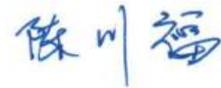


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический Факультет

На правах рукописи



Чэнь Чуаньфу

**Модели BDGIM и NeQuickG и сверхширокополосные GNSS
сигналы в задаче оценки ионосферных параметров**

Специальность 1.6.18 — Науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

к.ф.-м.н.,

Падохин Артем Михайлович

Москва 2025

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Ионосфера и её описание в операционных эмпирических моделях	11
1.1 Общие сведения об ионосфере Земли	11
1.2 Морфология пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере	13
1.3 Интегральные характеристики ионосферы	17
1.4 Операционные модели ионосферы	18
1.4.1 Модель Klobuchar	20
1.4.2 Модель BDGIM	22
1.4.3 Модель NeQuickG	24
1.5 Анализ результатов сопоставления операционных ионосферных моделей и нерешенные вопросы	27
ГЛАВА 2 Восстановление интегральных параметров ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами GNSS	29
2.1 Показатель преломления атмосферы для диапазона GNSS	29
2.2 Уравнения наблюдения и оценка TEC по данным GNSS	30
2.3 Особенности использования различных кодировок навигационных сигналов в ионосферных исследованиях	33
2.3.1 Сигналы с двоичной и квадратурной фазовой манипуляцией BPSK и QPSK	33
2.3.2 Сигналы с модуляцией двоичной смещенной несущей AltBOC	35
2.3.3 Теоретические оценки шумов измерений псевдодальностей для GNSS сигналов в кодировках BPSK, QPSK и AltBOC	36
2.3.4 Сигналы Galileo E5 и Beidou B2 AltBOC	39
2.4 Метод оценки абсолютного вертикального TEC по данным одночастотных наблюдений сверхширокополосных навигационных сигналов AltBOC	40

2.5 Выводы главы	44
ГЛАВА 3 Исследование особенностей описания ионосферных параметров в операционных моделях BDGIM и NeQuickG	46
3.1 Тестирование операционных ионосферных моделей по данным TEC	46
3.1.1 Суточный ход ошибки моделирования TEC	48
3.1.2 Влияние геомагнитной активности на ошибки моделирования TEC	49
3.1.3 Влияние солнечной активности на ошибки моделирования TEC	51
3.1.4 Сезонная изменчивость ошибки моделирования TEC	52
3.1.5 Анализ среднегодовых ошибок моделирования TEC	56
3.2 Тестирование операционных ионосферных моделей на данных GEC	56
3.3 Выводы главы	65
ГЛАВА 4 Исследование сверхширокополосных сигналов Beidou B2 и Galileo E5 в задачах зондирования ионосферы	66
4.1 Шумовые характеристики оценок TEC	66
4.2 Используемые экспериментальные данные	67
4.3 Исследование шумовых характеристик оценок TEC с использованием сигналов Galileo E5 и Beidou B2 AltBOC	70
4.4 Влияние естественных радишумов на сигналы AltBOC	74
4.5 Оценки абсолютного вертикального TEC по данным одночастотного приёма сигналов AltBOC	79
4.6 Выводы главы	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
ЛИТЕРАТУРА	91

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Системы глобальной спутниковой навигации (GNSS) нашли широкое применение в различных сферах деятельности человеческого общества. Для совершенствования их работы необходимо, с одной стороны лучше описывать среду распространения навигационных радиосигналов, в частности ионосферу Земли, а с другой стороны совершенствовать свойства навигационных сигналов для уменьшения шумов измерений. Работы в обоих направлениях активно ведутся. Для описания ионосферы системы GNSS используют отдельный класс моделей – операционные модели, которые сочетают с одной стороны достаточную простоту и вычислительную эффективность, а с другой стороны возможность адаптироваться к текущим гелиогеофизическим условиям. Имеется большое число исследований эффективности операционных моделей, например [1] [2] [3] [4] [5], но они в основном сфокусированы на их эффективности в навигационной задаче и способности описать ионосферную задержку. Более того, такие исследования показывают существенно различающиеся результаты в зависимости от региона исследования и гелиогеофизических условий, делая выводы о превосходстве той или иной модели. При этом с нашей точки зрения недостаточно внимания уделено вопросу, могут ли такие модели, за счёт своей высокой вычислительной эффективности, использоваться в научных приложениях, например для параметризации более сложных моделей среды. Аналогично, недостаточно с нашей точки зрения уделяется внимание вопросу, как развитие GNSS сигналов влияет на обеспеченность ионосферных наблюдений, дают ли новые сигналы какие-либо преимущества в оценке параметров ионосферы. Решению этих вопросов посвящена настоящая работа.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является исследование эффективности современных операционных моделей ионосферы BDGIM [4] и NeQuickG [5] в задачах оценки интегральных характеристик ионосферы, полного (TEC) [6] и глобального (GEC) [7] электронного содержания и возможности использования этих оценок для параметризации более сложных ионосферных моделей. Кроме того целью работы

также является экспериментальное изучение характеристик сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC [8], их влияния на обеспеченность данными ионосферных наблюдений и разработка метода оценки абсолютного вертикального TEC над отдельной приёмной станцией по данным одночастотных регистраций фаз и псевдодальностей навигационных сигналов в кодировке AltBOC.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести исследование особенностей оценки интегральных характеристик ионосферы TEC и GEC в операционных моделях BDGIM и NeQuickG на длительном интервале времени при различных гелиогеофизических условиях.
2. Разработать и протестировать метод оценки GEC по данным операционных моделей, воспроизводящий с заданной точностью данные реальных наблюдений CODG и протестировать его на большом массиве наблюдений.
3. Исследовать шумовые характеристики одночастотных оценок относительного наклонного TEC по данным приёма сверхширокополосных сигналов Beidou B2 и Galileo E5 AltBOC.
4. Разработать алгоритм оценки абсолютного вертикального TEC на основе одночастотных наблюдений сигналов AltBOC и провести его тестирование на реальных данных наблюдений и валидацию по данным известных двухчастотных алгоритмов.

Научная новизна исследования

1. Впервые показано, что модель BDGIM недооценивает до 2х раз амплитуды 27-дневных, полугодовых и годовых гармоник GEC по сравнению с экспериментальными данными CODG.
2. Впервые показано, что оценки GEC по модели NeQuickG можно использовать для параметризации более сложных ионосферных моделей вместо оценок GEC CODG, применяя простейшую регрессионную зависимость между ними.
3. Впервые показано уменьшение до 5 раз уровня шумов, оценки наклонного TEC по одночастотной фазово-кодовой комбинации при использовании навигационных сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC по сравнению с сигналами в кодировках BPSK/QPSK.

4. Разработанный метод оценки абсолютного вертикального TEC над одиночной станцией впервые позволил использовать для этого одночастотные данные наблюдений сигналов GNSS в кодировке AltBOC.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных методик для:

1. Экспресс - оценки GEC, являющегося входным параметром многих ионосферных моделей.
2. Увеличения обеспеченности ионосферных данных TEC за счёт использования одночастотных измерений навигационных сигналов в кодировке AltBOC.

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в настоящей работе, являются оригинальными и получены автором диссертации, либо при его непосредственном участии. Автором проведён анализ и выявлены особенности представления TEC и GEC в операционных моделях BDGIM и NeQuickG, разработан алгоритм, дающий возможность использовать оценки GEC по данным модели BDGIM в качестве входных данных для моделей ионосферы, использующих для этих целей оценки GEC по данным глобальных ионосферных карт CODG. Автором проведён экспериментальный анализ шумов одночастотных оценок относительного наклонного TEC по данным приёма сверхширокополосных навигационных сигналов AltBOC и разработан метод оценки абсолютного вертикального TEC над одиночной станцией по данным одночастотных измерений AltBOC сигналов.

Положения, выносимые на защиту

1. Амплитуды 27-дневных, полугодовых и годовых гармоник глобального электронного содержания ионосферы Земли в модели BDGIM в максимуме 24го цикла солнечной активности недооценены до 2х раз по сравнению с экспериментальными данными глобальных ионосферных карт центра CODG.

2. Метод экспресс-оценки глобального электронного содержания ионосферы Земли по данным модели NeQuickG, который позволяет достигнуть среднеквадратичной ошибки относительно данных глобальных ионосферных карт центра CODG не более 0.02 TECu.
3. Использование навигационных сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC позволяет оценивать относительное наклонное полное электронное содержание ионосферы по одночастотным данным с тем же уровнем шума, что и при использовании двухчастотных фазовых данных. Относительно BPSK/QPSK сигналов уровень шумов оценок полного электронного содержания по одночастотным данным для AltBOC сигналов уменьшается до 5 раз.
4. Метод оценки абсолютного вертикального полного электронного содержания на одиночной станции по данным одночастотных фазовых и кодовых наблюдений сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC, обеспечивающий абсолютные отклонения менее 1 TECu от методов использующих двух частотные фазовые наблюдения не менее чем в 95% случаев.

Достоверность результатов

Достоверность результатов данного исследования обусловлена использованием в работе физически и математически обоснованных методов и подходов. Работоспособность разработанных в диссертации методов протестирована на большом объеме экспериментальных данных радиопросвечивания ионосферы сигналами GNSS. Результаты, полученные в работе, находятся в хорошем количественном и качественном соответствии с результатами исследований, опубликованными другими авторами.

Апробация результатов работы

Результаты данного исследования были представлены на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Второй семинар "Физические основы прогноза солнечно-земных процессов и событий" ("ПРОГНОЗ-2024"), 27 - 31 мая 2024, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН.

2. Ежегодный тематический семинар "Радиозондирование ионосферы", 27 марта 2024, Институт солнечно-земной физики СО РАН.
3. Huawei Device Algorithm Summit 2024, 25 июня 2024.
4. Конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 14-18 ноября 2022, Институт космических исследований РАН.
5. Международный научный форум молодых учёных "Ломоносов 2020", 10 - 27 ноября 2020, МГУ им. М.В. Ломоносова.
6. 48-й ежегодный Апатитский семинар "Физика авроральных явлений" 10-14 марта 2025, Полярный геофизический институт РАН.

Список публикации по теме диссертации

1. **Chuanfu Chen**, Ilya Pavlov, Artem Padokhin, Yury Yasyukevich, Vladislav Demyanov, Ekaterina Danilchuk, and Artem Vesnin, "Galileo and BeiDou AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies," *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6472, 2024, doi: 10.3390/s24196472. [WOS IF = 3.4] (0.87 п.л./авторский вклад **0.76 п.л.**: анализ литературы, подготовка экспериментальных данных, анализ, интерпретация результатов, выводы, написание текста статьи)
2. Yury V. Yasyukevich, Dmitry Zatolokin, Artem Padokhin, Yunbin Yuan, Anna Yasyukevich, **Chuanfu Chen**, Ningbo Wang, Bruno Nava, Zishen Li, and Artem Vesnin, "Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains," *Sensors*, vol. 23, no. 10, p. 4773, 2023, doi: 10.3390/s23104773. [WOS IF = 3.4] (1.33 п.л./авторский вклад **0.6 п.л.**: анализ литературы, подготовка экспериментальных данных, анализ, интерпретация результатов, выводы)
3. **Ч. Чэнь**, А.М. Падохин, А.И. Иванов, И.А. Павлов, "Особенности представления глобального электронного содержания в операционных ионосферных моделях Клобучара, BDGIM и NeQuickG," *Журнал радиоэлектроники*, №. 1., 2025, doi: 10.30898/1684-1719.2025.1.4. [RINC IF = 0.333] (1.05 п.л./авторский вклад **0.94 п.л.**: анализ литературы, подготовка экспериментальных данных, анализ, интерпретация результатов, выводы, написание текста статьи)

4. **Ч. Чэнь**, А.М. Падохин, "Особенности представления GEC в операционных моделях BDGIM и NeQuickG," *ПРОГНОЗ-2024*, Москва, 2024. (0.063 п.л)
5. **Ч. Чэнь**, А.М. Падохин, "Тестирование модели ионосферной задержки BDGIM в регионе Китая," Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, Россия, 2022, doi: 10.21046/20DZZconf-2022a. (0.063 п.л)
6. А. Падохин, **Ч. Чэнь**, А. Иванов, Ю. Ясюкевич, and А. Веснин, "Особенности представления GEC в моделях NeQuickG, BDGIM и глобальных ионосферных моделях," Ежегодный тематический семинар "Радиозондирование ионосферы", *Институт солнечно-земной физики СО РАН*, 27 марта 2024, 2024. (0.063 п.л)
7. **Ч. Чэнь**, А. М. Падохин, "Тестирование ионосферной модели BDGIM в средних широтах на основе данных одиночного GNSS-приемника," XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2020", Москва, Россия, 2020. (0.063 п.л)
8. Artem Padokhin and **Chuanfu Chen**, "GNSS, ionospheric tomography and remote sensing, natural and artificial ionospheric disturbances and their influence on GNSS and positioning," HUAWEI Device Algorithm Summit 2024, Москва, Россия, 2024. (0.063 п.л)
9. А. Padokhin, Yu. Yasyukevich, V. Demyanov, **C. Chen**, I. Pavlov, A. Vesnin, E. Danilchuk, "GNSS AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies" Book of Abstracts PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA 48th Annual Seminar, Apatity, Russia, 2025. (0.063 п.л)

Структура и объём диссертации

Данная диссертация состоит из введения, четырёх глав, в которых изложено основное содержание работы, заключения и списка литературы, содержащего 102 ссылки. Общий объём диссертации 102 страницы, включая 6 таблиц и 34 рисунка.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели диссертации и решаемые задачи,

сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященной основным морфологическим особенностям распределения электронной концентрации и ее представлению в операционных эмпирических моделях Klobuchar, NeQuickG, BDGIM.

Во второй главе приводится описание методов восстановления интегральных характеристик ионосферы TEC и GEC по данным радиопросвечивания сигналами GNSS. Приводятся основные данные о методах кодирования GNSS сигналов и их влиянии на шумы наблюдаемых величин. Приводится описание разработанного метода восстановления абсолютного вертикального TEC над одиночной станцией по данным одночастотного приема навигационных сигналов в кодировке AltBOC.

В третьей главе приводятся результаты исследования особенностей представления TEC и GEC в операционных моделях ионосферы BDGIM и NeQuickG, показывается возможность использовать оценки GEC по модели NeQuickG для параметризации более сложных ионосферных моделей.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования шумов оценок TEC по данным одночастотного приема сигналов AltBOC, показано что этот метод кодирования уменьшает шумы оценок TEC до 5 раз по сравнению с BPSK и QPSK. Представлены результаты верификации разработанного во второй главе метода оценки вертикального TEC по данным приема сигналов AltBOC на одной частоте, показано, что он обеспечивает абсолютные отклонения менее 1TEC_i от методов использующих двухчастотные фазовые наблюдения в не менее чем 95% случаев.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией.

ГЛАВА 1

Ионосфера и её описание в операционных эмпирических моделях

1.1 Общие сведения об ионосфере Земли

Ионосфера [9], в общем значении — слой атмосферы планеты, сильно ионизированный вследствие облучения космическими лучами. У планеты Земля это верхняя часть атмосферы, состоящая из мезосферы, мезопаузы и термосферы, ионизированная главным образом облучением Солнца [10] [11].

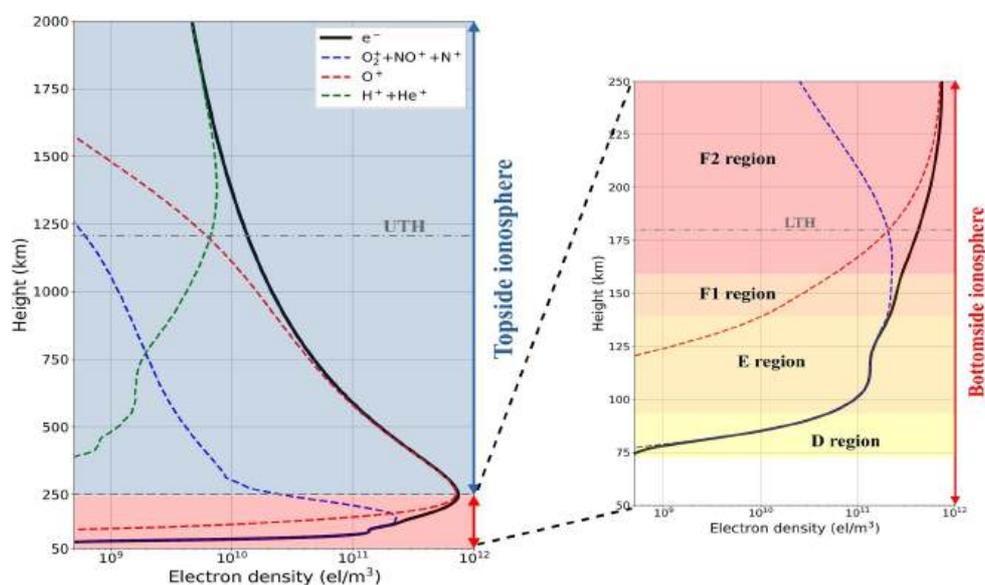


Рис. 1.1 Распределение электронной концентрации и структура ионосферных слоёв Земли [12].

В начале 20-х годов советский ученый М.В. Шулейкин установил, что в ионосфере должно быть по крайней мере два максимума электронной концентрации: один на высоте порядка 100 км, а другой на высоте 200 км. Анализируя результаты измерений напряженности поля дальних радиостанций в различных пунктах земной поверхности, он пришел также к выводу о существовании в ионосфере неоднородностей, имеющих форму облаков.

В результате отражения радиоволн от таких неоднородностей к антенне приемного устройства могут прийти два и более лучей, при сложении которых возможно либо усиление, либо ослабление (замирание) принимаемого сигнала. Итогом работы М. В. Шулейкина была разработка основ современной теории преломления радиоволн в ионосфере [13]. Его работы о влиянии ионосферы на распространение

радиоволн нашли дальнейшее развитие в последующих исследованиях Л. А. Жекулина [14], В. Л. Гинзбурга [13], Д.С. Лукина и А.С. Крюковского [15] и ряда других учёных.

В зависимости от распределения по высоте концентрации заряженных частиц N ионосферу разделяют на области D, E и F. Слой F в летнее дневное время подвергается бифуркации на два слоя F1 и F2 (см. Рис. 1.1) [16].

В области D (60 ~ 90 км) концентрация заряженных частиц составляет $N_{max} 10^2 \sim 10^3 \text{cm}^{-3}$ — это область слабой ионизации. Основной вклад в ионизацию этой области вносит рентгеновское излучение Солнца. Также небольшую роль играют дополнительные слабые источники ионизации: метеориты, сгорающие на высотах 60~100 км, космические лучи, а также энергичные частицы магнитосферы, высыпавшиеся из радиационных поясов в периоды магнитных бурь.

Слой D также характеризуется резким снижением степени ионизации в ночное время суток. В D-слое наиболее полно исследован состав кластерных ионов и протекающие с их участием процессы [17].

Область E (90 ~ 120 км) характеризуется плотностями плазмы до $N_{max} \sim 10^5 \text{cm}^{-3}$. Она делится на регулярный слой E и нерегулярный, спорадический. В регулярном слое E наблюдается рост концентрации электронов в дневное время, поскольку основным источником ионизации является солнечное коротковолновое излучение, к тому же рекомбинация ионов в этом слое идёт очень быстро и ночью плотность ионов может упасть до 10^3cm^{-3} . Этому процессу противодействует диффузия зарядов из области F, находящейся выше, где концентрация ионов относительно велика, и присутствуют ночные источники ионизации (геокоорное излучение Солнца, метеоры, космические лучи, реакция зарядового обмена с плазмосферой и др.).

На высотах 100 ~ 120 км практически всегда наблюдается слой E_S , очень тонкий (0.5 ~ 1 км), но плотный, получивший название спорадический. Особенностью этого подслоя является отражение радиоволн, соответствующее необычно высокой для области E концентрации электронов ($N_e \geq 10^5 \text{cm}^{-3}$).

Слой E, в силу относительно высокой концентрации свободных носителей заряда, играет важную роль в распространении средних и коротких волн.

Областью F называют всю ионосферу выше 130 ~ 140 км. Максимум ионообразования достигается на высотах 150 ~ 200 км. Однако вследствие диффузии и

относительно долгой длительности жизни ионов образовавшаяся плазма распространяется вверх и вниз от области максимума. Из-за этого максимальная концентрация электронов и ионов в области F находится на высотах 250 ~ 400 км.

В дневное время также наблюдается образование «ступеньки» в распределении электронной концентрации, вызванной мощным солнечным ультрафиолетовым излучением. Область этой ступеньки называют областью F1 (150 ~ 200 км). Она заметно влияет на распространение коротких радиоволн.

Выше лежащую часть слоя F называют слоем F2. Здесь плотность заряженных частиц достигает своего максимума — $N \sim 10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$.

На больших высотах преобладают более лёгкие ионы кислорода (до высот 400—1000 км), а ещё выше — ионы водорода (протоны) и в небольших количествах — ионы гелия.

Особенностью слоя F является то, что он отражает радиоволны в диапазоне коротких волн на частотах от нескольких мегагерц до 10 мегагерц, что делает возможным передачу таких радиосигналов на значительные расстояния.

Несмотря на то что ионный состав слоя F зависит от солнечной активности, его способность отражать электромагнитные волны с частотой, меньшей 10 МГц, стабильна. За открытие слоя F английскому физика Эдварду Виктору Эплтону в 1947 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

1.2 Морфология пространственного распределения электронной концентрации в ионосфере

Для ионосферы Земли характерна значительная пространственная и временная изменчивость. Последняя очевидным образом связана с вариациями основного источника ионизации — солнечного излучения, а также с характером циркуляции верхней атмосферы и вариациями электрического и магнитного поля Земли. В пространственном распределении электронной концентрации в ионосфере Земли можно выделить ряд областей с существенно различающимися характеристиками. Условно можно выделить полярную, авроральную, среднеширотную и экваториальную области (см. Рис. 1.2).

Наибольшие горизонтальные градиенты электронной концентрации в ионосфере наблюдаются в экваториальных и высоких широтах. Среднеширотная область характеризуется небольшими возмущениями, поведение ионосферы наиболее предсказуемо. Авроральные и полярные области характеризуются частыми возмущениями ионосферы, вызванными проникновением заряженных частиц вдоль линий магнитного поля. Большие широтные градиенты возникают вдоль границы аврорального овала. Поведение ионосферы в полярной области наименее предсказуемо. Иногда наблюдается проникновение возмущений из полярных областей в среднеширотную область, прежде всего в периоды геомагнитных бурь.

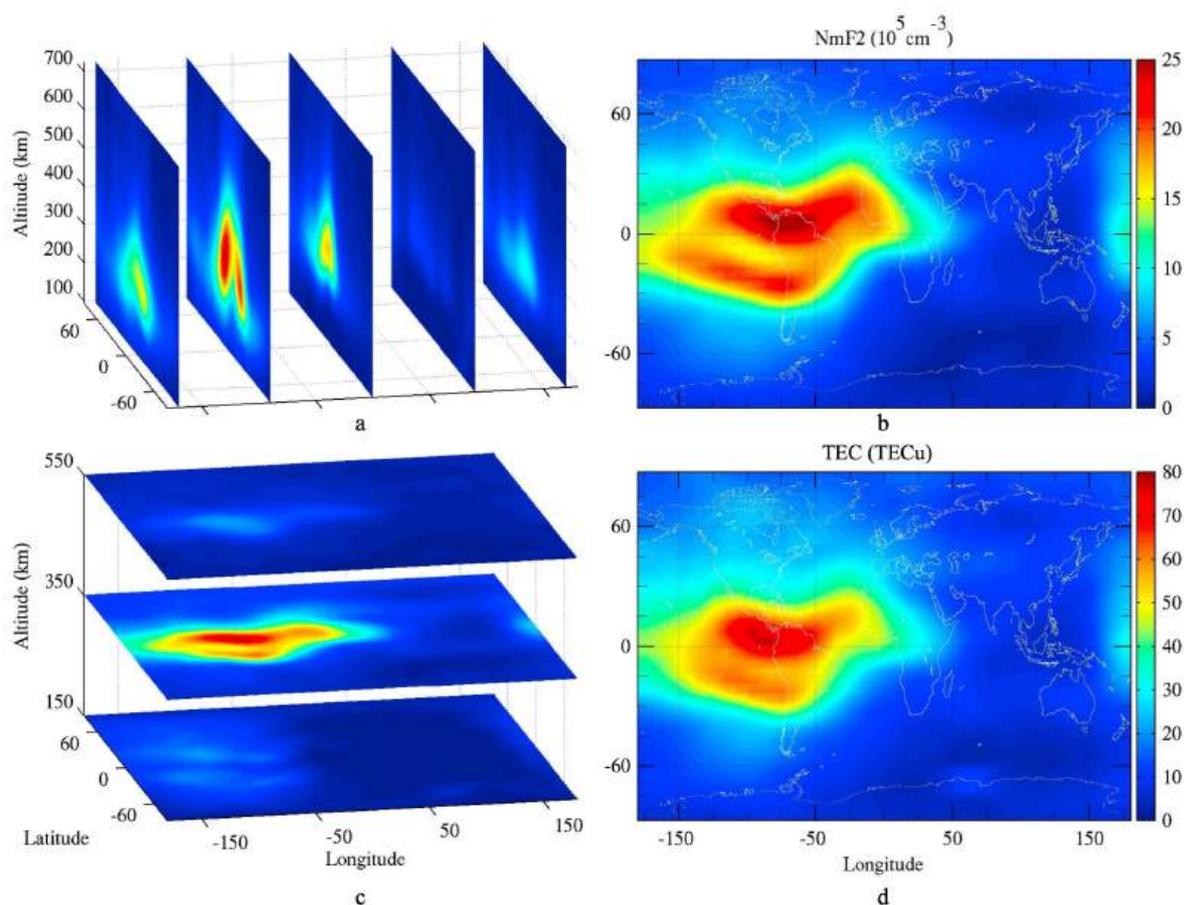


Рис. 1.2 Глобальное распределение электронной концентрации в ионосфере: (а) долготные и (с) высотные срезы электронной концентрации, (b) пространственное распределение электронной концентрации в максимуме слоя F2, (d) пространственное распределение полного электронного содержания TEC на 19:00 UT в сентябре 2006 года [18].

В пространственном распределении электронной концентрации (см. Рис. 1.2) наблюдаются глобальные неоднородности электронной плотности, характеризующиеся значительными пространственными градиентами. Самыми крупномасштабными и

регулярно наблюдаемыми неоднородностями подобного рода являются экваториальная аномалия и главный ионосферный провал.

Совокупный эффект высокого уровня ионизирующего солнечного излучения и специфической конфигурации электрического и магнитного полей Земли в экваториальной области приводит к образованию экваториальной аномалии — дневных максимумов в широтном ходе электронной концентрации, расположенных на 10-20 градусов севернее и южнее геомагнитного экватора [19].

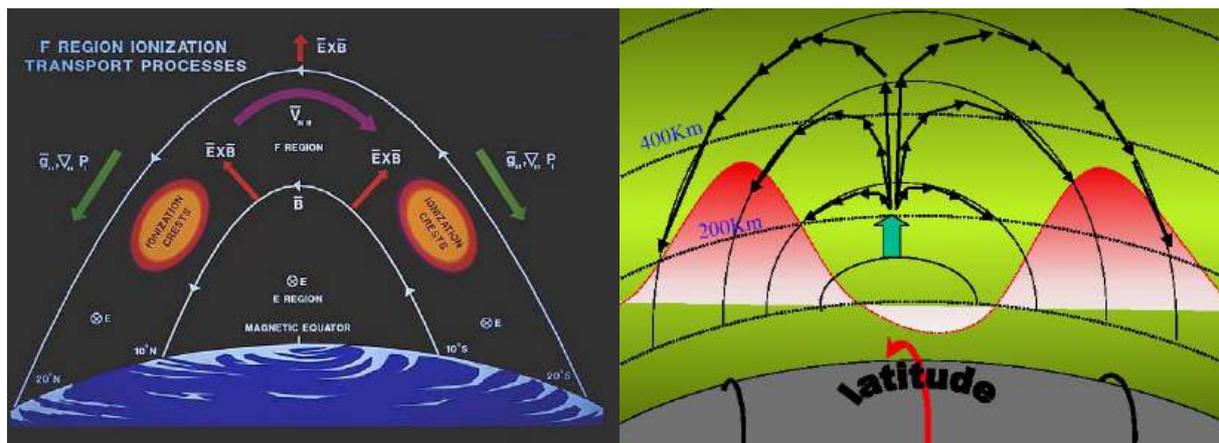


Рис. 1.3 Механизм образования экваториальной аномалии [20].

В области геомагнитного экватора существующее геомагнитное поле (почти параллельное поверхности Земли вблизи геомагнитного экватора) и восточно-западная компонента электрического поля вызывают дрейф заряженных частиц в направлении, поперечном обоим полям. В результате происходит вынос плазмы из района экватора, где ионизация максимальна, в области более высоких широт (см. Рис. 1.3). Возникает явление "фонтан-эффекта", при котором плазма поднимается вверх в экваториальной области и постепенно отклоняется на север в северном полушарии и на юг в южном. Это связано с увеличением наклона геомагнитных силовых линий по обе стороны от геомагнитного экватора.

Экваториальная аномалия является важным фактором в прогнозировании параметров радиосвязи, радионавигации, локации, существенным образом влияет на работу различных наземных технологических систем и т.д. Высокие значения горизонтальных градиентов электронной концентрации зачастую плохо учитываются в эмпирических моделях и служат дополнительным источником ошибок позиционирования в одночастотном режиме.

Главный ионосферный провал (ГИП) – провал в широтном ходе электронной концентрации на высотах F2-области, является преимущественно зимним ночным явлением субавроральной ионосферы. Чаще всего он проявляется на затененной стороне. Летом в дневное время он практически не наблюдается. Глубина провала составляет от 3 до 5 и более раз на высотах F2-области. Впервые ГИП был обнаружен на высоте максимума слоя F2 (~300 км) Muldrew [21]. По данным, представленным в работе Tulunay [22], ГИП существует как в ночные, так и в дневные часы в районе высоких и средних широт. Провал регистрируется как при высокой, так и при низкой солнечной активности.

Наиболее раннее детальное исследование положения провала представлено в работе Titheridge [23]. Там показано, что положение главного ионосферного провала в наибольшей мере зависит от времени суток и уровня геомагнитной активности. Наиболее высокоширотное положение провала занимает в послеполуденные часы, а наиболее низкоширотные – в ночные. С ростом геомагнитной активности провал сужается и смещается к экватору. По данным спутника ESRO-4 для зимних и равноденственных условий Kohnlein [24] показал, что провал в основном регистрируется в ночные часы от 19 до 05 LT и привёл простейшее соотношение для широты провала в зависимости от уровня геомагнитной активности и локального времени.

В работе Tulunay и Sayers [25] исследовалась форма и ширина провала. Показано, что высокоширотная стенка провала более крутая, чем низкоширотная. Наибольшая ширина провала наблюдается в утренние и вечерние часы. С увеличением уровня геомагнитной активности ширина провала уменьшается. Исследование зависимости положения провала от уровня геомагнитной активности проведены также в работах Karachev [26] [27], Deminov [28] и Prölls [29], в которых представлены наиболее продвинутые на настоящее время эмпирические модели положения провала. Отметим, что значительные градиенты электронной концентрации в области ГИП могут также служить источником дополнительной ошибки в режиме одночастотной навигации.

На фоне рассмотренных выше крупномасштабных ионосферных структур, с характерными масштабами в тысячи километров, зачастую наблюдаются неоднородности и с меньшими масштабами порядка первых сотен километров.

Источники и проявления таких возмущений разнообразны. Существенный вклад в генерацию подобного рода возмущений вносит геомагнитная активность и потоки высыпающихся в авроральной области частиц. Помимо этого источники возмущений могут находиться в нижней атмосфере, земной коре и гидросфере, к таким можно отнести тропические циклоны, ВСП (взрыв сильной мощности), землетрясения, сейши. Возмущения от таких источников распространяются в верхнюю атмосферу — ионосферу в виде акустико-гравитационных волн (АГВ), впервые детально описанных Хайнсом [30]. АГВ на высотах термосферы проявляются в виде ионосферных неоднородностей, за счёт вовлечения плазмы в движение нейтральной компонентой [31]. Такие возмущения в общем случае принято называть перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). Подобные возмущения не могут быть учтены в эмпирических моделях ионосферы и очевидным образом влияют на ошибки моделирования ионосферы в области их локализации.

1.3 Интегральные характеристики ионосферы

Одним из наиболее часто используемых для описания состояния ионосферы параметров является полное электронное содержание ТЕС. Это величина, определяет общее количество свободных электронов в столбе атмосферы единичного сечения, выражается в TECu (Total Electron Content Units), где 1 TECu соответствует 10^{16} электронов на квадратный метр. Вычисление ТЕС может быть выполнено по следующей формуле:

$$\text{ТЕС} = \int_{h_1}^{h_2} n_e(h) dh , \quad (1.1)$$

где $n_e(h)$ — это плотность электронов на высоте h , h_1 и h_2 — нижняя и верхняя границы ионосферы, обычно от 90 до 1000 км.

ТЕС имеет ярко выраженные пространственно-временные характеристики, которые, исходя из формулы (1.1), в целом повторяют свойства распределения электронной концентрации в максимуме слоя F2 показанные на Рис. 1.2. Аналогично в распределении ТЕС отражаются основные крупномасштабные морфологические особенности ионосферы, а также средние и мелкомасштабные неоднородности. ТЕС играет важную роль в функционировании GNSS и, в частности, определяет задержку

распространения навигационных радиосигналов, что будет подробно рассмотрено в Главе 2. На основе TEC можно построить как характеристики, описывающие средне- и мелкомасштабные ионосферные возмущения, так и ионосферу в глобальном масштабе. К первому типу относятся индексы возмущений ROT/ROTI [32], AATR и DIX [33]. Ко второму типу можно отнести GEC — глобальное электронное содержание, описывающее общее количество электронов во всей ионосфере. Данный параметр и методика его определения на основе глобальных распределений TEC были предложены в пионерских работах профессора Э.Л. Афраймовича [7]. Для получения оценки GEC необходимо просуммировать значения TEC_{ij} в узлах глобальной широтно-долготной сетки с весами, соответствующими площадям ячеек S_{ij} , учитывая их зависимость от широты [7] [34]:

$$GEC = \sum_{i,j} TEC_{ij} S_{ij} = \sum_{i,j} TEC_{ij} R_E^2 \delta\phi \left[\sin(\theta_j) - \sin(\theta_j + \delta\theta) \right], \quad (1.2)$$

где R_E — радиус Земли, $\delta\theta$ и $\delta\phi$ — шаг GIM по широте и долготе соответственно, j и i — индексы узлов по широте и долготе соответственно.

В настоящее время этот параметр активно используется, как для тестирования, так и для параметризации различных моделей ионосферы [35] [36].

1.4 Операционные модели ионосферы

Начиная с первых экспериментальных исследований стало понятно, что для учета влияния ионосферы на различные радиотехнические средства, прежде всего системы связи, радиолокации и навигации, необходимо разработать надежные модели среды — ионосферы. Работа в данном направлении продолжается до сих пор. В целом, многочисленные разработанные к настоящему времени ионосферные модели можно разделить на несколько больших групп.

К первой можно отнести эмпирические модели ионосферы, использующие параметризации высотного, пространственного и временного распределения электронной концентрации и ряда других ионосферных параметров с использованием функциональных зависимостей различной сложности с коэффициентами, определяемыми на основе регрессии по данным наблюдений. Самым известным представителем данного класса моделей является модель IRI [37] [38], построенная на

данных мировой сети ионозондов и данных внешнего зондирования со спутников Aloute, ARASE и Intercosmos-19. Она позволяет получить информацию о распределении электронной концентрации на различных высотах, а также предсказания о её изменениях во времени и пространстве, что имеет важное значение для изучения ионосферы и её воздействия на радиосигналы. В России также широко используются подобные модели, например разработанные в ИЗМИРАН на основе IRI модель GDMI [39]. К этому классу моделей относится также модель NeQuick2 [40], построенная на данных мировой сети GNSS.

К другому большому классу относятся модели, построенные на физических принципах. Они в большой степени используются для исследовательских целей и выявления взаимосвязей и взаимозависимостей в системе атмосфера-термосфера-ионосфера, а не для практических приложений. К данному классу следует отнести модели SAMI2/SAMI3 [41], модели университета штата Юта [42], модели ГСМ ТИП [43] и ИВМ РАН [44], TIE GCM [45]. Данные модели учитывают большое многообразие физических процессов, протекающих в атмосфере Земли, и зачастую слишком сложны и требуют большого числа вычислительных ресурсов для использования в практических приложениях.

Еще один большой класс ионосферных моделей — ассимиляционные, задача которых состоит в уточнении фоновой физической или эмпирической модели на основе постоянно поступающих данных наблюдений. Одними из представителей данного класса являются модель IRTAM [46] и модель USU GAIM [42]. Важным подклассом ассимиляционных ионосферных моделей являются операционные модели, используемые в GNSS. Они должны, с одной стороны, иметь возможность достаточно точно описывать глобальные ионосферные структуры, чтобы компенсировать их влияние на задачу позиционирования, а с другой — адаптироваться к меняющимся гелиогеофизическим условиям, сохраняя при этом достаточную простоту и скорость вычисления. Таким образом их удобнее всего строить на основе эмпирических ионосферных моделей, предусмотрев методы адаптации к реальным геофизическим условиям.

Более детальное описание операционных ионосферных моделей, используемых в современных навигационных системах, приведено в следующем трех параграфах.

1.4.1 Модель Klobuchar

Модель Klobuchar [47] является одной из самых ранних и простых эмпирических моделей ионосферной коррекции, используемых в системах GNSS, и была специально разработана для системы GPS [48]. Эта модель основана на модели Vent и включает в себя постоянную часть, представляющую задержку (TEC) в ионосфере в ночное время, и полукосинусоидальную функцию, описывающую суточные изменения [48]. Для минимизации вычислительной сложности и объёма данных, передаваемых спутниками, модель использует минимальное количество передаваемых коэффициентов (по 4 для амплитуды и фазы), которые передаются через сигналы спутников GPS и могут корректироваться наземными станциями в случае значительных изменений в ионосфере [49] [50].

Модель Klobuchar предполагает, что ионосфера представляет собой тонкий слой на высоте 350 км, используемый для моделирования вертикальной ионосферной задержки или TEC [47]. Амплитуда и период косинусоидальной функции зависят от геомагнитной широты и описываются полиномами третьей степени. Эти коэффициенты передаются пользователям как часть сообщений спутников GPS [51]. Для определения ионосферной задержки между конкретным спутником и приёмником или наклонного TEC используется простейшая функция картирования. Пространственные и временные изменения задержки (включая TEC) моделируются с использованием полиномиального разложения [50]. Этот простой подход позволяет компенсировать до 50% ионосферной задержки в одночастотных наблюдениях [47].

Алгоритм модели выражается следующим образом:

$$\Delta\tau = \left[D + A \cdot \cos \frac{2\pi(t - T_p)}{P} \right] \cdot MF, \quad (1.3)$$

где MF — картирующая функция, используемая для преобразования вертикального TEC в наклонный:

$$MF = 1 + 16 \cdot (0.53 - e)^3, \quad (1.4)$$

где A и P — представляют собой амплитуду и период косинусоидального члена соответственно и выражаются через следующие полиномы третьей степени:

$$\begin{cases} A = \sum_{i=0}^3 \alpha_i \phi_m^i, \\ P = \sum_{i=0}^3 \beta_i \phi_m^i. \end{cases} \quad (1.5)$$

где e — обозначает угол возвышения спутника, ϕ_m — геомагнитную широту точки пересечения ионосферы (IPP).

Таким образом, модель Klobuchar представляет собой постоянную задержку в 5 нс в ночное время и на высоких широтах, а также косинусный временной ход (положительный полупериод с максимумом в 14LT) для средних широт. Пример пространственного распределения ионосферной задержки в единицах TECu согласно модели Klobuchar приведён на Рис. 1.4.

Хорошо видны проблемы возникающие при использовании данной модели — невозможность описать временную изменчивость TEC в ночные часы, отсутствие корректного описания области экваториальной аномалии (невозможность разделить гребни), а также отсутствие основных морфологических особенностей ионосферы средних широт, а также авроральной и полярной областей. Так например в модели Klobuchar полностью отсутствует главный ионосферный провал.

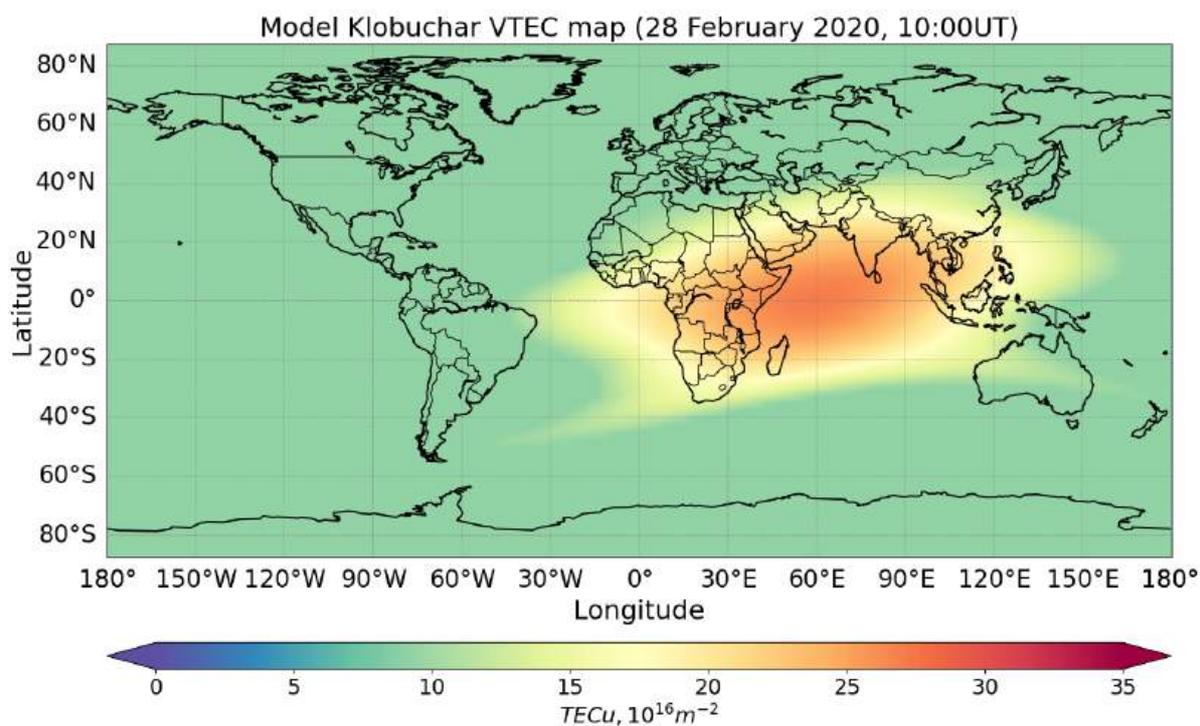


Рис. 1.4 Распределение ионосферной задержки (TEC) согласно модели Klobuchar, 28 февраля 2020 г., 10:00 UT.

Для лучшего описания ионосферной изменчивости и улучшения точности одночастотного позиционирования очевидно необходимо учесть больше параметров (коэффициентов) моделей, что и было сделано при разработке соответствующих операционных моделей для последующих систем BeiDou и Galileo.

1.4.2 Модель BDGIM

Китайская навигационная система BeiDou использует модель BDGIM для коррекции ионосферной задержки [2] [52]. Также как и модель Клобучара, BDGIM является двумерной моделью, описывающей пространственное распределение вертикального TEC и использующей картирующую функцию для определения ионосферных задержек на наклонных лучах. Пространственное распределение TEC задается в модели с помощью коэффициентов разложения по сферическим гармоникам в геомагнитной системе координат локального времени. При этом 17 коэффициентов разложения являются фиксированными, а 9 коэффициентов меняются в зависимости от состояния космической погоды и передаются в навигационном сообщении BeiDou с частотой обновления 2 ч. По утверждениям разработчиков модель BDGIM даёт возможность уменьшить связанные с ионосферой ошибки позиционирования на 25-98% в зависимости от уровня солнечной активности.

В модели BDGIM [2] тонкий ионосферный слой располагается на высоте около 400 км, а ионосферная задержка сигнала TEC рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{TEC} = \text{MF} \cdot \frac{40.28 \times 10^{16}}{f^2} \cdot \left[A_0 + \sum_{i=1}^9 \alpha_i A_i \right], \quad (1.6)$$

где MF — картирующая функция, f — рабочая частота, α_i — девять параметров модели коррекции ионосферной задержки (в TECu), вещаемые спутниками в навигационном сообщении, A_0 — предсказанное значение ионосферной задержки, рассчитанное на основе невещаемых параметров модели.

Величины A_i вычисляются на основе координат подионосферных точек в геомагнитной системе координат с использованием разложения по сферическим гармоникам в тонком слое по следующей формуле:

$$A_i = \begin{cases} N_{n_i, m_i} \cdot P_{n_i, m_i}(\sin \phi') \cdot \cos(m_i \lambda') & m_i \geq 0, \\ N_{n_i, m_i} \cdot P_{n_i, m_i}(\sin \phi') \cdot \sin(-m_i \lambda') & m_i < 0. \end{cases} \quad (1.7)$$

где ϕ' и λ' — обозначают соответственно геомагнитную широту и долготу подионосферной точки в радианах, N_{n_i, m_i} и P_{n_i, m_i} — коэффициенты разложения и классические ненормированные функции Лежандра, n_i и m_i — представляют собой порядок и степень сферических гармоник. Всего в разложении (1.7) используется 17 невещаемых коэффициентов модели BDGIM.

Картирующая функция MF, используемая в модели BDGIM, отличается от таковой для модели Klobuchar и рассчитывается по следующей формуле:

$$MF = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E + H_{ion}} \cdot \cos(E)\right)^2}}, \quad (1.8)$$

где E — угол возвышения спутника (в радианах), H_{ion} — высота тонкого слоя ионосферы, обычно принимаемая равной 400 км, R_E — средний радиус Земли, примерно равный 6371 км.

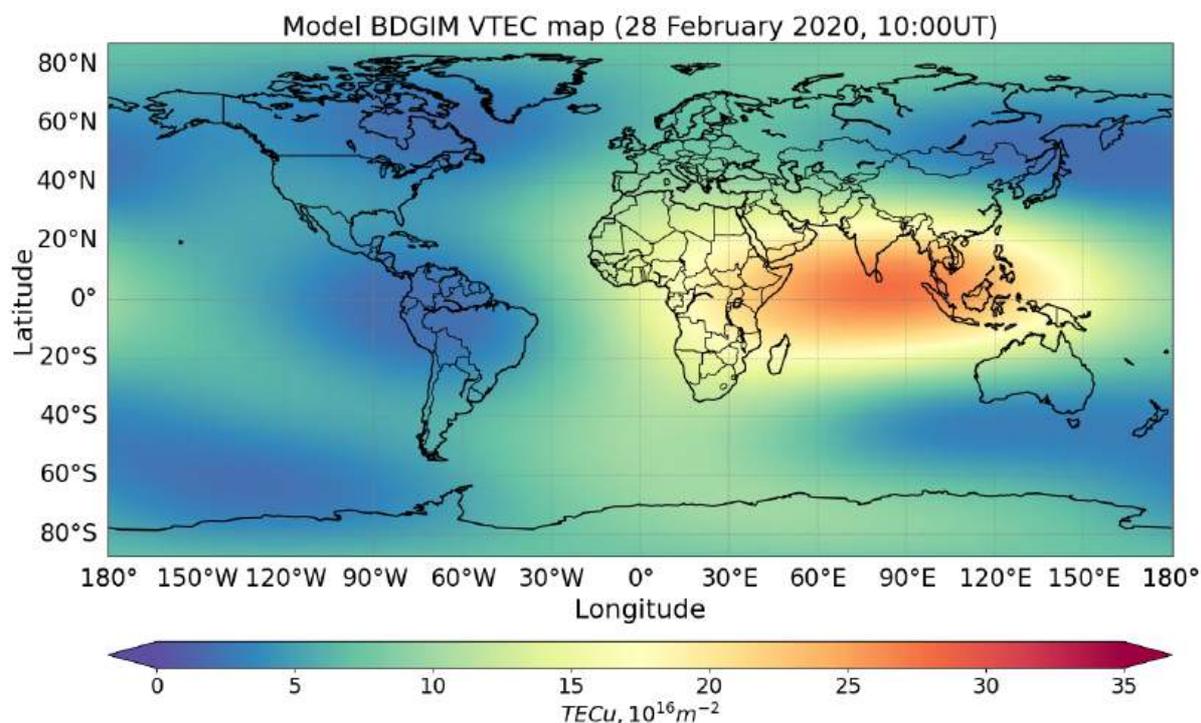


Рис. 1.5 Распределение ионосферной задержки (TEC) согласно модели BDGIM, 28 февраля 2020 г., 10:00 UT.

Модель ионосферной задержки, построенная по такому принципу может описать больше ионосферной изменчивости по сравнению с моделью Klobuchar (см. Рис. 1.4 и 1.5). Вместе с тем стоит отметить сохраняющуюся проблему с неразделением северного и южного гребней экваториальной аномалии в модели BDGIM. Решить данную проблему можно либо учитывая больше коэффициентов разложения по сферическим гармоникам, как это сделано при построении глобальных ионосферных карт GIM TEC, либо храня среднемесячные распределения исследуемых параметров, как это сделано в модели NeQuickG [3]. Оба подхода при этом приводят к необходимости хранить большой объем данных и проводить более сложные вычисления, что, впрочем, не является большой проблемой на современном этапе развития техники.

1.4.3 Модель NeQuickG

Модель NeQuickG [3] [53] [54] является базовой моделью, используемой Европейским космическим агентством (ESA) для коррекции ионосферной задержки в системе Galileo. Эта модель, в отличие от моделей Клобучара и BDGIM, трехмерная и описывает высотный профиль электронной концентрации в E, F1 и F2 слое ионосферы с помощью 6 полуслоев Эпштейна, параметры которых определяются медианными распределениями f_oE , f_oF1 , f_oF2 и $M(3000)F2$, получаемыми на основе коэффициентов разложения по сферическим гармоникам CCIR для заданного уровня солнечной активности, являющегося входным параметром модели. В отличие от модели NeQuick2, использующей одно значение потока солнечного радиоизлучения F10.7 в качестве входного параметра для всего земного шара, модель NeQuickG для более точного описания распределения электронной плотности использует распределение эффективного солнечного потока (A_z) по земному шару, которое задается в виде функции модифицированной геомагнитной широты точки наблюдения. Коэффициенты этой функции (a_0 , a_1 и a_2) передаются в навигационном сообщении Galileo и определяются с помощью наблюдений на сети базовых станций.

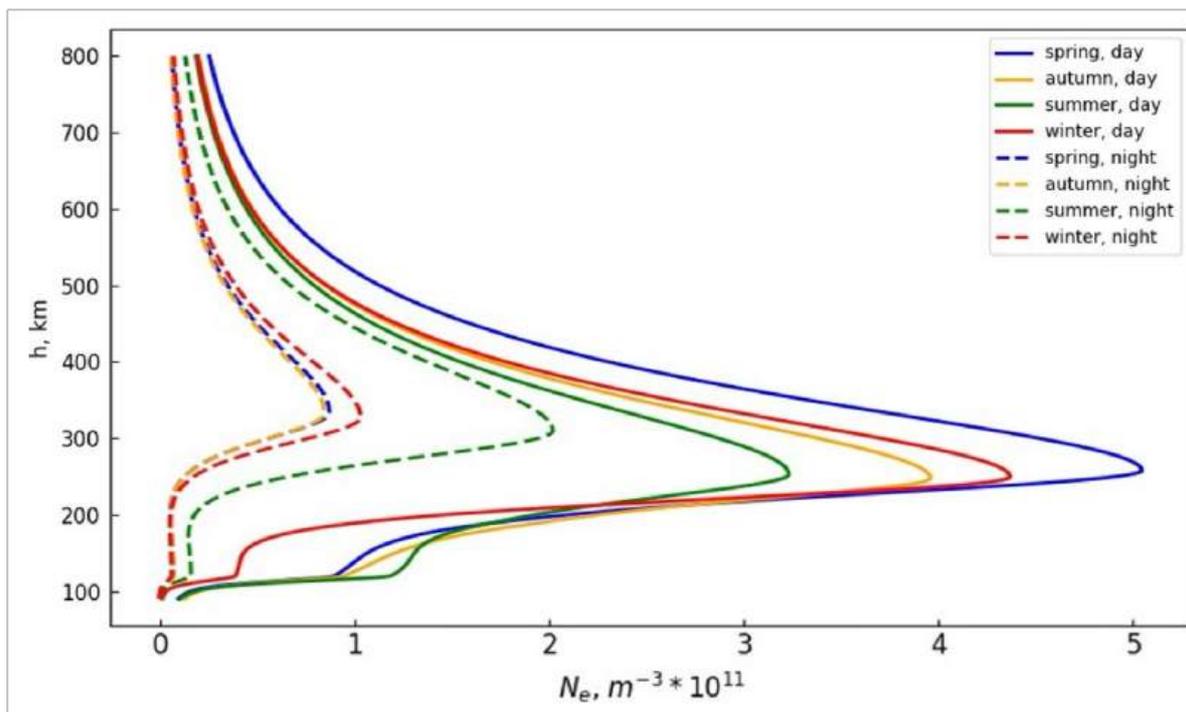


Рис. 1.6 Вертикальный профиль электронной концентрации в ионосфере над Москвой для различных сезонов и времен по данным модели NeQuickG.

На Рис. 1.6 приведены примеры вертикальных профилей электронной концентрации над Москвой для различных сезонов и времён. Хорошо видно, что параметры профиля могут варьироваться в достаточно широких пределах. Особенно это касается эффективной высоты и полутолщины ионосферного слоя F2. Такие изменения очевидно не возможно корректно описать в рамках модели простого тонкого слоя с фиксированной высотой и простейшими картирующими функциями используемыми в моделях Klobuchar и BDGIM, рассмотренных ранее.

Как было указано выше модель NeQuickG для описания высотного хода электронной концентрации $n_e(h)$ в каждом из 3х ионосферных слоёв использует функцию Эпштейна:

$$n_e(h) = n_m \cdot \left(1 - \left(\frac{h - h_m}{H} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}}, \quad (1.9)$$

где n_m — электронная концентрация в максимуме слоя, h_m — высота максимума слоя, а H — параметр толщины, причём он свой для верхней и нижней половины слоя. Пространственно временные распределения n_m , h_m и H для каждого из полуслоев

задаются с помощью разложения по сферическим гармоникам в модифицированной геомагнитной системе координат локального времени, наборы коэффициенты CCIR этого разложения доступны для двух уровней солнечной активности.

Текущее распределение эффективного индекса солнечной активности A_z определяется на основе коэффициентов, передаваемых в навигационном сообщении Galileo:

$$A_z = a_{i0} + a_{i1}\mu + a_{i2}\mu^2, \quad (1.10)$$

где a_{i0} , a_{i1} и a_{i2} — это коэффициенты, передаваемые системой Galileo, которые рассчитываются на основе глобальных данных наблюдений и регулярно обновляются для точного моделирования изменений в ионосфере, μ — скорректированная магнитная широта подионосферной точки, которая рассчитывается через географическую широту φ и магнитное наклонение I следующим образом:

$$\tan(\Phi) = \frac{I}{\sqrt{\cos(\varphi)}}, \quad (1.11)$$

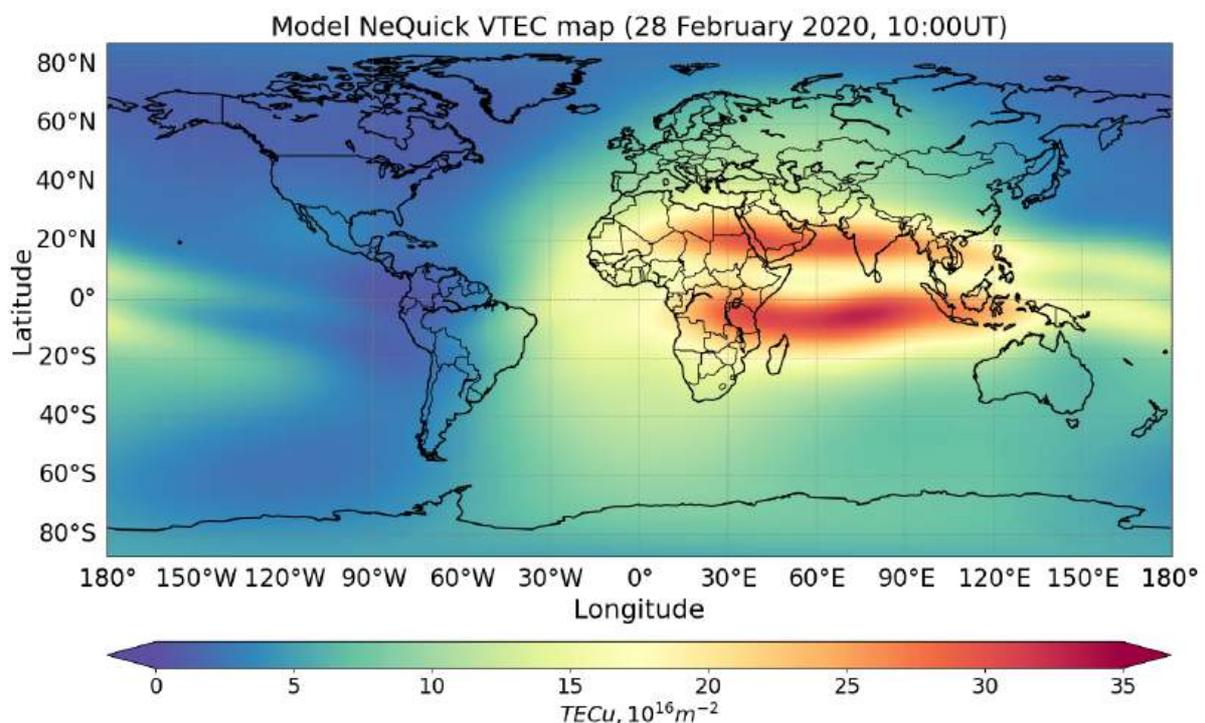


Рис. 1.7 Распределение ионосферной задержки (ТЕС) согласно модели NeQuick, 28 февраля 2020 г., 10:00 UT.

С точки зрения вычислений, NeQuickG является самой сложной операционной моделью, из рассмотренных в работе, но именно эта сложность позволяет ей воспроизводить основные морфологические особенности распределения ТЕС, включая экваториальную аномалию и главный ионосферный провал (см. Рис. 1.7).

1.5 Анализ результатов сопоставления операционных ионосферных моделей и нерешенные вопросы

Из предыдущих параграфов видно, что рассматриваемые операционные модели Klobuchar, BDGIM и NeQuickG значительно отличаются по принципам построения и по возможностям описания основных морфологических структур ионосферы.

Исследованиям особенностей данных моделей посвящено большое число работ. В большинстве из них используется два критерия оценки точности операционных моделей. Первый основан на ошибках определения координат в одночастотном режиме при использовании сравниваемых моделей, второй на ошибках определения ТЕС. Так, в одном из наиболее подробных, как по числу рассмотренных моделей, так и по временному интервалу тестирования 2000–2020 гг., исследований [55] на примере 13 станций IGS [56], находившихся в различных регионах, показано, что использование операционных моделей приводит к уменьшению ошибок местоопределения в одночастотном режиме по сравнению с решением, не учитывающим ионосферную задержку, на 15,3% для модели BDGIM, 13,3% для NeQuickG и 13,2% для модели Клобучара. При этом смещение ТЕС и средние абсолютные ошибки ТЕС относительно глобальных ионосферных карт IGSG [57] для моделей оказались следующими: BDGIM — $-0,7$ и $2,9$ ТЕС_u, NeQuickG — $-1,5$ и $3,5$ ТЕС_u, модель Клобучара — $1,2$ и $4,9$ ТЕС_u. Несколько другие результаты, полученные на данных 10 южноамериканских станций за период 2020–2021 гг. в минимуме солнечной активности, приведены в работе [1]. Авторы также делают вывод о превосходстве модели BDGIM в задаче одночастотной навигации, указывая, что максимальное снижение ошибок позиционирования, достигнутое путем коррекции ионосферы, составляет 49% для модели Клобучара, 45% для NeQuickG и 51% для BDGIM. При этом авторы утверждают, что модель NeQuickG имеет тенденцию недооценивать ТЕС в рассматриваемом регионе, тогда как модели Клобучара и BDGIM имеют тенденцию переоценивать её. Данный результат для модели

BDGIM, таким образом, оказывается противоположным, полученному в [55] на большем интервале тестирования и для всего земного шара в среднем. Подобный разброс результатов в зависимости от региона, уровня солнечной активности, методологии исследований свидетельствует о том, что вопрос эффективности операционных ионосферных моделей нельзя считать вполне закрытым.

Помимо TEC, ещё одним важным интегральным параметром, описывающим состояние ионосферы, является глобальное электронное содержание (GEC) — общее число электронов во всей ионосфере. В настоящее время этот параметр активно используется, как для тестирования, так и для параметризации различных моделей ионосферы [58] [36]. Основой для его определения являются данные глобальных ионосферных карт GIM, представляемых несколькими центрами обработки данных с различной временной задержкой [59]. Вместе с тем GEC можно легко оценить и с использованием данных операционных ионосферных моделей. В связи с этим возникает ещё одна, менее исследованная, но практически более полезная метрика сравнения операционных ионосферных моделей — по ошибке оценивания GEC. Это и является одним из предметов исследования настоящей диссертационной работы, результаты которого будут подробно рассмотрены в Главе 3.

ГЛАВА 2

Восстановление интегральных параметров ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами GNSS

Задача дистанционного зондирования атмосферы сигналами GNSS является задачей радиопросвечивания, поскольку частоты навигационных радиосигналов (L-диапазон ~ 1.5 ГГц) существенно превышают плазменную частоту ионосферы (порядка десятка МГц). Распространение навигационных сигналов в атмосфере определяется показателем преломления, зависящим от основных характеристик среды, что дает возможность их определения на основе измерения свойств навигационных сигналов, прошедших через среду. Остановимся на этой зависимости подробнее.

2.1 Показатель преломления атмосферы для диапазона GNSS

На длинах волн соответствующих сигналам GNSS показатель преломления n атмосферы содержит вклады четырёх основных источников: вклад сухой атмосферы, водяного пара, свободных электронов в ионосфере и частиц, преимущественно тех, из которых состоят облака [60] [61].

$$\begin{cases} N = (n - 1) \cdot 10^6 = k_1 \frac{p}{T} + k_2 \frac{p_w}{T^2} - k_3 \frac{n_e}{f^2} + 1.4W, \\ k_1 = 77.6, \quad k_2 = 3.73 \cdot 10^5, \quad k_3 = 4.03 \cdot 10^7. \end{cases} \quad (2.1)$$

где N — приведенный показатель преломления, p — атмосферное давление (мбар), T — температура (К), p_w — парциальное давление водяного пара (мбар), n_e — электронная концентрация (м^{-3}), f — частота зондирования (Гц), W — водность ($\text{г}/\text{м}^3$).

В формуле (2.1), первое слагаемое вызвано способностью молекул в атмосфере к поляризации, т.е. способностью электрического поля породить дипольный момент у молекул воздуха. Вклад сухой атмосферы в показатель преломления пропорционален молекулярной плотности и играет основную роль на высотах до 60-90 км [62]. Второе слагаемое, обусловлено большим постоянным дипольным моментом водяного пара и существенно в нижней тропосфере. Третье слагаемое связано с концентрацией свободных электронов и становится основным в ионосфере с высот порядка 80 км [63].

Четвёртое слагаемое (1.4W) связано с образованием облаков водностью W на высотах до 5-10 км.

Хорошо видно, что показатель преломления атмосферы содержит диспергирующую (зависящую от частоты) и недиспергирующую части. Более того, диспергирующая часть определяется распределением электронной концентрации в ионосфере, в то время как недиспергирующая часть в основном обусловлена полями метеопараметров в нижней атмосфере. Таким образом, используя наблюдения на двух когерентных рабочих частотах GNSS можно составить линейные комбинации уравнений наблюдения так, чтобы выделить вклад различных областей атмосферы в наблюдаемую задержку.

2.2 Уравнения наблюдения и оценка TEC по данным GNSS

В простейшем случае GNSS-приемник это инструмент, измеряющий время прохождения сигнала от спутника (k) до приемника (i). Если это время умножить на скорость света в вакууме c , наблюдаемая величина может быть представлена в виде комбинации геометрического расстояния между спутником и приемником $\rho_i^k(t)$, ошибки синхронизации часов приемника $\delta^k(t)$, ошибки синхронизации часов спутника $\delta_i(t)$, задержки вызванной распространением сигнала через ионосферу $I_i^k(t)$, задержки вызванной распространением сигнала через тропосферу $T_i^k(t)$, а также шума в наблюдениях, связанного например, с многолучевостью и нестабильностью фазового центра антенны приемника. Наблюдаемые псевдодальности (P_1 и P_2) и фазовые измерения (L_1 и L_2) на двух рабочих частотах системы, выраженные в метрах, можно записать следующим образом [64] [65] [66]:

$$\begin{cases} P_{1i}^k(t) = \rho_i^k(t) + I_i^k(t) + T_i^k(t) + c(\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \varepsilon , \\ P_{2i}^k(t) = \rho_i^k(t) + I_i^k(t) + T_i^k(t) + c(\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \varepsilon , \\ L_{1i}^k(t) = \rho_i^k(t) + N_{1i}\lambda_1 - I_i^k(t) + T_i^k(t) + c(\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \varepsilon , \\ L_{2i}^k(t) = \rho_i^k(t) + N_{2i}\lambda_2 - I_i^k(t) + T_i^k(t) + c(\delta_i(t) - \delta^k(t)) + \varepsilon . \end{cases} \quad (2.2)$$

Уравнения для фазовых измерений (L1 и L2) включают в себя неоднозначность $N_{1,2i}^k\lambda_{1,2}$ равную расстоянию между приемником и спутником в момент начала приема.

Ионосферный вклад в измерения псевдодальности и фазовые измерения противоположен по знаку. В случае использования одночастотного приемника задержки распространения навигационного сигнала в тропосфере и ионосфере, входящие в формуле (2.2) должны быть определены независимо на основе эмпирических моделей. Для оценки тропосферной задержки традиционно используют модель Саастамойнена [67] [68] [69], для учета ионосферной задержки, которая является доминирующей, в различных навигационных системах используют разные модели, такие как модель Klobuchar [47], BDGIM, NeQuickG [53] [40], которые будут рассмотрены в предыдущей главе. Кроме того, она может быть оценена по данным двух частотных GNSS измерений. Как указано выше, показатель преломления в формуле (2.1) содержит диспергирующую часть (зависящую от частоты), которая определяется распределением электронной концентрации, и недиспергирующей, определяемой параметрами нижней атмосферы. Таким образом на двух когерентных GNSS частотах становится возможным составить линейные комбинации уравнений (2.2), чтобы выделить вклад различных областей атмосферы в наблюдаемую задержку. В частности, можно определить полное электронное содержание TEC.

Расчет относительного наклонного TEC осуществляется путём линейной комбинации наблюдений фазы и псевдодальности на двух частотах, согласно следующим простым соотношениям [60]:

$$s\text{TEC} = \int_l n_e(\vec{r}) dl = \frac{c}{K} \left(\frac{L_i}{f_i} - \frac{L_j}{f_j} \right) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + \text{const} , \quad (2.3)$$

$$s\text{TEC} = \int_l n_e(\vec{r}) dl = \frac{1}{K} (P_j - P_i) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + \text{DCB}_{sat} + \text{DCB}_{rec} , \quad (2.4)$$

где c — это скорость света в вакууме, $K = 40.308m^3/s^2$ — это константа, используемая для согласования единиц измерения, L_i, L_j и P_i, P_j — фазовые и кодовые наблюдения на любой из рабочих частот (f_i, f_j) систем GNSS, n_e — распределение электронной концентрации в ионосфере.

Значение TEC, определяемое по фазовым данным (2.3) является относительным и содержит неизвестную константу связанную с неопределенностью начальной фазы. Значения TEC, определяемые по данным псевдодальностей (2.4), содержат так

называемые дифференциальные кодовые задержки в аппаратуре приёмников (DCB_{rec}) и спутников (DCB_{sat}), связанные с разной скоростью обработки сигналов на разных частотах в приёмном и передающем трактах приёмника и спутника, соответственно, которые должны быть оценены одновременно с оценкой ТЕС с использованием определённых модельных представлений.

Используя тот факт, что ионосферная задержка входит в фазовые и кодовые наблюдения в (2.2) с разным знаком, можно построить также и одночастотную комбинацию этих данных для оценки ТЕС [70]:

$$sTEC = \frac{f_i^2}{2K} \left(P_i - \frac{L_i c}{f_i} \right) + \text{const} , \quad (2.5)$$

Отметим, что эта оценка также является относительной, так как тоже содержит неопределенность начальной фазы.

При оценке ТЕС с использованием сигналов GNSS по формулам (2.3), (2.4) и (2.5) важную роль играют шумы измерений фазы и псевдодальности, так как они в конечном итоге и определяют итоговые шумы в оценке ТЕС. Шумы псевдодальномерных наблюдений обычно выше и в основном вызваны многолучевостью и нестабильностью аппаратного обеспечения приемника, что снижает точность оценки ТЕС при использовании этих данных. В то же время фазовые наблюдения обладают меньшими шумами, что позволяет достичь более высокой точности в оценке ТЕС. Однако фазовые наблюдения содержат неопределенность начальной фазы (целое число циклов), что приводит к относительному характеру результатов оценки ТЕС.

Сочетание двух типов наблюдений — фаз и псевдодальности — в алгоритмах оценки ТЕС приводит к тому, что на шумы оценок ТЕС влияют как шумы измерений фаз, так и шумы измерений псевдодальности, причём последние доминируют. Таким образом, чтобы получить, например, одночастотную оценку ТЕС согласно (2.5) с приемлемым уровнем шума, необходимо в первую очередь уменьшить шумы измерений псевдодальностей. Это может быть достигнуто как за счёт увеличения мощности сигнала навигационной системы, так и за счёт использования современных методов кодирования, что является предпочтительным. В следующих разделах

рассматриваются основные методы кодирования, используемые в системах GNSS, и их влияние на шумы измерений псевдодальностей.

2.3 Особенности использования различных кодировок навигационных сигналов в ионосферных исследованиях

Как было указано выше, на шумы наблюдений GNSS может оказывать влияние схема кодирования навигационных сигналов. Поэтому в данном параграфе мы рассмотрим наиболее часто используемые кодировки GNSS, а именно фазовую манипуляцию (PSK — Phase Shift Keying) и её наиболее востребованные варианты BPSK (двоичная фазовая манипуляция) и QPSK (квадратурная фазовая манипуляция), а также получившие в последнее время значительное развитие модуляции двоичной смещённой несущей (BOC — binary offset carrier), прежде всего в варианте AltBOC (alternative BOC).

2.3.1 Сигналы с двоичной и квадратурной фазовой манипуляцией BPSK и QPSK

Фазовая манипуляция это один из видов фазовой модуляции, при котором фаза несущей меняется скачкообразно в зависимости от информационного сообщения. Количество дискретных значений, которые может принимать фаза несущей определяет порядок манипуляции, соответственно 2 для двоичной и 4 для квадратурной фазовой манипуляции. Порядок манипуляции (2^n) определяет количество бит информации n , передаваемых одним перескоком фазы. Для двоичной (2^1) манипуляции это 1 бит, для квадратурной (2^2) это 2 бита информации соответственно.

Фазоманипулированный сигнал можно рассматривать как разложение сигнала по базисным функциям. Для BPSK это базис состоит из одной функции:

$$\phi(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t), \quad (2.6)$$

где f_c — частота несущей, T_b — время между перескоками фазы. При этом сигнал $\sqrt{E_b}\phi(t)$ кодирует бит “1”, а сигнал $-\sqrt{E_b}\phi(t)$ кодирует бит “0”, где E_b — обозначает

энергию передачи бита данных, т. е. фазовое пространство сигнала состоит из двух точек, оно показано на Рис. 2.1 слева.

Для QPSK этот базис состоит, соответственно из двух функций:

$$\begin{cases} \phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) , \\ \phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \sin(2\pi f_c t) . \end{cases} \quad (2.7)$$

А фазовое пространство сигнала состоит из четырёх точек ($\pm\sqrt{\frac{E_b}{2}}$), оно показано на Рис. 2.1 справа. Отметим что фактор $\frac{1}{2}$ введен, чтобы показать, что энергия распределяется между двумя базисными сигналами.

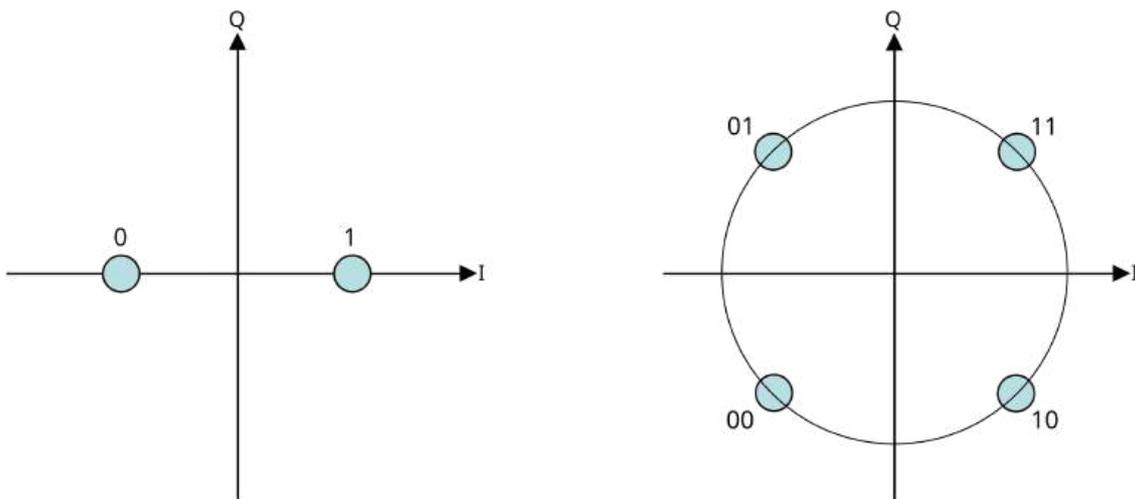


Рис. 2.1 Фазовое созвездие для BPSK (слева) и QPSK(справа) [71].

Отметим, что модуляция BPSK является самой помехоустойчивой из всех видов фазовых модуляций, то есть при её использовании вероятность ошибки при приёме данных наименьшая (сразу вслед за кодом Манчестер-2). Однако каждый символ несёт только 1 бит информации, что обуславливает наименьшую среди PSK скорость передачи информации. Вероятность ошибки на бит для BPSK в канале с аддитивным белым гауссовским шумом с энергией N_0 может быть вычислена по формуле:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2.8)$$

Одним из главных преимуществ QPSK [72] является возможность значительно увеличить скорость передачи данных в заданной полосе частот. Его можно рассматривать как совокупность двух ортогональных сигналов, каждый из которых модулирован как BPSK. Поэтому вероятность ошибки на бит для QPSK такая же, как и для BPSK, но для этого требуется двухкратное увеличение энергии сигнала, так как он распределяется по двум ортогональным несущим.

2.3.2 Сигналы с модуляцией двоичной смещенной несущей AltBOC

Сигнал AltBOC может быть сформирован двумя (только сигналы данных) или четырьмя кодами (каналы данных и пилотные каналы). Если рассматривать первый случай, т. е. имеется есть только два кода, сигнал состоит только из данных и может быть выражен следующим образом:

$$S_{AltBOC}(t) = c_L c_s(t) + c_U c_s^*(t), \quad (2.9)$$

где $c_s(t)$ — комплексная поднесущая, которая может быть определена как может быть определена следующим образом:

$$c_s(t) = \text{sign}[\cos(2\pi f_s t)] + j \text{sign}[\sin(2\pi f_s t)] = c_r(t) + j s_r(t), \quad (2.10)$$

где c_L и c_U — коды в нижнем и верхнем поддиапазонах соответственно.

Как видно из (2.9), таким образом производится спектральное смещение одного из кодов в верхний диапазон, т. е. на $+f_s$, а второго в нижний диапазон на $-f_s$.

Определенный выше сигнал соответствует общему случаю модуляции AltBOC. Единственная проблема состоит в том, что при введении сложной поднесущей и комплексных кодов для каналов данных и пилот-сигнала составной сигнал теряет свойство постоянной комплексной огибающей. Наличие постоянной огибающей является обязательным условием, поскольку в противном случае искажения, вызванные усилителем высокой мощности (НРА) в спутнике, были бы недопустимыми.

Постоянство огибающей в сигналах AltBOC достигается усложнением вида поднесущей.

Модуляция AltBOC предлагает значительные преимущества по сравнению с традиционными схемами модуляции BPSK и QPSK в GNSS. Она обеспечивает превосходную точность синхронизации, устойчивость к помехам и общую надёжность сигнала. Модуляция AltBOC разделяет спектр несущей на положительные и отрицательные частотные полосы, при этом каждая полоса модулирует сигналы с использованием разных фаз, что приводит к более высокой спектральной эффективности. В отличие от BPSK, где каждый символ несет один бит информации, и QPSK, которая несёт два бита на символ, AltBOC может передавать несколько сигналов одновременно по более широкой полосе пропускания, тем самым передавая больше информации на единицу спектра, что особенно выгодно в условиях ограниченных частотных ресурсов [8] [73].

2.3.3 Теоретические оценки шумов измерений псевдодалностей для GNSS сигналов в кодировках BPSK, QPSK и AltBOC

Уровень шумов кодовых измерений существенным образом отличается для трёх типов модуляций рассмотренных выше. Уровень шума определяется автокорреляционной функцией сигнала, чем уже и круче главный лепесток автокорреляционной функции, тем меньшее окно необходимо использовать в корреляторе приёмника и тем точнее и с меньшим шумом приёмник измеряет псевдодалность.

В обработке навигационных сигналов автокорреляционная функция (ACF) используется для описания корреляции сигнала при различных временных задержках τ , а стандартное отклонение измерений псевдодалности (σ_{code}) отражает ошибку измерений при заданных значениях сигнал/шум (C/N_0) сигнала. Ниже представлены теоретические зависимости для автокорреляционных функций ACF и СКО измерений псевдодалности σ_{code} для некоторых типов модуляций, используемых в системах GNSS, включая BPSK(1), BPSK(10), QPSK(10) и AltBOC(15,10), где целые числа (m, n) и (n) в скобках обозначают множители для частоты поднесущей $f_s = m \times f_0$ и частоты

чипа $f_{chip} = n \times f_0$, при $f_0 = 1,023$ МГц, а T_{chip} — длина чипа, которая зависит от схемы кодирования. Для сигнала BPSK(1) эти зависимости имеют вид:

$$R_{\text{BPSK}(1)}(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|, & |\tau| < 1, \\ 0, & |\tau| \geq 1. \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{\text{code}}^{\text{BPSK}(1)} = \frac{c}{f_{\text{BPSK}(1)}} \sqrt{\frac{\frac{1}{12} \left(1 + \frac{1}{C/N_0 \cdot T_p}\right)}{2 \cdot C/N_0}}, \quad (2.12)$$

где c — скорость света, $f_{\text{BPSK}(1)}$ — частота несущей, T_p — время интеграции.

Для сигнала в кодировке QPSK(10) теоретические зависимости для автокорреляционной функции R и СКО шума псевдодальности могут быть получены на основе аналогичных оценок для сигнала BPSK(10), с использованием следующих соотношений:

$$R_{\text{QPSK}(10)}(\tau) = \cos^2\left(\frac{\pi\tau}{2}\right) \cdot R_{\text{BPSK}(10)}(\tau), \quad (2.13)$$

$$\sigma_{\text{code}}^{\text{QPSK}(10)}(C/N_0) = 6 \times 10^{-\frac{C/N_0}{20}}, \quad (2.14)$$

Формула (2.14) основана на упрощённой модели, предполагающей обратную пропорциональность между σ_{code} и квадратным корнем из C/N_0 , где постоянная 6 определяется с помощью моделирования или эмпирических данных.

Для сигналов AltBOC(15,10) соответствующие соотношения принимают вид:

$$R_{\text{AltBOC}(15,10)}(\tau) = \begin{cases} (1 - |\tau|) \cdot \cos(3\pi\tau), & |\tau| < 1, \\ 0, & |\tau| \geq 1, \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\text{code}}^{\text{AltBOC}(15,10)} = \frac{c}{f_{\text{AltBOC}}} \sqrt{\frac{(1 - (1 - 0.2) \cos(0.6\pi)) \left(1 + \frac{1}{C/N_0 \cdot T_p}\right)}{2 \cdot C/N_0 [\cos(0.6\pi) + 2.7\pi \sin(0.6\pi)]^2}}, \quad (2.16)$$

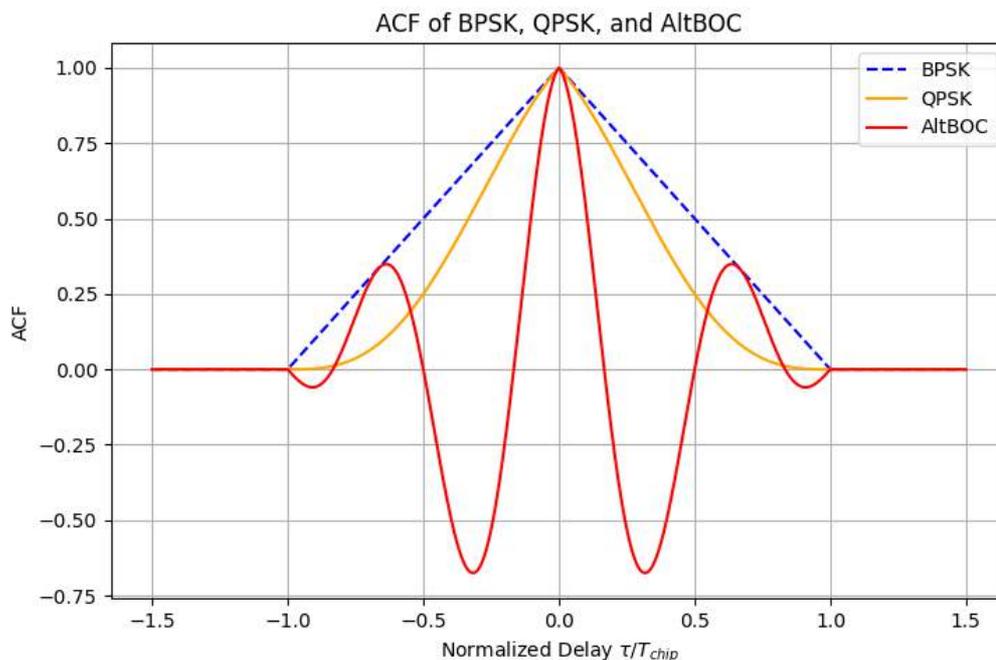


Рис. 2.2 Автокорреляционные функции для сигналов BPSK, QPSK и AltBOC.

На Рис. 2.2 показаны автокорреляционные функции для сигналов с различными схемами модуляции, BPSK (2.11), QPSK (2.13) и AltBOC (2.16). Хорошо видно, что автокорреляционная функция для сигнала AltBOC имеет самый узкий основной лепесток с существенно подавленными боковыми лепестками, по сравнению с сигналами BPSK и QPSK [74]. Поскольку шум измерений псевдодальности, как хорошо видно из приведённых выше соотношений, обратно пропорционален крутизне главного максимума автокорреляционной функции, это должно привести к уменьшению шума псевдодальности для сигналов AltBOC по сравнению с сигналами BPSK и QPSK. Это можно увидеть на Рис. 2.3. Сигналы AltBOC превосходят, как сигналы BPSK, так и QPSK, демонстрируя шум псевдодальности менее 5 см при SNR более 35 дБ-Гц, что подчеркивает его превосходство в точности и надежности сигнала. Отметим, что шум псевдодальности будет напрямую влиять на любой метод оценки ТЕС, включающий измерения псевдодальности. В данной ситуации более чем двухкратное уменьшение уровня шумов при использовании сигналов AltBOC, должно существенно улучшить шумовые характеристики оценок ТЕС, получаемых по одночастотной комбинации фазы и кода.

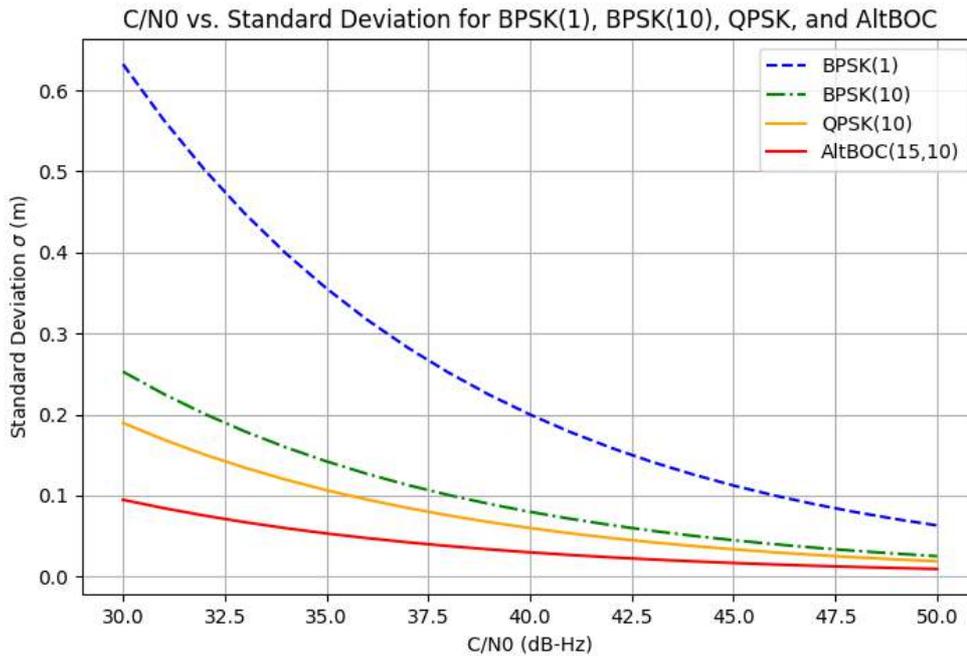


Рис. 2.3 Шумы псевдодальности для сигналов BPSK, QPSK и AltBOC.

2.3.4 Сигналы Galileo E5 и Beidou B2 AltBOC

Хотя структура AltBOC сигналов сложна, а реализация приёмника более затратна, преимущества этих сигналов, такие как высокое SNR и малые шумы в измерениях псевдодальности и фазы, делают их актуальными для использования в системах GNSS, требующих высокоточного позиционирования.

Параметры сигналов Beidou B2 и Galileo E5 полностью учитывает эти факторы, используя модуляцию AltBOC для обеспечения более высокой точности и надежности позиционирования. В Таб. 2.1 ниже приведены основные характеристики сигналов этих сигналов. Спутники Galileo и Beidou передают сигналы E5 и B2 в диапазоне [1164–1215 МГц], который является одним из основных диапазонов, используемых для спутниковых радионавигационных систем. Этот диапазон также является высокозащищенным диапазоном авиационных радионавигационных служб, но не является эксклюзивным для спутниковых навигационных систем. Это означает, что сигналы Galileo E5 и Beidou B2 делят этот диапазон с другими сигналами GNSS, и другими не связанными со спутниковой радионавигацией системами. В частности, сигналы GPS L5 и L2C, QZSS L5S и L2, SBAS L5, IRNSS L5, а также будущий сигнал ГЛОНАСС L3 — все они попадают в данный диапазон.

Таб. 2.1 Основные характеристики сигналов Galileo E5 и Beidou B2

Система	Сигнал	RINEX 3.05	Центральная частота (МГц)	Минимальная полоса пропускания (МГц)	Тип модуляции	Частота чипа (МГц)
Galileo	E5a	C5X, L5X, D5X, S5X	1176.45 МГц	20.46 МГц	BPSK(10)	10.23 МГц
	E5b	C7X, L7X, D7X, S7X	1207.14	20.46	BPSK(10)	10.23
	E5(a + b)	C8X, L8X, D8X, S8X	1191.795	51.15	AltBOC(15,10)	10.23
Beidou	B2a	C5X, L5X, D5X, S5X	1176.45	20.46	QPSK(10)	10.23
	B2b	C7D, L7D, D7D, S7D	1207.14	20.46	BPSK(10)	10.23
	B2(a + b)	C8X, L8X, D8X, S8X	1191.795	51.15	AltBOC(15,10)	10.23

Оба сигнала, Galileo E5 [75] и Beidou B2 [76], используют формат модуляции AltBOC (15,10) с центральной частотой 1191,795 МГц, включая поддиапазоны E5a (или B2a для Beidou) 1176,45 МГц и E5b (или B2b для Beidou) 1207,14 МГц. Эта комбинация расширяет полосу пропускания сигнала до примерно 51,15 МГц и значительно повышает точность в условиях многолучевого распространения. Такая схема кодирования обеспечивает широкополосные характеристики сигнала и улучшает его свойства в сложных условиях, делая сигнал Beidou B2 и Galileo E5 важным компонентом для высокоточных сервисов.

2.4 Метод оценки абсолютного вертикального ТЕС по данным одночастотных наблюдений сверхширокополосных навигационных сигналов AltBOC

Относительные оценки наклонного ТЕС, полученные с использованием одночастотной комбинации (2.5) фазовых и кодовых наблюдений сигналов AltBOC, могут служить входными данными для оценки абсолютного вертикального ТЕС на одиночной станции.

Существует несколько методов для оценки v ТЕС на одной станции, включая [77], но они обычно требуют либо оценки DCB, либо неизвестной фазовой константы, что, в свою очередь, требует дополнительных предположений. В настоящей работе

разработан собственный алгоритм, ключевая особенность которого заключается в переформулировке задачи, чтобы исключить DCB или начальную фазовую константу из рассмотрения. Для этого используется довольно общая модель тонкого слоя и представления $v\text{TEC}$ вблизи станции в виде усеченного разложения в ряд Тейлора до второго порядка в пространстве и времени:

$$\begin{aligned}
 v\text{TEC} = & a_0 + a_1(lat_{ipp} - lat_{st}) + a_2(lat_{ipp} - lat_{st})^2 + \\
 & + a_3(lon_{ipp} - lon_{st}) + a_4(lon_{ipp} - lon_{st})^2 + \\
 & + a_5(t_{obs} - t_{est}) + a_6(t_{obs} - t_{est})^2 + \\
 & + a_7(lon_{ipp} - lon_{st})(lat_{ipp} - lat_{st}) + \\
 & + a_8(lon_{ipp} - lon_{st})(t_{obs} - t_{est}) + \\
 & + a_9(lat_{ipp} - lat_{st})(t_{obs} - t_{est})
 \end{aligned} \quad , \quad (2.17)$$

где lat_{ipp} , lon_{ipp} — широта и долгота точки подионосферной точки, lat_{st} , lon_{st} — широта и долгота станции, t_{obs} , t_{est} — время текущего наблюдения и момент времени оценки $v\text{TEC}$. Таким образом для определения распределения $v\text{TEC}$ в окрестности станции необходимо оценить 10 коэффициентов $\{a_i\}$. При этом только наблюдения, для которых выполняется условие $|t_{obs} - t_{est}| < 15$ минут, вносят вклад в эти коэффициенты для искомого момента времени t_{est} . Для преобразования вертикального $v\text{TEC}$ в наклонный $s\text{TEC}$ мы используем простейшую картирующую функцию, используемую например в модели BDGIM:

$$\begin{cases} s\text{TEC} = \text{MF}(el) \cdot v\text{TEC} , \\ \text{MF}(el) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cdot \cos(el)}{R_E + h_{ipp}}\right)^2}} , \end{cases} \quad (2.18)$$

где el — угол возвышения спутника, h_{ipp} — высота подионосферной точки (обычно 450 км), R_E — радиус Земли.

Уравнения (2.5), (2.17) и (2.18) для всех видимых спутников образуют систему линейных уравнений (СЛУ) для оценки $\{a_i\}$. Эта система по-прежнему содержит неизвестные константы, которые необходимо устранить. Рассмотрим подробнее вид уравнений такой системы для произвольного (p -го) интервала непрерывности данных,

т. е. наблюдений определённого спутника на приёмнике между двумя последовательными срывами сопровождения фазы на рабочей частоте:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \sum_{k=0}^{n_{coeffs}-1} A_{jk} a_k = sTEC_j + const_p + \epsilon_j, \\ \sum_{k=0}^{n_{coeffs}-1} A_{j+1,k} a_k = sTEC_{j+1} + const_p + \epsilon_{j+1}, \\ \sum_{k=0}^{n_{coeffs}-1} A_{j+2,k} a_k = sTEC_{j+2} + const_p + \epsilon_{j+2}, \\ \dots \end{array} \right\}, \quad (2.19)$$

Элементы матрицы определяются значениями соответствующих картирующих функций (2.18) и приращений аргументов разложения (2.17), индекс j означает j -й луч спутник-приёмник из p -го интервала непрерывности данных, ϵ_j — инструментальная ошибка измерений на j -м луче, n_{coeffs} — число коэффициентов, необходимых для описания пространственно-временной динамики поля ТЕС, в настоящем случае 10. Как можно видеть, в пределах фрагмента системы для p -го интервала непрерывности данных константа, входящая в правую часть системы (2.19), сохраняется и может быть легко устранена путём последовательного попарного вычитания уравнений в рассматриваемом фрагменте. В итоге получаем систему, не содержащую эту константу с уравнениями вида:

$$\sum_{k=0}^{n_{coeffs}-1} (A_{jk} - A_{j-1,k}) a_k = sTEC_j - sTEC_{j-1} + \epsilon_{j,j-1}, \quad (2.20)$$

Аналогичная операция может быть применена и ко всем остальным интервалам непрерывности данных (фрагментам системы), что приведёт к устранению всех неизвестных констант, связанных с неопределённостью начальной фазы.

Сами интервалы непрерывности данных определяются следующим образом. Отсутствие данных в течение определённого времени (T_{gap} , обычно 30 сек) или вариации sTEC, превышающие заданный порог (TEC_{jump} , обычно 1 TECu/30 сек) между последовательными эпохами, трактуются как разрыв в данных, что приводит к началу нового интервала непрерывности.

В результате применения разностного подхода согласно (2.20) к исходной системе вида (2.19) задача определения неизвестных коэффициентов сведётся к решению системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\tilde{A} \cdot a = r + v , \quad (2.21)$$

Квазирешение (2.21) будем искать методом наименьших квадратов (МНК) с весами, который сводится к решению нормальной системы:

$$(\tilde{A}^T \Omega^{-1} \tilde{A})a = \tilde{A}^T \Omega^{-1} r , \quad (2.22)$$

где Ω — ковариационная матрица ошибок наблюдений. Её элементы могут быть оценены исходя из используемой модели дисперсии шумов наблюдений. В предлагаемом методе используется упрощённая модель дисперсии шумов наблюдений (sTEC), определяемая углом возвышения спутника:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sin(el)} , \quad (2.23)$$

где σ_0 — среднеквадратичная ошибка оценки TEC по (2.5) в зените, а все наблюдения полагаются независимыми.

Чтобы обеспечить положительные значения vTEC, в настоящем алгоритме используется МНК с ограничениями, реализованными путём решения соответствующей задачи линейной дополнителности (LCP) [78]. Таким образом, необходимо решить систему (2.21) с условием, заданным неравенством вида:

$$G \cdot a \geq 0 , \quad (2.24)$$

где матрица G переводит вектор-столбец оцениваемых параметров согласно (2.17) в распределение vTEC. Условие (2.24) можно переформулировать в условие, заданное равенством, вводя произвольный неотрицательный вектор-столбец $h \geq 0$. Тогда задача определения квазирешения (2.21) с условием (2.24) может быть сведена к решению следующей задачи:

$$\begin{aligned} & \min(v^T \Omega^{-1} v) \\ \text{s.t. } & \begin{cases} \tilde{A} \cdot a = r + v , \\ G \cdot a - h = 0 , \\ h \geq 0 , \end{cases} \end{aligned} \quad (2.25)$$

что эквивалентно отысканию минимума следующего функционала:

$$\min_{a,y} \left(\frac{1}{2} (\tilde{A} \cdot a - r)^T \Omega^{-1} (\tilde{A} \cdot a - r) - y^T (G \cdot a - h) \right), y^T h = 0, \quad (2.26)$$

Дифференцируя функционал в (2.26) по a и y и приравнявая эти производные нулю, получим:

$$a = (\tilde{A}^T \Omega^{-1} \tilde{A})^{-1} (\tilde{A}^T \Omega^{-1} \cdot r + G^T \cdot y) = a_{LS} + N^{-1} G^T \cdot y, \quad (2.27)$$

где a_{LS} — решение нормальной системы с матрицей N для МНК без ограничений (2.24), а вектор-столбец y — решение линейной задачи дополненности:

$$\begin{aligned} h &= M \cdot y + w, \\ s.t. : h &\geq 0, y \geq 0, y^T \cdot h = 0, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где $w = G \cdot a_{LS}$, $M = GN^{-1}G^T$. Отметим, что (2.28) имеет единственное решение, т. к. матрица M положительно определена. Решение (2.28) можно получить используя метод Лемке [79].

Из (2.27) следует, что решение задачи (2.21) с ограничениями (2.24) состоит из двух частей — решения (2.21) без ограничений с использованием МНК с весами и калибровочного слагаемого, связанного с условием (2.24).

Необходимо отметить, что на работу предложенного метода существенное влияние будет оказывать выбор параметра σ_0 , который должен быть согласован с используемыми входными данными и их шумами. В связи с этим необходимо провести отдельное исследование шумовых характеристик одночастотных оценок ТЕС (2.5) получаемым в том числе и при использовании новых сверхширокополосных сигналов в кодировке AltBOC, что и будет представлено в Главе 4. Кроме того в Главе 4 предложенный метод оценки абсолютного вертикального ТЕС будет протестирован на массиве данных реальных GNSS наблюдений и верифицирован путём сопоставления результатов с оценками абсолютного вертикального ТЕС, полученными по данным двухчастотных наблюдений стандартными методами.

2.5 Выводы главы

В данной главе рассмотрены основные подходы к восстановлению интегральных характеристик ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами GNSS.

Приведены основные уравнения наблюдений GNSS, описывающие зависимости фазовых и кодовых наблюдений от атмосферных и ионосферных параметров, основные соотношения, используемые при оценке полного электронного содержания ТЕС по одночастотным и двухчастотным наблюдениям. Рассмотрены основные методы кодирования сигналов GNSS, включая BPSK, QPSK и AltBOC, и их использование в различных GNSS системах, приведены теоретические оценки шумов наблюдений псевдодальности при использовании традиционных BPSK и QPSK сигналов и сверхширокополосных AltBOC сигналов, показавшие, что шумы псевдодальности при использовании сигналов AltBOC могут быть на порядок меньше шумов псевдодальности при использовании сигналов BPSK, что в свою очередь должно приводить к уменьшению шумов оценок ТЕС для методов, использующих кодовые измерения сигналов AltBOC. В Главе сформулирована необходимость проведения экспериментального исследования шумов ТЕС, получаемого по данным приёма сигналов AltBOC, которая будет решена в Главе 4 настоящей работы.

В главе также разработан оригинальный метод оценки абсолютного вертикального ТЕС над одиночной станцией с использованием данных приёма сигналов AltBOC на одной частоте. Данный метод использует приближение тонкого слоя высотой 450км, однослойную картирующую функцию, и усечённое до 2го порядка разложение поля ТЕС в окрестности станции в ряд Тейлора по широте, долготе и времени. Неопределённости начальной фазы разрешаются в предложенном методе за счёт использования в качестве входных данных приращений наклонного ТЕС на соседних лучах внутри одного интервала непрерывности данных, вместо относительных значений наклонного ТЕС, как в других методах. Получаемая в итоге система линейных алгебраических уравнений решается МНК с весами наблюдений, согласованными с шумами оценок ТЕС, полученными по данным приема сигналов AltBOC, а условие положительности оценок абсолютного вертикального ТЕС, реализовано за счёт решения задачи линейной дополнителности LCP. В главе формулируется задача необходимости тестирования предложенного метода на данных реальных наблюдений и его верификации по данным оценок абсолютного вертикального ТЕС стандартными двухчастотными методами, которая также решается в рамках данной работы в Главе 4.

ГЛАВА 3

Исследование особенностей описания ионосферных параметров в операционных моделях BDGIM и NeQuickG

3.1 Тестирование операционных ионосферных моделей по данным TEC

В данной главе приведены результаты исследования особенностей описания распределения TEC в рамках моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в различных регионах мира. В качестве данных о «реальном» распределении TEC в ионосфере использовались данные глобальных ионосферных карт CODG (Университет Берна), хорошо зарекомендовавшие себя в предыдущих исследованиях. На Рис. 3.1 представлены разностные карты распределений вертикального TEC по данным моделей Klobuchar, BDGIM, NeQuickG и данным карты CODG для одного и того же дня года в периоды максимума и минимума солнечной активности. Хорошо видно, что в целом с ростом солнечной активности ошибка моделирования TEC в операционных моделях возрастает. Кроме того хорошо видны области, где ошибка существенно превышает средние значения. Это прежде всего полярные и авроральные области, а также приэкваториальные широты, где наблюдаются значительные пространственные градиенты TEC, связанные с неоднородностями в полярной шапке, авроральном овале, главном ионосферном провале и экваториальной аномалии. Кроме того можно отметить значительное превышение средних значений ошибки в южном полушарии, что может быть связано с недостаточным числом станций наблюдений, на основании которых строились модели в данной области. Исходя из представленных на Рис. 3.1 распределений ошибки и интереса автора к регионам России и Китая для исследования были выбраны следующие 4 области (см. Таб. 3.1).

В качестве метрики ошибки было принято СКО данных TEC на основе трех рассматриваемых моделей и данных CODG:

$$Err(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{TEC}_i^{\text{CODG}}(t) - \text{TEC}_i^{\text{model}}(t))^2}, \quad (3.1)$$

где суммирование ведётся по всем пространственным узлам сетки карты CODG, попадающим в рассматриваемый регион. Это позволяет в определённой степени уравнивать регионы различных размеров и непосредственно сравнивать для них ошибки.

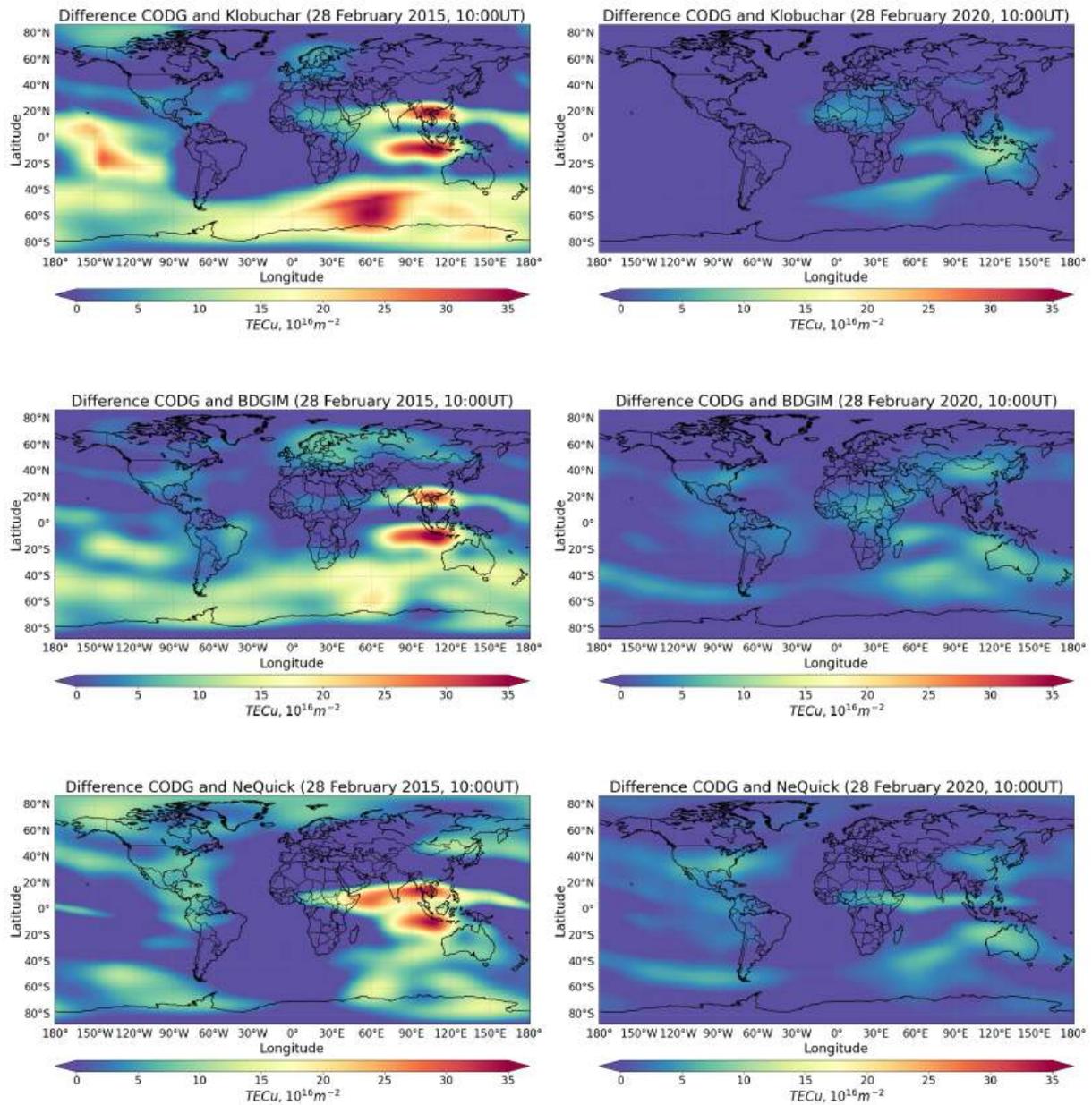


Рис. 3.1 Разностные карты распределений вертикального TEC по данным моделей Клобухар (сверху), BDGIM (в центре) и NeQuickG (снизу) и CODG TEC, для 28 февраля 2020 г. - низкая солнечная активность (справа) и 28 февраля 2015 г. - высокая солнечная активность (слева).

Таб. 3.1 Регионы тестирования операционных моделей

Регион	Широта	Долгота
Регион Северная Америка	70° W — 130° W	25° N — 49° N
Регион Южная Америка	70° W — 130° W	25° S — 49° S
Регион Россия	26° E — 180° E	40° N — 60° N
Регион Китай	80° E — 120° E	20° N — 40° N

Далее в работе представлено исследование вариаций ошибок моделирования ТЕС для трёх рассматриваемых моделей в четырёх регионах на различных временных масштабах, а также влияние на ошибки моделирования солнечной и геомагнитной активности.

3.1.1 Суточный ход ошибки моделирования ТЕС

Рассмотрим суточный ход суммарной ошибки моделирования ионосферной задержки для моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG на примере Китая для двух дней 2015 года, представляющих периоды весеннего равноденствия и зимнего солнцестояния. Эти результаты представлены на Рис. 3.2.

Хорошо видно, что для всех трёх исследуемых моделей наблюдается ярко выраженный суточный ход ошибки с максимумом в полуденные часы. В дневное время, когда ошибка достигает максимумов для всех трёх моделей ошибка модели Klobuchar практически вдвое превосходит ошибки модели BDGIM. В период весеннего равноденствия в дневные часы модель BDGIM показывает сопоставимые с моделью NeQuickG ошибки ТЕС, в то время как в период зимнего солнцестояния ошибка модели NeQuickG примерно в два раза меньше, чем ошибка модели BDGIM. В ночные часы все три исследуемых модели демонстрируют сравнимые ошибки оценки ТЕС. Отметим также, что максимальные ошибки для всех трёх моделей в период весеннего равноденствия выше, чем в период зимнего солнцестояния, что свидетельствует о наличии сезонной изменчивости ошибок оценки ТЕС по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG, которая будет рассмотрена в следующих параграфах.

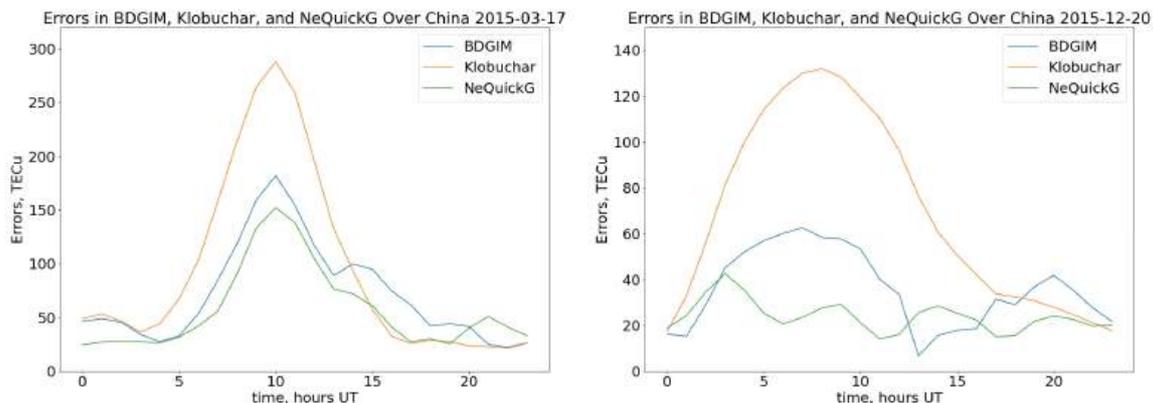


Рис. 3.2 Суточный ход суммарной ошибки моделирования TEC на основе моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG для региона Китая в периоды весеннего равноденствия (слева) и зимнего солнцестояния (справа) 2015 г.

3.1.2 Влияние геомагнитной активности на ошибки моделирования TEC

На ошибку оценки TEC могут оказывать влияние различные гелиогеофизические возмущения, влияния которых на распределение электронной концентрации в ионосфере не может быть полностью учтено в операционных моделях ионосферы, используемых в GNSS [80]. Прежде всего это относится к геомагнитным возмущениям и вызванным ими ионосферным бурям. В случае геомагнитной бури в ионосфере генерируются неоднородности в широком спектре пространственных и временных масштабов, распространяющиеся от полярных областей, в случае сильных возмущений они могут достигать экваториальной области [81]. Такие неоднородности вызывают сильные пространственные градиенты электронной концентрации, а следовательно и TEC, которые зачастую не могут быть учтены в моделях, описывающих достаточно гладкую крупномасштабную изменчивость ионосферы.

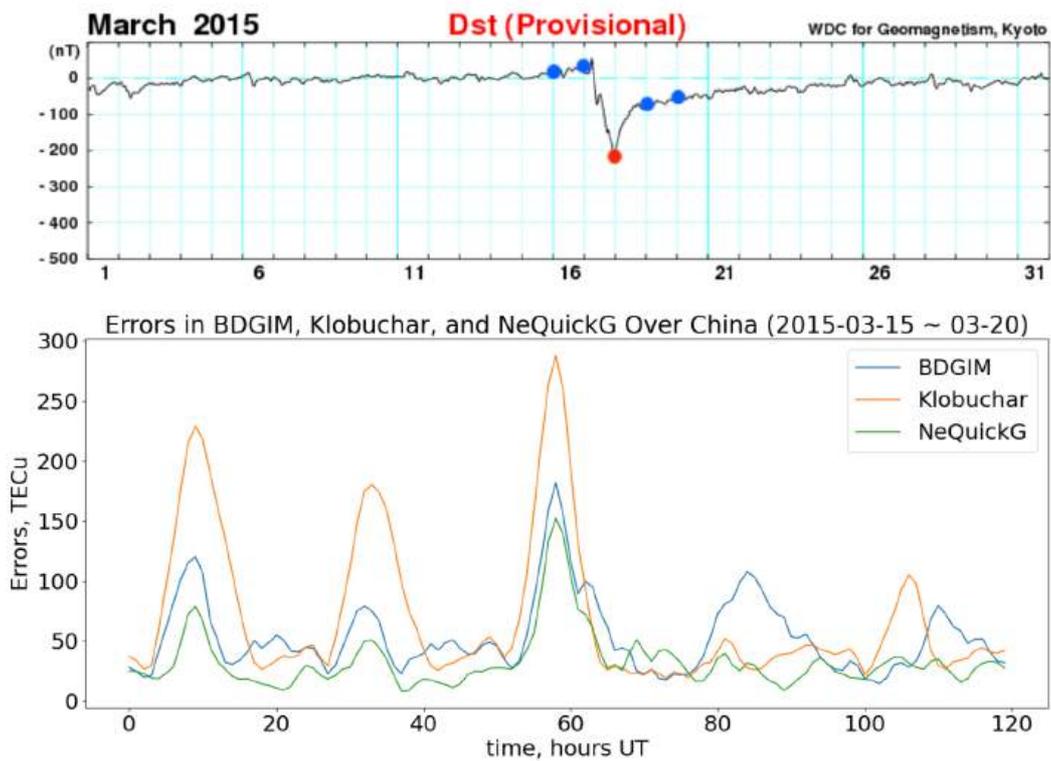


Рис. 3.3 Вариации Dst индекса (сверху) и суммарных ошибок оценки TEC для региона Китая по данным моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG (снизу) в период геомагнитной бури марта 2015 г.

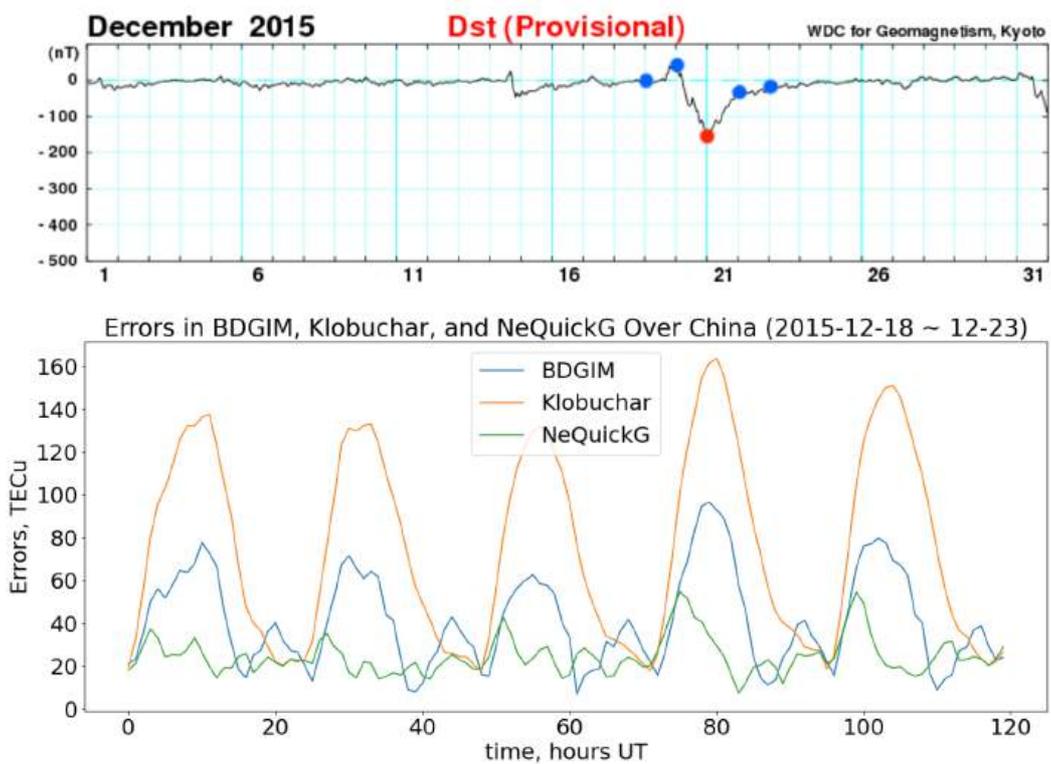


Рис. 3.4 Вариации Dst индекса (сверху) и суммарных ошибок оценки TEC для региона Китая по данным моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG (снизу) в период геомагнитной бури декабря 2015 г.

В рассматриваемый нами 2015г наблюдались две сильные геомагнитные бури — буря 17-18 марта 2015г (сильнейшая буря в 24 солнечном цикле) и буря 21 декабря 2015г. Отметим, что данные бури приходятся на периоды равноденствия и солнцестояния, соответственно. На верхних панелях Рис. 3.3 и 3.4 показаны значения индекса Dst, наблюдавшиеся в периоды данных событий. Видно, что для первого из них индекс Dst опускался ниже -200нТл , что говорит о сильнейших возмущениях геомагнитного поля в экваториальной области, а следовательно и об ионосферной возмущённости. Второе событие, как видно, было менее интенсивным. На нижних панелях Рис. 3.3 и 3.4 представлены ошибки оценки TEC по трём рассматриваемым моделям за 5 дней в период фазы внезапного вступления, главной фазы и фазы восстановления каждой бури (отмечены точками на графике Dst). Хорошо видно, что ошибка TEC для бури марта 2015г. растёт в главную фазу бури и быстро уменьшается на фазе восстановления бури, в то время как для бури декабря 2015 г. ошибка растёт лишь на фазе восстановления бури. Это может быть связано с различными механизмами генерации ионосферных возмущений для геомагнитных бурь периодов равноденствия и солнцестояния, а также возможно не достаточно оперативным обновлением коэффициентов моделей, вводимых в навигационных сообщениях. Отметим, что ошибка модели Klobuchar ожидаемо больше ошибок BDGIM и NeQuickG в периоды максимального развития возмущений, ошибка модели NeQuickG оказывается меньше ошибки модели BDGIM [55].

3.1.3 Влияние солнечной активности на ошибки моделирования TEC

Помимо геомагнитной активности на вариации ошибок моделирования TEC может оказывать влияние и солнечная активность, характеризуемая большими временными масштабами. В ходе выполнения работы нами были проанализированы вариации среднесуточной суммарной ошибки TEC по данным моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG для региона Китая за 2015 г. Она представлена на Рис. 3.5. Хорошо видна характерная периодика 27 дней, соответствующая среднему периоду вращения Солнца, а следовательно вариациям ионизирующего солнечного излучения. Это ещё раз подтверждает вывод о том, что максимальные ошибки моделирования соответствуют максимальным значениям TEC.

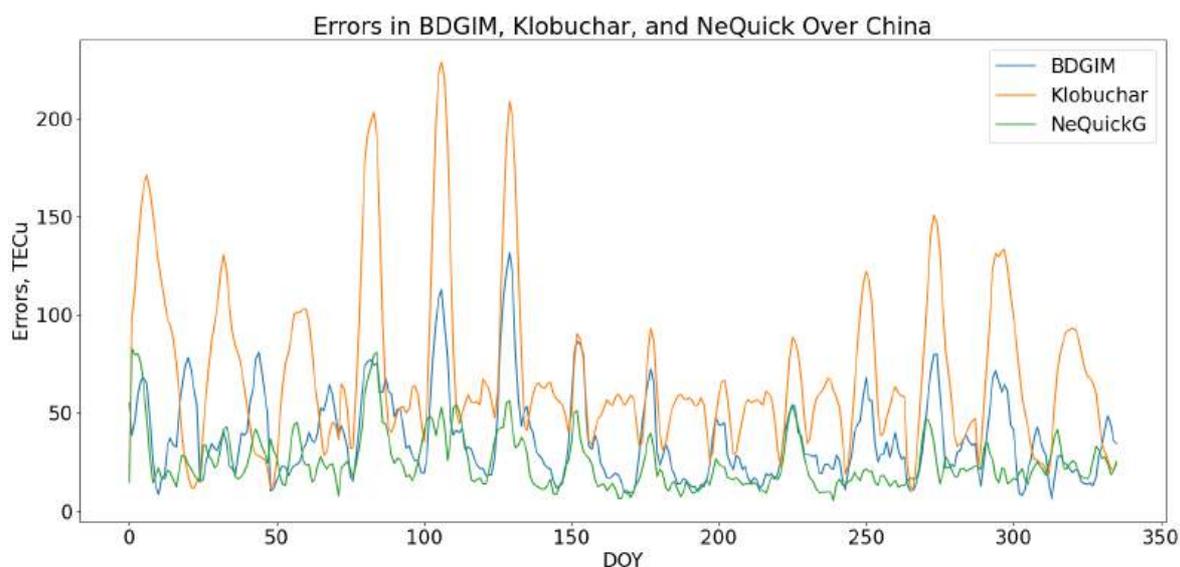


Рис. 3.5 Вариации среднесуточной суммарной ошибки оценки TEC по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG для региона Китая в 2015 г.

Помимо этого на Рис. 3.5 можно видеть и сезонную изменчивость ошибки, которая будет рассмотрена более подробно в следующем параграфе.

3.1.4 Сезонная изменчивость ошибки моделирования TEC

Для всех четырёх рассматриваемых в работе регионов проведено исследование сезонной изменчивости ошибок оценки TEC для моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в 2015 г. Эти результаты представлены на Рис. 3.6 — 3.9. На верхних двух панелях графиков приведены вариации индексов геомагнитной (Dst) и солнечной (F10.7) активности. На трёх нижних панелях в координатах время UT по вертикальной оси, день года по горизонтальной оси цветом представлены ошибки трёх исследуемых моделей. Такое представление удобно для анализа как внутрисуточной изменчивости, так и вариаций день ото дня.

Хорошо видно, что для всех четырёх регионов и трёх моделей наблюдается максимум суточного хода ошибки в полуденные часы. Это связано с суточным ходом TEC и максимумом ионизации в полуденные часы. Помимо суточного хода для всех регионов наблюдается ярко выраженный сезонный ход с максимумами в периоды равноденствий и минимумами в периоды солнцестояний. Это можно объяснить вариациями солнечного зенитного угла, а следовательно и потока проходящего ионизирующего излучения. Кроме того на наблюдаемую картину влияют особенности

циркуляции термосферы в периоды равноденствий и солнцестояний. В периоды равноденствий оба земных полушария нагреваются примерно одинаково, что уменьшает интенсивность межполушарной циркуляции, а следовательно и перемешивания газовых составляющих верхней атмосферы. Это приводит к тому, что более лёгкий атомарный кислород поднимается выше и его концентрация на высотах F2 слоя растёт по сравнению с концентрацией молекулярного азота. Концентрация атомарного кислорода при этом контролирует эффективность реакции ионизации, а концентрация молекулярного азота — реакции рекомбинации ионов кислорода и электронов. Таким образом растёт электронная концентрация, а следовательно ТЕС, что в свою очередь ведёт к росту ошибки оценки ТЕС. В периоды солнцестояния напротив межполушарная циркуляция усиливается за счёт неравномерного нагрева, что приводит к дополнительному перемешиванию в термосфере и росту относительного числа молекул азота на ионосферных высотах, а следовательно к увеличению эффективности рекомбинации и уменьшению электронной концентрации и ТЕС. Это приводит к уменьшению абсолютных ошибок оценки ТЕС.

На фоне сезонного хода ошибок ТЕС для всех четырёх регионов и трёх рассматриваемых моделей отчётливо прослеживаются вариации с периодом 27 дней, связанные с солнечной активностью. Они хорошо коррелируют с индексом F10.7. На фоне длиннопериодных вариаций ошибок также проявляются максимумы, связанные с геомагнитной активностью, коррелирующие с индексом Dst. Помимо этого наблюдаются и другие максимумы ошибки по-видимому не связанные с солнечной и геомагнитной активностью. Они могут быть вызваны возмущениями передающимися из нижней атмосферы в ионосферу за счёт распространения АГВ.

Отметим также явную широтную зависимость ошибок ТЕС. Максимальные ошибки наблюдаются для регионов Китая и Южной Америки, где они обусловлены градиентами электронной концентрации в северном и южном гребнях экваториальной аномалии [82]. Для регионов России и Северной Америки, расположенных преимущественно в средних широтах ошибка меньше, что обусловлено меньшими градиентами электронной концентрации в средних широтах [83].

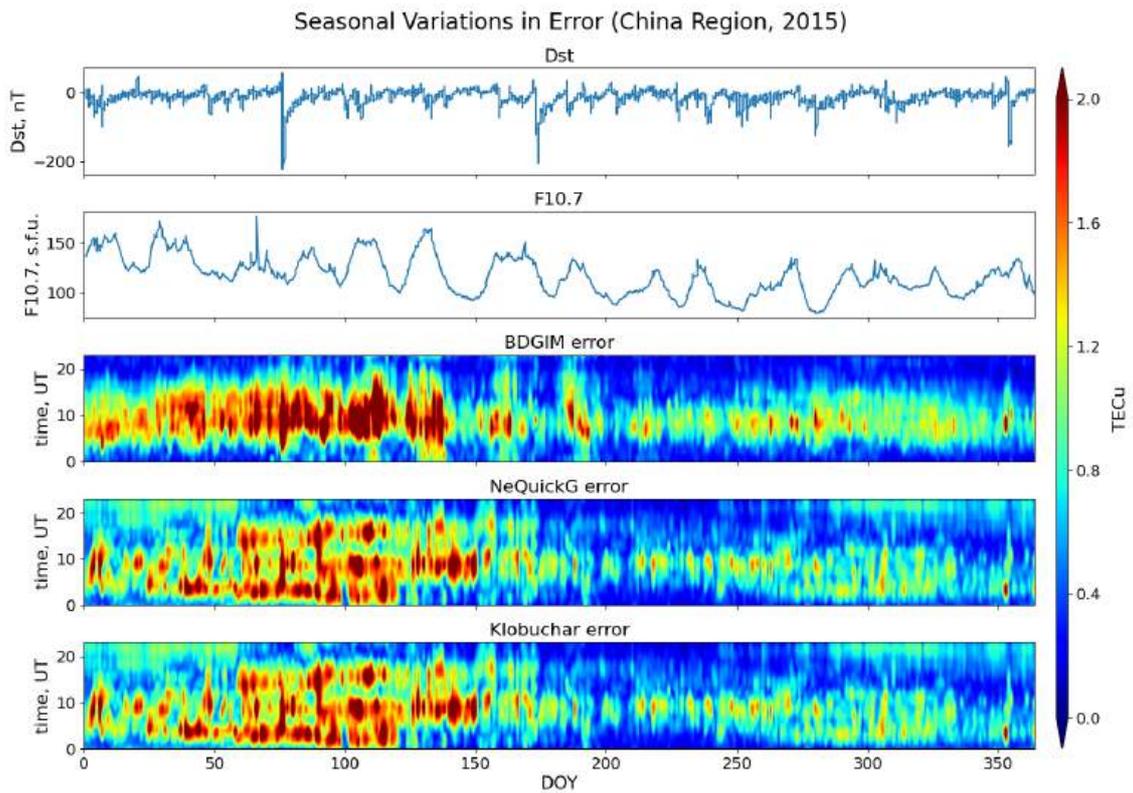


Рис. 3.6 Вариации ошибок ТЕС по моделям Кlobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Китай 2015 г.

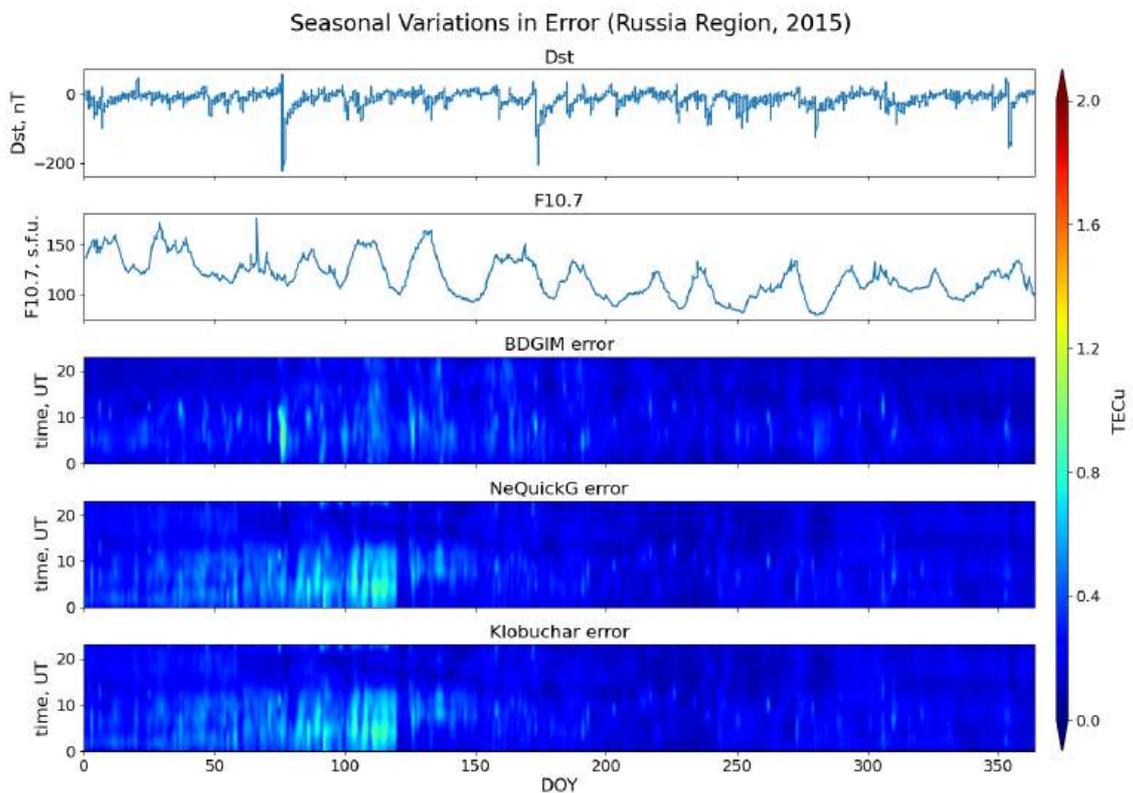


Рис. 3.7 Вариации ошибок ТЕС по моделям Кlobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Россия 2015 г.

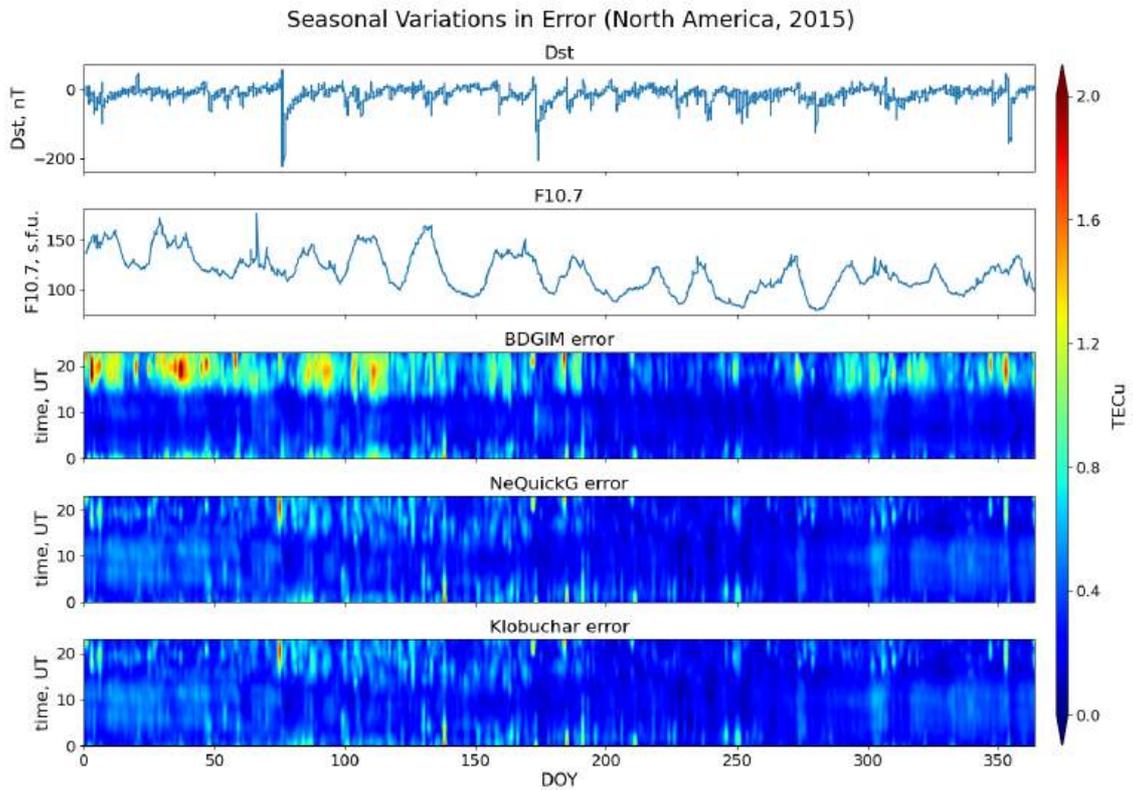


Рис. 3.8 Вариации ошибок ТЕС по моделям Кlobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. С. Америка 2015 г.

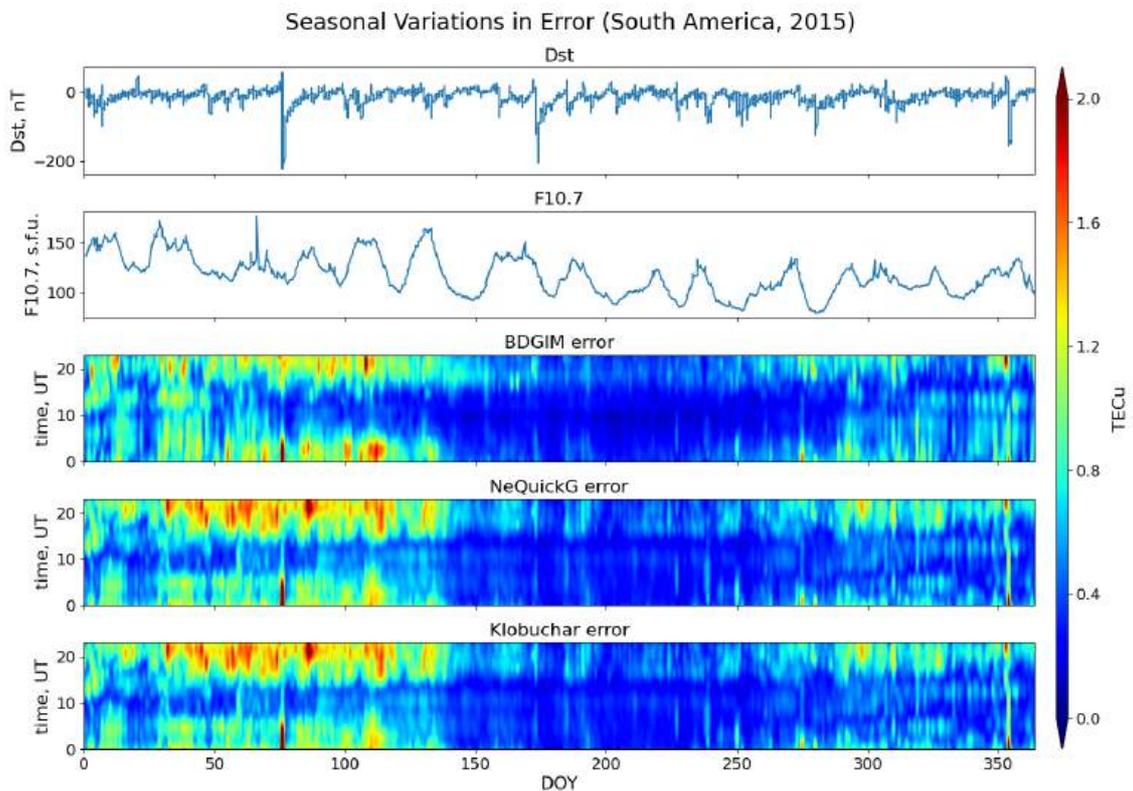


Рис. 3.9 Вариации ошибок ТЕС по моделям Кlobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Ю. Америка 2015 г.

3.1.5 Анализ среднегодовых ошибок моделирования TЕС

В данном параграфе приведём сравнение среднегодовых ошибок оценки TЕС по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG за 2015 год в четырех рассмотренных в работе регионах, оно представлено в Таб. 3.2. Эти результаты подтверждают, что усложнение эмпирической модели за счёт увеличения числа коэффициентов (в случае BDGIM) и более корректного задания высотного профиля электронной концентрации (в случае NeQuickG) могут существенно уменьшить ошибку моделирования TЕС, а значит и ошибку моделирования ионосферной задержки. Так для региона Китая такое улучшение составляет до 20% при использовании модели BDGIM вместо модели Klobuchar. Хорошо видно, что максимальные ошибки наблюдаются в регионах со значительными градиентами электронной концентрации, в частности в области экваториальной аномалии. Подобного поведения можно ожидать и в области главного ионосферного провала.

Таб. 3.2 Среднегодовые ошибки моделирования TЕС в рассматриваемых регионах (TЕСu)

Операционные Модели	Северная Америка	Южная Америка	Регион Китая	Регион России
Klobuchar	0.40	0.72	0.97	0.34
BDGIM	0.39	0.52	0.74	0.20
NeQuick	0.31	0.56	0.75	0.23

3.2 Тестирование операционных ионосферных моделей на данных GEC

Помимо TЕС, ещё одним важным интегральным параметром, описывающим состояние ионосферы, является глобальное электронное содержание (GEC) — общее число электронов во всей ионосфере. Данный параметр и методика его определения на основе глобальных распределений TЕС приведены в параграфе 2.5 на основе работ профессора Э.Л. Афраймовича [7]. В настоящее время этот параметр активно используется, как для тестирования, так и для параметризации различных моделей

ионосферы [35] [36]. Основой для его определения являются данные глобальных ионосферных карт GIM, представляемых несколькими центрами обработки данных с различной временной задержкой [4]. Вместе с тем GEC можно легко оценить и с использованием данных операционных ионосферных моделей. В связи с этим возникает ещё одна, менее исследованная, метрика сравнения ионосферных моделей — по ошибке оценивания GEC. Это и является предметом исследования в настоящем разделе.

Анализируются данные за период 2012–2020 гг., т. е. практически покрывающий весь 24й цикл солнечной активности, характеристики которой — индекс F10.7 — были получены из обсерватории Пентиктон в Канаде [84]. Для определения реального состояния ионосферы и оценки GEC использовались глобальные ионосферные карты европейского Центра определения орбит CODG [85]. Данные TEC по модели Klobuchar, представленные также в виде глобальных ионосферных карт были получены из ГНСС службы Европейского космического агентства [85]. Данные TEC по моделям NeQuickG и BDGIM также в формате глобальных ионосферных карт были получены в Китайской академии наук [86], при этом входные параметры моделей определялись на основе 30 распределенных по земному шару станций с использованием алгоритмов описанных в [87] [88]. На основе модельных распределений TEC и данных GIM CODG в работе проводились оценки GEC согласно (1.2) и сопоставление качества оценки GEC с использованием операционных моделей, результаты которых приведены далее.

Вариации GEC в 24м цикле солнечной активности (2012–2020 гг.), оценённые по операционным моделям Klobuchar, BDGIM, NeQuickG и глобальным ионосферным картам CODG представлены на верхней панели Рис. 3.10. На нижней панели приведены вариации индекса F10.7. Хорошо видно, что в целом оценки вариаций GEC по операционным моделям неплохо воспроизводят вариации GEC по данным глобальных ионосферных карт и на масштабе солнечного цикла хорошо коррелируют с солнечной активностью. При этом коэффициенты корреляции для среднесуточных значений F10.7 и GEC по модели NeQuickG и картам CODG оказываются практически одинаковыми и составляют 0.88, а по моделям BDGIM и Klobuchar 0.86 и 0.83, соответственно. Можно также отметить, что модель Klobuchar даёт завышенные оценки GEC по сравнению с другими рассматриваемыми моделями и GIM CODG в минимуме солнечной активности

и скорее заниженные оценки GEC в максимуме солнечной активности. Модели NeQuickG и BDGIM при этом лучше справляются с оценками абсолютных значений GEC в течение всего рассматриваемого периода.

Для более детального анализа рассмотрим статистику отклонений модельных оценок GEC от оценок GEC по данным GIM CODG [89]. Соответствующие распределения плотности вероятности отклонений для максимума (2015 г.) и минимума (2020 г.) солнечной активности, а также для всего периода исследований (2012–2020 гг.) представлены на Рис. 3.11.

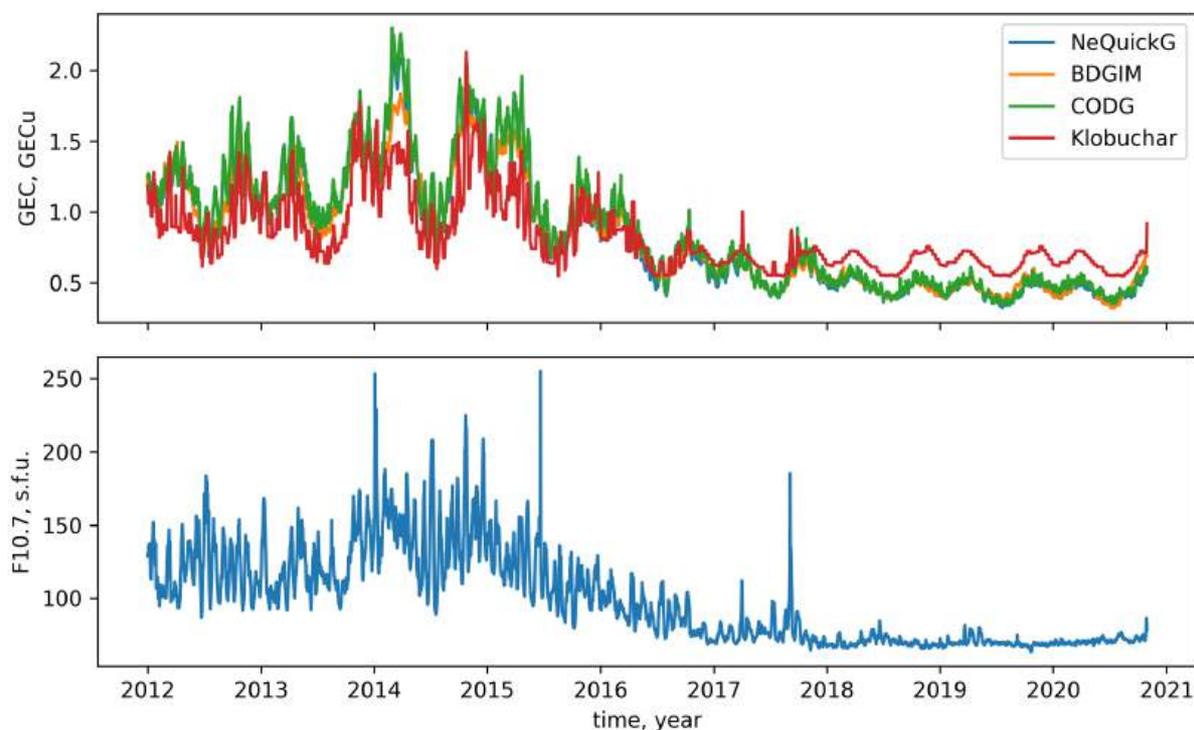


Рис. 3.10 Вариации GEC по данным моделей Klobuchar, NeQuickG и BDGIM, а также глобальных ионосферных карт CODG (верхняя панель) в сравнении с вариациями индекса солнечной активности F10.7 (нижняя панель).

Видно, что для модели BDGIM смещение оценки GEC уменьшается с уменьшением солнечной активности от -0.085 GECu в 2015 году до -0.013 GECu в 2020 году, при этом СКО также уменьшается с уменьшением солнечной активности от 0.111 GECu до 0.05 GECu, соответственно. Для модели NeQuickG смещение оценки GEC практически не меняется в зависимости от солнечной активности и составляет -0.025 GECu, при этом СКО также уменьшается с уменьшением солнечной активности от 0.049 GECu в 2015 году до 0.019 GECu в 2020 году. Для всего рассматриваемого

периода смещение и СКО оценок GEC для моделей BDGIM и NeQuickG составляет $(-0.041 \text{ GECu}, 0.092 \text{ GECu})$ и $(-0.025 \text{ GECu}, 0.042 \text{ GECu})$, соответственно. Здесь интересно отметить, что при сравнении по параметру GEC, модель NeQuickG таким образом показывает себя лучше модели BDGIM, в то время как согласно результатам [55], при сравнении TEC и точности позиционирования в одночастотном режиме выигрывает модель BDGIM. Это может быть связано как с тем, что результаты в [55] получены на ограниченном наборе приёмных пунктов, так и с тем, что в настоящей работе, в отличие от [55] использовались не вещаемые в навигационном сообщении параметры модели NeQuickG, а оценённые оптимальным образом согласно [87] [90].

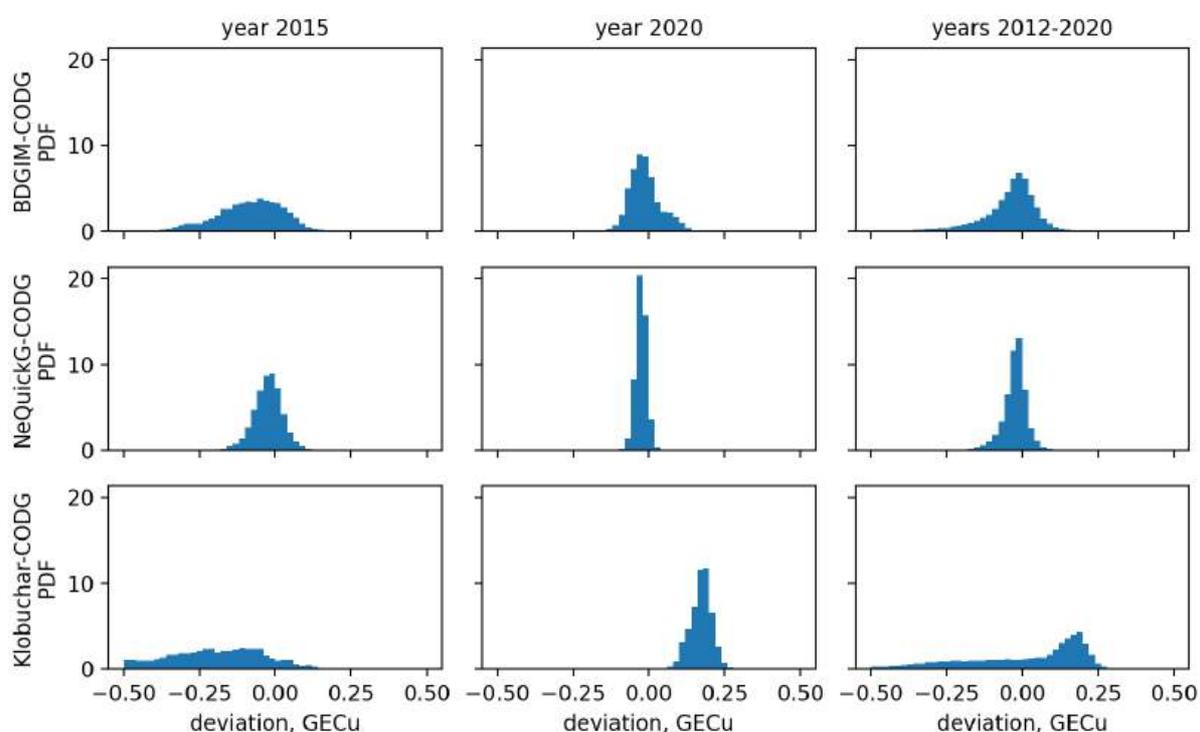


Рис. 3.11 Функции плотности вероятности отклонений модельных оценок GEC от оценок GEC по данным GIM CODG для максимума (слева) и минимума (по центру) солнечной активности, а также всего интервала 2012–2020 гг. (справа). Данные для модели BDGIM представлены в верхней строке, для модели NeQuickG в средней, для модели Klobuchar в нижней.

Для модели Klobuchar, как было отмечено выше, наблюдается разнонаправленное смещение оценок GEC для максимума и минимума солнечной активности. Для года максимума (2015 г.) наблюдается самое большое среди всех рассматриваемых моделей отрицательное смещение оценки GEC -0.243 GECu и самое большое СКО 0.204 GECu . Для года минимума (2020 г.) напротив наблюдается большое положительное смещение

оценки GEC 0.172 GECu при меньшем СКО 0.036 GECu , что приблизительно соответствует СКО BDGIM для этого периода. Это приводит к тому, что на графике плотности вероятности для модели Klobuchar за весь исследуемый период, в отличие от двух других рассмотренных моделей, наблюдается существенно негауссово распределение, состоящее из двух разных семейств. Такое поведение оценок GEC по данным модели Klobuchar можно объяснить тем, что данная модель использует постоянное значение TEC во всем ночном полушарии вне зависимости от уровня солнечной активности. Таким образом, в минимуме, когда ночные значения TEC, заложенные в модель, превышают реально наблюдаемые, ночная сторона вносит вклад в переоценку GEC, напротив в максимуме, когда реально наблюдаемые значения ночного TEC могут превосходить модельные, это приводит к недооценке GEC. Очевидным выходом из ситуации могло бы быть введение зависимости TEC в ночном полушарии от уровня солнечной активности в модели Klobuchar.

Отдельно было проведено исследование для северного полушария и южного полушария [91]. При анализе условий в северном полушарии (см. Рис. 3.12) и южном полушарии (см. Рис. 3.13) получены аналогичные результаты для отклонений и дисперсий GEC, как и для всего земного шара [92]. Тем не менее нужно отметить, что в то время как модель NeQuickG ведет себя в обоих полушариях практически одинаково, модель BDGIM демонстрирует большую асимметрию отклонений от данных GEC от CODG в южном полушарии по сравнению с северным, с доминированием отрицательных смещений. Отдельно стоит отметить результаты сравнения фильтрованных в диапазоне до полугода вариаций GEC представленных на этих рисунках. Здесь хорошо видно, что модель BDGIM имеет особенность существенно недооценивать 27-дневные вариации GEC в обоих полушариях по сравнению с моделью NeQuickG и данными CODG. Эту особенность мы рассмотрим далее более подробно [93].

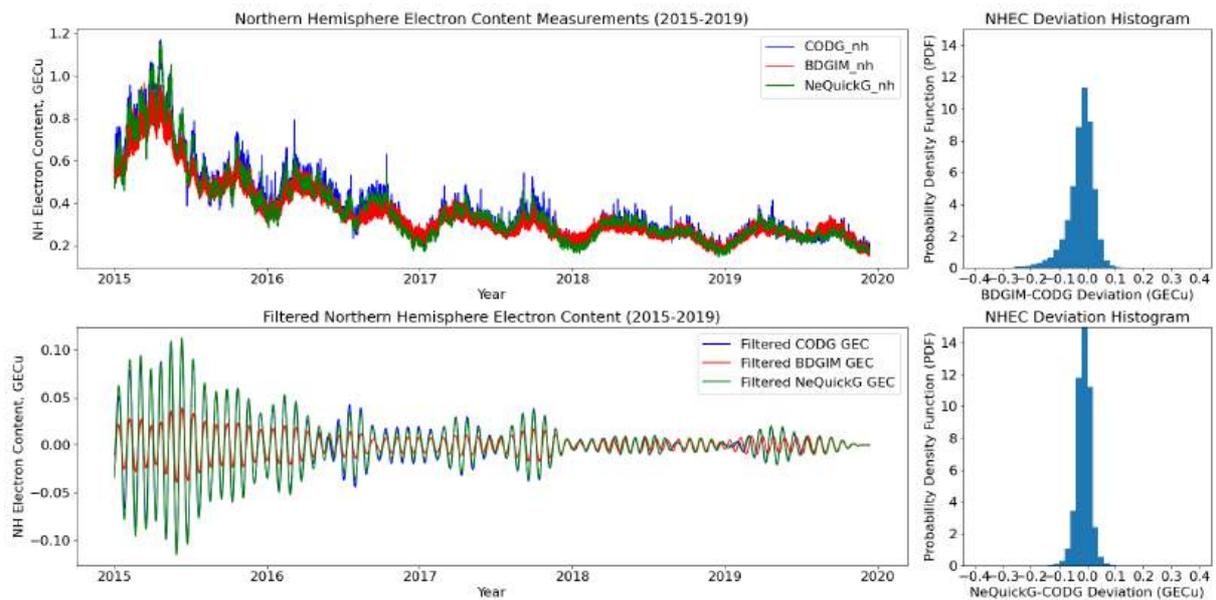


Рис. 3.12 GEC северного полушария по данным GIM CODG и моделям BDGIM и NeQuickG за 2015–2019 гг. (слева сверху), тоже отфильтрованное в диапазоне периодов меньше полугода (слева снизу) и гистограммы отклонения GEC северного полушария по GIM CODG и модели BDGIM (справа сверху) и NeQuickG (справа снизу).

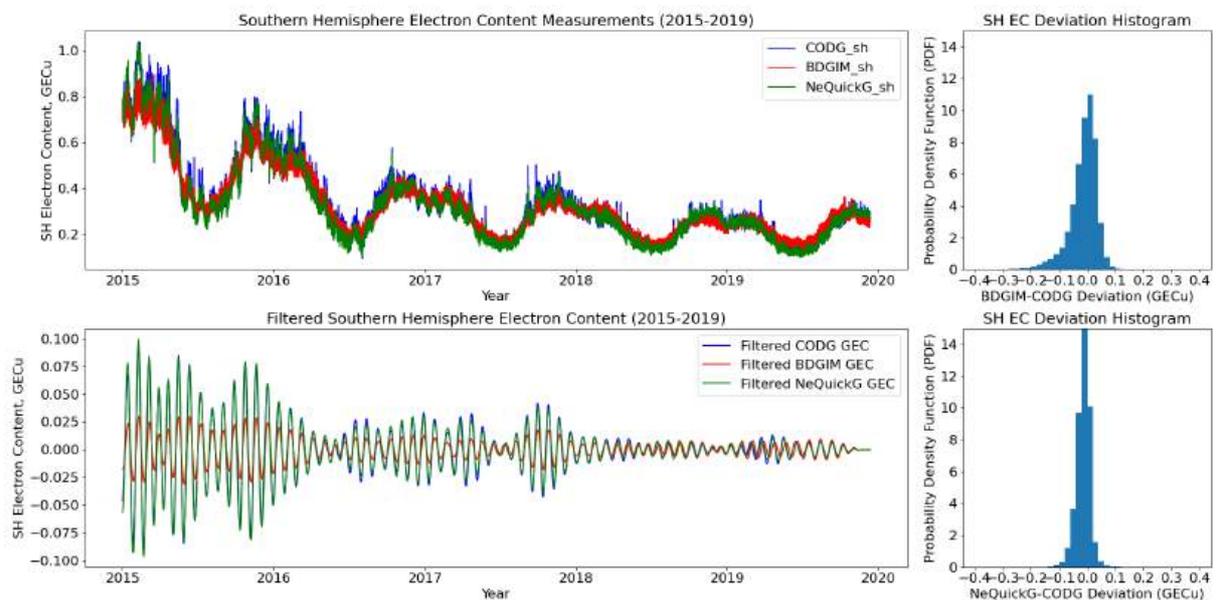


Рис. 3.13 GEC южного полушария по данным GIM CODG и моделям BDGIM и NeQuickG за 2015–2019 гг. (слева сверху), тоже отфильтрованное в диапазоне периодов меньше полугода (слева снизу) и гистограммы отклонения GEC южного полушария по GIM CODG и модели BDGIM (справа сверху) и NeQuickG (справа снизу).

Как хорошо видно на Рис. 3.10, GEC, будучи интегральным параметром, является чувствительным индикатором изменчивости ионосферы в целом в широком диапазоне временных масштабов, связанных как с эффектами космической погоды, так и с процессами, протекающими в нейтральной атмосфере [7] [94]. В данной работе также рассмотрены основные периодики, которые наблюдаются в спектре GEC, и то, как они воспроизводятся в моделях BDGIM и NeQuickG. Модель Klobuchar здесь не рассматривается из-за её особенностей, описанных выше. На Рис. 3.14 приведены вейвлет-спектры вариаций GEC, полученных по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG в сравнении со спектром индекса солнечной активности F10.7 в диапазоне периодов до 500 дней. Следует отметить, что спектры GEC по данным GIM CODG и F10.7 хорошо согласуются с результатами [7] [94].

Также важно отметить, что в спектре GEC присутствуют полугодовая и годовая гармоники, которые отсутствуют в спектре солнечной активности, что свидетельствует об атмосферном происхождении данных гармоник в спектре GEC и может быть объяснено особенностями циркуляции верхней атмосферы в рамках механизма термосферной ложки [88]. Если сравнить спектры GEC по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG, можно отметить следующие основные моменты. Во-первых, модель BDGIM недооценивает амплитуды как 27-дневной гармоники, связанной с солнечной активностью, так и полугодовой и годовой гармоник, связанных с атмосферной циркуляцией, особенно в периоды максимума солнечной активности. С другой стороны, модель NeQuickG при этом адекватно воспроизводит амплитуды этих гармоник. Это можно объяснить тем фактом, что коэффициенты CCIR, на основе которых строятся модели семейства NeQuick, уже содержат в себе сезонную изменчивость ионосферы, в то время как 17 невещаемых коэффициентов модели BDGIM не зависят от сезона. Таким образом, за счёт передаваемых в навигационном сообщении коэффициентов, в случае модели NeQuickG происходит адаптация в основном к эффектам солнечной активности, в то время как в модели BDGIM с использованием ограниченного числа вещаемых коэффициентов дополнительно к ним необходимо параметризовать и сезонную ионосферную изменчивость, что, по-видимому, менее эффективно. Возможным решением данной проблемы является замена текущего набора невещаемых коэффициентов модели BDGIM на аналогичные

среднемесячные наборы, что позволит достаточно просто учесть сезонную изменчивость ионосферы в модели и осуществлять её адаптацию к условиям солнечной активности за счёт вводимых коэффициентов.

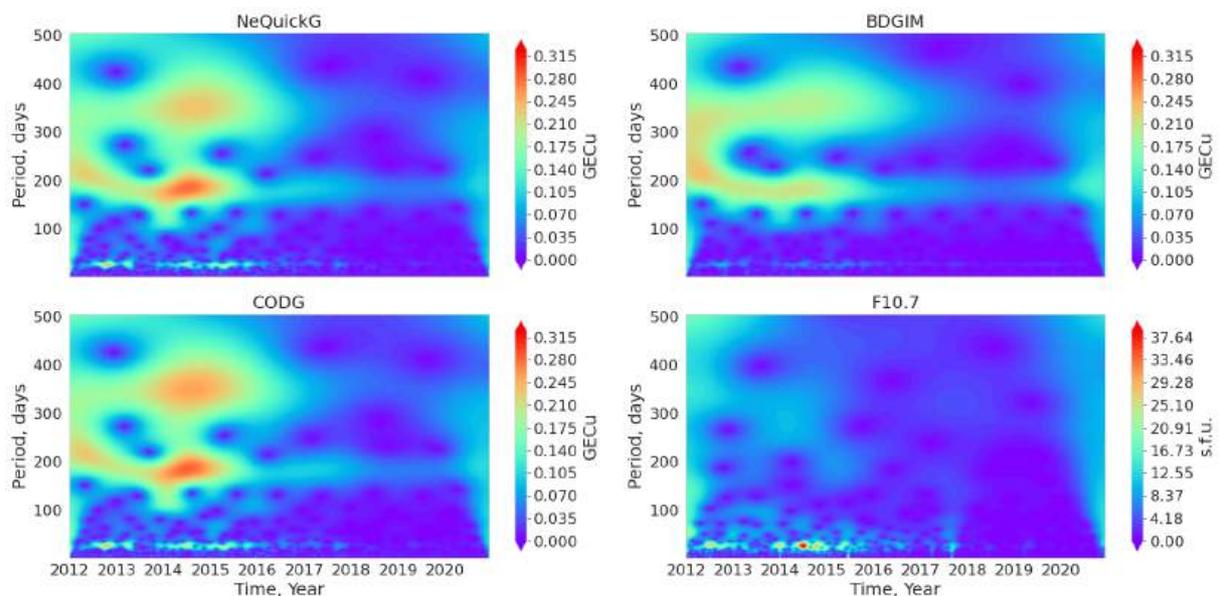


Рис. 3.14 Вейвлет-спектры вариаций GEC по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG в сравнении с вейвлет-спектром F10.7.

Важно отметить, что способность операционных ионосферных моделей адаптироваться к текущим гелиогеофизическим условиям на основе наблюдений на достаточно ограниченном наборе приёмных пунктов ГНСС, позволяет оценивать GEC с точностями, лучшими, чем согласно [7], демонстрируют эмпирические модели IRI и NeQuick2. Таким образом операционные модели, в первую очередь могут быть использованы для экспресс-оценки GEC, например для дальнейшей параметризации более сложных моделей. В работе была рассмотрена возможность построения регрессионных зависимостей GEC по данным CODG, обычно используемого при параметризациях более сложных моделей, от GEC по моделям NeQuickG и BDGIM. Тестировались простейшие полиномиальные модели различных порядков, из которых лучшие результаты показали приближения второго порядка, эти регрессионные кривые приведены на Рис. 3.15. Коэффициенты регрессионной модели для NeQuickG — $[0.02, 0.98, 0.025]$, для BDGIM — $[0.2, 0.79, 0.077]$.

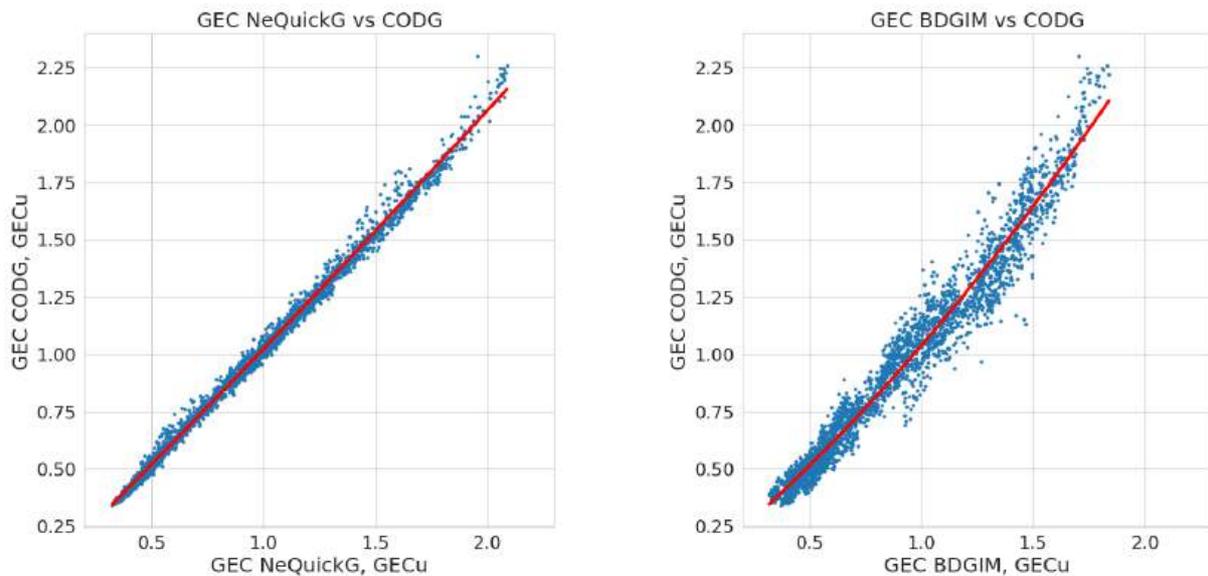


Рис. 3.15 Регрессионные зависимости GEC по данным GIM CODG от GEC по моделям BDGIM (справа) и NeQuickG (слева).

Видно, что для модели NeQuickG регрессионная зависимость ближе к линейной, в то время как для модели BDGIM вклад члена второго порядка является значительным. Также видно, что дисперсия регрессионных оценок GEC CODG в случае использования модели BDGIM выше, чем при использовании модели NeQuickG. Проведённый в работе анализ показывает, что представленная регрессионная модель позволяет получать несмещенные оценки GEC CODG с СКО 0.02 GECu по данным оценок GEC по модели NeQuickG. Учитывая тот факт, что задержки в получении глобальных ионосферных карт CODG, а следовательно и оценок CODG GEC, составляют несколько дней, а задержки в обновлении вещаемых коэффициентов модели NeQuickG составляют несколько часов и в любом случае не превышают суток, предлагаемая модель позволяет существенно улучшить оперативность высокоточных оценок GEC и предлагает метод экспресс-оценки GEC. Ещё одним выводом является тот факт, что при использовании модели NeQuickG для надёжной оценки GEC требуются данные всего нескольких десятков GNSS станций, а не нескольких сотен, как в случае глобальных ионосферных карт CODG и других групп. Отметим, что большая дисперсия и существенная нелинейность полученной регрессионной модели не позволяют использовать для этих целей модель BDGIM.

3.3 Выводы главы

В заключение главы сформулируем основные полученные в ней результаты. На основе анализа GNSS данных практически за полный 24-й цикл солнечной активности показаны особенности оценки GEC с использованием операционных ионосферных моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG. Показано, что вне зависимости от фазы солнечной активности модели BDGIM и NeQuickG имеют тенденцию в среднем недооценивать значения GEC по сравнению с данными глобальных ионосферных карт CODG. При этом SKO отклонений для обеих моделей растёт с ростом солнечной активности, а SKO для модели NeQuickG меньше, чем для модели BDGIM. Для модели Клобушара наблюдается разнонаправленное поведение оценок GEC с переоценкой по сравнению с CODG в периоды максимума солнечной активности и недооценкой в периоды минимума. Также эта модель характерна максимальными значениями SKO оценок GEC. Модель BDGIM имеет особенность недооценивать до 2х раз амплитуды 27-дневных, годовых и полугодовых вариаций GEC по сравнению с моделью NeQuickG и данными CODG, особенно в периоды максимума солнечной активности. Результаты работы показывают, что операционные модели ионосферы, в первую очередь NeQuickG, могут быть использованы для экспресс-оценки GEC по ограниченному набору GNSS наблюдений, например для дальнейшей параметризации более сложных моделей. Разработана простейшая регрессионная модель позволяющая получать несмещенные оценки GEC CODG с SKO 0.02 GEC_i по данным оценок GEC по модели NeQuickG. Учитывая тот факт, что задержки в получении глобальных ионосферных карт CODG, а следовательно и оценок CODG GEC, составляют несколько дней, а задержки в обновлении вещаемых коэффициентов модели NeQuickG составляют несколько часов и в любом случае не превышают суток, предлагаемая модель позволяет существенно улучшить оперативность высокоточных оценок GEC и предлагает метод экспресс-оценки GEC.

Результаты работы также показывают возможные пути усовершенствования модели BDGIM, которые в перспективе могут не только улучшить оценки GEC, но и точности позиционирования в одночастотном режиме с использованием данной модели.

ГЛАВА 4

Исследование сверхширокополосных сигналов Beidou B2 и Galileo E5 в задачах зондирования ионосферы

Исходя из приведённых в Главе 2 теоретических оценок шумов измерений псевдодальностей при использовании сигналов в кодировках BPSK и QPSK, а также новых сверхширокополосных сигналов в кодировке AltBOC можно ожидать, что оценки относительного наклонного TEC, получаемые одночастотным методом (2.5) при использовании сигналов AltBOC, будут обладать сходными шумовыми характеристиками с оценками TEC, получаемыми по двухчастотным фазовым измерениям (2.3) с использованием сигналов BPSK и QPSK. В таком случае одночастотные оценки относительного наклонного TEC можно было бы впервые использовать в задачах высокоточного мониторинга состояния ионосферы, в том числе при восстановлении абсолютного вертикального TEC над одиночным приёмником методом, представленным в параграфе 4 Главы 2 данной работы. Целью настоящей главы является экспериментальное подтверждение данного вывода для сигналов Galileo E5 и Beidou B2 – единственных сверхширокополосных сигналов GNSS доступных для наблюдения на регулярной основе. Для этого в данной главе будут проанализированы экспериментальные шумовые характеристики оценок наклонного TEC при использовании одночастотных (2.5) и двухчастотных комбинаций (2.3) и различных типов кодирования сигналов, исследовано влияние естественных радиопомех на навигационные сигналы в различных кодировках и верифицирован метод восстановления абсолютного вертикального TEC по данным измерений параметров одночастотных AltBOC сигналов.

4.1 Шумовые характеристики оценок TEC

Для сопоставления шумовых характеристик сигналов в различных кодировках и оценок относительного наклонного TEC, полученных на их основе, необходимо выбрать параметры, которые будут использоваться при описании шумов. В данной работе, в качестве параметра, характеризующего шумы TEC, используется среднеквадратичное отклонение относительного наклонного TEC в интервале 100 сек., полученное при скважности измерений 1 сек.:

$$\text{TEC RMS} = \sqrt{\langle \text{TEC}^2 \rangle_{100s} - \langle \text{TEC} \rangle_{100s}^2}, \quad (4.1)$$

Такой подход хорошо зарекомендовал себя в предыдущих исследованиях, например [95]. Интервал в 100 сек. был выбран по двум причинам: с одной стороны, он достаточно длинный, чтобы обеспечить статистически значимое количество данных TEC при выбранной скважности, а с другой стороны, он достаточно короткий, чтобы ограничить влияние изменчивости ионосферы, которая обычно характеризуется большими временными масштабами, на полученные результаты. На основе (4.1) в следующих разделах проведено сопоставление шумовых характеристик оценок TEC, полученных с использованием двух частотных и одночастотной комбинации (2.3), (2.4) и (2.5) для различных типов кодирования сигналов в системах Galileo и Beidou. Помимо этого дополнительно анализировалось стандартное соотношение сигнал/шум (SNR) для каждой из сигнальных компонент.

4.2 Используемые экспериментальные данные

Для исследования влияния схемы кодирования навигационных сигналов на шумы относительного наклонного TEC с использованием введённой согласно (4.1) характеристики необходимо использовать высокочастотные наблюдения (со скважностью не менее 1 Гц) с приёмников геодезического класса, способных отслеживать как сигналы в кодировке AltBOC, такие как Galileo E5 и Beidou B2, так и в более традиционных кодировках BPSK и QPSK. Для сигнала Galileo E5 выбор такого приёмника не представляет большой проблемы. Например, более $\frac{2}{3}$ станций европейской сети EUREF способны отслеживать эти сигналы [96]. С недавно представленным сигналом Beidou B2 ситуация пока не столь благоприятна, из-за отсутствия поддержки этого сигнала у многих производителей оборудования. В связи с этим, лишь малое число приёмников в общедоступных сетях способны отслеживать обо рассматриваемых в настоящем исследовании сигнала AltBOC. В настоящей работе использовались данные двух таких приёмников, SGPO и ACRG, входящих в международную сеть IGS, подробная информация об этих станциях представлена в Таб. 4.1. Чтобы отчасти компенсировать малое число приёмных станций, в работе проанализированы длительные интервалы наблюдений с этих станций.

Таб. 4.1 Приёмные станции, данные которых использованы в работе для анализа шумов оценки наклонного TEC с использованием одночастотных наблюдений сигналов в кодировке AltBOC

Название станции	SGPO	ACRG
Координаты	36.604° N, 97.485° W	5.603°N, 0.187°W
Местоположение	Биллингс, Оклахома, США	Аккра, Гана
Тип приемника	Javad TRE_3S	Javad TRE_3S
Сигналы, отслеживаемые приемником	GPS, GLO, GAL, BDS, SBAS	GPS, GLO, GAL, BDS, IRNSS, SBAS
Тип антенны	JAVAD RingAnt-G5T	SEPTENTRIO POLANT CHOKE RING B3/E6
Частота данных	1 Гц	1 Гц

Эти приёмники расположены в разных широтных и долготных регионах: экваториальном африканском секторе для ACRG и среднеширотном американском секторе для SGPO, что позволяет провести исследование в разных геофизических условиях. Также следует отметить, что обе станции оснащены антеннами типа Choke Ring, которые обеспечивают хорошее подавление многолучевых помех. Обе станции, рассмотренные в работе, используют однотипные приёмники Javad TRE_3S [97], что до некоторой степени гарантирует эквивалентную обработку сигналов. Вместе с тем, следует отметить, что уровень шумов обычно связан с используемыми алгоритмами обработки сигналов и может существенно меняться в зависимости от производителя и модели приёмника [98], таким образом полученные далее в работе оценки шумов TEC справедливы для конкретного типа приёмника, но можно ожидать, что соотношение уровней шума TEC, полученного с помощью одночастотных и двухчастотных комбинаций сигналов в кодировках AltBOC и BPSK/QPSK будет сохраняться.

Для исследования шумовых характеристик TEC на описанных выше приёмных пунктах мы использовали двухнедельный период наблюдений на фазе роста 25-го цикла солнечной активности с 14 по 29 февраля 2024 года, чего оказалось достаточно

для получения репрезентативной статистики наблюдений. Всего было получено более 85 миллионов измерений относительного наклонного ТЕС по данным приёма сигналов BPSK и QPSK, и более 37 млн. измерений по данным приёма сигналов AltBOC. Более чем двухкратная разница в числе наблюдений связана с тем, что из более чем 110 GNSS спутников, использовавшихся в наблюдениях, только менее 50 спутников (Galileo и Beidou) передавали сигналы в кодировке AltBOC. Выбранный период наблюдений характеризуется спокойными геомагнитными условиями, по данным Центра мировых данных по геомагнетизму Киото [99], максимальные абсолютные значения индекса Dst не превышали 30 нТл, а индекс Kp обычно был ниже 3, достигая пиковых значений 4+ 27 февраля 2024 года.

Для тестирования метода восстановления абсолютного вертикального ТЕС по данным одночастотных наблюдений сигналов AltBOC на одиночном приёмнике, предложенном в 4 параграфе Главы 2 использовались данные с этих же станций за период февраль 2023 — февраль 2024 года.

Кроме этого, отдельно проведено исследование работы сигналов AltBOC в условиях сильных естественных радиопомех (RFI), вызванных солнечными радиовсплесками (SRB). SRB представляют собой относительно короткие периоды, когда радиоизлучение Солнца увеличивается по сравнению с типичными фоновыми уровнями. Эти явления часто сопровождают солнечные вспышки и корональные выбросы массы. Спектр SRB обычно охватывает широкий диапазон частот и неоднороден по структуре. Если SRB происходит с существенным увеличением радиоизлучения в диапазоне частот GNSS и с соответствующей поляризацией (правой круговой), это может привести к радиопомехам и повлиять на сигналы и работу GNSS, что, в свою очередь, может быть зафиксировано в наблюдениях SNR. В связи с этим в работе дополнительно рассмотрены данные за 28 августа 2022 года, когда в 17:45 UT произошла сильная солнечная радиовспышка, которая серьёзно повлияла на станции GNSS в американском секторе [100], а также данные за 9 мая 2024 года, когда ещё один SRB в 09:00 UT повлиял на приём сигналов GNSS в африканском секторе.

В следующих трёх параграфах описаны результаты, полученные в ходе проведённого исследования.

4.3 Исследование шумовых характеристик оценок TEC с использованием сигналов Galileo E5 и Beidou B2 AltBOC

В этом параграфе представлены результаты исследования шумовых характеристик (4.1) относительного наклонного TEC, полученных с помощью двухчастотных и одночастотных комбинаций (2.3), (2.4) и (2.5) наблюдений GNSS сигналов в различных кодировках. Вначале рассматриваются шумы TEC на отдельных пролётах спутников, а в заключении анализируется полная статистика за весь период наблюдений.

На Рис. 4.1 и Рис. 4.2 приведены примеры оценок относительного наклонного TEC и его шумовых характеристик, полученных по данным приёмника ACRG во время пролётов спутников Beidou C24 и Galileo E05, соответственно. Средние панели рисунков показывают SNR различных сигнальных компонент и угол возвышения спутника. Левые панели рисунков показывают относительные оценки наклонного TEC по комбинациям (2.3), (2.4) и (2.5) и сигналам в различных кодировках, полученные для этой пары спутник — приёмник, а правые панели показывают 100-секундное RMS TEC (4.1) для изучаемых комбинаций, которое используется в качестве характеристики шума. Обозначения наблюдаемых величин и сигналов далее по тексту приведены согласно стандарта формата RINEX 3, смотри Таб. 2.2.

На средней панели Рис. 4.1 для наблюдений со спутника Beidou C24, видно, что все три принимаемых сигнала демонстрируют схожее поведение с увеличением SNR по мере увеличения угла возвышения спутника. В то же время мы видим, что SNR S8 для сигнала B2(a+b) AltBOC больше, чем SNR S2 для сигнала B1I BPSK(2) примерно на 7,5 дБ-Гц и примерно на 2,5 дБ-Гц больше, чем SNR S5 для сигнала B2a QPSK(10) на всем протяжении пролёта.

На левой панели Рис. 4.1 хорошо видно, что двухчастотная комбинация (2.4), построенная на наблюдениях псевдодальностей C2 BPSK(2) и C5 QPSK(10), имеет самый высокий уровень шума среди всех рассмотренных комбинаций TEC, особенно на низких углах возвышения. Одночастотная комбинация (2.5), построенная на наблюдениях фазы и псевдодальности L2 и C2 BPSK(2), немного меньше подвержена шуму, однако его уровень все ещё значителен. Ожидаемо лучший уровень шумов TEC демонстрирует двухчастотная комбинация (2.3), построенная на наблюдениях фаз L2 BPSK(2) и L5 QPSK(10). Однако важно отметить, что сопоставимый уровень шума

показывает одночастотная комбинация (2.5), построенная на наблюдениях фазы и псевдодальности L8 и C8 AltBOC(15,10). Эти результаты ещё более заметны на правой панели Рис. 4.1, которая показывает характеристику (4.1), выбранную в качестве показателя шума. Шум ТЕС для всех изучаемых комбинаций значительно увеличивается на низких углах возвышения. В то же время видно, что шум ТЕС для комбинации фазы L8 и псевдодальности C8 сигналов в кодировке AltBOC может быть на порядок или даже два ниже, чем для соответствующей комбинации сигналов старого поколения (L2 и C2), и составляет порядка 0.05 TECu на больших углах возвышения, что очень близко к результатам двухчастотной фазовой комбинации L2 и L5.

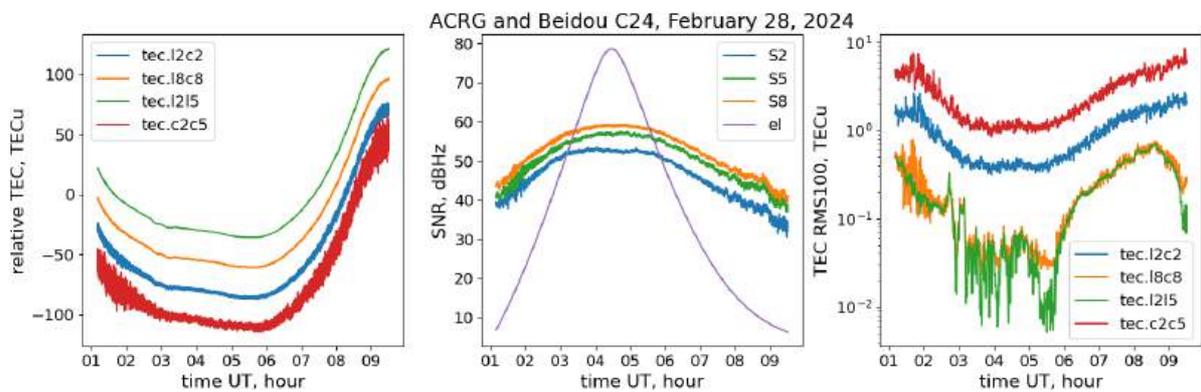


Рис. 4.1 Наклонный ТЕС (слева), SNR (в центре) и RMS ТЕС (справа) для пролёта спутника Beidou C24 над станцией ACRG 28 февраля 2024 года. На левой и правой панелях зелёная, оранжевая, синяя и красная линии соответствуют комбинациям L2L5, L8C8, L2C2 и C2C5 соответственно. На средней панели оранжевая, зелёная и синяя линии соответствуют наблюдениям S8, S5 и S2, фиолетовая линия показывает угол возвышения спутника.

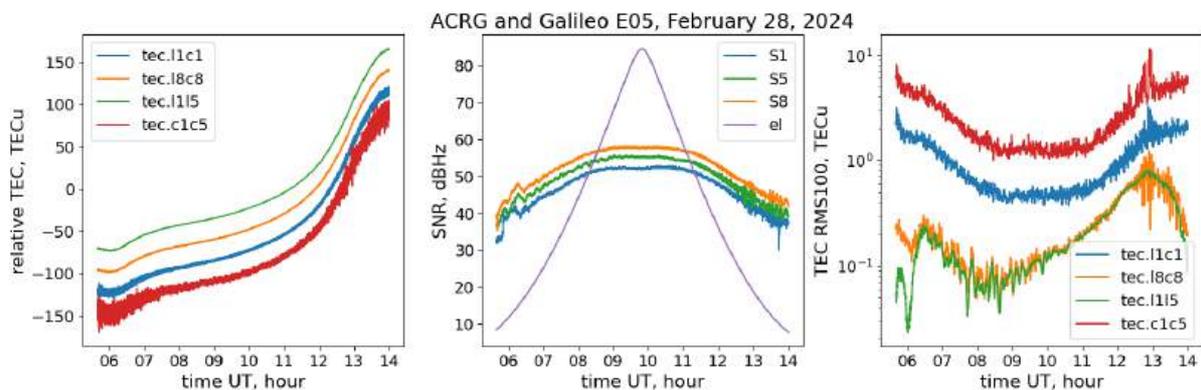


Рис. 4.2 Наклонный ТЕС (слева), SNR (в центре) и RMS ТЕС (справа) для пролёта спутника Galileo E05 над станцией ACRG 28 февраля 2024 года. На левой и правой панелях зелёная, оранжевая, синяя и красная линии соответствуют комбинациям L1L5, L8C8, L1C1 и C1C5 соответственно. На средней панели оранжевая, зелёная и синяя линии соответствуют наблюдениям S8, S5 и S1, фиолетовая линия показывает угол возвышения спутника.

Аналогичные оценки и сопоставления были проведены и для сигналов системы Galileo, они приведены на Рис. 4.2. Результаты показывают те же особенности для сигнала Galileo E5 AltBOC, которые наблюдались для сигнала Beidou B2 AltBOC. SNR S8 для сигнала E5(a+b) AltBOC почти достигает 60 дБ-Гц на больших углах возвышения и так же превосходит SNR S1 BPSK(1) и SNR S5 BPSK(10) примерно на 7,5 дБ-Гц и 2,5 дБ-Гц соответственно. Отметим, что показатели шума ТЕС для одночастотных комбинаций фазы/кода сигналов Beidou AltBOC и Galileo AltBOC также очень близки для рассматриваемых тестовых пролётов. Также отметим, что приведенные результаты для сигнала Galileo AltBOC хорошо согласуются с полученными в [95].

Приведённые отдельные примеры дают лишь некоторое представление о свойствах сигналов AltBOC и потенциале их использования для оценки ТЕС. В связи с этим был проведён статистический анализ всего рассмотренного набора данных с обоих приемных пунктов и всех наблюдаемых спутников, передающих сигналы в кодировке AltBOC. Результаты отдельно для спутников системы Galileo показаны в Таб. 4.2, для спутников системы Beidou — в Таб. 4.3 соответственно. Данные были разделены на 3 группы, соответствующие низким γ ($0-30^\circ$), средним ($30-60^\circ$) и высоким ($60-90^\circ$) углам возвышения спутников. Для каждой группы рассмотрены шумовые характеристики (4.1) для двух одночастотных комбинаций (фазы L8 и псевдодальности C8 AltBOC для Beidou и Galileo, фазы L1 и псевдодальности C1 BPSK для Galileo или фазы L2 и псевдодальности C2 BPSK для Beidou) и одной двухчастотной комбинации (фазы L1 BPSK и фазы L5 QPSK для Galileo или фазы L2 BPSK и фазы L5 QPSK для Beidou). Следует отметить, что (4.1) помимо непосредственно шумов также вносят вклад мелкомасштабные ионосферные неоднородности. Поэтому представленные здесь результаты в основном относятся к спокойным условиям в ионосфере, когда влияние таких неоднородностей относительно мало.

Приведённая статистика наблюдений в целом подтверждает результаты, полученные для отдельных пролётов спутников. Оценки ТЕС, полученные на основе одночастотной комбинации фазы и псевдодальности при использовании модуляции AltBOC (L8C8), для обеих навигационных систем последовательно демонстрируют

уровни шума, которые в 4-5 раз ниже, чем в случае использования аналогичной одночастотной комбинации и модуляций BPSK и QPSK (L1C1 для Galileo и L2C2 для Beidou). При этом она показывает всего примерно в 1,5 раза больший уровень шума по сравнению с двухчастотными фазовыми комбинациями L1L5 и L2L5, в основном на низких углах возвышения. На больших углах возвышения одночастотная комбинация фазы и псевдодальности AltBOC сигналов в среднем обеспечивает такой же уровень шума TEC, как и двухчастотные фазовые комбинации сигналов BPSK и QPSK для обеих систем. Следует отметить, что средний шум оценок относительного наклонного TEC с использованием одночастотной комбинации и сигналов AltBOC в целом практически идентичен для обеих систем, Beidou и Galileo, для всех рассмотренных диапазонов углов возвышения, с немного более высокими значениями шумов для Beidou на низких углах, что, вероятно, связано с различиями в орбитах систем.

Таб. 4.2 Средние значения характеристики шума TECRMS (TEC_u) для спутников Galileo за исследуемый период

Возвышение, °	L8C8 (AltBOC)	L1C1 (BPSK)	L1L5 (B(Q)PSK)
0-30	0.249	0.876	0.193
30-60	0.137	0.628	0.125
60-90	0.090	0.468	0.081

Таб. 4.3 Средние значения характеристики шума TECRMS (TEC_u) для спутников Beidou за исследуемый период

Возвышение, °	L8C8 (AltBOC)	L2C2 (BPSK)	L2L5 (B(Q)PSK)
0-30	0.261	0.866	0.222
30-60	0.148	0.602	0.140
60-90	0.090	0.446	0.085

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что свойства AltBOC сигналов делают этот тип данных пригодным для использования в алгоритмах оценки абсолютного вертикального TEC по данным одночастотных наблюдений, в частности могут быть использованы в качестве входных данных для алгоритма, разработанного в

рамках данной работы и описанного в Главе 2. Таким образом использование сигналов AltBOC значительно влияет на обеспеченность ионосферных наблюдений при использовании одночастотной приёмной аппаратуры. Кроме того важную роль играет возможное влияние естественных радиопомех на приём сигналов AltBOC, а следовательно и на возможность их использования в задачах диагностики ионосферы. В случае если соотношение сигнал/шум падает ниже определённого порога, обычно в 20-25 дБ-Гц, возможны срывы сопровождения фазы навигационного сигнала, что приводит к произвольному изменению значений констант, связанных с фазовой неоднозначностью, в (2.3) и (2.5). Это в свою очередь может приводить к тому, что интервалы непрерывности в оценках относительного наклонного TEC согласно (2.5) будут слишком короткими, чтобы их можно было использовать в разработанном алгоритме восстановления абсолютного вертикального TEC. В связи с этим необходимо дополнительно исследовать поведение SNR сигналов AltBOC в присутствии интенсивных радиопомех. Хорошую возможность для этого представляют солнечные радиовсплески, анализу приёма сигналов AltBOC во время которых посвящён следующий параграф.

4.4 Влияние естественных радиопомех на сигналы AltBOC

В этом параграфе представлены результаты исследования особенностей приёма сигналов Galileo и BeiDou AltBOC в условиях естественных радиопомех, вызванных интенсивными солнечными радиовсплесками 28 августа 2022 года и 9 мая 2024 года. Геомагнитная обстановка во время обоих событий была спокойной, индекс K_p не превышал 3.

Во время солнечного радиовсплеска 28 августа 2022 года Райт и др. [100] обнаружили снижение SNR для сигналов GNSS в кодировках BPSK и QPSK по всему американскому сектору. В настоящем диссертационном исследовании для данного события проведено сопоставление SNR сигналов AltBOC с SNR сигналов BPSK и QPSK по данным приёмника SGPO, как раз расположенного в средних широтах американского сектора, данные о приёмнике приведены в Таб. 4.1.

Во время события SRB затухание сигнала GNSS зависит от зенитного угла Солнца на станции во время наблюдения и угла возвышения наблюдаемого спутника. Спутники

Galileo E34 и BeiDou C44 находились близко к зениту во время рассматриваемого SRB. Проанализируем данные SNR для сигналов AltBOC (S8) и их боковых полос QPSK (S5 и S7), а также для сигналов BPSK (S1 и S2) и сопоставим их с данными о солнечном радиоизлучении. Для рассматриваемого события в данных радиообсерватории Сагамор Хилл [101] отсутствуют измерения на частоте 1415 МГц — ближайшей к частотам рассматриваемых GNSS сигналов. Поэтому для идентификации и описания временной эволюции этого SRB использовались измерения радишума на следующей ближайшей к частотам GNSS линии 610 МГц с этой обсерватории.

Полученные результаты показаны на Рис. 4.3 для спутника Galileo E34 и Рис. 4.4 для спутника Beidou C44. Можно наблюдать резкий рост солнечного радиоизлучения, начинающийся около 17:45 UT и интенсивностью в максимуме превышающей 40 000 s.f.u. (что указывает на SRB). Эффекты значительного затухания сигналов Galileo и BeiDou охватывает период около 1 часа, что в два раза дольше периода, когда наблюдается увеличение солнечного радиоизлучения на частоте 610 МГц. Это может свидетельствовать о сильно неоднородном спектре данного SRB. До периода возмущений солнечного радиоизлучения для сигналов Galileo и Beidou AltBOC (S8X) можно наблюдать значительно более высокие (превышение до 10 дБ-Гц) значения SNR по сравнению с сигналами в других кодировках, E1 и B1I, соответственно. С развитием SRB можно наблюдать резкое уменьшение SNR для всех рассмотренных сигналов GNSS, как для BeiDou, так и для Galileo. Также можно заметить, что степень этого уменьшения SNR не одинакова для всех изученных сигналов. Для не-AltBOC сигналов E1 и B1I это затухание на 5-10 дБ-Гц меньше, чем для сигналов AltBOC E5 и B2 и их боковых полос. В то же время значения SNR для всех сигналов не опускаются до ~20–25 дБ-Гц, что обычно является пороговым значением при срыве сопровождения фазы и потери захвата сигнала в навигационных приёмниках геодезического класса. Это может свидетельствовать о более слабой защите от радиопомех для сверхширокополосных сигналов AltBOC по сравнению с BPSK и QPSK, что вообще говоря не является ожидаемым.

Другим возможным объяснением может быть сильно неоднородный спектр солнечного радиоизлучения во время данного SRB. Следует учитывать, что сигналы Galileo E1 и Beidou B1I с одной стороны, и Galileo E5a, E5b, E5(a+b) и Beidou B2a, B2b

и B2(a+b) с другой, занимают довольно разные части спектра: вблизи 1570 МГц для первых и вблизи 1190 МГц для последних. Можно наблюдать высокую корреляцию вариаций SNR сигналов E1 и B1I и их довольно большие отличия от вариаций SNR сигналов E5 и B2, которые, в свою очередь, выглядят сильно коррелированными между собой. Эти особенности наиболее заметны около 18:00 UT, 18:15 UT и 18:30 UT, а также до и после основной фазы SRB. Это может свидетельствовать о том, что излучение SRB было более интенсивным вблизи 1190 МГц, чем около 1570 МГц, но это невозможно подтвердить, так как независимые измерения спектра солнечного радиоизлучения, в широком спектральном диапазоне не были доступны. Ещё одним возможным объяснением являются различия в обработке разных типов сигналов в разных частотных каналах сигналов в аппаратуре приёмника. Чтобы проверить эту возможность, необходимо провести дополнительные исследования с использованием различных моделей приёмного оборудования, реализующих различные схемы обработки сигналов для AltBOC, что на момент написания данной работы затруднено из-за малой распространённости AltBOC приёмников и выходит за рамки настоящего диссертационного исследования.

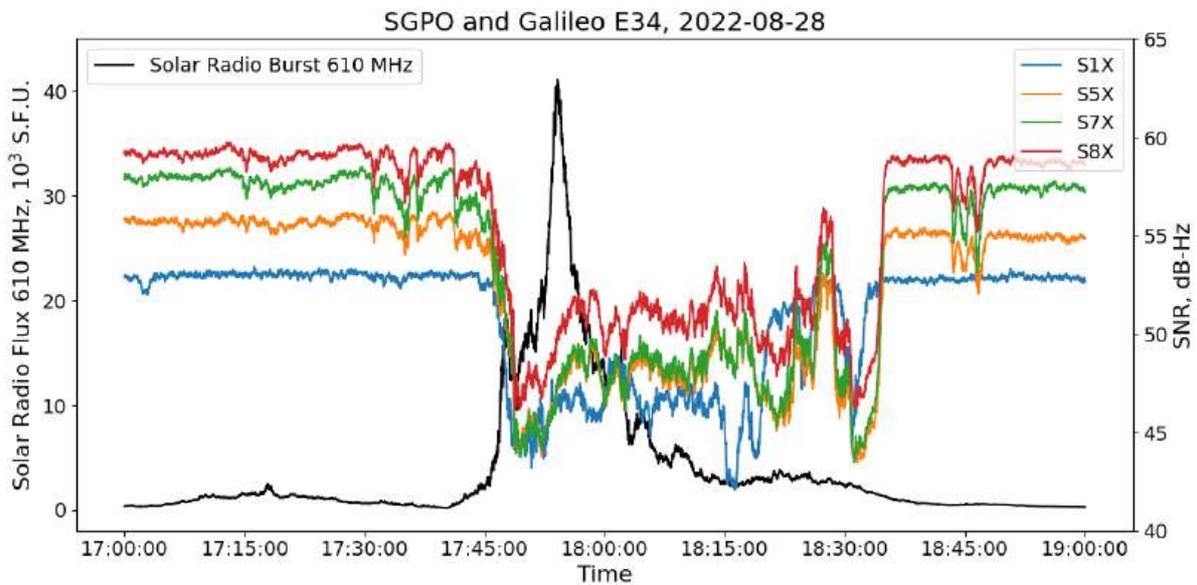


Рис. 4.3 Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Galileo E34 на станции SGPO 28 августа 2022 г. Красная линия - SNR S8X сигнала E5(a+b), зелёная линия - SNR S7X боковой полосы E5b, оранжевая линия — SNR S5X боковой полосы E5a, синяя линия - SNR S1X сигнала E1, чёрная линия — радиоизлучение солнца на частоте 610 МГц.

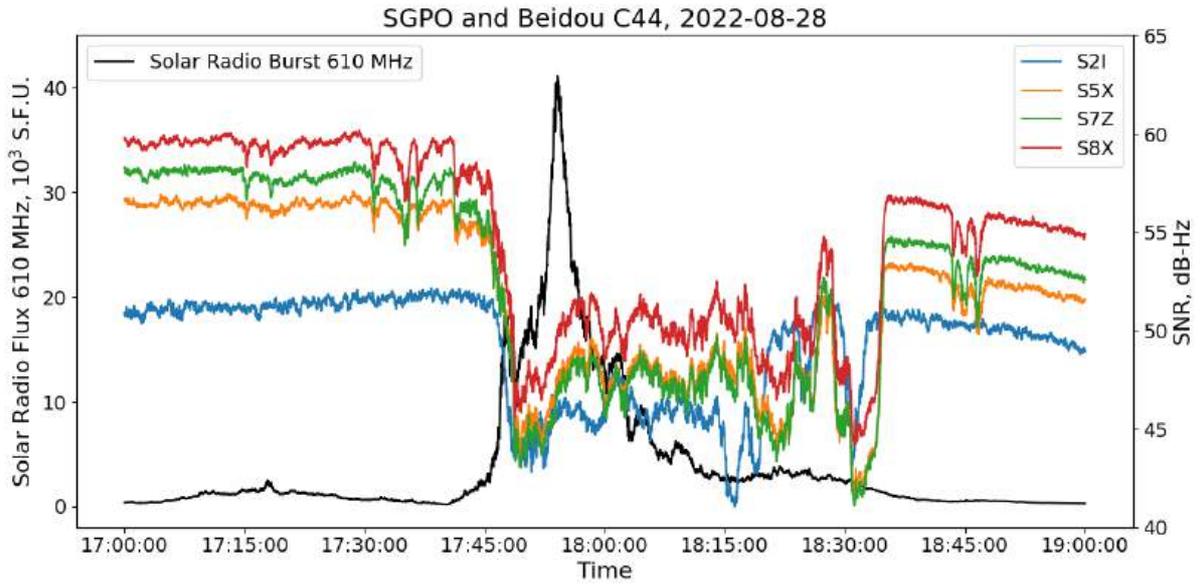


Рис. 4.4 Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Beidou C44 на станции SGPO 28 августа 2022 г. Красная линия - SNR S8X сигнала B2(a+b), зеленая линия - SNR S7Z боковой полосы B2b, оранжевая линия — SNR S5X боковой полосы B2a, синяя линия - SNR S2I сигнала B1I, чёрная линия — радиоизлучение солнца на частоте 610 МГц.

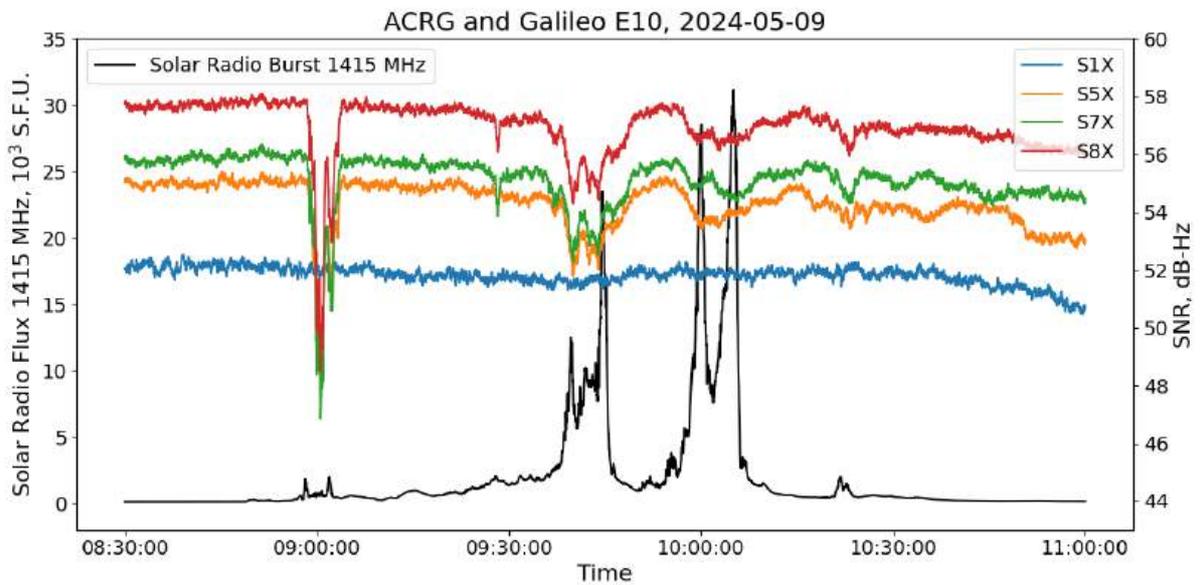


Рис. 4.5 Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Galileo E10 на станции ACRG 9 мая 2024 г. Красная линия - SNR S8X сигнала E5(a+b), зелёная линия - SNR S7X боковой полосы E5b, оранжевая линия — SNR S5X боковой полосы E5a, синяя линия - SNR S1X сигнала E1, чёрная линия — радиоизлучение солнца на частоте 1415 МГц.

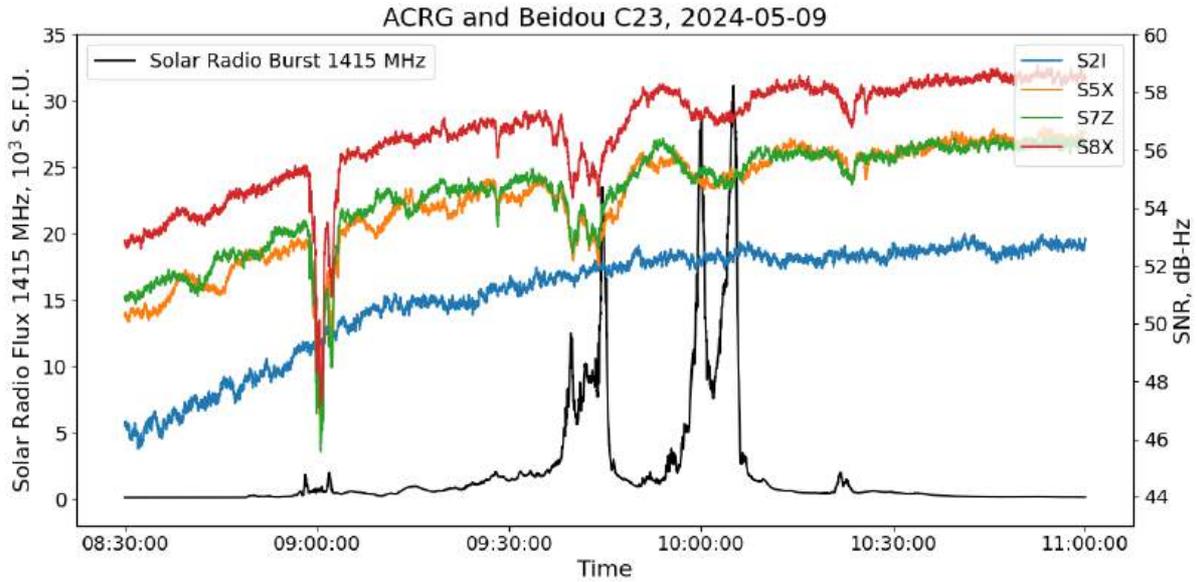


Рис. 4.6 Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Beidou C23 на станции ACRG 9 мая 2024 г. Красная линия - SNR S8X сигнала B2(a+b), зеленая линия - SNR S7Z боковой полосы B2b, оранжевая линия — SNR S5X боковой полосы B2a, синяя линия - SNR S2I сигнала B1I, чёрная линия — радиоизлучение солнца на частоте 1415 МГц.

Результаты полученные для второго из рассматриваемых в работе SRB 9 мая 2024г., полученные на станции ACRG, расположенной в африканском секторе, на примере наблюдений спутников Galileo E10 и Beidou C23 представлены на Рис. 4.5 и Рис. 4.6, соответственно. Они в целом подтверждают результаты, полученные для рассмотренного ранее SRB 28 августа 2022г. Для этого события, в отличие от предыдущего, были доступны наблюдения радиообсерватории Сан-Вито на частоте 1415 МГц, ближайшей к полосе частот сигналов GNSS. В очередной раз наблюдается существенное уменьшение SNR сигналов AltBOC для спутников обеих систем с ростом интенсивности солнечного радиоизлучения, и высокая коррелированность поведения SNR сигналов AltBOC для обоих спутников. Удивительно, что более слабые всплески интенсивности солнечного радиоизлучения <5000 s.f.u. на частоте 1415МГц в районе 9:00 UT привели к более сильному падению SNR сигналов AltBOC на ~10 дБ-Гц, чем более интенсивные > 20 000 s.f.u радиовсплески на той же частоте, наблюдавшиеся в районе 9:40 UT и 10:00UT, которые привели к уменьшению SNR всего на 2–5 дБ-Гц. Это также может быть связано с тем, что для данного SRB, меньшая интенсивности радиовсплеска на частоте 1415 МГц сопутствовала большей интенсивности всплеска в диапазоне сигналов Galileo/BeiDou AltBOC(~1200 МГц). Отметим, что как и для

предыдущего события, для сигналов AltBOC не был преодолен порог SNR 20-25 дБ-Гц и срыва сопровождения фазы и захвата сигнала не наблюдалось. Отметим, что для данного события поведение SNR сигналов AltBOC от SNR сигналов BPSK, отличается ещё более значительно. Так во время этого события вообще не наблюдается отклик SNR сигналов Galileo E1 и BeiDou B1I ни на один из всплесков солнечного радиоизлучения на частоте 1415МГц. Этот результат скорее свидетельствует в пользу гипотезы о том, что более широкий спектральный диапазон сигналов AltBOC увеличивает суммарные шумы и ухудшает работу петель ФАПЧ в аппаратуре текущего поколения геодезических GNSS приёмников. Этот возможный недостаток сигналов AltBOC необходимо иметь в виду при построении систем ионосферного зондирования, однако следует отметить, что он компенсируется изначально более высоким уровнем SNR сигналов AltBOC по сравнению с сигналами BPSK и QPSK.

4.5 Оценки абсолютного вертикального ТЕС по данным одночастотного приёма сигналов AltBOC

Исходя из результатов описанных в предыдущих двух параграфах можно сделать вывод, что свойства AltBOC сигналов делают этот тип данных пригодным для использования в алгоритмах оценки абсолютного вертикального ТЕС по данным одночастотных наблюдений. Эффективность предложенного в Главе 2 алгоритма зависит не только от качества входных данных, т. е. их шумовых характеристик и числа срывов сопровождения сигнала, но и от количества входных данных, т. е. непосредственно количества единовременных оценок относительного наклонного ТЕС на одиночном приёмнике, которое можно получить с помощью одночастотной комбинации фазовых и кодовых наблюдений сигналов AltBOC. Это число в свою очередь зависит от числа спутников, передающих сигналы AltBOC. Оно постоянно увеличивается и в настоящее время составляет 26 для Beidou и 25 для Galileo, при общем числе спутников GNSS превышающем 110. Тем не менее числа спутников вещающих сигналы AltBOC оказывается достаточно, чтобы обеспечить необходимое количество входных данных, для алгоритма, разработанного в Главе 2. В данном параграфе приводятся результаты применения этого алгоритма к данным наблюдений AltBOC сигналов на станциях SGPO и ACRG за период февраль 2023 — февраль 2024 гг., подтверждающие данный вывод. Отметим, что параметры ковариационной матрицы

шумов наблюдений, используемой в алгоритме и отвечающей за веса наблюдений на различных углах возвышения спутников, задавались на основе экспериментальных оценок шумов относительного наклонного TEC по данным приёма сигналов AltBOC, полученных в 3 параграфе настоящей главы.

На Рис. 4.7 и Рис. 4.8 показаны примеры результатов оценки абсолютного вертикального TEC, полученные по данным наблюдений на станция SGPO и ACRG в феврале 2024г. На верхних панелях показаны оценки вертикального TEC, полученные разработанным в Главе 2 алгоритмом по одночастотным наблюдениям сигналов AltBOC, со всех спутников Galileo и Beidou, вещающих эти сигналы, и оценки вертикального TEC, полученные стандартным двухчастотным методом [102] по данным всех GNSS спутников, включая GPS, ГЛОНАСС, Galileo и Beidou, и отдельно по набору спутников Galileo и Beidou, использовавшемуся в одночастотном методе. На нижних панелях приведены средние значения числа наблюдений, используемых в каждом из трёх случаев.

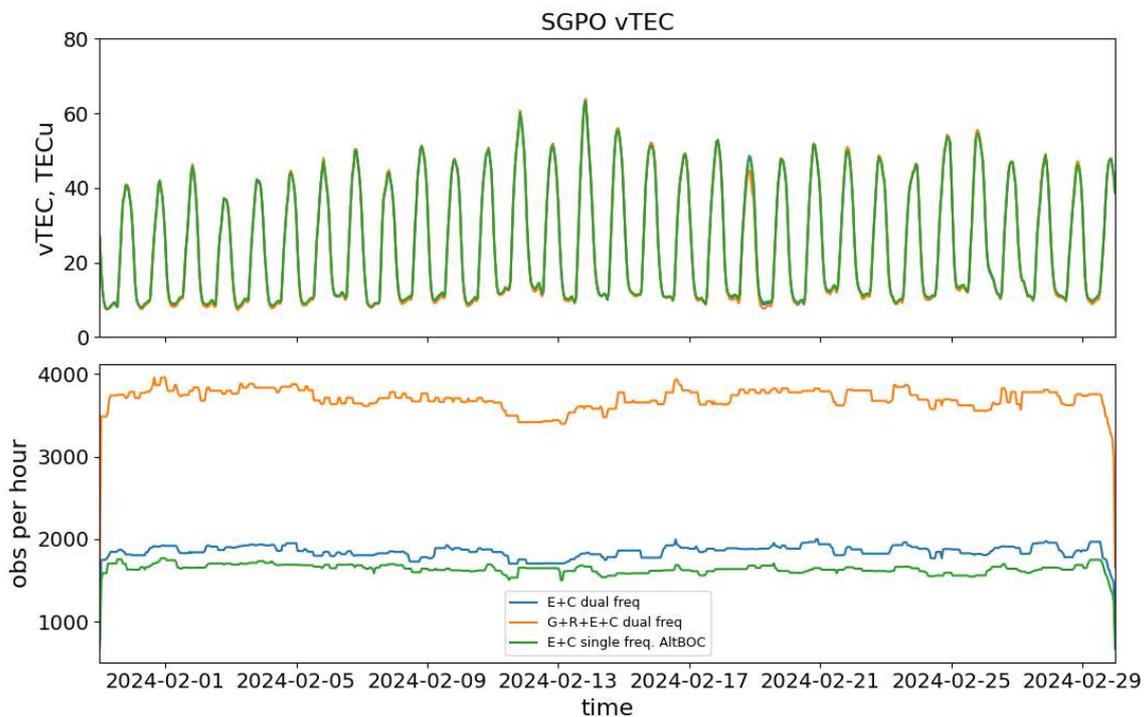


Рис. 4.7 Верхняя панель - оценки абсолютного вертикального TEC на станции SGPO по одночастотной комбинации фаз и псевдодальностей сигналов AltBOC со спутников Galileo и Beidou (зеленая линия) по двухчастотной фазовой комбинации сигналов BPSK и QPSK со спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou (оранжевая линия) и двухчастотной фазовой комбинации сигналов BPSK и QPSK со спутников Galileo, Beidou (синяя линия); нижняя панель — среднее число наблюдений в час использованных при получении приведённых на верхней панели оценок.

Видно, что все три оценки довольно хорошо согласуются друг с другом. Отклонения в основном связаны с геометрией доступных подионосферных точек и количеством данных (связей спутник-приёмник), использованных в каждом из случаях. На панелях снизу хорошо видно, что число наблюдений по полному созвездию GNSS, обычно более чем в 2 раза превышает число доступных наблюдений Galileo и Beidou, а число наблюдений AltBOC сигналов обычно еще немного меньше, так как не все спутники системы Beidou передают сигналы AltBOC.

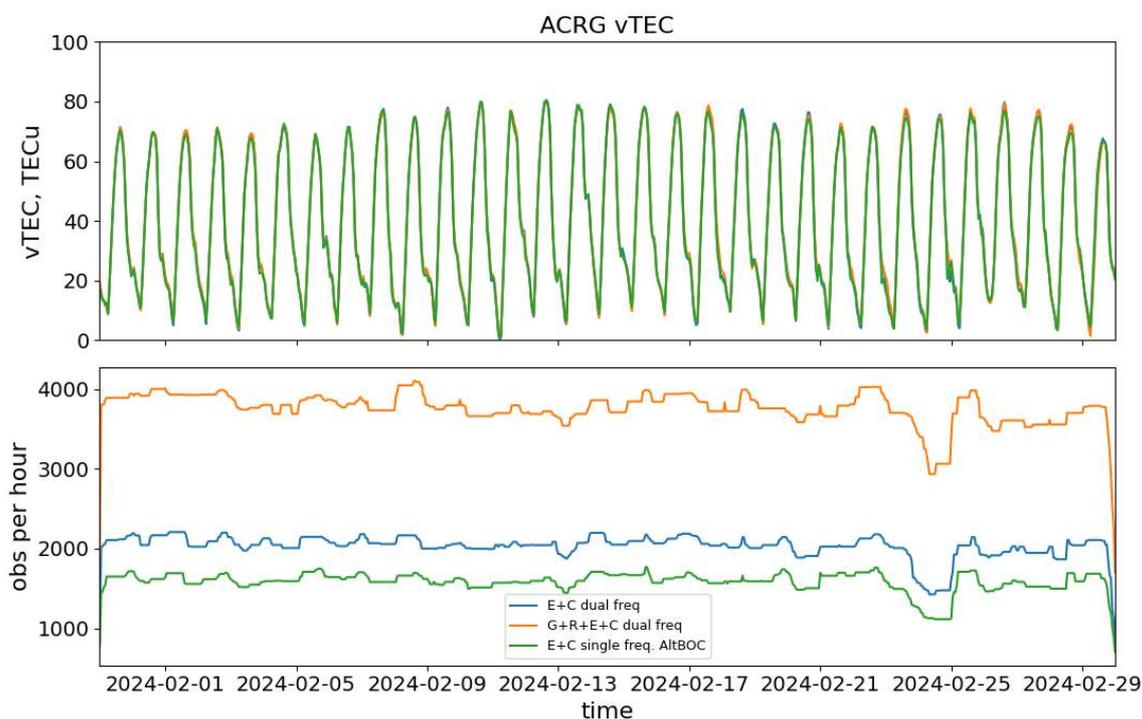


Рис. 4.8 Верхняя панель - оценки абсолютного вертикального TEC на станции ACRG по одночастотной комбинации фаз и псевдодальностей сигналов AltBOC со спутников Galileo и Beidou (зеленая линия) по двухчастотной фазовой комбинации сигналов BPSK и QPSK со спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou (оранжевая линия) и двухчастотной фазовой комбинации сигналов BPSK и QPSK со спутников Galileo, Beidou (синяя линия); нижняя панель — среднее число наблюдений в час использованных при получении приведённых на верхней панели оценок.

В данной работе также проанализирована статистика отклонений оценок абсолютного вертикального TEC полученных по одночастотным наблюдениям сигналов AltBOC, со всех спутников Galileo и Beidou от аналогичных оценок, полученных стандартным двухчастотным методом по данным всех GNSS спутников, включая GPS, ГЛОНАСС, Galileo и Beidou, и отдельно по набору спутников Galileo и Beidou, за весь период исследований. Эти результаты представлены на Рис. 4.9. Видно, что оба

распределения практически несмещенные, отклонения оценок в основном не превышают 2.5 TECu. При этом, если для двухчастотной и одночастотной AltBOC оценки абсолютного вертикального TEC используется сопоставимое число и геометрия наблюдений, как в случае гистограммой, представленной на Рис. 4.9 справа, распределение становится более узким, а сами отклонения и в 95% случаев не превышают 1 TECu.

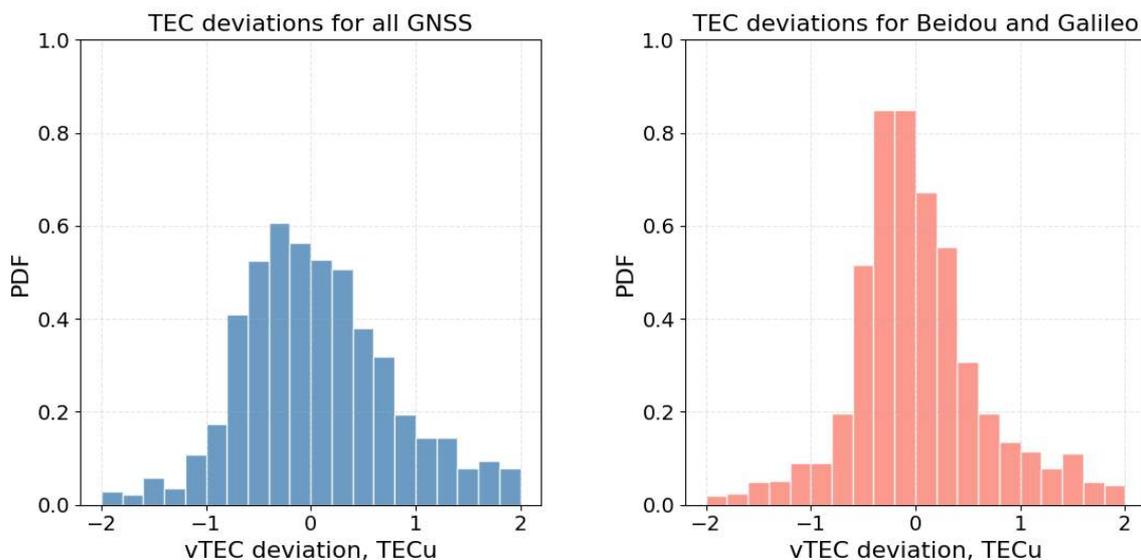


Рис. 4.9 Статистика отклонений оценок абсолютного вертикального TEC одночастотным методом с использованием сигналов Beidou и Galileo AltBOC от оценок абсолютного вертикального TEC двухчастотным методом по данным всех доступных спутников GNSS (слева) и спутников Beidou и Galileo (справа).

Полученные результаты убедительно свидетельствуют, что одночастотные наблюдения сигналов AltBOC могут использоваться наравне с двухчастотными фазовыми измерениями сигналов BPSK и QPSK в задачах радиопросвечивания ионосферы, увеличивая таким образом обеспеченность высокоточными данными ионосферного зондирования, а разработанный метод оценки абсолютного вертикального TEC по одночастотным данным AltBOC, демонстрирует характеристики не уступающие методам, основанным на двухчастотных наблюдениях. Это впервые позволяет рассматривать одночастотные наблюдения сигналов GNSS как надёжный источник ионосферных данных.

4.6 Выводы главы

В завершении сформулируем основные выводы полученные в Главе 4. В ней показано, что кодировка AltBOC впервые позволяет использовать одночастотную комбинацию измерений фазы и псевдодальности для высокоточной оценки наклонного и вертикального ТЕС.

В работе экспериментально подтверждено уменьшение до 5 раз уровня шумов, оценки наклонного ТЕС по одночастотной фазово-кодовой комбинации при использовании навигационных сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC по сравнению с сигналами в кодировках BPSK/QPSK, уровень шумов ТЕС одночастотной фазово-кодовой комбинации при этом становится сопоставим с уровнем шумов двухчастотной фазовой комбинации.

По данным годовых наблюдений на двух приёмных пунктах IGS протестирован предложенный в Главе 2 метод оценки абсолютного вертикального ТЕС на отдельной станции по данным одночастотных фазовых и кодовых наблюдений сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC. Показано, что в 95% случаев предложенный метод оценки абсолютного вертикального ТЕС обеспечивает абсолютные отклонения менее 1 ТЕСу от методов использующих двух частотные фазовые и кодовые наблюдения.

В главе показано, что GNSS сигналы AltBOC могут быть более подвержены воздействию естественных радиошумов, по сравнению с сигналами BPSK и QPSK. Так в невозмущенных условиях SNR AltBOC сигналов Galileo E5 и Beidou B2 примерно на 7,5 дБ-Гц выше, чем у BPSK сигналов Galileo E1 и Beidou B1. Однако в случае присутствия интенсивных радиопомех, например в периоды солнечных радиовсплесков, рассмотренных в работе, для сигналов AltBOC E5 и B2 наблюдается уменьшение SNR превышающее по величине аналогичное уменьшение SNR BPSK сигналов E1 и B1. Этот результат говорит о том, что более широкий спектральный диапазон сигналов AltBOC увеличивает суммарные шумы и ухудшает работу петель ФАПЧ в аппаратуре текущего поколения геодезических GNSS приёмников, однако следует отметить, что это компенсируется изначально более высоким уровнем SNR сигналов AltBOC по сравнению с сигналами BPSK и QPSK.

Полученные в Главе 4 результаты убедительно свидетельствуют, что одночастотные наблюдения сигналов AltBOC могут использоваться наравне с двухчастотными

фазовыми измерениями сигналов BPSK и QPSK в задачах радиопросвечивания ионосферы, увеличивая таким образом обеспеченность высокоточными данными ионосферного зондирования.

Также необходимо отметить, что сигналы AltBOC используются в настоящий момент только системами Galileo и Beidou и только на одной рабочей частоте. Внедрение такой схемы кодирования в остальных GNSS в перспективе позволиткратно увеличить число доступных и пригодных для ионосферных исследований одночастотных данных. Отметим также, что возможное использование сигналов AltBOC на паре или более рабочих частот GNSS открывает перспективы к улучшению шумовых характеристик и двухчастотных методов зондирования, однако данный вопрос остаётся за пределами настоящего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы глобальной спутниковой навигации нашли широкое применение в различных сферах деятельности человеческого общества. Постоянно повышающиеся требования к надёжности и точности их функционирования требуют с одной стороны лучше описывать среду распространения навигационных радиосигналов, в частности ионосферу Земли в операционных моделях, а с другой стороны совершенствовать свойства навигационных сигналов для уменьшения шумов измерений. Этим задачам посвящена и настоящая диссертация. В ней последовательно решаются вопросы тестирования современных самых современных на настоящий момент операционных ионосферных моделей NeQuickG и BDGIM и новых сверхширокополосных навигационных сигналов в кодировке AltBOC. На большом массиве экспериментальных GNSS данных покрывающих практически полный 24й цикл солнечной активности убедительно демонстрируются особенности оценки глобальной электронной концентрации (GEC) при помощи моделей BDGIM и NeQuickG. Выявлено, что независимо от фазы солнечной активности модели BDGIM и NeQuickG в среднем недооценивают значения GEC по сравнению с данными глобальных ионосферных карт CODG. При этом стандартное отклонение этих оценок возрастает с усилением солнечной активности, но для NeQuickG оно меньше, чем для BDGIM. Модель BDGIM обладает особенностью занижать в периоды максимума солнечной активности амплитуды 27-дневных, годовых и полугодовых вариаций GEC вплоть до двух раз по сравнению с NeQuickG и данными CODG. Результаты работы указывают на то, что оперативные модели ионосферы, прежде всего NeQuickG, при ограниченном объёме исходных данных GNSS могут успешно применяться для экспресс-оценки GEC, например для более детальной параметризации более сложных моделей. В дополнение к этому, разработанная простейшая регрессионная модель позволяет получать несмещённые оценки GEC CODG с СКО $0.02 \text{ GEC}_{\text{CODG}}$ по данным NeQuickG, что существенно повышает оперативность получения высокоточных значений GEC с учётом краткосрочного запаздывания вещаемых коэффициентов NeQuickG по сравнению с более длительными задержками при формировании данных CODG. Полученные в диссертации результаты указывают таким образом на направления возможного дальнейшего совершенствования операционных ионосферных моделей в

системах GNSS, особенно это актуально для системы GPS, которая до сих пор использует модель Klobuchar.

Проведённые исследования также показывают возможность высокоточной оценки наклонного и вертикального TEC на основе одночастотных наблюдений сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC. Эксперименты подтвердили, что использование AltBOC даёт снижение уровня шумов оценок наклонного TEC в несколько раз по сравнению с BPSK/QPSK, а качество одночастотной фазово-кодовой комбинации становится сравнимым с двухчастотной фазовой комбинацией. Предложенный и проверенный на данных годовых наблюдений метод определения абсолютного вертикального TEC по одночастотным фазовым и кодовым наблюдениям AltBOC обеспечивает в большинстве случаев отклонения менее 1 TECu относительно методов, опирающихся на двухчастотные наблюдения. При этом выявлено, что сигналы AltBOC, несмотря на высокие значения SNR по сравнению с сигналами BPSK/QPSK, могут быть сильнее подвержены естественным радиопомехам возможно вследствие более широкой спектральной полосы. Тем не менее в работе убедительно показано, что AltBOC-сигналы могут успешно использоваться наравне с BPSK/QPSK в задачах радиопросвечивания ионосферы увеличивая таким образом обеспеченность данными дистанционного зондирования Земли. Полученные в работе экспериментальные характеристики сигналов AltBOC могут служить отправной точкой при введении новых сигналов в частотный план таких систем как ГЛОНАСС. В перспективе расширение применения кодировки AltBOC в других глобальных навигационных системах, а также использование ее на дополнительных частотах, может ещё более повысить точность и устойчивость как одночастотных, так и двухчастотных методов GNSS-зондирования атмосферы.

СПИСОК РИСУНКОВ

Рис. 1.1	Распределение электронной концентрации и структура ионосферных слоёв Земли	10
Рис. 1.2	Глобальное распределение электронной концентрации в ионосфере	13
Рис. 1.3	Механизм образования экваториальной аномалии	14
Рис. 1.4	Распределение ионосферной задержки (TEC) согласно модели Klobuchar, 28 февраля 2020 г., 10:00 UT	20
Рис. 1.5	Распределение ионосферной задержки (TEC) согласно модели BDGIM, 28 февраля 2020 г., 10:00 UT	22
Рис. 1.6	Вертикальный профиль электронной концентрации в ионосфере над Москвой для различных сезонов и времен по данным модели NeQuickG	24
Рис. 1.7	Распределение ионосферной задержки (TEC) согласно модели NeQuick, 28 февраля 2020 г., 10:00 UT	25
Рис. 2.1	Фазовое созвездие для BPSK и QPSK	33
Рис. 2.2	Автокорреляционные функции для сигналов BPSK, QPSK и AltBOC	37
Рис. 2.3	Шумы псевдодальности для сигналов BPSK, QPSK и AltBOC	38
Рис. 3.1	Разностные карты распределений вертикального TEC по данным моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG и CODG TEC, для 28 февраля 2020 г.	46
Рис. 3.2	Суточный ход суммарной ошибки моделирования TEC на основе моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG для региона Китая в периоды весеннего равноденствия и зимнего солнцестояния 2015 г.	48
Рис. 3.3	Вариации Dst индекса и суммарных ошибок оценки TEC для региона Китая по данным моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в период геомагнитной бури марта 2015 г.	49
Рис. 3.4	Вариации Dst индекса и суммарных ошибок оценки TEC для региона Китая по данным моделей Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в период геомагнитной бури декабря 2015 г.	49

Рис. 3.5	Вариации среднесуточной суммарной ошибки оценки TEC по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG для региона Китая в 2015 г.	51
Рис. 3.6	Вариации ошибок TEC по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Китай 2015 г.	53
Рис. 3.7	Вариации ошибок TEC по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Россия 2015 г.	53
Рис. 3.8	Вариации ошибок TEC по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. С. Америка 2015 г.	54
Рис. 3.9	Вариации ошибок TEC по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Ю. Америка 2015 г.	54
Рис. 3.10	Вариации GEC по данным моделей Klobuchar, NeQuickG и BDGIM, а также глобальных ионосферных карт CODG в сравнении с вариациями индекса солнечной активности F10.7	57
Рис. 3.11	Функции плотности вероятности отклонений модельных оценок GEC от оценок GEC по данным GIM CODG	58
Рис. 3.12	GEC северного полушария по данным GIM CODG и моделям BDGIM и NeQuickG за 2015–2019 гг.	60
Рис. 3.13	GEC южного полушария по данным GIM CODG и моделям BDGIM и NeQuickG за 2015–2019 гг.	60
Рис. 3.14	Вейвлет-спектры вариаций GEC по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG в сравнении с вейвлет-спектром F10.7	62
Рис. 3.15	Регрессионные зависимости GEC по данным GIM CODG от GEC по моделям BDGIM и NeQuickG	63
Рис. 4.1	Наклонный TEC, SNR и RMS TEC для пролёта спутника Beidou C24 над станцией ACRG 28 февраля 2024 года	70
Рис. 4.2	Наклонный TEC, SNR и RMS TEC для пролёта спутника Galileo E05 над станцией ACRG 28 февраля 2024 года	70
Рис. 4.3	Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Galileo E34 на станции SGPO 28 августа 2022 г.	75

Рис. 4.4	Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Beidou C44 на станции SGPO 28 августа 2022 г.	76
Рис. 4.5	Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Galileo E10 на станции ACRG 9 мая 2024 г.	76
Рис. 4.6	Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутника Beidou C23 на станции ACRG 9 мая 2024 г.	77
Рис. 4.7	Оценки абсолютного вертикального TEC на станции SGPO по одночастотной комбинации фаз и псевдодальностей сигналов AltBOC со спутников Galileo и Beidou	79
Рис. 4.8	Оценки абсолютного вертикального TEC на станции ACRG по одночастотной комбинации фаз и псевдодальностей сигналов AltBOC со спутников Galileo и Beidou	80
Рис. 4.9	Статистика отклонений оценок абсолютного вертикального TEC одночастотным методом с использованием сигналов Beidou и Galileo AltBOC от оценок абсолютного вертикального TEC двухчастотным методом по данным всех доступных спутников GNSS и спутников Beidou и Galileo	81

СПИСОК ТАБЛИЦ

Таб. 2.1	Основные характеристики сигналов Galileo E5 и Beidou B2	39
Таб. 3.1	Регионы тестирования операционных моделей	47
Таб. 3.2	Среднегодовые ошибки моделирования ТЕС в рассматриваемых регионах (ТЕСу)	55
Таб. 4.1	Приёмные станции, данные которых использованы в работе для анализа шумов оценки наклонного ТЕС с использованием одночастотных наблюдений сигналов в кодировке AltBOC	67
Таб. 4.2	Средние значения характеристики шума ТЕС _{RMS} (ТЕСу) для спутника Galileo за исследуемый период	72
Таб. 4.3	Средние значения характеристики шума ТЕС _{RMS} (ТЕСу) для спутника Beidou за исследуемый период	72

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Setti, Paulo T, C. M. da Silva, and D. B. M. Alves, "Assessing GNSS ionospheric models at low latitudes: BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar," *GPS Solutions*, vol. 29, no. 1, p. 15, 2025.
- [2] Y. Yuan, N. Wang, Z. Li, and X. Huo, "The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results," *Navigation*, vol. 66, no. 1, pp. 55-69, 2019.
- [3] M. M. Hoque, N. Jakowski, and R. Orús-Pérez, "Fast ionospheric correction using Galileo Az coefficients and the NTCM model," *GPS solutions*, vol. 23, no. 2, p. 41, 2019.
- [4] N. Wang, Z. Li, Y. Yuan, and X. Huo, "BeiDou Global Ionospheric delay correction Model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions," *GPS solutions*, vol. 25, no. 3, p. 97, 2021.
- [5] O. Montenbruck and B. González Rodríguez, "NeQuick-G performance assessment for space applications," *GPS solutions*, vol. 24, no. 1, p. 13, 2020.
- [6] A. Mannucci, B. Wilson, D. Yuan, C. Ho, U. Lindqwister, and T. Runge, "A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements," *Radio science*, vol. 33, no. 3, pp. 565-582, 1998.
- [7] E. Afraimovich, E. Astafyeva, A. Oinats, Y. V. Yasukevich, and I. Zhivetiev, "Global electron content: a new conception to track solar activity," in *Annales Geophysicae*, 2008, vol. 26, no. 2: Copernicus Publications Göttingen, Germany, pp. 335-344.
- [8] L. Lestarquit, G. Artaud, and J.-L. Issler, "AltBOC for dummies or everything you always wanted to know about AltBOC," in *Proceedings of the 21st international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2008)*, 2008, pp. 961-970.
- [9] Б. Е. Брюнелли and А. А. Намгаладзе, *Физика ионосферы*. Москва: Наука (in Russian), 1988, p. 528 с.
- [10] M. C. Kelley, *The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics*. Academic press, 2009.
- [11] J. A. Ratcliffe, *An introduction to ionosphere and magnetosphere*. CUP Archive, 1972.

- [12] D. Bilitza, M. Pezzopane, V. Truhlik, D. Altadill, B. W. Reinisch, and A. Pignalberi, "The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark," *Reviews of Geophysics*, vol. 60, no. 4, p. e2022RG000792, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/363934037_The_International_Reference_Ionosphere_model_A_review_and_description_of_an_ionospheric_benchmark.
- [13] V. L. Ginzburg, "The propagation of electromagnetic waves in plasmas," *International Series of Monographs in Electromagnetic Waves*, 1970.
- [14] Л. А. Жекулин, "Распространение электромагнитной волны в магнитно-активной ионизированной среде," *Вестник электротехники*, vol. 2, 1930.
- [15] A. Kryukovskii, D. Lukin, D. Rastyagaev, and Y. I. Skvortsova, "Mathematical simulation of propagation of frequency-modulated radio waves in ionospheric plasma," *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 60, pp. 1049-1057, 2015. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064226915100071>.
- [16] H. Rishbeth and O. K. Garriott, "Introduction to ionospheric physics," *Introduction to ionospheric physics*, 1969.
- [17] Б. М. Смирнов, *Комплексные ионы*. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы [Физматлит] (in Russian), 1983, p. 150 с.
- [18] X. Yue *et al.*, "Space weather observations by GNSS radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2," *Space Weather*, vol. 12, no. 11, pp. 616-621, 2014.
- [19] А. А. Криволуцкий and В. Е. Куницын, "Ионосфера," in *Ионосфера*. Москва: МК, 2006.
- [20] R. J. Redmon, D. Anderson, R. Caton, and T. Bullett, "A Forecasting Ionospheric Real-time Scintillation Tool (FIRST)," *Space Weather*, vol. 8, no. 12, 2010.
- [21] D. Muldrew, "F-layer ionization troughs deduced from Alouette data," *Journal of Geophysical Research*, vol. 70, no. 11, pp. 2635-2650, 1965.
- [22] Y. K. Tulunay and J. Grebowsky, "The noon and midnight mid-latitude trough as seen by Ariel 4," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 40, no. 7, pp. 845-855, 1978.

- [23] J. Titheridge, "Plasma temperatures from Alouette 1 electron density profiles," *Planetary and Space Science*, vol. 24, no. 3, pp. 247-259, 1976.
- [24] W. Köhnlein and W. J. Raitt, "Position of the mid-latitude trough in the topside ionosphere as deduced from ESRO 4 observations," *Planetary and Space Science*, vol. 25, no. 6, pp. 600-602, 1977.
- [25] Y. K. Tulunay and J. Sayers, "Characteristics of the mid-latitude trough as determined by the electron density experiment on Ariel III," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 33, no. 11, pp. 1737-1761, 1971.
- [26] A. Karpachev, "The dependence of the main ionospheric trough shape on longitude, altitude, season, local time, and solar and magnetic activity," *GEOMAGNETISM AND AERONOMY C/C OF GEOMAGNETIZM I AERONOMIIA*, vol. 43, no. 2, pp. 239-251, 2003. [Online]. Available: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/modeling/publications/trough5.shtml?LANG=ru>.
- [27] A. Karpachev, M. Klimenko, V. Klimenko, and L. Pustovalova, "Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 146, pp. 149-159, 2016.
- [28] M. Deminov, A. Karpachev, S. Annakuliev, V. Afonin, and Y. Smilauer, "Dynamics of the ionization troughs in the night-time subauroral F-region during geomagnetic storms," *Advances in Space Research*, vol. 17, no. 10, pp. 141-145, 1996.
- [29] G. Prölss, "The equatorward wall of the subauroral trough in the afternoon/evening sector," in *Annales Geophysicae*, 2007, vol. 25, no. 3: Copernicus Publications Göttingen, Germany, pp. 645-659.
- [30] R. D. Hunsucker, "The sources of gravity waves," *Nature*, vol. 328, no. 6127, pp. 204-205, 1987.
- [31] Y. Kurdyeva, S. Kulichkov, S. Kshevetskii, O. Borchevkina, and E. Golikova, "Propagation to the upper atmosphere of acoustic-gravity waves from atmospheric fronts in the Moscow region," in *Annales Geophysicae*, 2019, vol. 37, no. 3: Copernicus Publications Göttingen, Germany, pp. 447-454. [Online]. Available: <https://angeo.copernicus.org/articles/37/447/2019/angeo-37-447-2019.pdf>. [Online]. Available: <https://angeo.copernicus.org/articles/37/447/2019/angeo-37-447-2019.pdf>

- [32] X. Pi, A. Mannucci, U. Lindqwister, and C. Ho, "Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network," *Geophysical Research Letters*, vol. 24, no. 18, pp. 2283-2286, 1997.
- [33] N. Jakowski, C. Borries, and V. Wilken, "Introducing a disturbance ionosphere index," *Radio Science*, vol. 47, no. 04, pp. 1-9, 2012.
- [34] E. Afraimovich, E. I. Astafyeva, I. V. Zhivetiev, A. V. Oinats, and Y. V. Yasyukevich, "Global electron content during solar cycle 23," *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 48, pp. 187-200, 2008.
- [35] T. Gulyaeva, M. Hernández-Pajares, and I. Stanislawska, "Ionospheric Weather at Two Starlink Launches during Two-Phase Geomagnetic Storms," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 7005, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/7005>.
- [36] U. Sezen, T. L. Gulyaeva, and F. Arikani, "Performance of solar proxy options of IRI-Plas model for equinox seasons," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 123, no. 2, pp. 1441-1456, 2018.
- [37] D. Bilitza *et al.*, "The International Reference Ionosphere 2012—a model of international collaboration," *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 4, p. A07, 2014. [Online]. Available: https://www.swsc-journal.org/articles/swsc/full_html/2014/01/swsc130043/swsc130043.html.
- [38] T. Gulyaeva and D. Bilitza, "Towards ISO standard earth ionosphere and plasmasphere model," *New developments in the standard model*, pp. 1-39, 2012.
- [39] V. Shubin and M. Deminov, "Global dynamic model of critical frequency of the ionospheric F 2 layer," *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 59, pp. 429-440, 2019.
- [40] B. Nava, P. Coisson, and S. M. Radicella, "A new version of the NeQuick ionosphere electron density model," (in English), *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 70, no. 15, pp. 1856-1862, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>.
- [41] J. Huba, G. Joyce, and J. Fedder, "Sami2 is Another Model of the Ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 105, no. A10, pp. 23035-23053, 2000.
- [42] R. W. Schunk *et al.*, "Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM)," *Radio Science*, vol. 39, no. 1, pp. 1-11, 2004.

- [43] А. Намгаладзе *et al.*, "Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли," *Геомагнетизм и аэрономия*, vol. 30, no. 4, pp. 612-612, 1990.
- [44] В. Дымников, Д. Кулямин, and П. Останин, "Совместная модель глобальной динамики термосферы и ионосферы Земли," *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, vol. 56, no. 3, pp. 280-292, 2020. [Online]. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S0002351520030062>.
- [45] L. Qian *et al.*, "The NCAR TIE-GCM: A community model of the coupled thermosphere/ionosphere system," *Modeling the ionosphere-thermosphere system*, pp. 73-83, 2014.
- [46] I. Galkin, B. Reinisch, X. Huang, and D. Bilitza, "Assimilation of GIRO data into a real-time IRI," *Radio Science*, vol. 47, no. 04, pp. 1-10, 2012.
- [47] J. S. Subirana, J. J. Zornoza, and M. Hernández-Pajares, "Klobuchar ionospheric model," *Technical University of Catalonia*, 2011.
- [48] J. A. Klobuchar, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users," *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, no. 3, pp. 325-331, 1987.
- [49] A. Dorsey, W. Marquis, P. Fyfe, E. Kaplan, and L. Wiederholt, "Understanding GPS: Principles and Applications," *Understanding GPS Principles and Applications*, 2006. [Online]. Available: <https://nguyenduyliemgis.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/09/understanding-gps-principles-and-applications-2006.pdf>.
- [50] M. Limberger, "Ionosphere modeling from GPS radio occultations and complementary data based on B-splines," Technische Universität München, 2015. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1254715/1254715.pdf>
- [51] X. Wu, X. Hu, G. Wang, H. Zhong, and C. Tang, "Evaluation of COMPASS ionospheric model in GNSS positioning," *Advances in Space Research*, vol. 51, no. 6, pp. 959-968, 2013.
- [52] L. Dandan, X. Longxia, L. Bo, and L. Xiaohui, "Analysis of ionospheric delay correction methods for BeiDou navigation satellite system," in *2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 2017: IEEE, pp. 603-608.

- [53] L. HAN, J. WANG, and J. LIU, "NeQuick model algorithm research and performance assessment," *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, vol. 43, no. 3, pp. 464-470, 2018.
- [54] U. Ngayap *et al.*, "Comparison of NeQuick G and Klobuchar Model Performances at Single-Frequency User Level," *Engineering Proceedings*, vol. 54, no. 1, p. 7, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-4591/54/1/7>.
- [55] Y. V. Yasyukevich *et al.*, "Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains," *Sensors*, vol. 23, no. 10, p. 4773, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4773>.
- [56] J. M. Dow, R. E. Neilan, and C. Rizos, "The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems," *Journal of geodesy*, vol. 83, pp. 191-198, 2009. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-008-0300-3>.
- [57] M. Hernández-Pajares *et al.*, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," *Journal of Geodesy*, vol. 83, pp. 263-275, 2009.
- [58] T. Gulyaeva and I. Veselovsky, "Two-phase storm profile of global electron content in the ionosphere and plasmasphere of the Earth," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 117, no. A9, 2012. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JA018017>.
- [59] D. Roma-Dollase *et al.*, "Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle," *Journal of Geodesy*, vol. 92, pp. 691-706, 2018.
- [60] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [61] E. Kursinski, G. Hajj, J. Schofield, R. Linfield, and K. R. Hardy, "Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 102, no. D19, pp. 23429-23465, 1997.
- [62] M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, "GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning

- system," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 97, no. D14, pp. 15787-15801, 1992.
- [63] G. E. Lanyi and T. Roth, "A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations," *Radio science*, vol. 23, no. 4, pp. 483-492, 1988.
- [64] Г. Курбатов, Е. Козловцева, А. Ясюкевич, Ю. Ясюкевич, and А. Падохин, "Использование сигналов геостационарных спутников системы COMPASS/BeiDou для оценки ионосферных эффектов геомагнитных бурь и внезапных стратосферных потеплений," *Ученые записки физического факультета Московского университета*, no. 4, pp. 1740502-1740502, 2017.
- [65] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [66] P. Misra, "Global positioning system: Signals," *Measurements, and Performance/Ganga-Jamuna Press*, 2006.
- [67] J. Saastamoinen, "Contributions to the theory of atmospheric refraction: Part II. Refraction corrections in satellite geodesy," *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, vol. 107, pp. 13-34, 1973.
- [68] J. Saastamoinen, "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites," *The use of artificial satellites for geodesy*, vol. 15, pp. 247-251, 1972.
- [69] Д. Ю. Першин, "Сравнительный анализ моделей тропосферной задержки в задаче определения местоположения высокой точности в спутниковых навигационных системах ГЛОНАСС/GPS," *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*, vol. 7, no. 1, pp. 84-91, 2009.
- [70] Y. V. Yasyukevich, A. Mylnikova, and V. Ivanov, "Estimating the absolute total electron content based on single-frequency satellite radio navigation GPS/GLONASS data," *Solar-Terrestrial Physics*, vol. 3, no. 1, pp. 128-137, 2017.
- [71] "Phase-shift keying." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying

- [72] N. Birla, N. Gautam, J. Patel, and P. Balaji, "A novel QPSK modulator," in *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, 2014: IEEE, pp. 653-656.
- [73] G. W. Hein *et al.*, "A candidate for the Galileo L1 OS optimized signal," in *proceedings of the 18th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2005)*, 2005, pp. 833-845.
- [74] A. Padokhin *et al.*, "GNSS AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies," presented at the Book of Abstracts PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA 48th Annual Seminar, Apatity, Russia, 2025.
- [75] E. Union, *GALILEO OPEN SERVICE SIGNAL-IN-SPACE INTERFACE CONTROL DOCUMENT*. EU, 2023.
- [76] China, *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal BIC*. China, 2017.
- [77] Y. Yasyukevich, A. Mylnikova, and A. Vesnin, "GNSS-based non-negative absolute ionosphere total electron content, its spatial gradients, time derivatives and differential code biases: bounded-variable least-squares and Taylor series," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5702, 2020.
- [78] A. Padokhin, E. Andreeva, M. Nazarenko, and S. Kalashnikova, "Phase-Difference Approach for GNSS Global Ionospheric Total Electron Content Mapping," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 65, no. 7, pp. 481-495, 2022.
- [79] C. Chen *et al.*, "Galileo and BeiDou AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies," *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6472, 2024, doi: 10.3390/s24196472.
- [80] C. Wang, "New chains of space weather monitoring stations in China," *Space Weather*, vol. 8, no. 8, 2010.
- [81] K. H. Kim, J. Goldstein, and D. Berube, "Plasmaspheric drainage plume observed by the Polar satellite in the prenoon sector and the IMAGE satellite during the magnetic storm of 11 April 2001," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 112, no. A6, 2007.
- [82] Ч. Чэнь and А. М. Падохин, "Тестирование ионосферной модели BDGIM в средних широтах на основе данных одиночного GNSS-приемника," presented at the

- XXVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов 2020", Москва, Россия, 2020. [Online]. Available: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/664979876/>.
- [83] Ч. Чэнь and А. М. Падохин, "Тестирование модели ионосферной задержки BDGIM в регионе Китая," presented at the Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, Россия, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21046/20DZZconf-2022a>.
- [84] S. W. Canada. "Solar Flux." <https://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php> (accessed).
- [85] IONEX GNSS Products [Online] Available: <ftp://ftp.gssc.esa.int/gnss/products/ionex/>
- [86] GIPP Product Information [Online] Available: <ftp://ftp.gipp.org.cn/product/>
- [87] N. Wang, Y. Yuan, Z. Li, Y. Li, X. Huo, and M. Li, "An examination of the Galileo NeQuick model: comparison with GPS and JASON TEC," *GPS solutions*, vol. 21, pp. 605-615, 2017.
- [88] M. Jones Jr, J. Emmert, D. Drob, J. Picone, and R. Meier, "Origins of the thermosphere-ionosphere semiannual oscillation: Reformulating the “thermospheric spoon” mechanism," *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 123, no. 1, pp. 931-954, 2018.
- [89] Ч. Чэнь, А. М. Падохин, А. И. Иванов, and И. А. Павлов, "Особенности представления глобального электронного содержания в операционных ионосферных моделях Клобучара, BDGIM и NeQuickG," *Журнал радиоэлектроники*, no. 1, Russian 2025, doi: 10.30898/1684-1719.2025.1.4.
- [90] N. Wang, Z. Li, X. Huo, M. Li, Y. Yuan, and C. Yuan, "Refinement of global ionospheric coefficients for GNSS applications: Methodology and results," *Advances in space research*, vol. 63, no. 1, pp. 343-358, 2019.
- [91] Ч. Чэнь and А. М. Падохин, "Особенности представления ГЕС в операционных моделях BDGIM и NeQuickG," presented at the ПРОГНОЗ-2024, Москва, 2024. [Online]. Available: <https://forecast2024.izmiran.ru/привет-мир>, <https://forecast2024.izmiran.ru/wp-content/uploads/2024/06/Симпозиум-ПРОГНОЗ-2024.-Сборник-тезисов.pdf>.

- [92] A. Padokhin and C. Chen, "GNSS, ionospheric tomography and remote sensing, natural and artificial ionospheric disturbances and their influence on GNSS and positioning," presented at the HUAWEI Device Algorithm Summit 2024, Москва, Россия, 2024. [Online]. Available: <https://www.chaspark.com/#/live/1021864595077840896>.
- [93] А. Падохин, Ч. Чэнь, А. Иванов, Ю. Ясюкевич, and А. Веснин, "Особенности представления ГЕС в моделях NeQuickG, BDGIM и глобальных ионосферных моделях," presented at the Ежегодный тематический семинар "Радиозондирование ионосферы", Иркутский институт солнечно-земной физики, 27 марта 2024, 2024. [Online]. Available: https://ru.iszf.irk.ru/Об_институте.
- [94] Y. Yasyukevich *et al.*, "Ionospheric Global and Regional Electron Contents in Solar Cycles 23–25," *Symmetry*, vol. 15, no. 10, p. 1940, 2023.
- [95] A. M. Padokhin, A. A. Mylnikova, Y. V. Yasyukevich, Y. V. Morozov, G. A. Kurbatov, and A. M. Vesnin, "Galileo E5 AltBOC Signals: Application for Single-Frequency Total Electron Content Estimations," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 19, p. 3973, 2021-10-04 2021, doi: 10.3390/rs13193973.
- [96] "EUREF Permanent GNSS Network." [Online]. Available: <https://www.epncb.oma.be>.
- [97] "Javad GNSS. (2014). TRE-3: High Performance GNSS Receiver. Javad GNSS Technical Documentation.." [Online]. Available: <https://www.javad.com/jgnss/products/oem/TRE-3S/specifications.html>.
- [98] V. Demyanov, M. Sergeeva, M. Fedorov, T. Ishina, V. J. Gatica-Acevedo, and E. Cabral-Cano, "Comparison of TEC calculations based on trimble, Javad, Leica, and Septentrio GNSS receiver data," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 19, p. 3268, 2020.
- [99] "World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. (2024). Geomagnetic Activity Indices.." [Online]. Available: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.
- [100] I. G. Wright *et al.*, "On the detection of a solar radio burst event that occurred on 28 August 2022 and its effect on GNSS signals as observed by ionospheric scintillation monitors distributed over the American sector," ed: EDP Sciences, 2023.
- [101] "National Centers for Environmental Information (NCEI), NOAA. (2022). Solar and Geophysical Event Reports.." [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/radio-bursts/reports/>.

- [102] Y. V. Yasyukevich, A. Mylnikova, V. Kunitsyn, and A. Padokhin, "Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere," *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 55, pp. 763-769, 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/284003691>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Время бежит непрерывно, и вот мой трёхлетний докторский этап подходит к концу. За эти семь лет в Москве я прошёл путь от магистратуры до аспирантуры на физическом факультете МГУ. Этот город стал моим вторым домом, здесь я провёл больше всего времени в одиночестве в своей жизни. Я люблю всё здесь: людей, истории, которые здесь происходят.

Мои учёба и опыт на физическом факультете МГУ навсегда останутся в моей памяти. Этот этап был насыщенным и удовлетворительным, полным как неудач, так и радостей, иногда чувства беспомощности, но всегда с поддержкой и помощью окружающих. Благодарность моим учителям, однокурсникам, друзьям и семье не поддаётся описанию.

С начала магистратуры я следовал за научным руководителем Артёмом Михайловичем, ступая по пути научных исследований. Мои кандидатская диссертация, её тема, концепция и написание — всё это было сделано под его тщательным руководством, благодаря чему работа была выполнена безупречно. За три года аспирантуры его строгий, но доступный метод научных исследований оказал на меня неизгладимое влияние и будет вдохновлять меня на дальнейшие успехи. Выражаю глубокую благодарность моему уважаемому наставнику Артёму Михайловичу!

Благодарю всех преподавателей, наставлявших меня в период аспирантуры, за их терпение и помощь в решении учебных вопросов, что позволило мне успешно завершить обучение. Также благодарю моих дорогих однокурсников и друзей за их доброту, энтузиазм и усердие, которые вдохновляли меня, делая нашу общую жизнь насыщенной и полной.

Благодарю мою семью за поддержку, понимание и помощь, которые позволили мне сосредоточиться на учёбе.

Благодарю мою родину — Китай, за предоставленную стипендию.

И, наконец, благодарю Россию, эту великую страну, и всех людей, которых я здесь встретил. Встреча с вами стала самым счастливым событием в моей жизни.

На пороге окончания учёбы я искренне желаю всем преподавателям успехов в будущей работе и жизни, благополучия и процветания!