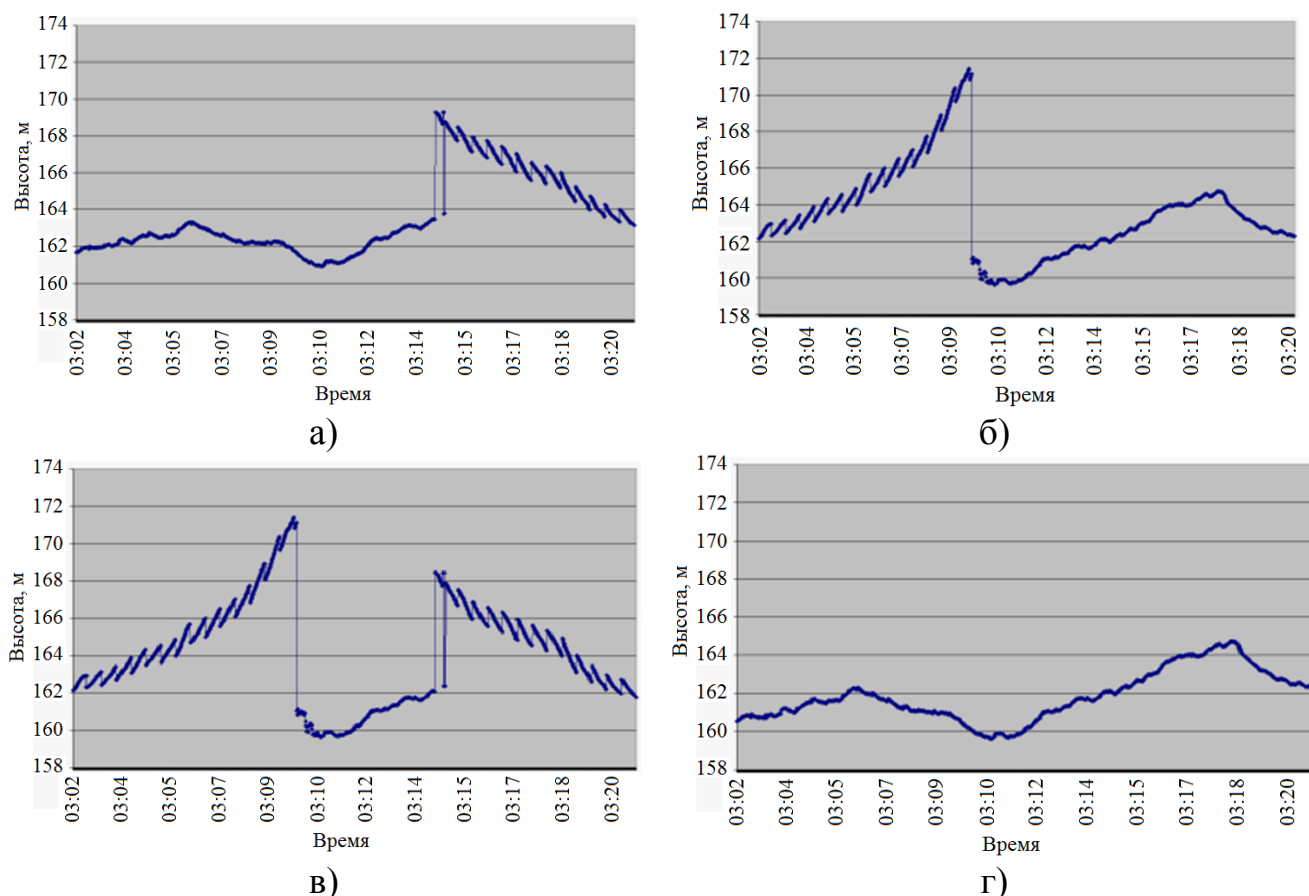


Рисунок 4.13 – Зависимость измеряемой высоты от исключения спутников из решения навигационной задачи: а) исключен GPS15, б) исключен GPS29, в) исключен GPS 32, г) исключены GPS 15, 29

4.3 Эмпирическая модель коррекции зенитной тропосферной задержки

Кроме использования реальных данных о температуре, давлении и влажности, которые изменяются на протяжении дня для вычисления тропосферной задержки или использования предложенных эмпирических суточных зависимостей зенитной тропосферной задержки, целесообразна проверка возможности введения эмпирического коэффициента коррекции в существующую модель оценок зенитных тропосферных задержек и выявление его регрессионных зависимостей от уровня коэффициента преломления тропосферы, а также оценка влияния этих коррекций на точность определения координат. Введение эмпирического коэффициента предполагает коррекцию вычисляемых зенитных тропосферных задержек R_T

$$\hat{R}_T = \alpha R_T, \quad (4.8)$$

которые можно использовать для коррекции псевдодальностей и в дальнейшем – при вычислении координат. Это означает, что при имитационном моделировании используются не задержки, полученные по модели MOPS, а скорректированные с использованием эмпирически введенного коэффициента α .

Когда $\alpha = 1$, то используется стандартная модель зенитной тропосферной задержки, когда $\alpha \geq 1$ – используется задержка больше стандартной, когда $\alpha \leq 1$ – меньше стандартной. Для анализа были выбраны несколько дней зимой, когда изменения коэффициента преломления на протяжении дня, в большинстве случаев, невелики, а также дни весной и летом, когда перепады коэффициента преломления достигали 55 N ед. за сутки.

На рис. 4.15, 4.16 для примера показано, как изменяются координаты относительно центра мишени при введении коэффициента коррекции на зенитную тропосферную задержку с утра – рис. 4.15, и под вечер – рис. 4.16 зимой. Сбоку от мишеней приведены результаты статистической обработки: широта – B , долгота – L , высота – h , их отклонения от истинного значения и среднеквадратическая ошибка определения, полученные по выборке в

N наблюдений. На рис. 4.14 показано поведение среднеквадратической ошибки измерения высоты – рис. 4.14, а и координат рис. 4.14, б.

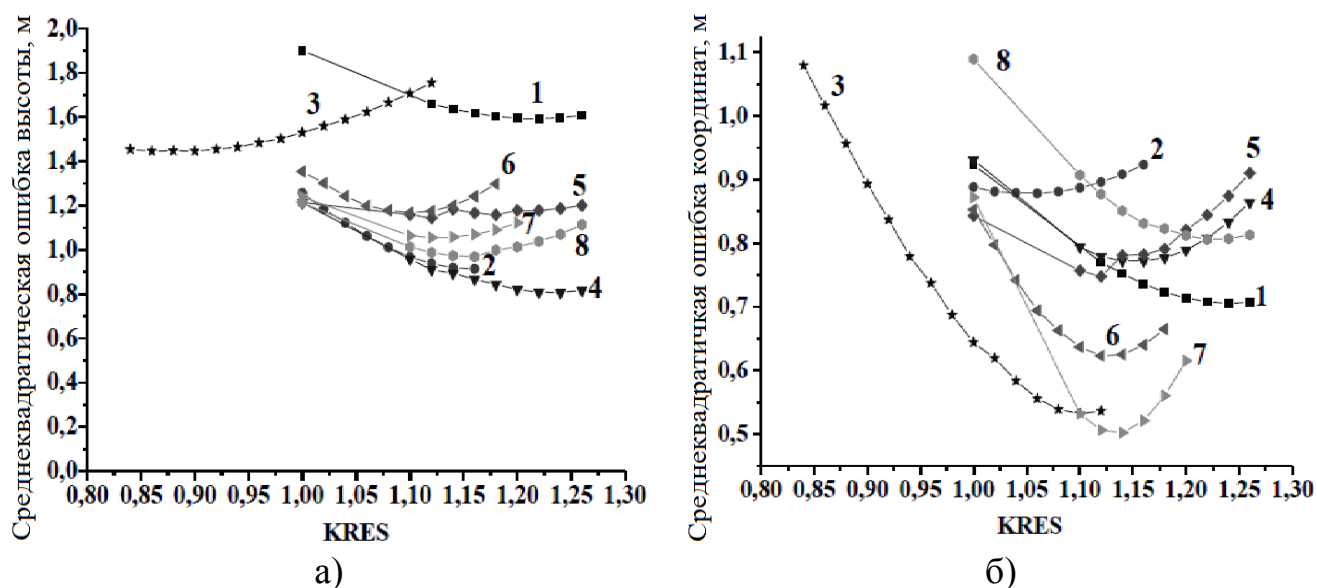


Рисунок 4.14 – Зависимость среднеквадратического значения ошибки высоты (а) и координат (б) от значения коррекции зенитной тропосферной задержки коэффициентом $\alpha = Kres$: 1 – 28.12.20 с 07:44:36 по 10:53:38; 2 – 28.12.2011 с 10:53:38 по 14:03:48; 3 – 28.12.2011 с 14:03:49 по 17:13:47; 4 – 28.12.2011 с 17:13:48 по 20:23:52; 5 – 28.12.20 с 20:23:53 по 23:34:09; 6 – 28.12.2011 с 23:34:10 по 02:44:32; 7 – 29.12.2011 с 02:44:33 по 05:54:56; 8 – 29.12.2011 с 05:54:57 по 09:04:57

Видно, что как для высоты, так и для координат есть оптимальное значение коэффициента коррекции для зенитной тропосферной задержки, при которых среднеквадратическое значение ошибки определения высоты и координат минимально. В табл. 4.9 приведены оптимальные значения коэффициентов коррекции, которые были в часы измерения. Для каждого из интервалов измерений было использовано около 10000 наблюдений.

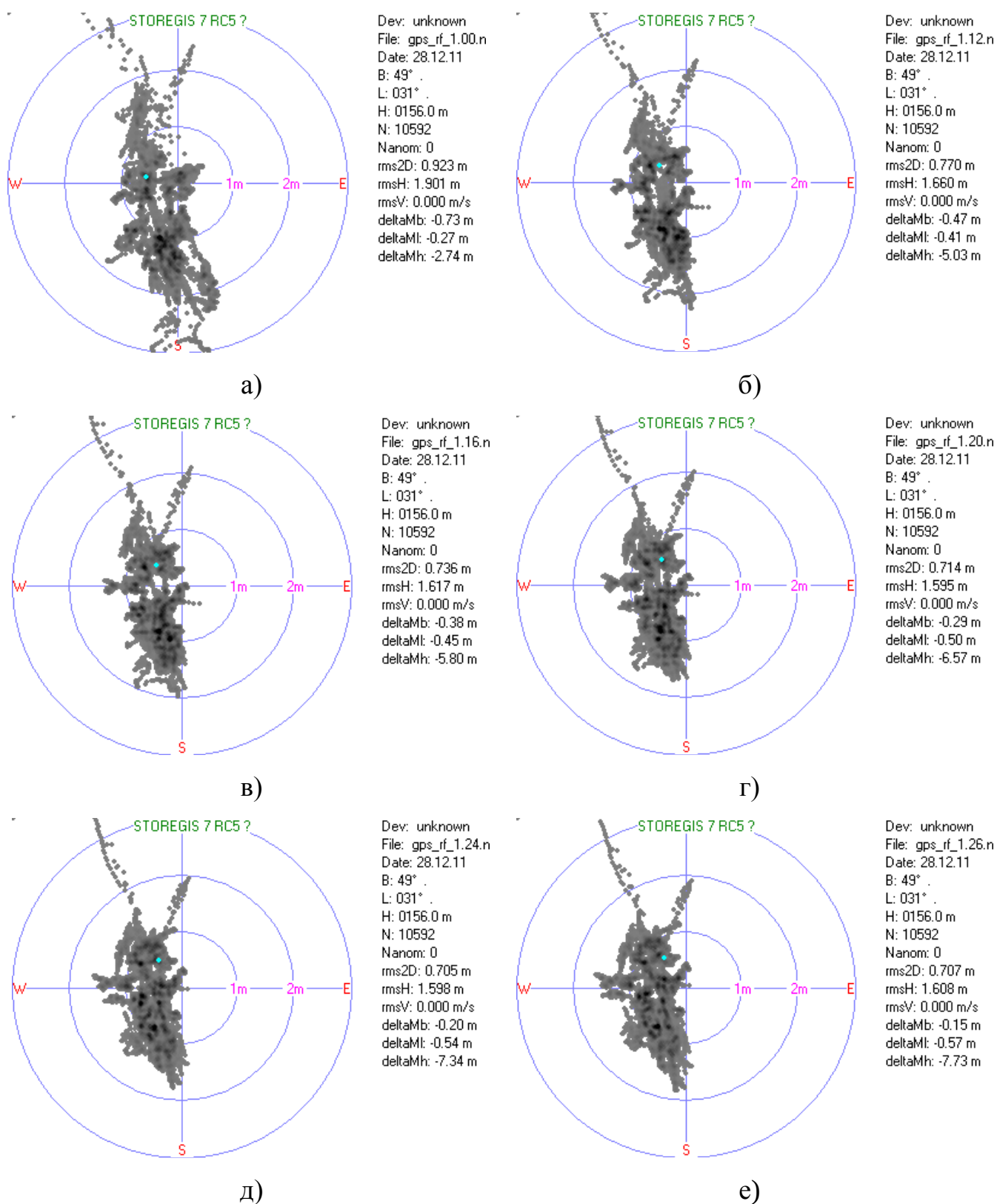


Рисунок 4.15 – Результаты использования алгоритма введения поправки в зенитную тропосферную задержку для г. Смела 28.12.2011 з 07:44:36 по 10:53:38 : а – $\alpha = 1$; б – $\alpha = 1,12$; в – $\alpha = 1,16$; г – $\alpha = 1,20$; д – $\alpha = 1,24$; е – $\alpha = 1,26$

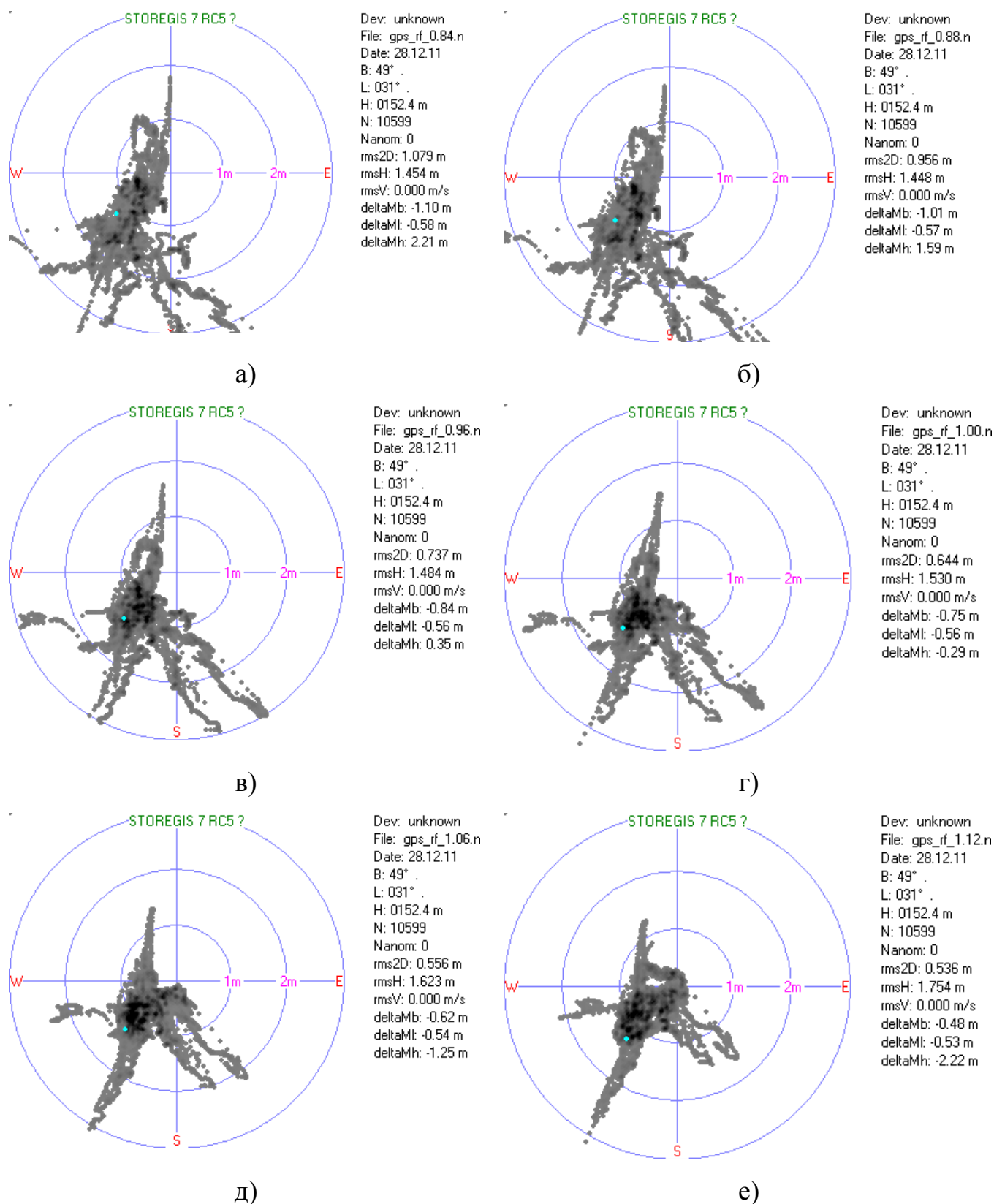


Рисунок 4.16 – Результаты использования алгоритма ввода поправки в зенитную тропосферную задержку для г. Смела 28.12.20 з 14:03:49 по 17:13:47: а – $\alpha = 0,84$; б – $\alpha = 0,92$; в – $\alpha = 0,96$; г – $\alpha = 1,0$; д – $\alpha = 1,06$; е – $\alpha = 1,12$

В некоторых случаях, как видно из табл. 4.10, значения оптимальных коэффициентов коррекции для минимальных ошибок координат и высоты совпадают. Приблизительно одинаковы для них и средние значения. С использованием этих данных была проведена отбраковка выбросов коэффициентов коррекции, которые можно было идентифицировать как грубые ошибки.

На втором этапе были отбракованы те коэффициенты, которые были получены для дней, значение коэффициента преломления которых не были характерны для сезона. Полученные при этом зависимости оптимальных коэффициентов коррекции от коэффициентов преломления показаны на рис. 4.17, в – для высоты, рис. 4.17, г – координат.

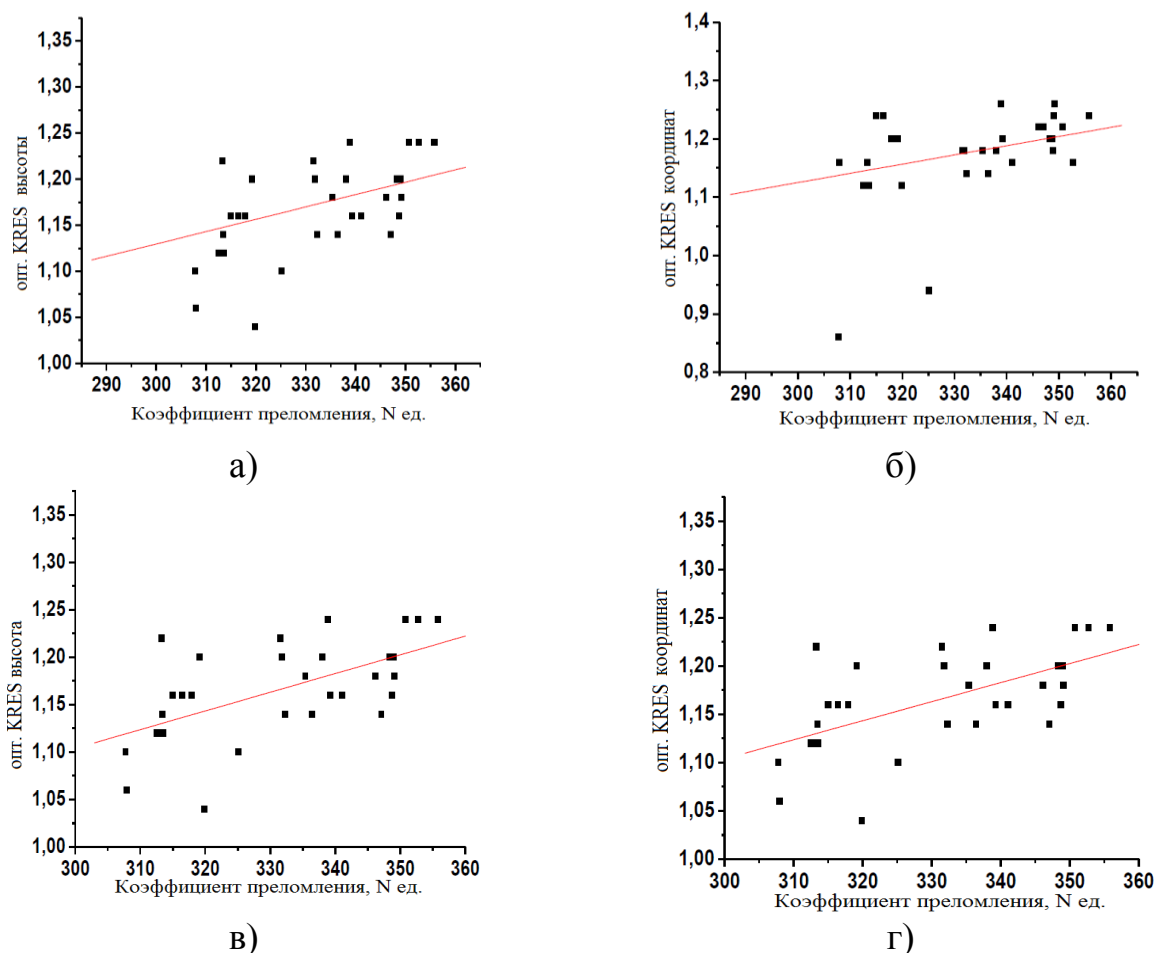


Рисунок 4.17 – Зависимость корректирующей зенитную тропосферную задержку коэффициентов от коэффициента преломления тропосферы: а, б – 35 точек; в, г – 31 точка; а, в – высота; б, г – координаты по площади

Таблица 4.9 – Зависимость оптимальных значений коэффициентов корректирующих зенитную тропосферную задержку K_{res} от индекса коэффициента преломления тропосферы N для г. Смела

День измерений	Индекс коэффициента преломления	K_{res}	
		rms2D - min	rmsH - min
25.05.2011 - 26.05.2011	307,7894	1,24	1,20
	348,9118	1,20	1,18
	339,2463	1,16	1,20
	331,5267	1,22	1,18
	325,1122	1,10	0,94
	319,8833	1,04	1,12
10.06.2011 - 11.06.2011	319,1601	1,20	
	301,3041	1,20	1,22
	293,2634	1,12	1,18
	294,4876	1,12	
	331,8026	1,20	1,18
	335,3939	1,18	
	322,978	1,14	
	341,0622	1,16	
16.06.2011 - 17.06.2011	352,7261	1,24	
	318,3027	1,28	1,34
	316,1580	1,24	1,22
	321,1696	1,20	1,26
	340,7218	1,12	
	348,2932	1,20	
	347,0776	1,14	1,22

Продолжение таблицы 4.9

День измерений	Индекс коэффициента преломления	<i>Kres</i>	
		rms2D - min	rmsH - min
23.06.2011 - 24.06.2011	336,4396	1,14	
	318,4919	1,34	
	316,4371	1,16	1,24
	317,8878	1,16	1,20
	338,0076	1,20	1,18
	348,9434	1,22	1,12
	348,7664	1,16	1,20
	349,1029	1,18	1,26
	338,8494	1,24	1,26
28.12.2011 - 29.12.2011	308,4465	1,24	1,22
	307,9514	1,06	1,16
	307,7518	1,10	0,86
	314,9953	1,16	1,24
	312,5502	1,12	
	313,5497	1,12	
	313,4485	1,14	1,12
	313,2810	1,22	1,16
09.07.2012 - 10.07.2012	354,4284	1,26	1,14
	350,7833	1,24	1,22
	349,0228	1,20	1,24
	350,5233	1,14	1,18
	346,1397	1,18	1,22
	355,8031	1,24	
	351,7377	1,16	

Проведенный анализ показал, что зимой оптимальные значения зенитной тропосферной задержки в большинстве случаев практически совпадает с теоретическими значениями. Отклонение оптимальных значений от теоретических оценок не превышало +5...10 % ($\alpha_{opt} \leq 1,05...1,1$). В тоже время, летом оптимальные значений задержки для координат по плоскости и высоте приблизительно на 10...25 % больше, чем теоретически значения.

Значения регрессионных коэффициентов для разных объемов выборки, полученные на каждом из этапов, приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10 – значения регрессионных коэффициентов связи оптимального корректирующего коэффициента K_{res} с коэффициентом преломления тропосферы N

Координаты				Высота			
A	B	R	N	A	B	R	N
0,92281	7,79111 E-4	0,23878	45	0,96497	6,40811 E-4	0,13921	45
0,72702	0,00134	0,47482	35	0,65184	0,00158	0,35867	35
0,51229	0,00197	0,59468	31	0,31215	0,00258	0,47484	31

Выражение для оценки оптимальных коэффициентов коррекции имеет вид:

$$\alpha = K_{res} = A + B \cdot N. \quad (4.9)$$

Тогда для практических вычислений можно брать $A \approx (1,4...2,0) \cdot 10^{-3}$, а $B \approx (2,0...2,5) \cdot 10^{-3}$. При введении оптимальных коррекций среднеквадратическое значение ошибки измерения координат можно уменьшить приблизительно на 4...5 %, а высоты на 8...9 %. Для этого необходимо при расчетах зенитной тропосферной задержки летом увеличивать теоретическую оценку этого параметра, полученную по модели MOPS, приблизительно на 15 %, что позволит уменьшить ошибку измерения координат и высоты. Для этого можно использовать полученное эмпирически соотношение (4.9). Логично

предположить, что необходимо учитывать и суточные зависимости при введении коррекции. Предложенный подход может дать более хорошее улучшение точности определения координат, чем при введении одинаковой на протяжении дня коррекции зенитной тропосферной задержки.

Выводы к разделу 4

1. Впервые предложен интерполяционный алгоритм введения поправки при определении координат. Проведена его экспериментальная апробация и верификация. Показано, что его использование позволяет существенно уменьшить ошибки, особенно в летний сезон, когда поведение коэффициента преломления среды распространения может отличаться для разных измерительных пунктов. При использовании сглаженных данных за 1 час, можно добиться ошибки, не превышающей 2 м, тогда как при стандартном методе коррекции она может достигать 10...15 м. Предложенный метод позволяет добиться устойчивой коррекции, позволяющей снизить среднеквадратическую ошибку измерения координат в 1,2...2,1 раза. Аналогичные результаты получаются и при использовании интерполяционного метода применительно к псевдодальностям.

2. Показано, что в координатной информации, полученной при помощи спутниковых систем глобальной навигации, могут наблюдаться аномально-высокие выбросы, в несколько раз превышающие среднеквадратические ошибки. Предложены методики фильтрации с использованием дополнительного информационного канала производной, который отслеживает резкие изменения координатной информации независимо от природы их возникновения. Исключение аномально-высоких выбросов при анализе информационного параметра (измеряемых координат) позволяет снизить выбросы для г. Сумы на уровнях обеспеченности 0,99 до 0,44...0,54, а при 0,9 – до 0,235...0,325. Полученные результаты показывают, что устранение аномально-высоких

выбросов для всех проанализированных дней позволяет снизить их интенсивность почти в 2 раза. Импульсные выбросы при этом уменьшаются до 2...4,5 м по высоте и до 1...1,5 м для плоскостных координат.

3. Экспериментально показана необходимость отслеживания флуктуаций уровня сигналов навигационных спутников и предложены критерии исключения спутников из навигационного решения. Показано, что исключение из навигационного решения спутников с большим уровнем флуктуаций сигнала позволяет снизить ошибки определения координат.

4. Впервые предложена эмпирическая модель коррекции тропосферной задержки, которая может использоваться при отсутствии информации о реальных изменениях метеорологических параметров, которые обычно используются в моделях вертикальных тропосферных задержек. Показано, что для летнего сезона оптимальные значения тропосферной задержки на 10...25 % больше, чем теоретические значения. Использование предлагаемого эмпирического коэффициента при введении оптимальных коррекций, среднеквадратическое значение ошибки измерения координат можно уменьшить приблизительно на 4...5 %, а высоты на 8...9 %.

ВЫВОДЫ

В данной диссертационной работе приведено решение актуальной научно-практической задачи дистанционного зондирования тропосферы при помощи использования излучений ИСЗ систем глобальной навигации. В ходе многолетних исследований экспериментально изучены характеристики сигналов ГНСС при различных метеоусловиях, особенности поведения сигнала при радиозаходах ИСЗ, влияние атмосферной рефракции и зон выпадения дождя на результаты измерений координат и псевдодальностей штатными приемниками глобальных навигационных спутниковых систем. Проведено достаточное количество экспериментов (круглосуточные накопления с 2011 г.) по обработке реальных наблюдений сигналов ГНСС, что позволяет говорить о достоверности полученных результатов.

В ходе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработана модель описания коэффициента преломления тропосферы, позволяющая оценивать условия распространения радиосигналов, а также впервые показана возможность использования для описания нестационарного поведения коэффициента преломления в течение сезона вложенных полумарковских процессов. Предложен новый подход проверки гипотез о законе распределения случайной величины, в который базируется на использовании обратных функций проверяемой гипотезы и полученной по экспериментальной выборке.

На основании многолетних исследований сезонной изменчивости коэффициента преломления для различных регионов Украины показано существенное отличие числовых характеристик (среднего значения и дисперсии) для городов, принадлежащих различным по морфологическим условиям группам. Определены характерные значения коэффициента преломления различных регионов Украины для всех сезонов (зима около 310 N ед., лето – примерно

350...370 N ед.). Впервые установлена зависимость трендовой составляющей коэффициента преломления от изменений солнечной активности. Проведен сравнительный анализ аппроксимаций сезонных изменений коэффициента преломления при помощи функций Гаусса и финитных функций Кравченко – Рвачева и установлено, что использование функций Кравченко – Рвачева дает несколько заниженные оценки (кроме летнего сезона) при заданных уровнях значимости коэффициента преломления, в то время как функции Гаусса будут давать завышенные оценки относительно экспериментальных значений.

2. Разработана модель функции отображения тропосферной задержки, которая учитывает сферичность тропосферы, что не учитывалось эмпирическими моделями, основанными на многолетних наблюдениях. Показано, что учет реальных значений градиента коэффициента преломления позволяет в несколько раз снизить ошибки определения псевдодальности, которые существенно возрастают на низких углах визирования, за счет увеличения толщины слоя тропосферы, сквозь которую вынужден проходить сигнал от навигационного спутника. Предложена методика оценки градиента коэффициента преломления на трассе распространения сигнала к конкретному навигационному спутнику путем решения обратной задачи, обеспечивающей минимализацию расхождения экспериментальных и модельных данных по тропосферной задержке.

3. На основании многолетних исследований сезонных и суточных изменений координатной информации, полученной при помощи систем глобальной спутниковой навигации, предложена методика определения наличия дождя на трассе распространения сигналов. Установлено, что наличие осадков на трассе распространения сигналов ГНСС будет приводить к увеличению псевдодальностей и, соответственно, нехарактерным для суточных флуктуаций изменениям координатной информации. Показано, что наличие дождя может приводить к снижению измеряемой высоты в несколько метров, а амплитуда изменений будет зависеть от интенсивности осадков. С использованием

экспериментальных данных установлено, что изменение плоскостных координат имеет обратную корреляцию с изменениями коэффициента преломления тропосферы, что может использоваться для оценки пространственного изменения данного параметра вокруг точки измерения. Установлено, что прохождение солнечного затмения также может приводить к искажениям координатной информации, которые сложно описать стандартными методами учета суточных флуктуаций, что связано с разной скоростью реакции ионосферы и тропосферы, которая является более инерционной.

4. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждена методика дистанционного зондирования земной поверхности при помощи излучений систем глобальной навигации, нахождения областей отражения в условиях городской застройки. Показана возможность определения местоположения областей отражения и оценки их параметров на основании спектрального анализа флуктуационной компоненты принимаемых сигналов. Показано, что дисперсия флуктуационной компоненты может использоваться как критерий оценки типа подстилающей поверхности, и установлено, что дисперсия зон застройки в 2-3 раза выше, чем для равнинной местности.

5. Впервые предложена интерполяционная методика дифференциальной коррекции координат и псевдодальностей к различным спутникам. С использованием экспериментальных данных показано, что использование предложенной методики коррекции координат позволяет снизить ошибку измерения в 1.39...4.24 раза, особенно в летние сезоны, когда наблюдаются существенные изменения коэффициента преломления. Показано, что предложенная методика позволяет добиться стабильной поправки, без наличия систематических погрешностей, которые могут возникать из-за неправильного выбора опорной точки в стандартном методе коррекции.

Предложен эмпирический коэффициент коррекции тропосферной задержки, связанный с сезонными и суточными флуктуациями. Установлено, что

для зимы смещение оценок не превышает 5...10 %, а летом – 10...25 %. Его учет позволяет повысить точность определения координат приемниками ГНСС.

6. Предложен метод устранения аномально-высоких выбросов измерения координат при помощи фильтрации с дополнительным информационным каналом производной. Такой подход позволяет снизить выбросы на уровне обеспеченности 0,99 до 0,44...0,54 и на уровне 0,9 до 0,235...0,325. Показано, что спутники с малыми уровнями сигналов и большими уровнями флуктуаций могут приводить к появлению аномально-высоких ошибок измерения координат. Их устранение из решения навигационной задачи позволяет устранить аномально высокие выбросы ошибок оценивания, что особо важно при использовании приемников ГНСС в авиации и космонавтике. Установлено, что спутники, которые пролетают вдоль горизонта, слабо влияют на появление выбросов, однако могут наблюдаться случаи снижения уровня сигнала на углах выше 3° , что говорит о необходимости постоянного отслеживания уровня сигналов всех спутников, принимающих участие в решении навигационной задачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Exploitation of Ground-based GPS for Operational Numerical Weather Prediction and Climate Applications / G. Elgered , H.P. Plag, H. Van der Marel, S.J.M. Barlag en J. Nash.– EC/COST, EUR, 2005.– 234 p.– ISBN 92-898-0012-7.
2. GPS Meteorology' Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System / Michael Bevis, Steven Businger, Thomas A. Herring, Christian Rocken, Richard A. Anthes, and Randolph H. Ware // Journal of geophysical research.– 1992.– Vol. 97, No. D14.– P. 15,787-15,801.
3. Анализ влагосодержания атмосферы по данным приемников GPS / В. Е. Куницын, И. А. Нестеров, Н. А. Терешин и др. // Журнал Радиоэлектроники – 2015.– №6.– С. 1-12.
4. Сопін А. О. Радіодіагностика іоносферних збурень, що стимулювані потужними тропосферними процесами: дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / А.О. Сопін.– Харків, 2013.–171 с.
5. Полякова А. С. Исследование ионосферных возмущений, связанных с источниками в нижней нейтральной атмосфере по данным GPS/ГЛОНАСС-Радиозондирования: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.29 / А. С. Полякова.– Иркутск, 2014.– 199 с.
6. Forbes J. M. Variability of the ionosphere / J. M. Forbes, S. E. Palo, X. Zhang // J. Atm. Solar-Terr. Phys. – 2000.– Vol. 62.– P. 685-693.
7. Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below. / J. Lastovicka // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.– 2006.– Vol.68.– P. 479-497.
8. Gershman B. N. Traveling ionospheric disturbances – A Review / B. N. Gershman, G. I. Grigor'ev // Radiophysics and Quantum Electronics.– 1968.– Vol. 11(1).– P. 1-13.
9. Kazimirovsky E. S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review. / E. S. Kazimirovsky // Ann. of Geophys.– 2002.– Vol. 45, N. 1.– P. 1-29.

10. Гофманн–Велленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика / Б. Гофманн–Велленгоф, Р. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ.; під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наук. Думка, 1995.– 380 с.
11. Rizos C. Principles and Practice of GPS Surveying [Електронний ресурс] / С. Rizos – Sydney (Australia): SNAP, School of Geomatic Engineering, UNSW, 1999.– Режим доступу: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap>.
12. Фам Хоанг Лонг. Разработка методики учета влияния ионосферы при GPS – измерениях на территории Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32.– Москва, 2014.– 141 с.
13. Невзоров Р. А. Метод формирования фазовых измерений в GPS/ГЛОНАСС приемнике: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Р. А. Невзоров.– Москва, 2001.– 154 с.
14. Дицкий І. В. Розвиток методів та алгоритмів розв'язання неоднозначності та усунення стрибків фазових вимірювань у задачах точного позиціонування по сигналах глобальних навігаційних супутникових систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17 / І. В. Дицкий.– Харків, 2014.– 203 с.
15. Гаврилов Н.М. Измерение характеристик атмосферы методом наземного радиоприема навигационных спутниковых систем. Учебно-методическое пособие / Н.М. Гаврилов.– Санкт Петербург, 2007.– 31 с.
16. Козин И. Д. Спутниковые радионавигационные системы/ И. Д. Козин.– Алматы, 2006.– 75 с.
17. Афраймович Э. Л. GPS мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова.– Иркутск, 2006.– 480 с.
18. Пушин В.Ф. Эффекты ионосферных декаметровых радиосигналов, вызванные распространением кноидальных волн концентрации электронов / В. Ф. Пушин, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия.– 2009.– Т. 14, №2.– С. 150-161.
19. Черногор Л.Ф. Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощного нестационарного радиоизлучения / Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия.–2013.– Т. 18, № 1.– С. 49-64.

20. Гармаш К.П. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения / К.П. Гармаш, Л.Ф. Черногор // Электромагнитные явления.— 1998.— Т.1, №1.— С. 90-110.
21. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г.Виноградов.— М: Радио и связь, 1983.— 224 с.
22. Thayer G.D. An improved equation for the radio refractive index of air / G.D. Thayer // Radio Science.— 1974.— Vol.9, No 10.— P. 803-807.
23. Davis J.L. Geodesy by radiointerferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length / J.L. Davis, T.A. Herring, I.I. Shapiro [et al.] // Radio Science. — 1985. — Vol. 20, No. 6.— P. 1593-1607.
24. Birnbaum G. Amplitude, scale and spectrum of refraction index inhomogeneities in the first 125 meters of the atmosphere / G. Birnbaum, H.E. Bussey // Proc. IRE.— 1955.— V. 43.— P. 1412-1418.
25. Дымнов Д. Г. Разработка аппаратных методов учета влияния тропосферы при спутниковых измерениях в геодезии: дис. канд. техн. наук: 25.00.32 / Д. Г. Дымнов.— Москва, 2009.— 100 с.
26. Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave Radiometry / G. Elgered // Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry. Ed. M.A. Janssen. New York: John Wiley and Sons.— 1993. — P. 215–258.
27. Jackson D.M. Millimeter-wave radiometric observations of the troposphere: a comparison of measurements and calculations based on radiosonde and Raman lidar / D.M. Jackson and A.J. Gasiewski // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 1995. — Vol. 33. — No. 1.— P. 3–14.
28. Гомбоев Н. Ц. Изменчивость коэффициента преломления воздуха в Забайкалье / Н. Ц. Гомбоев, И. О. Лучицкая // Тр. ЗСРНИГМИ. М.: Гидрометеиздат.— 1991.— Вып. 95.— С. 3-12.
29. Crain C. M. Apparatus for recording fluctuations in the refractive index of the atmosphere at 3,2 centimeter wavelength / C. M. Crain // Rev. Sci. Instr.— 1950.— V. 21, № 5.— P. 456-457.

30. Bean B. R. Radio meteorology / B. R. Bean, E. J. Dutton // Washington, 1966.– 456 p.
31. Наумов А. П. О статистической структуре распределения радиометеорологических характеристик / А. П. Наумов // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана.– 1979.– Т. 15, № 12.– С. 175-186.
32. Birnbaum G. A recording microwave refractometer / G. Birnbaum // Rev. Sci. Instr. - 1950.– V. 21, № 2.– P. 164-176.
33. Jung P. Transistorized frequency stabilization for reflex klystrons used in magnetic resonance / P. Jung // J. Sci. Instr.– 1960.– V. 37.– P. 372-374.
34. Керр Д.Е. Распространение ультракоротких волн / Пер с англ. под ред. Б. А. Шиллерова.– М.: Сов. радио, 1954.– 710 с.
35. Введенский Б. А. Распространение ультракоротких радиоволн / Б. А. Введенский.– М.: Наука.– 1973.– 408 с.
36. Лайхтман Д. Л. Физика приземного слоя атмосферы / Д. Л. Лайхтман, А. Ф. Чудновский.– М.: Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1949.– 248 с.
37. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере.– М.: Сов радио.– 1970.– 496 с.
38. Долуханов М.П. Распространение радиоволн/ М.П. Долуханов.– М.: «Связь».– 1965.– 392с.
39. Исимару И. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / И. Исимару.– М.: Мир.– 1981.– Т. 2.– 317 с.
40. Кабанов В. А. Рефрактометрические измерения с помощью вертолета / В. А. Кабанов, И. С. Тургенев // Радиотехника.– 1980.– Вып. 52.– С. 94-97
41. Бондаренко М. Ф. Вторичное излучение. Исследование эхо-сигналов акустического зондирования атмосферы в зоне мегаполиса. / М. Ф. Бондаренко, В. В. Семенец, В. И. Леонидов // 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ 2008), Международная конференция «Современные перспективные системы

- радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (СРРСН-2008), 22-24 октября: сб. научн. тр.– Харьков, 2008.– С. 87-90.
42. Комплексное акустическое и радиоакустическое зондирование пограничного слоя атмосферы / Г.В. Азизян, В.Б. Белявская, В.М. Бовшеверов и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 2008.– Т.18, №10.– С.1036-1042.
 43. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 04.00.23 / Н.П. Красненко.– Томск, 1998.– 334 с.
 44. Стерлядкин В.В. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы / В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г. Щукин // III Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике / Материалы IV Всероссийской научной конференции (Муром, 25-27 июня 2013 г.) – Муром: Изд.– полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013.– С.24-42
 45. Анализ современного состояния теории и практики систем радиоакустического зондирования / В. М. Карташов, С. И. Бабкин, А. В. Волох, С. В. Пашенко, П. А. Яценко // 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ 2008), Международная конференция «Современные перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (СРРСН-2008) 22-24 октября: сб. научн. тр.– Харьков, 2008.– С. 79-82.
 46. Леонидов В. И. О новом подходе к построению алгоритма радиоакустического зондирования при возмущенных термодинамических состояниях пограничного слоя атмосферы. / В. И.Леонидов // 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ 2008), Международная конференция «Современные перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (СРРСН-2008) 22-24 октября: сб. научн. тр.– Харьков, 2008.– С. 83-86.
 47. Каллистратова М.А. Радиоакустическое зондирование атмосферы / М.А. Каллистратова, А.И. Кон.– М.: Наука, 1985.– 200 с.

48. Карюкин Г.А. Оценки возможностей реальных систем радиоакустического зондирования атмосферы / Г.А. Карюкин– Препр. / ИФА АН СССР, 1981.– 33 с.
49. Макарова Т.И. Измерение скорости ветра двухлучевым радиоакустическим зондированием / Т.И. Макарова // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1980.– Т.16, № 5.– С. 533-536
50. Измерение влажности воздуха радиоакустическим зондированием атмосферы/ С.И. Бабкин, Н. Г. Максимова, А.Ю. Панченко и др. // Труды 9-го Всесосюз. симпоз. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы.– Ч.2.– Томск: ТФСО АН СССР, 2006.– С. 145-148.
51. Зуев В.Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В.Е. Зуев, В.В. Зуев // СПб.: Гидрометеиздат, 1992.– 231 с.
52. Оценка условий распространения радиоволн над морем радиометрическим методом / Г. Г. Щукин, Ю. А. Мельник, С. М. Гальперин, Я. К. Ильин, Н. Ф. Михайлов, А. В. Рыжков // Тр. Гл. геофиз. Обсерватории, Методы активной и пассивной радиолокации в радиометеорологии.– 1982.– Вып. 451.– С. 65-68.
53. Волосюк В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации: [монография] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко; под ред. В. Ф. Кравченко.– М. : Физматлит, 2008.– 704 с.– ISBN 978-5-9221-0895-9
54. Троицкий А. В. СВЧ-радиометрия земной атмосферы: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.03 / А.В. Троицкий.– Москва, 1994.– 193 с.
55. Кабанов В. А. Связь радиояркостной температуры при скользящих углах с условиями распространения радиоволн над морем / В. А. Кабанов // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. – Харьков, 2006.– Т. 11, № 2.– С. 234-239.
56. Войтович О. А. Двухчастотное профилирование параметров дождя / О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. И. Хлопов // Радиофизика и электроника.– 2011.– Т. 2(16), № 3.– С. 51-60.
57. Белов Е. Н. Двухчастотное зондирование жидких осадков с помощью метеорадара МРЛ-1 / Е. Н. Белов, О. А. Войтович, А. М. Линкова, Г. А. Руднев,

- Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко // Радиофизика и электроника.– 2012.– Т. 3(17), № 1.– С. 49-59.
58. Жуков Б. В. Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере: [монография] / Б. В. Жуков [и др.] ; ред. Г. И. Хлопов ; Инт радиофизики и электроники НАН Украины. К. : Наук. думка, 2010.– 263 с.
59. Кабанов В.А. Структура коэффициента преломления атмосферы и диагностика условий распространения УКВ над морем: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / В.А. Кабанов.– Харьков, 1996.– 161 с.
60. Статистические характеристики показателя преломления в приводном слое атмосферы / Н.А. Дорфман, В.А. Кабанов, Ф.В. Кивва, И.С. Тургенев.– Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1978. – Т.14, №5.– С. 549-552.
61. Замараев В. Б. Определение характеристик тропосферной рефракции в зоне тени по излучению удаленного источника. Часть 1. Модель / В. Б. Замараев, В. Б. Синицкий // Радиофизика и электроника.– 2014.– Т. 5(19), № 3.– С. 41-48
62. Кабанов В. А. Определение характеристик тропосферной рефракции в зоне тени по излучению удаленного источника. Часть 2. Эксперимент / В. А. Кабанов, Г. М. Моргун, В. Б. Синицкий, И. С. Тургенев // Радиофизика и электроника.– 2014.– Т. 5(19), № 4.– С. 56-62.
63. Хоменко С. И. Исследование рефракционных свойств тропосферы с помощью радиоинтерферометра / С. И. Хоменко, Г. И. Хлопов, Д. Д. Халамейда // Радиофизика и электроника.– 2012.– Т. 3(17), № 2.– С. 50-53.
64. Иванов В. К. Распространение радиоволн миллиметрового диапазона в прибрежной зоне / В. К. Иванов, Ю. В. Левадный, В. Н. Шаляпин // Радиофизика и электроника.– 2011.– Т. 2(16), № 4.– С. 46-52.
65. Захарова Л. Н. Методы радиолокационной интерферометрии в исследовании характеристик земных покровов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Л.Н. Захаров.– Фрязино, 2011.– 213 с.
66. Солонин А. С. Состояние и перспективы развития метеорологических радиолокаторов // 3 Международный радиоэлектронный форум «Прикладная

- радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» Междунар. конф. «Современные и перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации» (СРРСН-2008), 22-24 октября: Сб. научн. трудов.– Харьков, 2008.– С. 9-13.
67. Веселовська Г.Б. Зворотнє розсіювання електромагнітних хвиль полідисперсним середовищем несферичних крапель у задачах двочастотного дистанційного зондування: дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / Г.Б. Веселовська.– Харків, 2014.– 147 с.
 68. Лінкова А.М. Комбінований метод двочастотного зондування дисперсних середовищ в атмосфері: дис. канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / А.М. Лінкова.– Харків, 2012.–168 с.
 69. Канарейкин Д. Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин.– М.: Сов. Радио, 1966.– 439 с.
 70. Поздняк С. И. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн / С. И. Поздняк, В. А. Мелитицкий.– М.: Сов. Радио, 1974.– 478 с.
 71. Красюк Н. П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н. П. Красюк, В. Л. Коблов, В. Н. Красюк.– М.: Радио и связь, 1988.– 213 с.
 72. Луценко В. И. Использование доплеровских РЛС для изучения турбулентности воздушных масс в облаках / В. И. Луценко, И.В. Луценко, Н. С. Ань // Известия ВУЗов Радиоэлектроника.– 2010.– Т.53, №6.– С. 3-12.
 73. Khomenko S. I. The Atmospheric Refraction Influence upon the "Clear-Sky" Reflections / S. I. Khomenko, A. Ye. Zatserklyany, V. I. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering.– 2005.– V. 63, № 12.– P. 1041-1052.
 74. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС [ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина].– М.: ИПРЖР, 1998.– 400 с
 75. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. / К.М. Антонович. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», Т.1: Монография.– 2005.– 334 с.

76. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. / К.М. Антонович. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», Т. 2: Монография.– 2005.– 360 с.
77. Sensing the Earth's atmosphere with occultation satellites / B. Lusignan, G. Modrell, A. Morrison, J. Pomalaza, S.G. Ungar // *Proceed. IEEE.*–1969.– V.57, №4.– P. 438-467.
78. Anderson K. D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements / K. D. Anderson // *Radio Sci.*– 1982.– V. 17, № 3.– P. 653– 663.
79. Hitney H. V. Means for determining the refractive index profile of the atmosphere: U.S. Patent 4 093 918 / H. V. Hitney – June 6, 1978.
80. Арманд Н. А. Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов ИСЗ / Н. А. Арманд, В. А. Андрианов, В. М. Смирнов // *Радиотехника и электроника.*– 1987.– Т. 32, Вып. 4.– С. 673–680.
81. Азизов А. А. Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы / А. А. Азизов, К. П. Гайкович, С. С. Кашкаров, М. Б. Черняева // *Изв. Вузов, Радиофизика.* – 1998.– Т. 41, № 9.– С. 1093-1116.
82. Экспериментальные исследования возможности применения интерферометрического метода радиопросвечивания атмосферы с ИСЗ для диагностики условий распространения радиоволн / И. Д. Гонтарь, И. С. Тургенев, В. Б. Сеницкий, С. И. Ширманова.– Харьков, 1989. – 17 с.
83. Сеницкий В. Б. Измерение и расчёт углов атмосферной рефракции по радиозаходам ИСЗ над морем / В. Б. Сеницкий, И. С. Тургенев, С. И. Ширманова // *Радиотехника.*– Харьков.– 1993.– Вып. 98.– С. 52-60.
84. Замараев В. Б. Диагностика условий распространения радиоволн над морем по радиозаходам ИСЗ / В. Б. Замараев, В. Б. Сеницкий, С. И. Ширманова // 7 Международная Крымская Микроволновая Конф.: тезисы. докл. – Севастополь, 1997. – С. 674–677.
85. Восстановление профилей показателя преломления тропосферы Земли по интерферометрическим измерениям угла рефракции / Г. А. Алексеев,

- А. П. Кусайкин, А. Е. Поединчук, В. П. Шестопалов // Использование радиоволн мм и сбмм диапазонов: Сборник научных трудов / ИРЭ АН Украины.– Харьков, 1993.– С. 120-133.
86. Сайт космической миссии COSMIC [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cosmic.ucar.edu>
 87. Zuffada C. A novel approach to atmospheric profiling with a mountain-based or airborne GPS receiver / C. Zuffada, G. A. Hajj, E. R. Kursinski // *Journal of Geophysical Research*.– 27 Oct. 1999.– vol. 104, no. D20.– P. 24,435-24,447.
 88. Официальный сайт программы CHAMP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gfz-potsdam.de/champ/>
 89. Официальный сайт программы GOCE [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE
 90. Официальный сайт программы GRACE [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.csr.utexas.edu/grace/>
 91. Сайт International GNSS Service (IGS) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.igs.org/>
 92. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том 1: [монография] / К.М. Антонович; ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.– 334 с.
 93. Ghoddousi-fard R. Modeling tropospheric gradients and parameters from NWP models: effects on GPS estimates / R. Ghoddousi-fard– Canada, 2009.– 218 p.
 94. Horizontal gradients in the 'wet' atmospheric propagation delay / Davis J.L., G. Elgered, A.E. Niell, I.I. Shapiro // *Proceedings of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, J.C. de Munck and T.A.Th. Spoelstra (Eds.), The Hague, The Netherlands, 19-22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, The Netherlands.– 1992.– No. 36, New Series.– P. 25-28.
 95. MacMillan D. S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations.– *Geophysical Research Letters*.– 1995.– Vol. 22, No.9.– pp. 1041-1044

96. Bar-Sever Y.E. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver / Y. E. Bar-Sever, P. M. Kroger, J. A. Borjesson // J Geophys Res 103(B3).–1998.– P. 5019–5035
97. Mendes, V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.– 1999.– 353 p.
98. MacMillan D.S. Atmospheric gradients and the VLBI terrestrial and celestial reference frames / D.S. MacMillan, C. Ma // Geophysical Research Letters.– 1997.– Vol. 24, №. 4, P. 453-456.
99. Chen G. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data / G. Chen, T.A. Herring // Journal of Geophysical Research.– 1997.– Vol. 102, №. B9.– P. 20,489-20,502.
100. Описання статистик негауссових процесів з використанням фінитних атомарних функцій / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов, Вей Чень // «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП 2013): 4 Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 22-24 травня 2013р.: зб. праць.– Черкаси, 2013.– С. 24-26.
101. Луценко В.И. Статистические модели коэффициента преломления тропосферы / В.И.Луценко, И.В.Луценко, Д.О. Попов // «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП 2013): 4 Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 22-24 травня 2013р.: зб. праць.– Черкаси, 2013.– С. 26-28.
102. Use finite functions Kravchenko-Rvachev to describe the distribution statistics of refractive index / .F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, Chen Wei, S.A. Masalov // Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13): International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, 23-28 June 2013: conf. proc.– Kharkiv, 2013.– P.614-616.

103. Statistics based on the finite atomic functions Kravchenko-Rvachev and their use for the description of scattered sea signal / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, Yang Ti, S.A. Masalov // Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13): International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, 23-28 June 2013: conf. proc.– Kharkiv, 2013.– P. 617-619.
104. Statistical Models of the Troposphere Refractive Index / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // Universal Journal of Physics and Application.– 2014.– Vol. 2(4).– P. 206-212.
105. Kravchenko V.F. Description and analysis of non-stationary signals by nested semi-Markov processes / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // (JMSI) Journal of measurement science and instrumentation.– Vol. 5, No. 3, Sept. 2014.– pp.25-32;
106. Empirical model of correction for zenith tropospheric delay / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, A.G. Laush, V.N. Gudkov // (JMSI) Journal of measurement science and instrumentation.– 2014.– Vol. 5, No. 4.– P. 20-28;
107. Луценко І.В. Дистанційне зондування тропосфери Землі з використанням випромінювання наземних та супутникових радіосистем: дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 01.04.03 / І.В. Луценко.– Харьков, 2011.– 226 с.
108. Lutsenko V.I. Usage of Electromagnetic Fields of Antropogenic Irradiation Sources for Remote Sensing of Atmosphere / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, I.V. Popov, V.B. Sinitsky, E.V. Tarnavsky, S.N. Anh // The 6-th European Radar Conference, 30 September – 2 October 2009: conf. proceedings.– Rome, 2009.– P. 545-548.
109. Estimation of Atmospheric Parameters Using Radio Occultation Method / N. H. Anh, P. L. Khuong, V. A. Kabanov, V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, V. B. Sinitsky // J. Geology, Series B.–2008.–N 31–32.– P. 60–66.
110. Чабдаров Ш. М. Полигауссовы представления произвольных помех и прием дискретных сигналов / Ш. М. Чабдаров, А. Т. Трофимов // Радиотехника и электроника.– 1975.– Т.20, №4.– С.734-745.

111. Чабдаров Ш. М. Марковско-смешанные полигауссовы модели случайных процессов / Ш. М. Чабдаров, А. Ф. Надеев, Р. Р. Файзуллин, А. В. Сенюшин, А. В. Фалин // 5 МНТК «Радиолокация и оптико волоконная связь»: материалы конф.– Воронеж, 2000.– Т.1.– С. 6-11.
112. Чабдаров Ш. М. Новые классы полигауссовых моделей в статистической теории приема сигналов современных радиоэлектронных радиосистем / Ш. М. Чабдаров, А. Ф. Надеев, Р. Р. Файзуллин, А. В. Сенюшин, А. В. Фалин, А. Е. Егоров // Прикладная радиоэлектроника.– Харьков, 2002.– Т.1.– №2.– С. 171-180.
113. Луценко В. И. Имитационная модель сигнала обратного рассеяния от морской поверхности.– Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – №4. – С. 59-73.
114. Имитационная статистическая модель отражений от ясного неба / В. И. Луценко, И. В. Луценко, С. И. Хоменко, А. Е. Зацеркляный // Труды 8 МНТК «Радиолокация, навигация и связь», 23–25 апреля.– Воронеж, 2002.– Т. 2.– С. 1435-1442.
115. Зацеркляный А. Е. Влияние атмосферной рефракции на отражения от ясного неба / А. Е. Зацеркляный, С. И. Хоменко, В. И. Луценко // Труды 8 МНТК «Радиолокация, навигация и связь», 23–25апреля.– Воронеж, 2002.– Т. 2.– С. 1426-1434.
116. Simulation Statistical Model of Reflection from the «ClearSky» / V. I. Lutsenko, S. I. Khomenko, A. Ye. Zatserklyany, I. V. Lutsenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – 63, № 5. – P. 371-380.
117. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов.– М.: Сов. Радио, 1977.– 488 с.
118. Королюк В.С. Полумарковские процессы и их приложения / В.С. Королюк, А.Ф. Турбин.– Киев: «Наукова думка», 1976.– 184 с.
119. Мишель. Н. Отражение радиолокационных эхо-сигналов от морской поверхности. (Модели и экспериментальные результаты) / Н. Мишель // Зарубежная радиоэлектроника.– 1972.– № 7.– С. 13-26.

120. Транк Г. Обнаружение целей на фоне помех от морской поверхности с негауссовым распределением.– Зарубежная радиоэлектроника.– 1971.– № 7.– С. 17-28.
121. Kulemin G. P. Millimeter-Wave Radar Targets and Clutter.– Technical Editor David K. Barton.– Boston, London: Artech House, 2003.– 417 p.
122. Бурдаков В. С. Цифровые модели импульсных помех / В.С. Бурдаков, А.Г. Долматов // Тр. Всесоюзн. конференции «Обработка локационных сигналов отраженных протяженными объектами»: Тез. докл. – Свердловск, 1981.– С. 23.
123. Валеев В.Г. Обнаружение слабых когерентных сигналов в коррелированных негауссовых помехах / В.Г. Валеев, Ю.Г. Сосулин // Радиотехника и электроника.– 1969.– №2.– С. 230-238.
124. Чабдаров Ш.М. Полигауссовы представления произвольных помех и прием дискретных сигналов / Ш.М. Чабдаров, А.Т. Трофимов // Радиотехника и электроника.– 1975.– Т. 20, №4.– С. 734-745.
125. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов.– М.: Сов. Радио, 1977.– 537 с.
126. Луценко В.И., Сугак В.Г. Статистическая модель сигнала, рассеянного поверхностью Земли / Луценко В.И., Сугак В.Г.// III Всесоюзная школа по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере, Харьков 12-17 октября 1989г.: тез. докл. III Всесоюзной школы по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере.– Харьков: ИРЭ АН УССР.– 1989.– С. 89-90.
127. Using Embedded Semi-Markov Processes for Describing Nonstationary Signals and Fields / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, S.A. Masalov, S.I. Khomenko // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 17–21 September, 2012.– Sevastopol, 2012.– P. 297-301.
128. Луценко В.И. Обнаружение сигналов на фоне негауссовых помех от подстилающей поверхности / В.И. Луценко // Электромагнитные волны и

- электронные системы, Математическое моделирование физических процессов.— 2007.— №12.— С. 41-57.
129. О возможности определения характеристик отражающих слоев в тропосфере над сушей по вариациям уровней сигналов УКВ на загоризонтных трассах. / В. И. Луценко, И. В. Луценко, Е. Н. Белов, С. И. Хоменко // Вісник Харківського національного університету ім. В.М. Каразіна, Серія Радіофізика та електроніка.— 2002.— № 570.— С. 203-204.
130. Кендалл М., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. Том 3. М.: Наука, 1976.— 736 с.
131. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб пособие / Е.Н. Львовский.— М.: Высш. Школа.— 1982.— 224 с.
132. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин.— М.: Сов. радио, 1974.— Т. 1.— 549 с.
133. Новый класс вероятностных весовых функций в цифровой обработке сигналов и изображений / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, А. Р. Сафин, Д. В. Чуриков // Электромагнитные волны и электронные системы.— 2009.— № 9, Т. 14.— С. 31-44.
134. Рвачев В.Л. Про одну фінітну функцію / В. Л. Рвачев, В. О. Рвачев // Доповіді академії наук УРСР. Серія А.— 1971.— Вип. 7.— С. 705-707.
135. Kravchenko V.F. Atomic Functions in Modern Problems of Radio Physics / V. F. Kravchenko, O. V. Kravchenko, V. I. Pustovoit , D. V. Churikov // Physical Bases of Instrumentation. Special Issue, November, 2011— P. 3-48.
136. Kravchenko V.F. Kravchenko probability weight functions in problems of radar signals correlation processing / V. F. Kravchenko, D. V. Churikov // Journal of Measurement Science and Instrumentation.— 2013.— Vol.4, No.3.— P. 231-237
137. Кравченко В. Ф. Атомарные функции в теории вероятностей и случайных процессов / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, А. Р. Сафин // Успехи современной радиоэлектроники.— 2009.— № 5.— С. 23-37.
138. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г.Хан, С.Шапиро // перевод с англ. Е.Г. Коваленко, под ред. В.В. Налимова. М.: Мир.— 1968.— 395 с.

139. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях : [монография] / М. А. Басараб, В. К. Волосюк, О. В. Горячкин, А. А. Зеленский, В. Ф. Кравченко, А. В. Ксендзук, Б. Г. Кутуза, В. В. Лукин, А. В. Тоцкий, В. П. Яковлев; под ред. В. Ф. Кравченко.— М. : Физматлит, 2007.— 544 с.— ISBN 978-5-9221-0871-3.
140. Лазоренко О. В. Чои–вильямс-анализ в цифровой обработке сигналов / О. В. Вишнинецкий, О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия.— 2007.— т. 12, №4.— С. 410-432.
141. Кутуза Б.Г. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности / Б.Г. Кутуза, М.В. Данилычев, О.И. Яковлев // М.: ЛЕНАНД.— 2015.— 333 с.
142. Simulation of the mapping function for calculation of tropospheric zenith delay. / V.I. Lutsenko, D.O. Popov, I.V. Lutsenko, A.G. Laush, V.N. Gudkov // Telecommunications and Radio Engineering.— 2014.—73 (5).— P. 413-424.
143. Луценко В.И. Обнаружение метеорологических образований при помощи систем глобальной навигации / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // «Прикладной радиоэлектроники. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014): 5-ый международный радиоэлектронный форум, 14-17 октября 2014: сб. трудов.— Харьков, 2014.— С. 207-210.
144. Луценко В.И. Исследование подстилающей поверхности при помощи ГНСС / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // «Обробка сигналів і негаусівських процесів»: Праці V Міжнародної науково-практичної конференції, 20-22 травня 2015р.: тези допов.— Черкаси, 2015.— С. 113-115.
145. Usage of global navigation systems for detection of dangerous meteorological phenomena / V.F. Kravchenko, O.V. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // (JMSI) Journal of Measurement Science and Instrumentation.— 2015.— Vol. 6, No. 1.— P. 68-74.
146. Використання випромінювань штучних супутників землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О.В. Кривенко, А.Г. Лауш, В.І.

- Луценко, Д.О. Попов, I.V. Попов, О.В. Соболяк // Космічна наука і технологія.— 2015.— Т.21, №3.— С. 83-90.
147. Луценко В.И. Влияние солнечного затмения 20.03.2015 на характеристики ГНСС сигналов / В. И. Луценко, Д. О. Попов, И. В. Луценко // 25-я международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo`2015), 6–12 сентября 2015 г.: сб. трудов.— Севастополь, Крым, 2015.— С. 1100-1101.
148. Луценко В.И. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной и спутниковой системы / В.И. Луценко, Д.О. Попов, И.В. Луценко // Радиофизика и электроника.—2016.— Т. 7 (21), №1.— С. 31-39.
149. Использование излучений ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования окружающей среды / Б. Г. Кутуза, В. Ф. Кравченко, В. И. Луценко, И. В. Луценко, Д. О. Попов // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов»: XII Всероссийская Открытая конференция, 10–14 ноября 2014 г.— Москва, 2014.
150. Мониторинг атмосферы и поверхности океана при помощи приемников систем глобальной спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС / С. А. Левченко, В. И. Луценко, И. В. Луценко, Д. О. Попов // «Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития (SSF-2014)», 18-21 сентября 2014: сб. трудов.— Минск, Беларусь, 2014.— С. 26-30.
151. Луценко В.И. Влияние метеообразований на изменение координат потребителей в ГНСС / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // 24-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, 7–13 сентября 2014 г.: Материалы конференции.— Севастополь, Крым, 2014.— С. 1125-1126.
152. Model of mapping function for the calculation of zenith tropospheric delay / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, A.G. Laush, V.N. Gudkov // “Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW’13): International Kharkov Symposium on Physics

- and Engineering of Microwaves, , 23-28 June 2013: conf. proc.– Kharkiv, 2013.– P. 349-351
153. Обнаружение опасных метеорологических явлений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / В. И. Луценко, И. В. Луценко, Е.В. Кривенко, Д.О. Попов // «Электронные методы исследования окружающего пространства»: Первая украинская конференция, 25-27 сентября 2012г.: сб. тез. докл.– Харьков, 2012.– С. 253-255
 154. Бровкин В.В. Атмосферные явления – классификация и описание [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://meteocenter.net/meteolib/www.htm>
 155. Красюк Н. П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н. П. Красюк, В. Л. Коблов, В. Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988.– 213 с.
 156. Электродинамика и распространение радиоволн / В. А. Неганов, О. В. Осипов, С. Б. Раевский, Г. П. Яровой // Радиотехника, 2009.– 744 с.
 157. Сухонин Е. В. Ослабление миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере с гидрометеорами: дисс. докт. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Е. В. Сухонин.– М.: ИРЭ АН СССР, 1988.– 351 с.
 158. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. The Use of Artificial Satellites for Geodesy / J. Saastamoinen, S. W. Henriksen, A. Mancini, B. H. Chovitz.– Papers presented at the Third International Symposium on The Use of Artificial Satellites for Geodesy. AGU.– 461 p.
 159. Hopfield H. S. Tropospheric range error at the zenith. Space Research XII / H. S. Hopfield.– Akademie-Verlag, Berlin, 1972.– P. 581-594.
 160. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System, Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA / DO-229C. November 28 - 2001.
 161. Долуханов М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов – М.: Связь, 1965.– 400 с.

162. Пинус Н. 3. Аэрология. Часть 2. Физика свободной атмосферы / Н. 3. Пинус, С. М. Шмепер.– Л.: Гидрометеиздат, 1965.– 352 с.
163. Black, H.D. Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects / H. D. Black, A. Eisner // Journal of Geophysical Research.–1984.– Vol. 89, No. D2.– P. 2616-2626.
164. Дымнов Г.Д. Разработка аппаратных методов учета влияния тропосферы при спутниковых измерениях в геодезии / Г.Д. Дымнов.– Москва, 2009.– 108 с.
165. Svensmark. Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate / Svensmark, Henrik.– Physical Review Letters.– 1998.– P. 5027–5030.– DOI:10.1103/PhysRevLett.81.5027.
166. Жеребцов Г.А. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности / Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко, С.И. Молодых // Оптика атмосферы и океана.– 2004.– №12.– С. 1003-1017.
167. Модель воздействия солнечной активности на климатические характеристики тропосферы Земли / Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко, С.И. Молодых, О.А. Рубцова // Оптика атмосферы и океана.– 2005.– №12.– С. 1042-1050.
168. Жеребцов Г.А. Роль солнечной активности и геомагнитной активности в изменении климата Земли / Г.А. Жеребцов, В.А. Коваленко, С.И. Молодых // Оптика атмосферы и океана.– 2008.– №1.– С. 53-59.
169. Наговицын Ю. А. Глобальная активность Солнца на длительных временах / Ю. А. Наговицын // Астрофизический бюллетень.– 2008.– № 1.– С. 45-58.
170. Исследования NASA солнечного цикла 2008 года [Электронный ресурс]: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/10jan_solarcycle24/
171. Жеребцов Г.А. Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы / Г.А. Жеребцов. В.А. Коваленко // Солнечно-земная физика.– Вып. 21.– 2012.– С. 98-106.
172. Черногор Л. Ф. Отклик ионосферы на солнечное затмение 1 августа 2008 г.: результаты вертикального зондирования / Л. Ф. Черногор, Л. Я. Емельянов, И. Б. Складов // Космічна наука і технологія.– 2009.– Т. 15, № 4.– С. 12-21.

173. Черногор Л. Ф. Эффекты солнечного затмения 1 августа 2008г. в приземной атмосфере / А. Л. Акимов, Л.Ф. Черногор // Кинематика и физика небесных тел.— 2010.— Т. 26, №3.— С. 58-74.
174. Луценко И.В., Наблюдение сигналов на загоризонтных трассах во время солнечного затмения 29 марта 2006 года / И. В. Луценко, В. И. Луценко // Радиофизика и электроника.— 2007.— т. 12, №2.— С. 341-344;
175. Архив данных карт электронной концентрации IONEX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>
176. Синицкий В.Б. О возможности использования излучения спутников GPS для диагностики морского волнения // Радиофизика и электроника.— Т.1(15), №3.— 2010.— С. 58-64.
177. Луценко И. В. Спектральные методы оценивания характеристик вторичных источников в каналах с многолучевостью / И. В. Луценко, И. В. Попов, В. И. Луценко // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова.— Харьков, 2006.— Т. 11, № 1.— С. 144-146.
178. Разказовский В.Б. Многолучевое распространение над морем / В.Б. Разказовский, Ю. А. Педенко // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.— 1996.— № 7.— С. 29-39.
179. Попов И. В. Использование методов обнаружения-измерения для анализа характеристик каналов с многолучевостью / И. В. Попов, И. В. Луценко, В. И. Луценко // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова.— Харьков, 2006.— Т. 11, № 2.— С. 305-308.
180. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть I / В.Ф. Кравченко, О.В. Кравченко, В.И. Пустовойт, Д.В. Чуриков // Радиотехника и электроника.— 2014.— Т. 59, № 10.— С. 949-978.

181. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть II / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, В. И. Пустовойт, Д. В. Чуриков, А.В. Юрин // Радиотехника и электроника.– 2014.– Т. 60, № 2.– С. 109-148.
182. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть III. / В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, Я. Ю. Коновалов, В. И. Пустовойт, Д. В. Чуриков // Радиотехника и электроника.– 2015.– Т. 60, № 7.– С. 663-694.
183. Применение семейств атомарных, WA-систем и R-функций в современных проблемах радиофизики. Часть IV // В. Ф. Кравченко, О. В. Кравченко, В. И. Пустовойт Д. В. Чуриков А. В. Юрин // Радиотехника и электроника.– Т. 60, № 11. – 2015. – С. 1113-1152.
184. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн - 2-е изд., доп. и переработ / Черный Ф. Б.– М. Сов. Радио, 1972.– 464 с.
185. Данилов Д.Л. Главные компоненты временных рядов: метод "Гусеница". / Д.Л. Данилов, А.А. Жиглявский // Санкт-Петербургский университет.– 1997.
186. Безрукавный Д.С. О возможности применения алгоритма «гусеница» к задаче контроля сетевого трафика // XIII Всероссийская научно-методическая конференция "ТЕЛЕМАТИКА'2006", Секция: в. Телекоммуникации в образовании и науке: Опыт и перспективы развития.
187. «Гусеница. Анализ и прогнозирования временных рядов» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gistatgroup.com/gus/index.html>
188. The interpolation method of the introduction of differential corrections in the measurement of the coordinates in the GNSS / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, V.N. Gudkov, A.G. Laush, N.X. Anh, Yuanyn, Hoang Hai Son // Geophysics – Cooperation and sustainable development: International scientific conference.– 17-21 November 2012: conf. proc.– Vietnam, Hanoi, Sapa.– P. 49-53.
189. Интерполяционный метод введения дифференциальных поправок в измерения координат и псевдодальностей в системах глобальной навигации / В.И. Луценко,

- И.В. Луценко, Д.О. Попов, В.Н. Гудков, А.Г. Лауш // “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2013): 23rd Int. Crimean Conference, 8-14 September 2013: conf. proc.– Sevastopol, Crimea, 2013.– P. 302-303.
190. Устранение аномально-высоких ошибок определения координат в приемниках глобальных навигационных спутниковых систем / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов, В.Н. Гудков, А.Г. Лауш // “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2013): 23rd Int. Crimean Conference, 8-14 September 2013: conf. proc.– Sevastopol, Crimea, 2013.– P. 308-309.
191. The three-point method of differential correction of coordinates and pseudo-range in GPS / V.F. Kravchenko, A.G. Laush, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, Wang Jianyuan // (JMSI) Journal of measurement science and instrumentation.– 2014.– Vol.5, №1.– P. 41-45.
192. Интерполяционный метод формирования дифференциальных поправок при определении координат и измерении псевдодальностей в системах глобальной навигации / В. Н. Гудков, Ван Джаньян, А. Г. Лауш, В. И. Луценко, И. В. Луценко, Д. О. Попов // Физические основы приборостроения.– 2014.– Том 3, №1.– С. 42-57.
193. Розроблення методів та технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації (Шифр «ТРОПОСФЕРА»), звіт з науково-технічної роботи за договором №ДЗ/467-2011 від 29 вересня 2011 р., етап №3 Проведення державної метрологічної атестації радіорефрактометра; розроблення принципів оптимізації вибору пунктів для розташування апаратури навігаційно–космічного забезпечення і методу прогнозування рефракційних властивостей тропосфери в точках вимірів; розроблення методик паспортизації розроблених методів вимірювань; розробка принципів створення для України мапи подібних за радіокліматичними умовами точок. (заклучний), Керівник НТР старш. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб. В. І. Луценко, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України. – Х.: 2012, Т.1. – 477 с.

194. Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС-технологій / В.І. Луценко, Д.О. Попов, А.Г. Лауш, В.О. Яценко, О.О. Жаліло, І.В. Діцький, Є.А. Безсонов // Космічна наука і технологія.– 2015.– Т.21, №3.– С. 83-90.
195. Modernization of accounting models of zenith tropospheric delays in estimation of GPS coordinate systems / V.I. Lutsenko, I.V Lutsenko, N. X. Anh, Hoang Hai Son, Ya.N. Dolzhenko // Geophysics – Cooperation and sustainable development: International scientific conference.– 17-21 November 2012: conf. proc.– Vietnam, Hanoi, Sapa.– P. 43-48.
196. Устранение аномально-высоких ошибок определения координат в приемниках глобальных навигационных спутниковых систем / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов, В.Н. Гудков, А.Г. Лауш // “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2013): 23rd Int. Crimean Conference, 8-14 September 2013: conf. proc.– Sevastopol, Crimea, 2013.– P. 308-309.
197. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том 1 / К. М. Антонович.– М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.– с. 334.
198. Литнарвич Р. Н. Геодезические приборы. Часть 2. Конспект лекций для студентов специальности земельного кадастра, ГИС систем и технологий / Р. Н. Литнарвич.– Чернигов, 2005.– 103 с.
199. Рябков П. В. Высокоточное определение навигационных погрешностей GPS с помощью одночастотных приемников / Автореф. дис. канд. техн. наук, М.– 2012.– 22 с.
200. Прогнозирование коэффициента преломления тропосферы по результатам измерения метеопараметров в опорных пунктах / В. И. Луценко , И. В. Луценко , О. В. Сытник , Н. С. Ань , В. Н. Гудков // Радиофизика и электроника: НАН Украины Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова.– Харьков.– 2012.– Т. 3(17)., № 4.– С. 54-63.
201. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебное пособие / Е. Н. Львовский.– М.: Высшая школа, 1982.– 224 с.

202. Диагностика рефракционных свойств тропосферы над сушей с использованием систем глобальной навигации / В. Н.Гудков, В. И.Луценко, И. В. Луценко, Н.С.Ань // Известия ВУЗов Радиоэлектроника.– 2010.– Т.53, №7.– С. 3-12.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АППАРАТУРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для проведения экспериментальных исследований по диагностике атмосферных процессов был создан пункт приема навигационных и метеорологических данных. Основой измерительного комплекса являются навигационные приемники, по данным которых оценивалось состояние тропосферы. Физической предпосылкой для использования навигационных приемников для подобных исследований является зависимость измеряемой псевдодальности от характеристик среды распространения. Так, например, наличие зон выпадения осадков может приводить к удлинению пути, что будет отображаться в навигационных данных от определенных спутников, что было показано в разделе 3.

Отметим, что на сегодняшний момент в сети интернет в публичном доступе имеются навигационные данные в формате RINEX, предоставляемые IGS (International GNSS Service) со всего мира. Подобные данные предоставляются в формате 30-секундных измерений, что позволяет проводить мониторинг ионосферы на основании вертикальных значений ПЭС, полученных при помощи двухчастотных измерений. Однако, несмотря на широкий спектр предоставляемой информации, исследование тропосферы весьма затруднительно из-за ограниченной возможности сопоставления навигационной информации с изменениями метеорологической информации в точке проведения наблюдений. Данные о метеорологических параметрах, имеющиеся в публичном доступе, также имеют недостатки, связанные с периодом предоставляемой информации (раз в 3 часа), а также пространственным разносом между метеостанцией и навигационным приемником, что может приводить к отличиям в параметрах приземного слоя тропосферы.

Таким образом, одним из преимуществ проводимых исследований является использование собственных навигационных приемников, а также возможность измерения приземного значения основных метеорологических параметров непосредственно в точке проведения измерений, дублируя при этом результаты

измерения на различных приемниках с целью уменьшения ошибок измерения, не связанных с исследуемыми эффектами.

В состав измерительного пункта входит:

- набор одночастотных приемников, которые позволяют получать «сырые» данные содержащие в себе задержки сигналов в атмосфере, что и является основой дистанционной диагностики;
- двухчастотный приемник, используемый для выделения ионосферной задержки из групповой;
- метеостанция и рефрактометр, позволяющие оценивать изменение коэффициента преломления тропосферы и устанавливать взаимосвязь с изменением навигационной информации.
- приемник сигналов метеорологических спутников NOAA, позволяющий получать карты облачности несколько раз за сутки.

А.1 Измерительный комплекс для регистрации сигналов ГНСС (одночастотный)

Для проведения исследований по диагностике атмосферы при помощи сигналов ГНСС был создан стенд приёма сигналов спутниковых систем представленный на рис. А1.



а)



б)

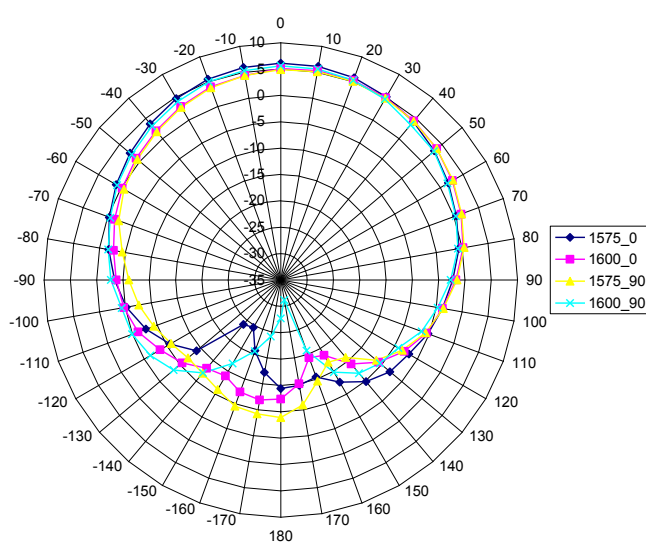


Рисунок А.1 – Комплекс регистрации сигналов GPS / GLONASS (а), навигационный приемник СН-4719 и антенна (б)

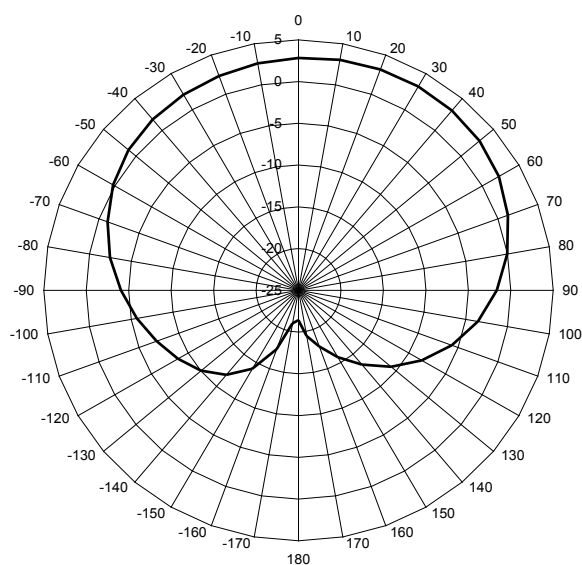
В состав стенда входит: приемник сигналов ГНСС, цифровые устройства для вычисления координат, их накопления и отображения, пакет специальных программ (BM-Ctrl, Storegis) для проведения данных операций.

Приемник СН-4719 представляет собой одночастотный приемник навигационных сигналов систем GPS / ГЛОНАСС и предназначен для определения текущих значений координат (широты, долготы, высоты), вектора скорости потребителя, текущего времени по сигналам СНС. Приемник обеспечивает прием и обработку сигналов СНС ГЛОНАСС, GPS и SBAS (EGNOW/WAAS/MSAS) по открыты кодам СТ и C/A в диапазоне L1, с частотой выдачи данных на внешние устройства 1, 2, 5 Гц.

В комплекте с навигационными приемниками использовалось несколько типов антенн: B104 и M102. Обе антенны предназначены для приема сигналов СНС ГЛОНАСС/GPS в диапазоне частот от 1570 до 1606 МГц и имеют следующие диаграммы направленности, которые представлены на рис. А.2. Особенностью данных антенн является то, что они способны принимать сигналы навигационных спутников при углах возвышения равных 0° и даже при небольших отрицательных углах, когда спутник заходит за горизонт.



а)



б)

Рисунок А.2 – Диаграммы направленности антенн: а) B104, б) M102

Для работы с описанными выше приемниками разработано специализированное ПО. Программа накопления и обработки измерений «STOREGIS» (см. рис. А.3), предназначена для приема данных по протоколу NMEA, BINR и BINR2 и представления этих данных в текстовом и графическом виде. Программа также может обрабатывать уже накопленные файлы и управлять режимами работы навигационного приемника. Полученные программой файлы позволяют анализировать флуктуации измеряемых координат, псевдодальностей, соотношений/сигнал шум, а также рассчитывать приращения псевдодальностей, что позволяет совместно с данными об ионосферной задержке, разделять влияние тропосферы и ионосферы.

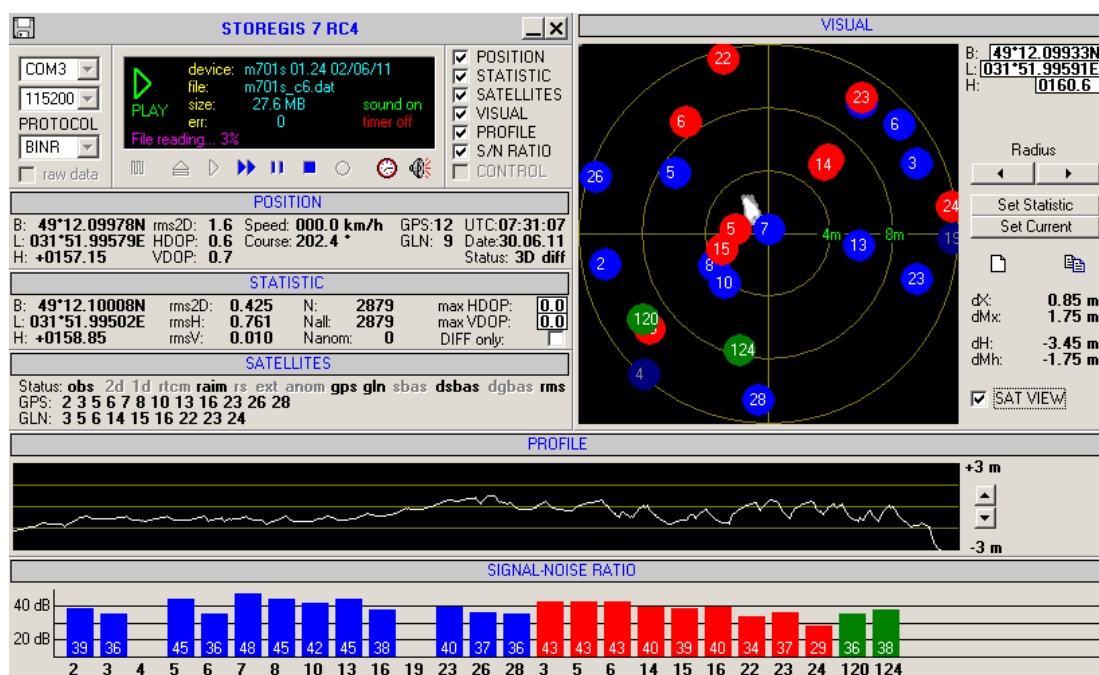


Рисунок А.3 – Внешний вид окна программы обработки навигационных данных

Красным цветом на поле мишени отображаются спутники ГЛОНАСС, синим – GPS, зеленым – SBAS. Мишень в данном случае нужно рассматривать как оси направления на север – юг (вертикальная ось) и с запада на восток (горизонтальная ось). Отдаление отметки спутника от центра мишени указывает на его угол места относительно антенны аппаратуры (в центре – 90 градусов, на крайнем положении внешнего круга – 0 градусов).

Выходные файлы представляют собой массивы данных содержащие информацию временных меток с периодичностью в 1 секунду, данные о измеряемых координатах (высоте, долготе, широте), спутники участвующие в решении навигационной задачи (Рис. А.4), а также массивы для отдельных спутников содержащие информацию об псевдодальностях, углах возвышения, азимутальных углах и соотношениях сигнал/шум для соответствующего момента времени (Рис. А.5).

2012/07/10 07:25:54 -	0.8660561106	0.6047853742	0112.0180	10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15
2012/07/10 07:25:55 -	0.8660561056	0.6047853752	0112.0845	10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15
2012/07/10 07:25:56 -	0.8660561043	0.6047853717	0112.1102	10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15
2012/07/10 07:25:57 -	0.8660561039	0.6047853719	0112.1104	10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15
2012/07/10 07:25:58 -	0.8660561037	0.6047853705	0112.1267	10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15
<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u> <u>6</u> <u>7</u>

Рисунок А.4 – Пример файла с определяемыми координатами приемника (1 – дата, 2 – время, 3 – широта, 4 – долгота, 5 – высота, 6 – количество используемых НКА, 7 – номера используемых НКА)

2012/02/25 12:01:54 -	GPS	01	11.8406	182.5637 =	40.64	-00022.553
2012/02/25 12:01:55 -	GPS	01	11.8336	182.5625 =	40.12	-00022.548
2012/02/25 12:01:56 -	GPS	01	11.8265	182.5613 =	39.94	-00022.553
2012/02/25 12:01:57 -	GPS	01	11.8194	182.5602 =	39.81	-00022.548
2012/02/25 12:01:58 -	GPS	01	11.8123	182.5590 =	39.50	-00022.499
<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u> <u>8</u>

Рисунок А.5 – Пример файла с поправками псевдодальностей (1 – дата, 2 – время, 3 – СНС, 4 – номер НКА, 5 – угол возвышения в градусах, 6 – азимут в градусах, 7 – соотношение сигнал / шум, dB/Hz, 8 – поправка псевдодальности)

Преимуществом использования «сырых» данных без дополнительных алгоритмов фильтрации является возможность установления взаимосвязи между сезонными и суточными вариациями метеопараметров и возникающими задержками на трассах распространения навигационных сигналов. Формируемые при этом массивы, являются решением навигационной задачи на основе кодовых измерений, однако для некоторых задач целесообразней использовать фазовый режим, позволяющий добиваться больших точностей (относительная навигация). Под фазовыми измерениями понимается значение задержки текущей фазы электромагнитной волны при распространении от фазового центра антенны

навигационного спутника до фазового центра антенны навигационного приемника. На основе такого измерения получают фазовую псевдодальность (сумма количества целых длин радиоволн и дробной части длины радиоволны). Поскольку радиоволна является периодической функцией, то обычное определение целых длин волн невозможно. Спутниковые приемники фиксируют только дробную часть фазы радиоволны, количество целых волн высчитывается математическим методом за счет избыточной информации. Таким образом, использование фазового режима работы может использоваться для повышения точности измеряемых параметров, а также для выделения ионосферной задержки при отсутствии измерений на частоте L2, как это было описано в разделе 1.

А.2 Измерительный комплекс для регистрации сигналов ГНСС (двухчастотный)

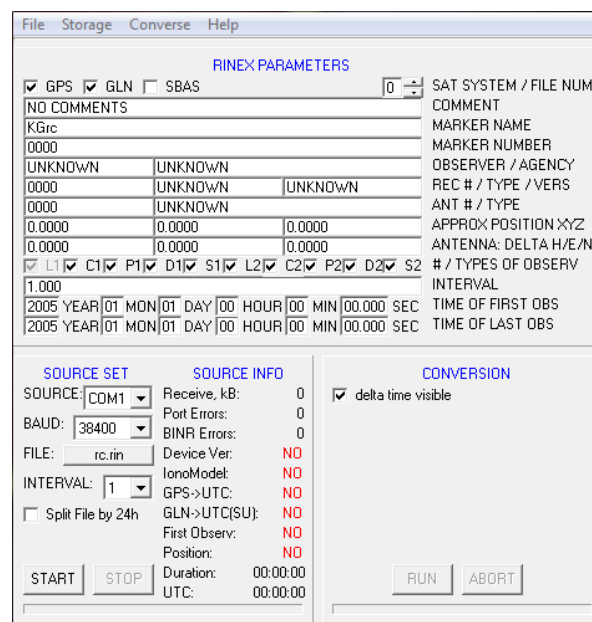
Так как одной из основных ошибок при определении координат является влияние задержки в атмосфере, то использование двухчастотных приемников позволяет повысить точность измерений за счет измерения ионосферной задержки на двух частотах. В отличие от одночастотного режима работы, в котором для коррекции измеренных псевдодальностей необходимо использовать различные модели тропосферной и ионосферной вертикальной задержки и пересчитывать их под различными углами, в двухчастотном приемнике можно напрямую измерять задержки, вызванные ионосферой. Это позволяет точно их компенсировать.

Двухчастотный приемник «Бриз» предназначен для автоматического определения текущих координат места, времени, путевой скорости потребителя, относительных координат между двумя точками по сигналам космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС (Россия), GPS (США) и их функциональных дополнений, а также для решения сервисных задач. Временной интервал обновления данных не более 1 с.

Аппаратура "Бриз" обеспечивает работу по радиосигналам навигационных космических аппаратов (НКА) в диапазонах частот L1 и L2 КНС ГЛОНАСС и L1 КНС GPS.



а)



б)

Рисунок А.6 – Внешний вид двухчастотного приемника (а) и программы накопления (б)

Используемое программное обеспечение позволяет получать навигационные данные в формате RINEX. RINEX (Receiver Independent Exchange Format) — формат обмена данными для файлов исходных данных спутниковых навигационных приёмников. Он позволяет производить пост-обработку полученных данных для выполнения более точных вычислений — обычно с помощью других данных, неизвестных приемнику, например, за счёт применения более точной модели атмосферных параметров в момент измерений. Файл с данными содержит информацию о псевдодальностях (P), псевдодальностях в фазовых циклах (L), доплеровской частоте (D) и соотношении сигнал/шум (S). Пример кадра выходного файла приведен на рис. А.7.

14 7 10 8 44 49.0000000 0 16R13R23G12R14R22R 5G 1R24R 4G28G24G17 0.000735882			
	G15G26R 6G 4		
163408210.64118	20779350.952	-5621.326	39.000
127090379.445 9	20779351.339	-4372.166	44.000
134023229.28519	20315735.130	-4587.586	46.000
87945903.621 9	20315737.415	-3568.082	46.000
<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>

Рисунок А.7 – Пример кадра файла RINEX: 1 – псевдодальность в фазовых циклах, 2 – кодовая псевдодальность, 3 – Доплер, 4 – соотношения сигнал шум

Аналогично одночастотным приемникам, в двухчастотном существует возможность использование как кодовых, так и фазовых измерений, однако появление фазовых измерений на частоте L2 позволяет более точно учитывать ионосферную задержку, чем использование кодовых или комбинированных методов.

А.3 Измерительный комплекс для регистрации сигналов метеорологических спутников Земли

К метеорологическим спутникам можно отнести следующие группы космических аппаратов широкого назначения:

- запущенные в рамках экологической программы EOS (Earth Observing System) глобального мониторинга поверхности Земли;
- Геостационарные спутники международной системы: активно использующиеся американские спутники NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Данные полярно-орбитальных спутников NOAA используются для долгосрочных прогнозов погоды, мониторинга атмосферы и погодных явлений, а также для обеспечения безопасности полетов и безопасности водного транспорта. Изображения облачности передаются в формате АРТ (Automatic Picture Transmission) в диапазоне 137 МГц. Пример получаемых изображений приведен на рис. А.8.

В сеансе передачи данных со спутников NOAA передаются изображения двух спектральных каналов: видимого (днем) или среднего ИК (ночью) и теплового ИК (круглосуточно) с пространственным разрешением 4 км и шириной полосы обзора приблизительно 3000 км. Повторяемость приема снимков одной и той же территории – 2..3 раза в сутки для одного спутника, или 8-12 раз в зависимости от количества одновременно действующих спутников (NOAA15 – $f = 137,62$ МГц, NOAA17 – $f = 137,5$ МГц, NOAA18 – $f = 137,9125$ МГц, NOAA19 – $f = 137,1$ МГц).

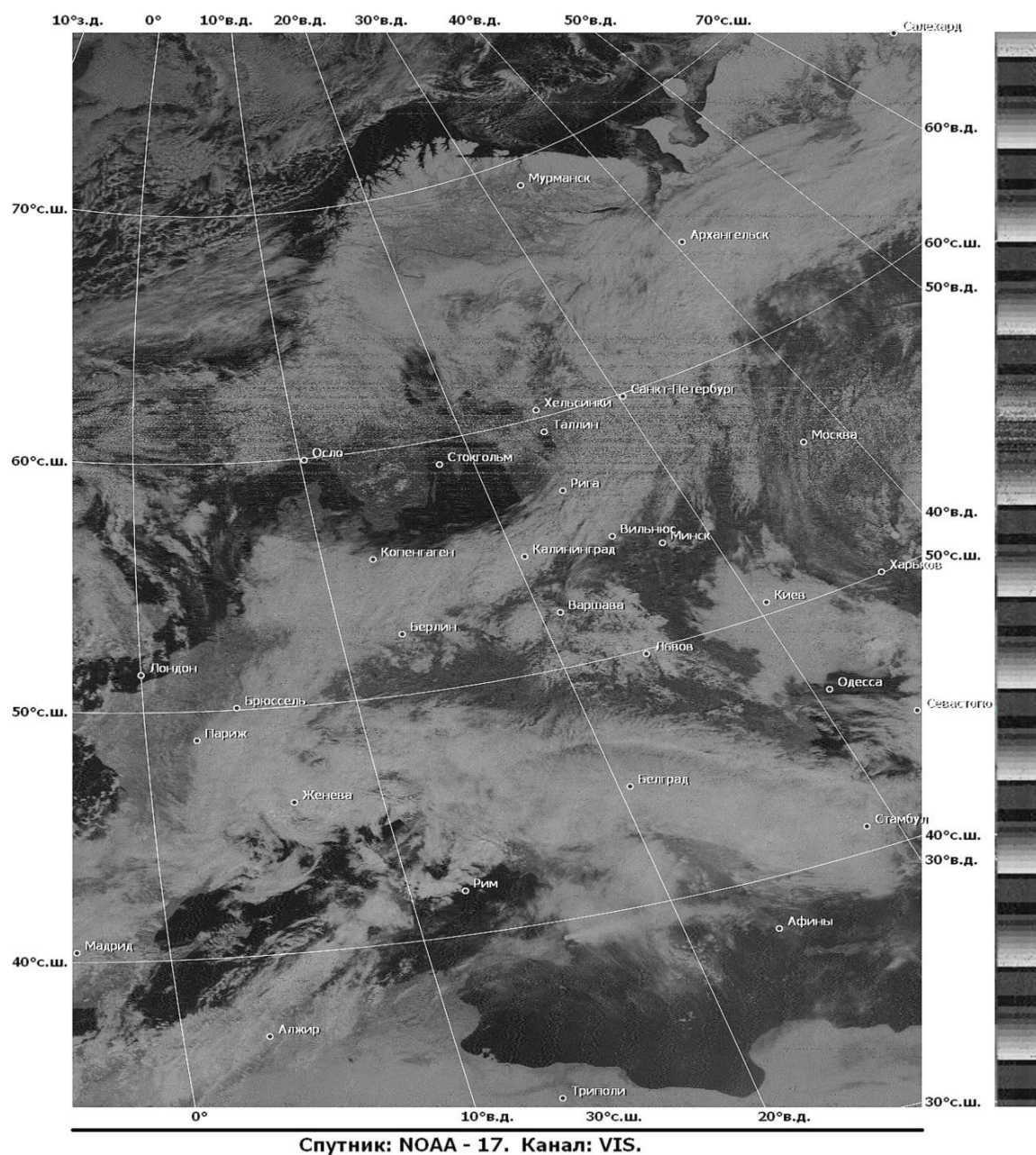


Рисунок А.8 – Карты облачности со спутников NOAA

Для приема снимков был разработан стенд приема сигналов метеорологических спутников NOAA (Рис. А9, А10). Пункт приема космической информации состоит из антенны, малошумящего антенного усилителя и приемника. Антенна представляет собой пару полуволновых вибраторов, размещенных ортогонально друг к другу. Антенный усилитель имеет коэффициент шума 1 дБ и коэффициент усиления близкий к 25 дБ размещенный в непосредственной близости от антенны и обеспечивающий высокую чувствительность приемника и компенсацию потерь в кабеле.

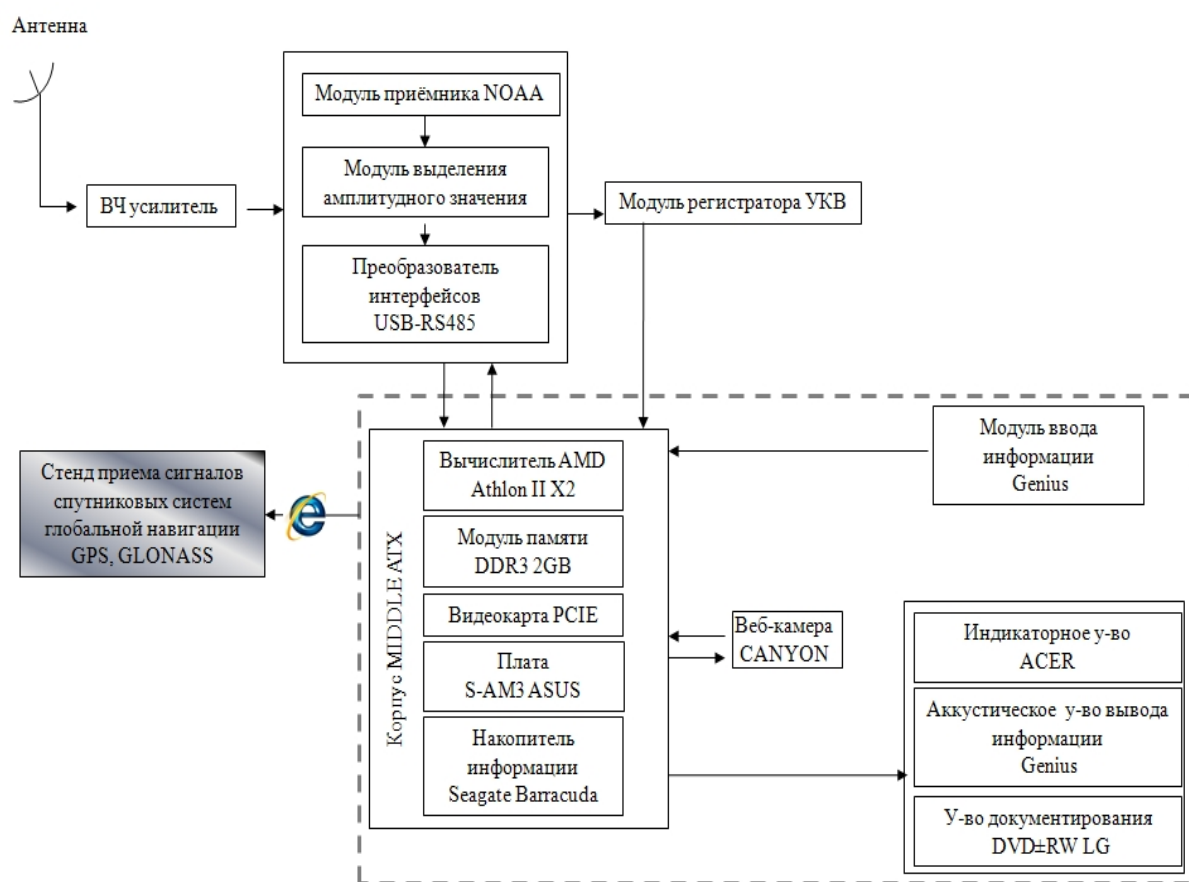


Рисунок А.9 – Упрощенная структурная схема стенда приема сигналов метеорологических спутников NOAA

Приемник космической информации построен по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты. Это позволяет обеспечить высокую избирательность по соседнему и зеркальному каналам.

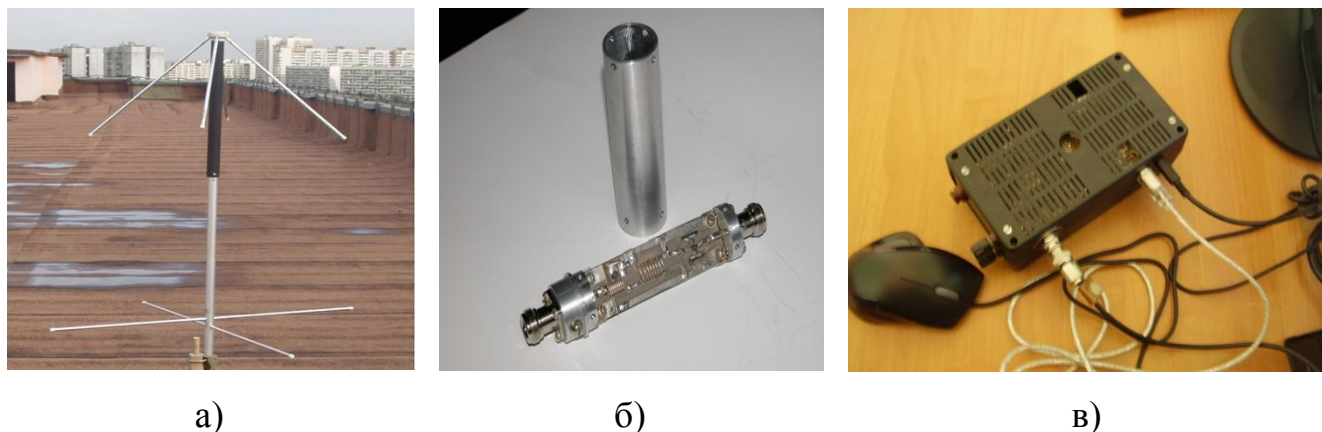


Рисунок А.10 – Внешний вид антенны (а), антенного усилителя (б), приемника сигналов NOAA (в)

Для автоматизации работы комплекса разработана программа SatScheduler, позволяющая записывать пролеты спутников в заданной пользователем время. Для создания расписания используется программа WXtrack (рис. А.11), которая позволяет оценивать траектории движения спутников их охват исследуемой территории.

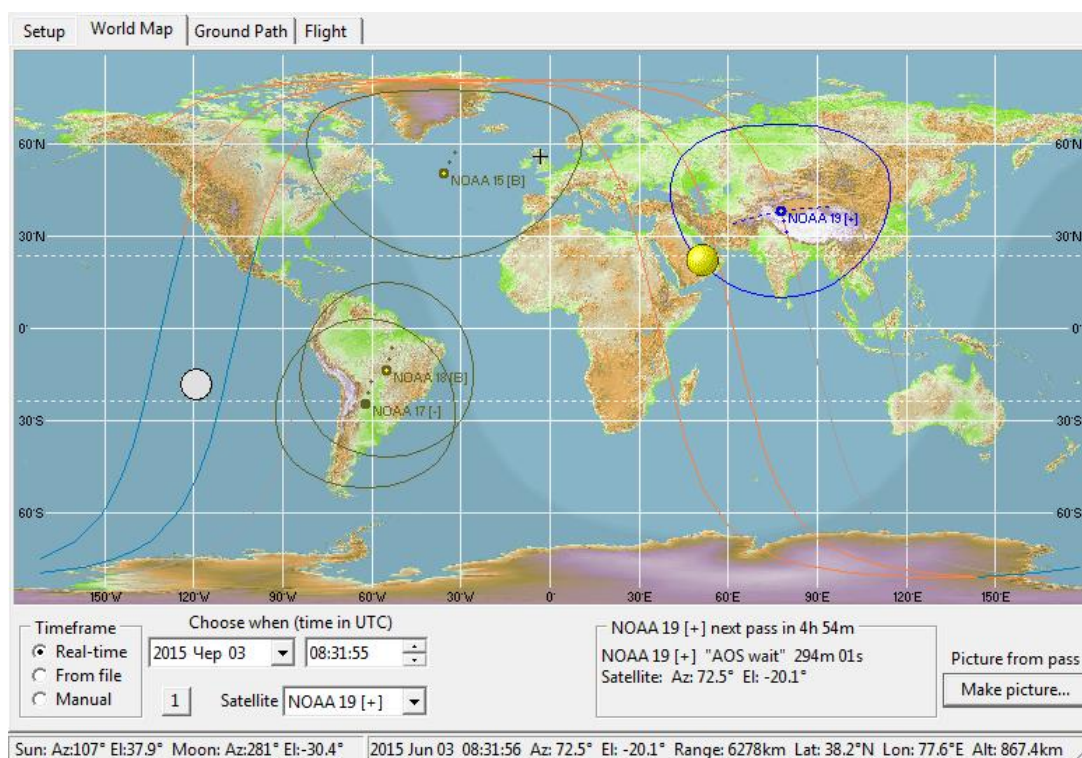


Рисунок А.11 – Интерфейс трекинг-программы WXtrack

Таким образом, использование карт облачности может обеспечивать дополнительной информацией о пространственном распределении облачности и зон выпадения осадков.

А.4 Метеостанция

Используемая в исследованиях метеостанция позволяет с высокой точностью определять параметры атмосферы (температуру, давление, влажность) с малыми интервалами между измерениями. В метеостанции используются датчик влажности и датчик давления, каждый из которых комплектован устройством для измерения температуры, что лишает необходимости установки отдельного датчика температуры. Одним из преимуществ использования штатной метеостанции является период получения информации о метеорологических параметрах, который может задаваться начиная с 2 с. (для данных из сети интернет период обновления информации составляет 1–3 ч.). Таким образом, получаемая информация об изменении коэффициента преломления, рассчитанного по метеорологическим параметрам, значительно достоверней. Пример сопоставления метеорологической информации, полученной в месте проведения исследований и ближайшей станцией, данные которой доступны в сети интернет, представлен на рис. А.12.

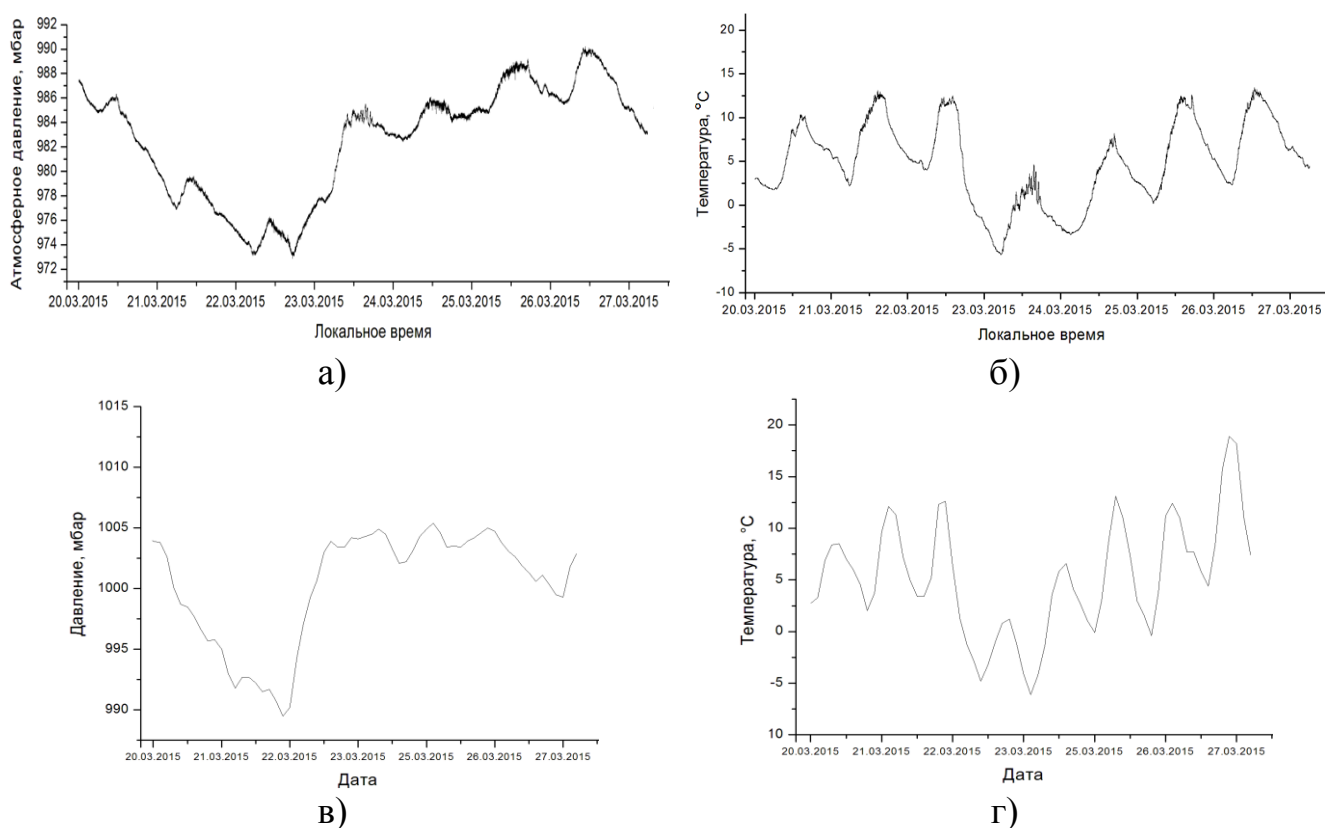


Рисунок А.12 – Изменения давления (а, в) и температуры (б, г) за период с 20.03.2015 по 27.03.2015: а, б) штатная метеостанция; в, г) метеоданные аэропорта

Для измерения влажности используется датчик серии SHT (Humidity & Temperature Sensor) компании “Sensirior”. Такие датчики предназначены для измерения относительной влажности воздуха в пределах от 0 до 100%. Основой датчика является чувствительный элемент, который представляет собой многошаровую структуру, образованную двумя плоскими платиновыми обкладками и диэлектрическим термореактивным полимером, который заполняет пространство между ними. Датчик имеет двухпроводной последовательный цифровой интерфейс с тактовой частотой до 10 МГц. Используемый датчик SHT15 имеет следующие точности $\pm 2\%$ при измерении относительной влажности и $\pm 0,3^\circ$ при измерении температуры. Диапазон измеряемых температур: -40°C до $+123,8^\circ\text{C}$.

Внутри датчика SHT15 есть элемент, который изменяет свои электрические характеристики при изменении влажности и элемент, который изменяет свои электрические характеристики при изменении температуры, которые нагружены на 14-разрядный АЦП, соединенный, в свою очередь, с внутренним микроконтроллером датчика SHT15 при помощи последовательного интерфейса, что позволяет получить высокое качество сигнала и малое время отклика на изменение влажности и температуры (не больше 3с).

В качестве датчика давления используется датчик HP03SA, компании HoreRF, который представляет собой миниатюрный гибридный модуль барометра/альтиметра с повышенной точностью, который изготовлен на основе пьезорезистивного датчика давления и интерфейсной микросхемы аналого-цифрового преобразователя. Тензочувствительный элемент датчика образуют четыре пьезорезистора в тонкой кремневой мембране, сформированные методом ионной имплантации и включенные по мостовой схеме. Деформация мембраны, вызванная приложенным давлением, приводит к изменению сопротивления и разбалансированию моста. Формат выходных данных такого устройства представляется в виде 16-разрядного слова, которое отвечает измеряемому АЦП напряжению в зависимости от давления и температуры.

Модуль HP03SA позволяет измерять атмосферно давление в пределах от 300 до 1100 гПа с точностью $\pm 1,5$ гПа и температуру в диапазоне от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$.

За основу принципиальной схемы прибора соединения компьютера с датчиком измерения давления, влажности и температуры используется восьмиразрядный микроконтроллер AT90USB1287, который представляет семейство AVR фирмы Atmel. Этот микроконтроллер имеет шесть восьмиразрядных портов ввода-вывода, шины одного из которых могут использоваться в качестве 10-разрядного АЦП и последовательный порт ввода-вывода UART, который используется для связи микроконтроллера с компьютером по интерфейсу RS-232C.

Конструктивно устройство реализовано в виде двух блоков: блок процессора и блок датчиков, соединенных между собой 10-контактным шлейфом (рис. А.13).

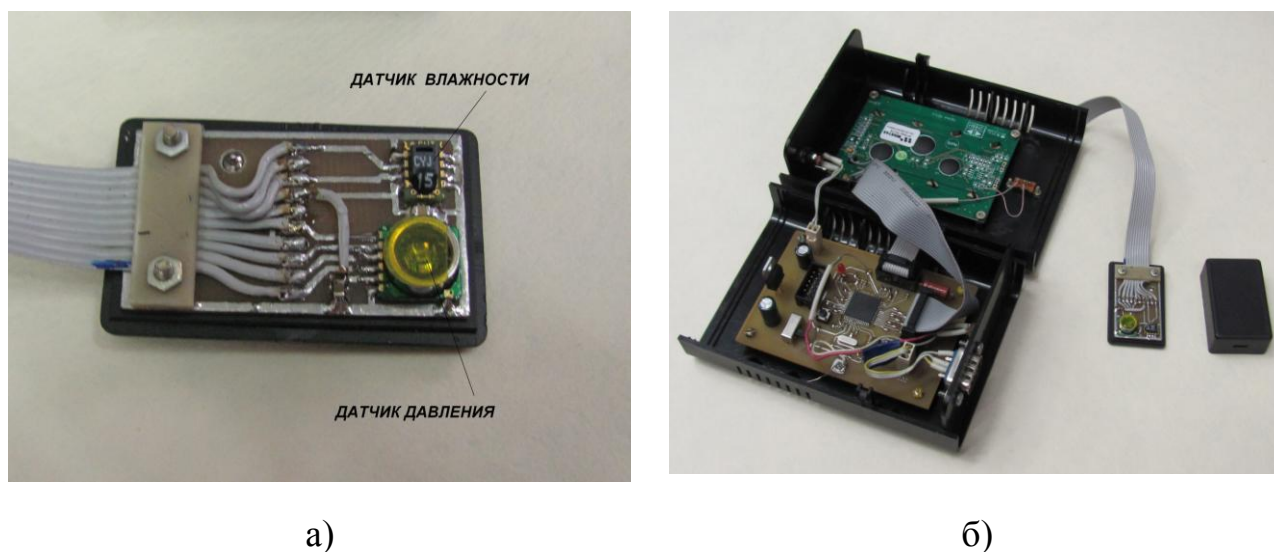


Рисунок А.13 – Блок датчиков (а) и устройство соединения с выносным блоком датчиков (б)

Накопление метеорологической информации осуществляется при помощи специально созданной программы, интерфейс которой представлен на рис. А.14.

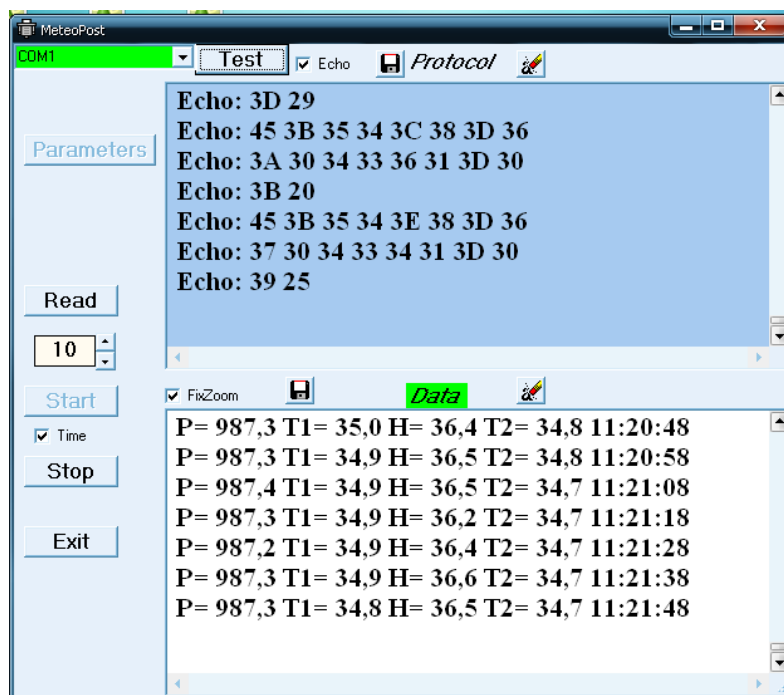


Рисунок А.14 – Интерфейс программы регистрации метеорологических параметров

А.5 Конденсаторный НЧ-рефрактометр

Свойства среды при распространении радиоволн определяются коэффициентом преломления n , который связан с диэлектрической проницаемостью среды простым соотношением $n = \sqrt{\epsilon}$. Для атмосферы вблизи поверхности Земли величина диэлектрической проницаемости отличается от единицы только в шестом знаке, поэтому для удобства на практике удобно использовать индекс рефракции $N = (n - 1) \cdot 10^6$. Для измерения индекса рефракции можно использовать как подходы, основанные на пересчете метеопараметров, так и непосредственное измерение диэлектрической проницаемости среды. В качестве устройства для непосредственного измерения коэффициента преломления среды в данных исследованиях использовался конденсаторный НЧ-рефрактометр (рис. А.15).

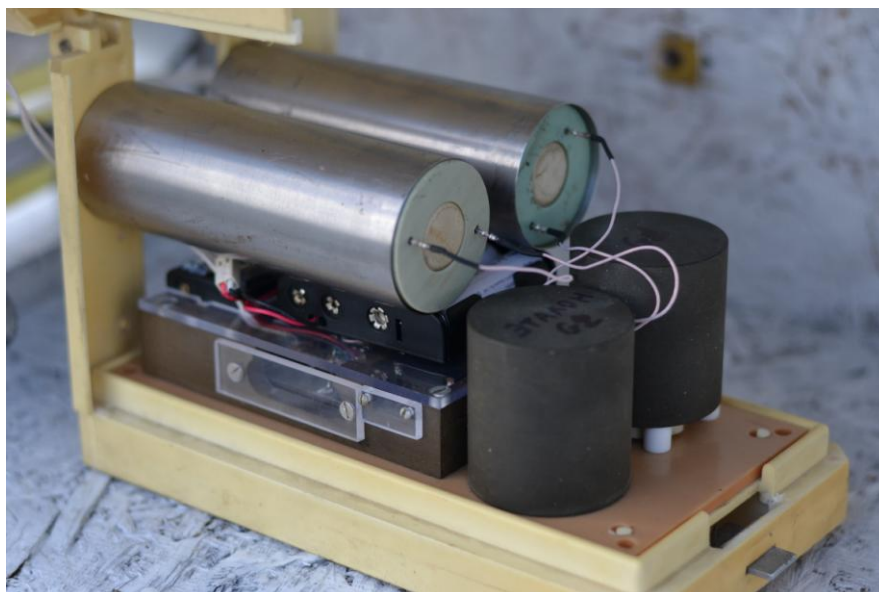


Рисунок А.15 – Внешний вид конденсаторного НЧ-рефрактометра

Работа используемого рефрактометра основана на методе Крейна, который измеряет разницу резонансных частот измеряемого (связанного с средой) и эталонного (закрытого) резонаторов, каждый из которых определяет частоту своего осциллятора. Флуктуации разностной частоты определяются изменениями показателя преломления среды в измеряемом резонаторе. Схематическая структура рефрактометра представлена на рис. А.16.

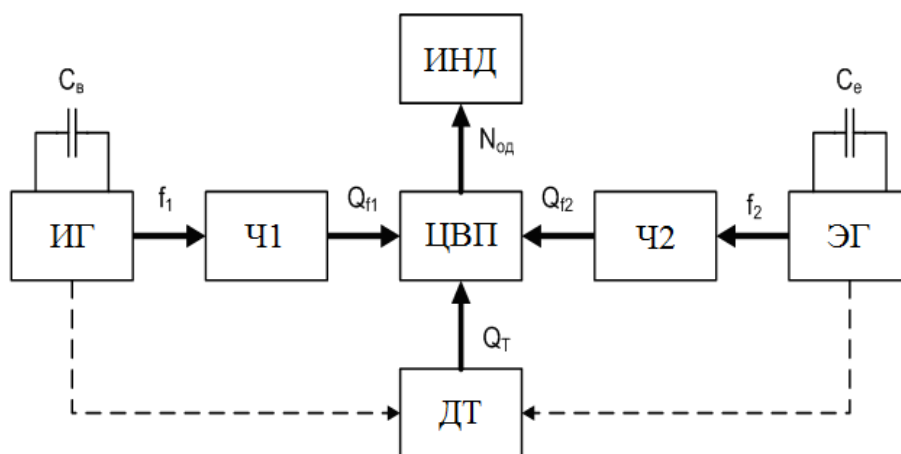


Рисунок А.16 – Структура конденсаторного НЧ рефрактометра: ИГ – измерительный генератор; ЭГ – эталонный генератор; Ч1, Ч2 – частотомеры; ДТ – датчик температуры; ЦВП – цифровой вычислительный прибор; ИНД – индикаторный прибор

Для устранения влияния смесителя частот на точность измерения используется прямое измерения частот генераторов, а разница определяется цифровым методом. Также для уменьшения влияния температурных коэффициентов частот генераторов на точность измерений используются датчики температуры, информация с которых позволяет проводить также и температурную компенсацию измерений.

Частотомеры реализованы в цифровом виде (алгоритмично) на основе микроконтроллера (МК). Микроконтроллер МК1 работает в режиме ведомого. Его задача – измерение частоты генератора Г1 и передача измеренной частоты на МК2. Микроконтроллер МК2 работает в режиме ведущего. Кроме измерения частоты сигнала генератора Г2, на нем также лежат функции основного вычислительного прибора и управления всеми функциями рефрактометра.

Измерительная информация собирается на постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ). Отображение информации о режиме работы рефрактометра и коэффициенте преломления, а также управлением прибором осуществляется при помощи отдельного подключаемого блока, содержащего жидкокристаллический индикатор и клавиатуру. Работа рефрактометра заключается в следующем. МК2 формирует интервал измерения $T_{изм}$ и выдает управляющий сигнал для указания его начала и конца микроконтроллеру МК1, чем и синхронизируются процессы измерения частот генераторов Г1 и Г2. После окончания интервала измерения МК2, через последовательный интерфейс связи SPI (Serial Peripheral Interface), принимает значение частоты генератора Г1 от МК1, вычисляет разницу частот генераторов Г1 и Г2 и по ней определяется коэффициент преломления среды. Для учета температурного коэффициента частоты генераторов при вычислении коэффициента преломления в схеме используется датчик температуры информация с которого считывается МК2 через однопроводной последовательный интерфейс 1-Wire.

Вычисление индекса рефракции в конденсаторном НЧ-рефрактометре. На точность определения коэффициента преломления в

большей степени зависит характеристики неустойчивости блока генераторов. Для LC-генераторов в общем случае частота определяется соотношением

$$f = \frac{K_0}{\sqrt{C_0 + C}}, \quad (\text{A.1})$$

где K_0 – коэффициент пропорциональности, который зависит от эквивалентного сопротивления, через который происходит заряд конденсатора;

C_0 – внутренняя емкость схемы.

На основании (A.1) можно записать:

$$f_{\min} = \frac{K_0}{\sqrt{C_0 + C_{\max}}}, \quad (\text{A.2})$$

$$f_{\max} = \frac{K_0}{\sqrt{C_0 + C_{\min}}}, \quad (\text{A.3})$$

где $f_{\min}$, $f_{\max}$ – минимальная и максимальная частоты генерации сигналов; $C_{\min}$, $C_{\max}$ – минимальная и максимальная емкости воздушного конденсатора генератора (в нашем $C_{\min} = 1 \text{ нФ}$, $C_{\max} = 81 \text{ нФ}$).

Тогда разделив (A.2) на (A.3), получим коэффициент α , который характеризует изменение частоты генерации при изменении емкости конденсатора:

$$\alpha = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \sqrt{\frac{C_0 + C_{\max}}{C_0 + C_{\min}}}. \quad (\text{A.4})$$

Из (A.4) видно, что при увеличении C_0 отношения максимальной и минимальной частот уменьшается, т. е. уменьшается влияние емкости конденсатора на частоту генерации. Максимальная она будет при $C_0 = 0$. Емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, а с учетом, что $n = \sqrt{\epsilon}$, пропорциональна и квадрату коэффициента преломления. То есть для LC генераторов, на основании которых построен блок

генераторов рефрактометра, частота генерации будет обратно пропорциональна коэффициенту преломления. Следовательно для определения индекса рефракции используется соотношение

$$N = N_0 + \Delta N = N_0 + \alpha_g [f_g(N) - f_g(N_0)] - \alpha_e [f_e(N) - f_e(N_0)], \quad (A.5)$$

где N_0 – калибровочное значение индекса рефракции; ΔN – прирост индекса рефракции; α_g (α_e) – коэффициент пропорциональности между сменой емкости конденсатора и частоты генерации измерительного (эталонного) генератора; $f_g(N)$, $f_e(N)$ – измеренные частоты генерации измеряемого и эталонного генераторов, соответственно; $f_g(N_0)$, $f_e(N_0)$ – частоты генерации измеряемого и эталонного генераторов, измеренные при калибровке прибора. Таким образом, для измерения коэффициента преломления среды при помощи конденсаторного НЧ-рефрактометра необходимо провести его предварительную калибровку.

Таким образом, созданный измерительный комплекс обеспечивает следующее.

1. Круглосуточные измерения основных метеорологических параметров приземного слоя тропосферы (температуры, давления, влажности), т. е. условий распространения.

2. Круглосуточные накопления навигационной информации в одно- и двухчастотном режиме работы ГНСС-приемников, что позволяет анализировать суточные и сезонные изменения координатной информации.

3. Возможность отслеживать перемещения облачного покрова, при помощи карт, получаемых со спутников NOAA.

Как следует из приведенного, совокупность использованных при его создании технических решений привела к тому, что он обладает уникальными возможностями обеспечивающими возможность решения как фундаментальных задач дистанционного зондирования окружающей среды, так и ряда прикладных, позволяющих повысить точность позиционирования в ГНСС за счет учета особенностей распространения радиоволн.