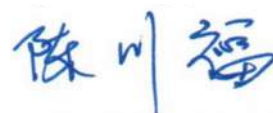


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

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

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель **Падохин Артем Михайлович**
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты **Крюковский Андрей Сергеевич**
доктор физико-математических наук
профессор, Автономная некоммерческая организация
высшего образования «Российский новый университет»,
заведующий кафедрой информационных технологий и
естественнонаучных дисциплин Института
информационных систем и инженерно-компьютерных
технологий

Пулинец Сергей Александрович
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт космических исследований Российской
академии наук», главный научный сотрудник отдела
космической геофизики

Когогин Денис Александрович
кандидат физико-математических наук
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Казанский (Приволжский) федеральный университет",
доцент кафедры радиоэлектроники Института физики

Защита диссертации состоится **5 июня 2025 г. в 16 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета МГУ.016.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2, физический факультет, аудитория СФА

E-mail: versan@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3411>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Колесов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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[1-5], 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 NeQuickG 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 GECu.
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 объёме 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

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах наукометрических данных Web of Science, Scopus и RSCI/РИНЦ, общим объёмом в 3.25 п.л. (личный вклад автора составляет 2.3 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 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, отражена актуальность её темы, сформулированы цели, решаемые задачи и основные положения, выносимые на защиту, а также приведено краткое содержание диссертации.

В Главе 1 приведён обзор литературы, посвящённой основным морфологическим особенностям распределения электронной концентрации и её представлению в операционных эмпирических моделях Klobuchar[9], NeQuickG[5], BDGIM[4], приводятся известные результаты тестирования операционных моделей ионосферы в задачах высокоточной навигации и оценки параметров ионосферы[1-5].

Глава 2 посвящена описанию подходов к оценке интегральных параметров ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами GNSS. **Первый параграф** описывает связь показателя преломления атмосферы в диапазоне рабочих частот GNSS с основными атмосферными параметрами, включая давление, температуру, влажность, электронную концентрацию. **Второй параграф** рассматривает уравнения для наблюдаемых фаз L и псевдодальностей P для сигналов GNSS и возможные комбинации наблюдаемых параметров, используемых для оценки относительного наклонного TEC. В частности вводятся одночастотные и двухчастотные комбинации псевдодальностей и фаз, используемые при оценке TEC[10]:

$$sTEC = \frac{c}{K} \left(\frac{L_i}{f_i} - \frac{L_j}{f_j} \right) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + const \quad (1)$$

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

Третий параграф описывает влияние шумов наблюдений на оценки относительного наклонного ТЕС по формулам (1), (2). Отмечается, что основной вклад в шумы оценок ТЕС традиционно вносят более шумные наблюдения псевдодальности P , при этом уровень шумов в наблюдениях псевдодальности зависит от типа кодировки навигационных радиосигналов. Рассматриваются основные методы кодирования сигналов GNSS, такие как BPSK, QPSK и AltBOC[8]. Приводятся теоретические оценки для автокорреляционных функций и шумов наблюдения псевдодальности для GNSS сигналов в различных кодировках. Эти зависимости представлены на Рис. 1. Видно, что автокорреляционная функция для сигнала AltBOC имеет самый узкий основной лепесток с существенно подавленными боковыми лепестками, по сравнению с сигналами BPSK и QPSK[A1].

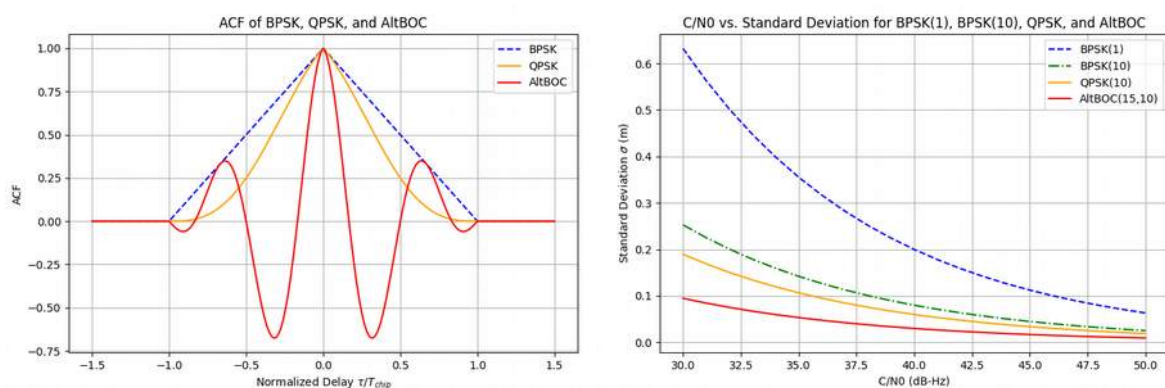


Рис. 1 Автокорреляционные функции (слева) и шумы псевдодальности (справа) для сигналов BPSK, QPSK и AltBOC.

Таб. 1 Основные характеристики сигналов Galileo E5 и Beidou B2

Система	Сигнал	RINEX 3.05	Центр. частота (МГц)	Минимальная полоса пропускания (МГц)	Тип модуляции	Частота чипа (МГц)
Galileo	E5a	C5X, L5X, D5X, S5X	1176.45	20.46	BPSK(10)	10.23
	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

Поскольку шум измерений псевдодальности, обратно пропорционален крутизне главного максимума автокорреляционной функции, это приводит к уменьшению шумов измерений псевдодальности для сигналов AltBOC по сравнению с сигналами BPSK и QPSK. Уменьшение шума измерений псевдодальности в свою очередь

приводит к уменьшению шумов оценки ТЕС согласно (2). В завершении параграфа приводятся основные характеристики сигналов Galileo E5[11] и Beidou B2[12], использующие кодировку AltBOC, они представлены в Таб. 1. **Четвёртый параграф** посвящён разработанному в работе методу оценки абсолютного вертикального ТЕС по одночастотным данным измерения сигналов AltBOC[A1]. Входными данными для алгоритма являются оценки относительного наклонного ТЕС по формуле (2) для всех наблюдаемых на станции спутников, передающих сигналы AltBOC. Ионосфера представляется тонким слоем на высоте $h_{ipp}=450\text{ km}$, в котором распределение вертикального ТЕС в окрестности станции представляется в виде усечённого разложения Тейлора до второго порядка в пространстве и времени:

$$\begin{aligned} vTEC = & a_0 + a_1(lat_{ipp} - lat_{st}) + a_2(lat_{ipp} - lat_{st})^2 \\ & + a_3(lon_{ipp} - lon_{st}) + a_4(lon_{ipp} - lon_{st})^2 \\ & + a_5(t_{obs} - t_{est}) + a_6(t_{obs} - t_{est})^2 \\ & + a_7(lat_{ipp} - lat_{st})(lon_{ipp} - lon_{st}) \\ & + a_8(lon_{ipp} - lon_{st})(t_{obs} - t_{est}) \\ & + a_9(lat_{ipp} - lat_{st})(t_{obs} - t_{est}) \end{aligned} \quad (3)$$

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 $vTEC$. При этом только наблюдения, для которых выполняется условие $|t_{obs} - t_{est}| < 15\text{ мин}$, вносят вклад в значения $vTEC$ в момент времени t_{est} . Преобразования вертикального $vTEC$ в наклонный $sTEC$ производится за счёт картирующей функции:

$$\begin{aligned} sTEC = MF(el) \cdot vTEC \\ \{ MF(el) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E \cdot \cos(el)}{R_E + h_{ipp}} \right)^2}} \} \end{aligned} \quad (4)$$

где el — угол возвышения спутника, R_E — радиус Земли. Уравнения (2), (3) и (4) образуют систему линейных уравнений для оценки $\{a_i\}$. Эта система по-прежнему содержит неизвестные константы, входящие в (2), которые устраняются разностным методом. Для произвольного (p -го) интервала непрерывности данных, т. е. наблюдений определённого спутника на приёмнике между двумя последовательными срывами сопровождения фазы уравнения системы имеют вид:

$$\begin{aligned}
\sum_{k=0}^{n_{\text{coeffs}}-1} A_{jk} a_k &= sTEC_j + \text{const}_p + \epsilon_j \\
\sum_{k=0}^{n_{\text{coeffs}}-1} A_{j+1,k} a_k &= sTEC_{j+1} + \text{const}_p + \epsilon_{j+1} \\
\sum_{k=0}^{n_{\text{coeffs}}-1} A_{j+2,k} a_k &= sTEC_{j+2} + \text{const}_p + \epsilon_{j+2}
\end{aligned} \tag{5}$$

Элементы матрицы A определяются значениями картирующей функции (4) и приращений аргументов разложения (3), 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 пределах фрагмента системы для p -го интервала непрерывности данных константа, входящая в правую часть системы (5), сохраняется и может быть устранена попарным вычитанием уравнений. В итоге получается система, с уравнениями вида:

$$\sum_{k=0}^{n_{\text{coeffs}}-1} (A_{jk} - A_{j-1,k}) a_k = sTEC_j - sTEC_{j-1} + \epsilon_{j,j-1} \tag{6}$$

Аналогичная операция может быть применена и ко всем остальным интервалам непрерывности данных, что приведёт к устранению всех неизвестных констант в (2).

Сами интервалы непрерывности определяются следующим образом. Отсутствие данных в течение 30 сек или вариации $sTEC$, превышающие порог 1 $TEC_u/30$ сек, трактуются как разрыв, что приводит к началу нового интервала непрерывности.

Таким образом, задача оценки абсолютного вертикального ТЕС сводится к следующей минимизационной задаче:

$$\begin{aligned}
&\min (v^T \Omega^{-1} v) \\
&\quad \tilde{A} \cdot a = r + v \\
&\text{s.t. } \{ G \cdot a - h = 0 \\
&\quad h \geq 0
\end{aligned} \tag{7}$$

где Ω — ковариационная матрица ошибок наблюдений, ее элементы могут быть оценены исходя из используемой модели дисперсии шумов наблюдений, а матрица G переводит столбец оцениваемых параметров a в распределение $vTEC$ согласно (3), $h \geq 0$ произвольный неотрицательный вектор. В предлагаемом методе используется упрощённая модель дисперсии шумов наблюдений ($sTEC$):

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sin(el)}, \tag{8}$$

где σ_0 — среднеквадратичная ошибка оценки ТЕС по (2) в зените, а все наблюдения полагаются независимыми.

Решением (7) является:

$$a = (\widetilde{A}^T \Omega^{-1} \widetilde{A})^{-1} (\widetilde{A}^T \Omega^{-1} \cdot r + G^T \cdot y) = a_{LS} + N^{-1} G^T \cdot y \quad (9)$$

где a_{LS} и N — решение и нормальная матрица системы вида (6) без ограничений, а y — решение линейной задачи дополнителности:

$$\begin{aligned} h &= M \cdot y + w \\ s.t. : h &\geq 0, y \geq 0, y^T \cdot h = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

где $w = G \cdot a_{LS}$, $M = G N^{-1} G^T$. Решение (10) получается с использованием метода Лемке. Предложенный алгоритм позволяет оценить вертикальный ТЕС над одиночным приемником с шагом по времени 15 мин. по данным одночастотных наблюдений сигналов GNSS в кодировке AltBOC. **В пятом параграфе** приводятся основные выводы главы, связанные с разработанным методом восстановления абсолютного вертикального ТЕС по одночастотным наблюдениям AltBOC. Отмечается улучшение обеспеченности ионосферных наблюдений за счёт возможности надёжных оценок ТЕС по одночастотным данным и роста числа спутников, передающих сигналы AltBOC, в группировках GNSS.

Глава 3 посвящена исследованию особенностей описания интегральных ионосферных параметров ТЕС и ГЕС в операционных моделях BDGIM и NeQuickG. Первый параграф посвящён тестированию операционных ионосферных моделей по данным ТЕС[A2]. Рассматриваются суточный ход ошибки моделирования ТЕС и ее изменчивость на больших периодах, для четырех регионов: Китай, Россия, Северная Америка и Южная Америка, а также ее зависимость от геомагнитной и солнечной активности. Пример вариаций ошибки моделирования ТЕС в операционных моделях относительно данных глобальных ионосферных карт для региона Китая и 2015 года представлен на Рис. 2. Видно, что максимум суточного хода ошибки наблюдается в полуденные часы. Это связано с суточным ходом ТЕС и максимумом ионизации в полуденные часы. Помимо суточного хода наблюдается ярко выраженный сезонный ход с максимумами в период равноденствия и минимумом в период солнцестояния, что можно объяснить вариациями солнечного зенитного угла, а, следовательно, и потока приходящего ионизирующего излучения, а также особенностями циркуляции в

термосфере и механизмом термосферной ложки. На фоне сезонного хода ошибок ТЕС отчётливо прослеживаются вариации с периодом 27 дней, связанные с солнечной активностью. 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.

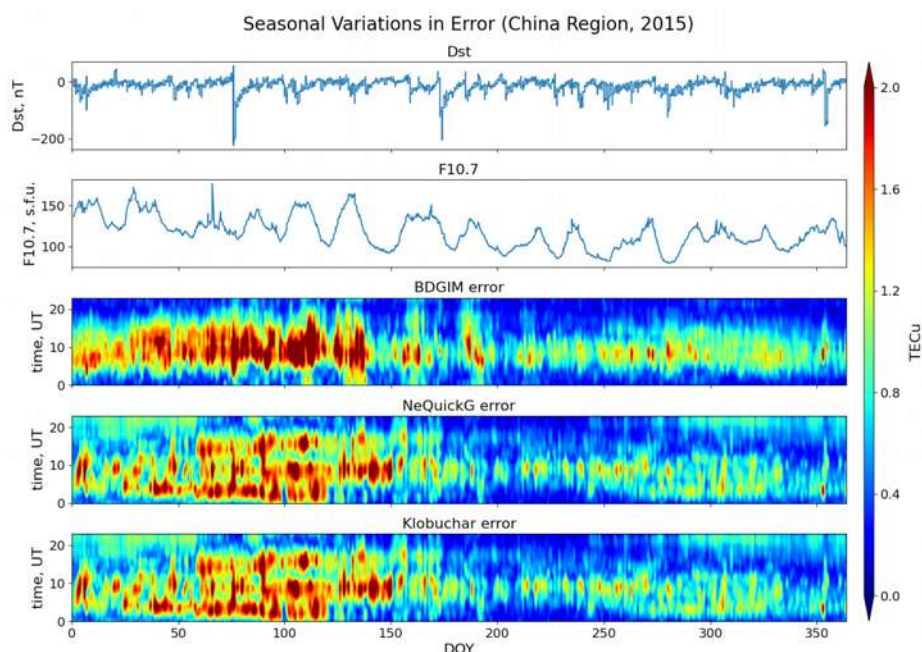


Рис. 2 Вариации ошибок ТЕС по моделям Klobuchar, BDGIM и NeQuickG в сравнении с геомагнитной и солнечной активностью. Китай 2015 г.

Таб. 2 Среднегодовые ошибки моделирования ТЕС в рассматриваемых регионах

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

Сравнительный анализ среднегодовых ошибок приведённый в Таб. 2 показал, что присутствует явная широтная 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. Для регионов России и Северной Америки ошибка меньше, что обусловлено

меньшими градиентами электронной концентрации в средних широтах. В целом модели BDGIM и NeQuickG показывают близкие значения ошибки моделирования TEC и существенно (до 20% в зависимости от региона) превосходят по этому показателю модель Klobuchar. **Второй параграф** посвящён исследованию особенностей описания GEC в операционных ионосферных моделях BDGIM, NeQuickG и Klobuchar в 24м цикле солнечной активности по сравнению с данными глобальных ионосферных карт CODG[A3]. Соответствующие вариации GEC представлены на левой панели Рис. 3 сверху, а снизу 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. 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. Модель Klobuchar даёт завышенные оценки GEC по сравнению с другими моделями и CODG в минимуме солнечной активности и скорее заниженные оценки GEC в максимуме солнечной активности.

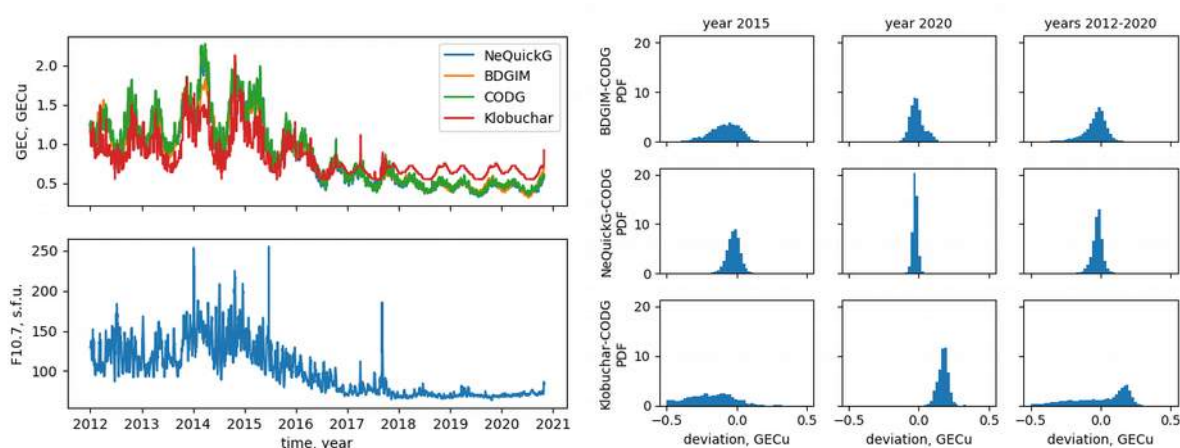


Рис. 3 Вариации GEC и их отклонения от данных GIM CODG для моделей Klobuchar, NeQuickG и BDGIM при разных уровнях солнечной активности.

Статистика отклонений модельных оценок GEC от данных CODG представлена на Рис 3 справа. 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 24го цикла смещение и СКО оценок GEC для моделей BDGIM и NeQuickG составляет (-0.041 GECu, 0.092 GECu) и (-0.025 GECu, 0.042 GECu), соответственно. Таким образом, при сравнении по параметру GEC, модель NeQuickG показывает себя лучше модели BDGIM, в то время как согласно результатам[A1], при сравнении по TEC обе модели сопоставимы. Отдельно проведено исследование спектров вариаций GEC в моделях BDGIM и NeQuickG а также данных CODG, см. Рис. 4. Показано, что амплитуды 27-дневных, полугодовых и годовых гармоник GEC в модели BDGIM в максимуме 24го цикла солнечной активности недооценены до 2х раз по сравнению с экспериментальными данными CODG и данными модели NeQuickG.

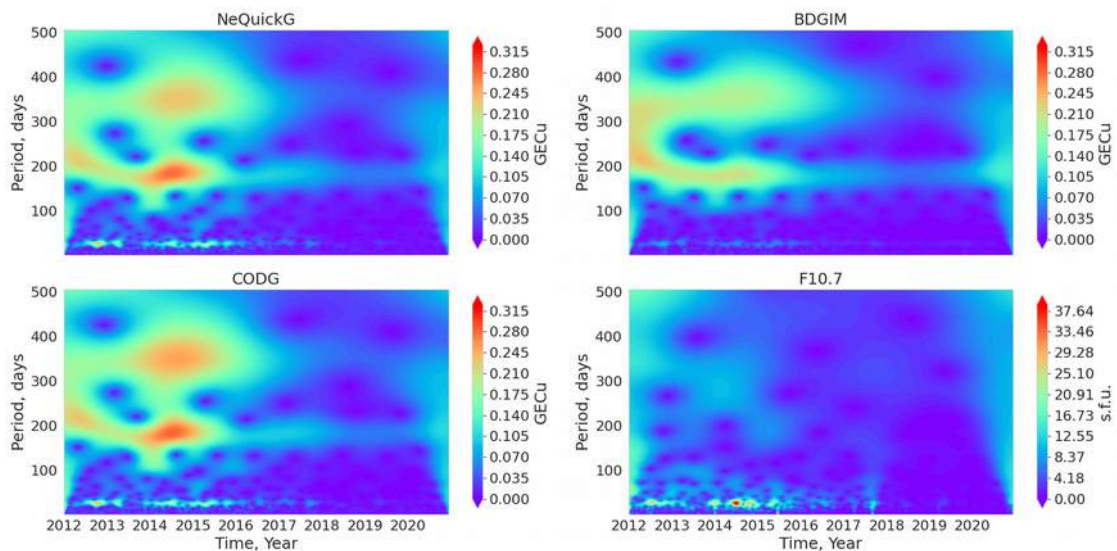


Рис. 4 Вейвлет-спектры вариаций GEC по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG в сравнении с вейвлет-спектром F10.7.

Способность операционных ионосферных моделей адаптироваться к текущим гелиогеофизическим условиям на основе наблюдений на достаточно ограниченном наборе приёмных пунктов GNSS, позволяет оценивать GEC с точностями, лучшими, чем согласно[7], демонстрируют эмпирические модели, например IRI. Это позволяет использовать их для экспресс-оценки GEC, например для дальнейшей параметризации более сложных моделей, использующих GEC CODG в качестве параметра, так как обычная задержка данных CODG составляет несколько суток, а частота обновлений операционных моделей обычно несколько часов. В работе построена регрессионная зависимость GEC по данным CODG от GEC по моделям NeQuickG и BDGIM, см. Рис 5. Лучшие результаты показали приближения второго порядка, с коэффициентами для NeQuickG — [0.02, 0.98, 0.025], для BDGIM — [0.2, 0.79, 0.077]. при этом

регрессионная модель позволяет получать несмещенные оценки GEC CODG с СКО 0.02 GECu по данным оценок GEC NeQuickG.

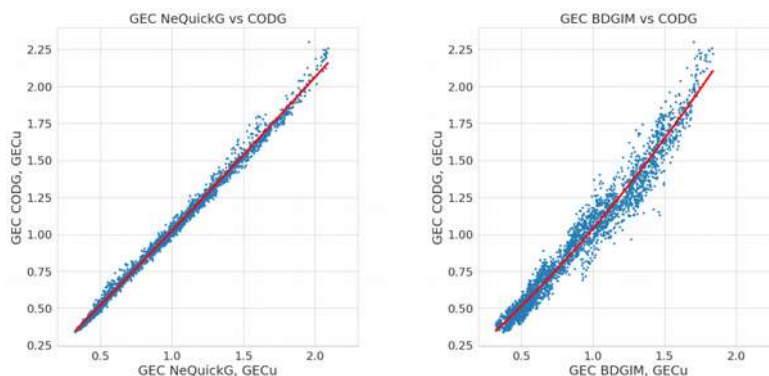


Рис. 5 Регрессионные зависимости GEC по данным GIM CODG от GEC по моделям BDGIM (справа) и NeQuickG (слева).

Третий параграф содержит основные выводы главы, касающиеся недооценки амплитуд 27 дневных, полугодовых и годовых гармоник GEC в модели BDGIM и разработанной регрессионной модели оценки GEC CODG по данным GEC модели NeQuickG, приведённые ранее.

Глава 4 посвящена исследованию свойств сверхширокополосных сигналов Beidou B2 и Galileo E5 в кодировке AltBOC в задачах зондирования ионосферы[A1]. **Первый параграф** вводит в рассмотрение характеристику шумов оценки относительного наклонного ТЕС, в качестве которой в настоящей работе выбрано СКО относительного наклонного ТЕС в окне 100 сек, при скважности измерений в 1 сек, что обеспечивает с одной стороны статистически значимое количество данных ТЕС, а с другой стороны, ограничивает влияние изменчивости естественной ионосферы, которая обычно характеризуется большими временными масштабами, на полученные результаты. **Второй параграф** посвящён использованным при исследовании шумовых характеристик ТЕС экспериментальным данным. Обоснован выбор периода наблюдений и приёмных пунктов, на которых они проводились, ограниченных временем, когда были доступны AltBOC сигналы со спутников Galileo и Beidou и наличием в мировой сети IGS приёмников, способных принимать данный сигнал. **Третий параграф** непосредственно посвящён экспериментальным оценкам шумов ТЕС для различных комбинаций наблюдаемых сигналов, включая Galileo E5 и Beidou B2 AltBOC. Приводятся шумовые характеристики ТЕС, полученные, как на отдельных пролётах спутников Galileo и Beidou, так и общая статистика за весь период

наблюдений. Пример отдельного пролёта спутника Beidou C24 над станцией ACRG приведён на Рис. 6.

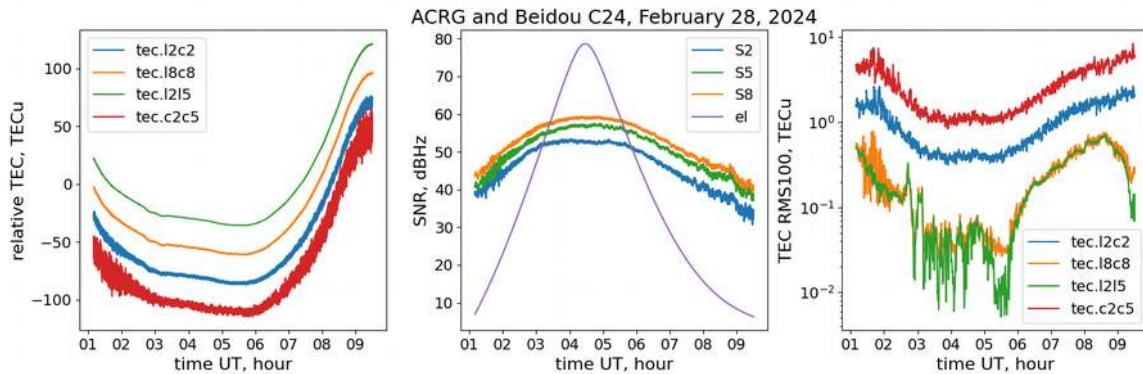


Рис. 6 Наклонный TEC (слева), SNR (в центре) и RMS TEC (справа) для пролёта спутника Beidou C24 над станцией ACRG 28 февраля 2024 года. На левой и правой панелях зелёная, оранжевая, синяя и красная линии соответствуют комбинациям L2L5, L8C8, L2C2 и C2C5 соответственно. На средней панели оранжевая, зелёная и синяя линии соответствуют наблюдениям S8, S5 и S2, фиолетовая линия показывает угол возвышения спутника.

Все три принимаемых сигнала демонстрируют схожее поведение с увеличением SNR по мере увеличения угла возвышения спутника, при этом SNR S8 для сигнала B2(a+b) AltBOC больше, чем SNR S2 для сигнала B1I BPSK(2) примерно на 7,5 дБ-Гц и на 2,5 дБ-Гц больше, чем SNR S5 для сигнала B2a QPSK(10) на протяжении всего пролёта. При этом, двухчастотная комбинация, 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, построенная на наблюдениях фазы и псевдодальности L2 и C2 BPSK(2), немного меньше подвержена шуму, однако его уровень все ещё значителен. Лучший уровень шумов TEC демонстрирует двухчастотная комбинация, построенная на наблюдениях фаз L2 BPSK(2) и L5 QPSK(10), однако важно отметить, что сопоставимый уровень шума показывает одночастотная комбинация, построенная на наблюдениях фазы и псевдодальности L8 и C8 AltBOC(15,10). Общая статистика наблюдений отдельно для спутников Galileo и Beidou приведена в Таб. 3 и Таб. 4. Результаты, приведённые в них, экспериментально подтверждают 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, уровень шумов TEC одночастотной фазово-кодовой комбинации при этом становится сопоставим с уровнем шумов двухчастотной фазовой комбинации. Это позволяет впервые использовать

одночастотные наблюдения GNSS наравне с двухчастотными[13] в высокоточных приложениях, повышая, таким образом, обеспеченность данными ионосферных наблюдений.

Таб. 3 Средние значения характеристики шума (TECu) 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 Средние значения характеристики шума (TECu) 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

Четвёртый параграф посвящён анализу влияния естественных радиошумов на сигналы AltBOC. В качестве таковых рассматриваются интенсивные солнечные радиовсплески, произошедшие в анализируемый период. Результаты представлены на Рис. 7. Видно, что для первого события наблюдается падение отношения сигнал/шум для всех наблюдаемых сигналов с увеличением потока солнечного радиоизлучения на частотах близких к частотам GNSS. При этом для не-AltBOC сигналов это падение на 5-10 дБ-Гц меньше, чем для сигналов AltBOC и их верхних и нижних боковых полос, в то же время отношения сигнал/шум для всех сигналов не опускаются ниже порога ~20–25 дБ-Гц, когда обычно начинают наблюдаться потери захвата сигнала в навигационных приёмниках геодезического класса. Для второго из рассмотренных событий, напротив, уменьшение отношения сигнал/шум наблюдается только для AltBOC сигналов. Это можно объяснить либо существенной неоднородностью спектра рассмотренных солнечных радиовсплесков, либо тем фактом, что сигналы AltBOC более подвержены влиянию радиошумов из-за особенностей схемы кодирования и большей спектральной ширины.

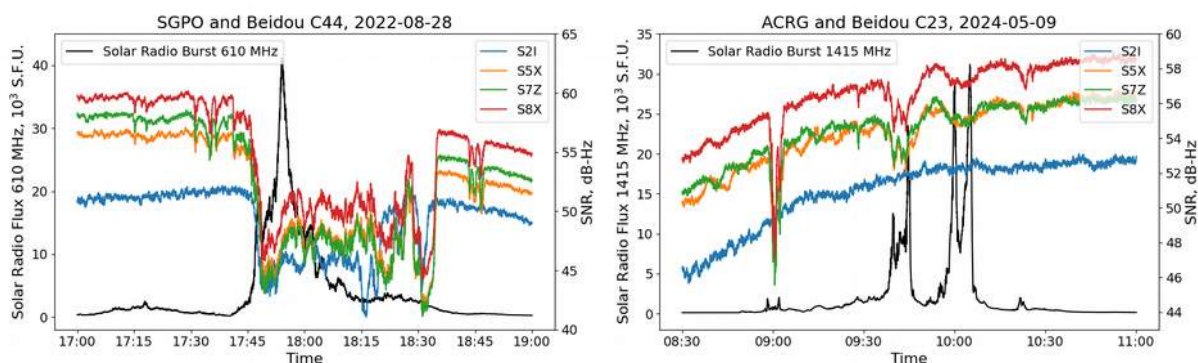


Рис. 7. Отношение сигнал/шум (SNR) для сигналов спутников Beidou C44 и C23 на станциях SGPO и ACRG во время двух солнечных радиовсплесков 28.08.2022 и 09.05.2024.

Пятый параграф посвящён тестированию метода оценки абсолютного вертикального ТЕС над одиночной станцией по данным приёма одночастотных сигналов AltBOC, представленному в четвёртом параграфе второй главы[A1]. Приводятся примеры сопоставлений оценок вертикального ТЕС, полученных разработанным методом, с результатами стандартных двухчастотных методик[13]. Пример такого сопоставления для станции SGPO и двухнедельного интервала наблюдений приведён на Рис. 8.

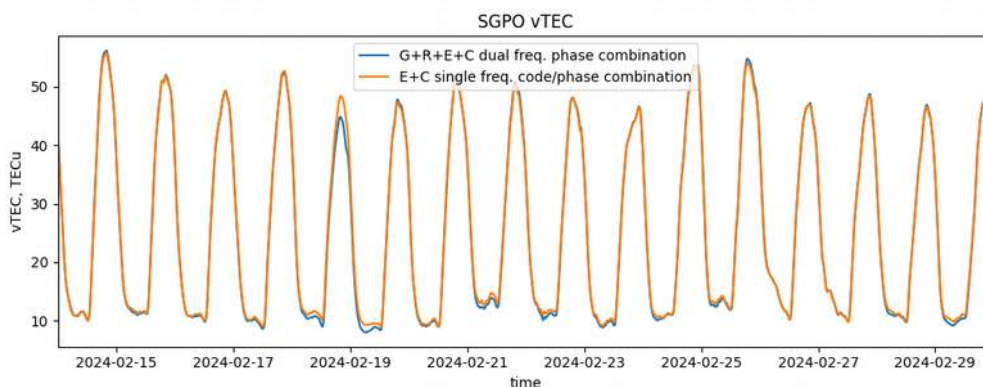


Рис. 8 Оценки абсолютного вертикального ТЕС на станции SGPO по одночастотной комбинации фаз и псевдодальностей сигналов AltBOC со спутников Galileo и Beidou (оранжевая линия), и по двухчастотной фазовой комбинации сигналов BPSK и QPSK со спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou (синяя линия)

Видно, что обе 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 случаев. Число наблюдений по полному созвездию GNSS, обычно более чем в 2 раза превышает число доступных наблюдений Galileo и Beidou AltBOC. Для всего анализируемого периода наблюдений февраль 2023 - февраль 2024 гг. получены статистики 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, см Рис. 9.

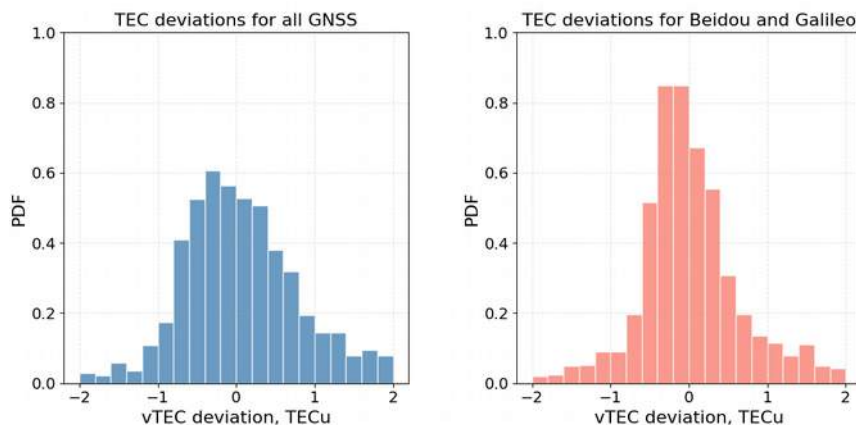


Рис. 9 Статистика отклонений оценок абсолютного вертикального TEC одночастотным методом с использованием сигналов Beidou и Galileo AltBOC от оценок абсолютного вертикального TEC двухчастотным методом по данным всех доступных спутников GNSS (слева) и спутников Beidou и Galileo (справа).

Видно, что оба распределения практически несмещенные, отклонения оценок в основном не превышают 2.5 TECu. При этом если для двухчастотной фазовой и одночастотной AltBOC оценки абсолютного вертикального TEC используется одинаковое число и геометрия спутников (справа), распределение становится более узким, а сами отклонения и в 95% случаев не превышают 1 TECu. Таким образом, предложенный в работе метод оценки абсолютного вертикального TEC на отдельной станции по данным одночастотных фазовых и кодовых наблюдений сигналов Galileo и Beidou в кодировке AltBOC, обеспечивает в не менее чем 95% случаев абсолютные отклонения менее 1 TECu от стандартных методов использующих двух частотные фазовые наблюдения. **Шестой параграф** содержит основной вывод главы, что кодировка AltBOC впервые позволяет использовать одночастотную комбинацию измерений фазы и псевдодальности для высокоточной оценки наклонного и вертикального TEC наравне с двухчастотной фазовой комбинацией.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Ошибки моделирования TEC в моделях Klobuchar, BDGIM и NeQuickG демонстрируют ярко выраженный суточный ход с максимумами в полуденные часы,

сезонный ход с максимумами в периоды весеннего и осеннего равноденствий, а также изменчивость связанную с 27-дневной вариацией солнечной активности. Для всех моделей присутствует широтный ход с максимумами в областях северного и южного гребней экваториальной аномалии. В целом модели BDGIM и NeQuickG показывают близкие значения ошибки моделирования TEC и существенно (до 20% в зависимости от региона) превосходят по этому показателю модель Kloubuchar[A2].

2. 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[A3].

3. В работе построена регрессионная зависимость GEC по данным CODG от GEC по модели NeQuickG, позволяющая получать несмещенные оценки GEC CODG с СКО не превышающим 0.02 GECu. Это позволяет использовать GEC по данным NeQuickG в качестве параметра в моделях, рассчитанных на использование GEC CODG, таких как IRIPlas, что позволяет в разы сократить запаздывание в получении этого параметра, которое для данных CODG составляет несколько суток[A3].

4. В работе показано, что использование сверхширокополосных сигналов AltBOC до 5 раз уменьшает уровень шумов в оценках TEC при использовании одночастотной комбинации наблюдаемых фаз и псевдодальностей по сравнению с таковыми полученными при использовании сигналов BPSK и QPSK. Это впервые позволяет использовать одночастотные данные GNSS для высокоточного зондирования ионосферы[A1].

5. Показано, что в ряде случаев сигналы AltBOC могут быть более подвержены влиянию естественных радиозумов по сравнению с сигналами BPSK и QPSK, демонстрируя большие просадки соотношения сигнал/шум, при этом сигналы AltBOC демонстрируют в среднем на 5-7 дБ-Гц лучшие значения соотношения сигнал/шум в отсутствие естественных широкополосных радиопомех[A1].

6. Разработан и протестирован на реальных данных наблюдений метод оценки абсолютного вертикального TEC над одиночной приемной станцией, использующий в качестве входных данных одночастотные оценки относительного наклонного TEC, полученные с использованием сигналов AltBOC. Предложенный метод

обеспечивает в не менее чем 95% случаев абсолютные отклонения менее 1 TECu от стандартных методов использующих двух частотные фазовые наблюдения[A1].

Полученные в работе результаты, таким образом, положительно влияют на обеспеченность данными ионосферных наблюдений с использованием GNSS.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [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. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/navi.292>.
- [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] Wang N. et al., "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] Montenbruck O., González Rodríguez B. "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," Annales Geophysicae, vol. 26, no. 2, pp. 335-344, 2008
- [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] Klobuchar J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users //IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. – 1987. – №. 3. – С. 325-331.

- [10] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] GALILEO OPEN SERVICE SIGNAL-IN-SPACE ICD, EU, 2023. Available online: http://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.1.pdf
- [12] ICD BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C, China, 2017. Available online: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608519640359959.pdf>
- [13] Yu V. Yasyukevich, A. A. Mylnikova, V. E. Kunitsyn, and A. M. 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, no. 6, pp. 763–769, 2015.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

- [A1] **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)
- [A2] 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)
- [A3] **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)