Аспарух Камбуров

GNSS ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЙОНОСФЕРНОТО ЕЛЕКТРОННО СЪДЪРЖАНИЕ НАД О-В ЛИВИНГСТЪН

Методи за обработка, валидация и вариации през 25-ия слънчев цикъл



СЪЮЗ НА ГЕОДЕЗИСТИТЕ И ЗЕМЕУСТРОИТЕЛИТЕ В БЪЛГАРИЯ

Аспарух Камбуров

GNSS ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЙОНОСФЕРНОТО ЕЛЕКТРОННО СЪДЪРЖАНИЕ НАД О-В ЛИВИНГСТЪН

Методи за обработка, валидация и вариации през 25-ия слънчев цикъл

МОНОГРАФИЯ

Съюз на геодезистите и земеустроителите в България

София · 2026

Аспарух Камбуров

GNSS ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЙОНОСФЕРНОТО ЕЛЕКТРОННО СЪДЪРЖАНИЕ НАД О-В ЛИВИНГСТЪН

Методи за обработка, валидация и вариации през 25-ия слънчев цикъл

Монография

Научни рецензенти:

чл.-кор. проф. д-р инж. Георги Костов Милев

доц. д-р инж. Любка Георгиева Пашова

Камбуров, А. GNSS изследване на йоносферното електронно съдържание над о-в Ливингстън: методи за обработка, валидация и вариации през 25-ия слънчев цикъл. София, 2026, 197 с.

Изображенията на кориците са създадени с помощта на ChatGPT (OpenAI, 2026); окончателното графично оформление е на автора.

ISBN (електронно издание, PDF): 978-619-92493-3-8

DOI: 10.5281/zenodo.23857919

© Аспарух Камбуров, 2026. Всички права запазени, освен ако изрично не е посочено друго. Отделни фигури и материали се използват или разпространяват при условията на посочените към тях лицензи и разрешения.

Издател: Съюз на геодезистите и земеустроителите в България

РЕЗЮМЕ

Монографията представя комплексно изследване на йоносферното пълно електронно съдържание (TEC) над о-в Ливингстън, Антарктика, въз основа на GNSS наблюдения от станция KOH2 през периода 2019–2026 г. Основната цел е разработване и проверка на възпроизводима методика за определяне на локални TEC оценки, оценка на тяхната съгласуваност с външни йоносферни продукти с различен методически произход и анализ на многогодишната изменчивост в рамките на 25-ия слънчев цикъл.

Двучестотните GNSS наблюдения са обработени чрез последователна процедура за определяне на наклонено пълно електронно съдържание (STEC), преобразуване във вертикално пълно електронно съдържание (VTEC) и формиране на станционна времева характеристика PyTECGg VEq. Като допълващ сравнителен подход е приложена обработка с pyOASIS. Получените локални оценки са съпоставени с IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC, а PyIRI е използван като емпиричен референтен модел. Влиянието на избора на глобална йоносферна карта е оценено чрез анализ на чувствителността спрямо продуктите на CODE, ESA, JPL и UPC.

Многогодишният анализ показва отчетливо нарастване на TEC с усилването на слънчевата активност през възходящата фаза на 25-ия слънчев цикъл. Регресионното моделиране с радиопотока F10.7 и сезонни компоненти обяснява приблизително 74–78% от изменчивостта на денонощните TEC стойности при разглежданите продукти, основани на наблюдения. Установена е статистически значима положителна зависимост между TEC и F10.7, като резултатите потвърждават необходимостта слънчевата активност и сезонността да се разглеждат съвместно при интерпретацията на многогодишните изменения.

Отделно е изследвано представително денонощие с високочестотни 10 Hz GNSS наблюдения. Разработен е експериментален показател за краткопериодични фазови флуктуации, основан на геометрично независимата фазова комбинация. Идентифициран е интервал, интерпретиран като кандидат за повишена краткопериодична йоносферна изменчивост, без да се приема като независимо потвърдено сцинтилационно събитие.

Разработените процедури и публикуваните софтуерни продукти и данни осигуряват възпроизводима основа за продължаване на времевия ред на KOH2, включване на допълнителни антарктически станции и бъдещи изследвания на връзката между GNSS наблюденията, слънчевата активност и динамиката на йоносферата.

Ключови думи: GNSS, йоносфера, пълно електронно съдържание, TEC, STEC, VTEC, KOH2, о-в Ливингстън, Антарктика, PyTECGg, IGS GIM, Madrigal, PyIRI, F10.7, 25-и слънчев цикъл

ABSTRACT

This monograph presents a comprehensive investigation of ionospheric total electron content (TEC) over Livingston Island, Antarctica, based on GNSS observations from station KOH2 during 2019–2026. The main objective is to develop and assess a reproducible methodology for deriving local TEC estimates, evaluate their consistency with external ionospheric products of different methodological origin, and investigate their long-term variability during Solar Cycle 25.

Dual-frequency GNSS observations are processed through a consistent procedure involving the estimation of slant total electron content (STEC), conversion to vertical total electron content (VTEC), and derivation of the station-based PyTECGg VEq time series. Processing with pyOASIS is employed as a complementary comparative approach. The resulting local TEC estimates are compared with IGS Final GIM and Madrigal GNSS TEC, while PyIRI is used as an empirical reference model. Sensitivity to the choice of global ionospheric map is assessed using products from CODE, ESA, JPL, and UPC.

The multi-year analysis reveals a pronounced increase in TEC with increasing solar activity during the ascending phase of Solar Cycle 25. Regression models incorporating the F10.7 solar radio flux and seasonal components explain approximately 74–78% of the variability in daily TEC values for the observation-based products considered. A statistically significant positive relationship between TEC and F10.7 is obtained, demonstrating the importance of considering solar forcing and seasonal variability jointly when interpreting long-term TEC changes.

A representative day of high-rate 10 Hz GNSS observations is additionally analysed. An experimental indicator of short-period phase fluctuations based on the geometry-free carrier-phase combination is developed. A distinct interval is identified as a candidate for enhanced short-period ionospheric variability, without being interpreted as an independently confirmed scintillation event.

The processing procedures, software, and machine-readable research products developed within the study provide a reproducible framework for extending the KOH2 time series, incorporating additional Antarctic stations, and supporting future investigations of the relationship between GNSS observations, solar activity, and ionospheric dynamics.

Keywords: GNSS, ionosphere, total electron content, TEC, STEC, VTEC, KOH2, Livingston Island, Antarctica, PyTECGg, IGS GIM, Madrigal, PyIRI, F10.7, Solar Cycle 25

ПРЕДГОВОР

Антарктика представлява уникална природна лаборатория, в която теренните геодезически измервания имат особено висока стойност. Голямата отдалеченост, ограниченият брой постоянно действащи станции и сложните климатични и логистични условия правят всяка измервателна кампания важна не само за конкретната научна задача, за която е проведена, но и за последващи интердисциплинарни изследвания. Именно такава възможност предоставят геодезическите GNSS наблюдения на о-в Ливингстън, натрупвани в рамките на българската научна дейност в Антарктика.

Геодезическите изследвания в района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ се развиват в продължение на повече от две десетилетия. Първоначално те са насочени предимно към топографското и хидрографското осигуряване, изграждането на локална геодезическа основа и решаването на конкретни задачи, свързани с картографирането на острова. Впоследствие приложението на GPS и GNSS технологии разширява обхвата им към геодинамични наблюдения, изследване на движенията на ледниците и интегриране с други геофизични методи. Постепенно се формира инфраструктура, позволяваща не само кампанийни измервания, но и натрупване на продължителни времеви редове. Създаването на сезонно действащата GNSS станция KOH2 е важен етап от този процес.

GNSS наблюденията имат комплексно приложение. От една страна, те осигуряват високоточна пространствена и времева основа за геодезически, геодинамични и други изследвания. От друга, радиосигналите от навигационните спътници преминават през йонизираната част на земната атмосфера и съдържат измерима информация за нейното състояние. Честотно зависимото въздействие на йоносферната плазма позволява от двучестотните кодови и фазови измервания да бъде определяно пълното електронно съдържание. По този начин наблюдателна инфраструктура, създадена предимно за геодезически цели, може да бъде използвана и като средство за непрекъснато дистанционно изследване на йоносферата.

Настоящата монография възникна именно от възможността многогодишният архив на KOH2 да бъде разгледан от тази различна гледна точка. Изходният набор не представлява готов хомогенен научен продукт. Наблюденията са натрупвани в различни сурови формати, с различна честота на регистрация и с неравномерна времева наличност. Това поставя практически и методически въпроси, свързани с тяхното унифициране, автоматизирана обработка, контрол на качеството и оценка на представителността на получените йоносферни величини. Една от основните цели на работата е именно превръщането на този разнороден архив във възпроизводим времеви ред от GNSS измервания, който може да бъде използван за количествен анализ на йоносферното електронно съдържание.

Особен интерес представлява времевият обхват 2019–2026 г. Той включва периода около минимума на слънчевата активност, възходящата фаза и условията на висока активност на 25-ия слънчев цикъл. Така данните от една и съща наземна станция предоставят възможност да бъдат проследени измененията на йоносферното електронно съдържание при съществено различаващо се слънчево въздействие. Едновременно с това районът на Южните Шетландски острови се намира в среда, в която взаимодействието между слънчевия вятър, магнитосферата и полярната йоносфера може да предизвиква значителна краткопериодична и пространствена изменчивост. Поради това интерпретацията на локалния времеви ред изисква разграничаване на дългопериодичните слънчево обусловени и сезонни изменения от отклоненията, свързани с геомагнитната активност.

Методическата постановка на монографията е изградена така, че локалните резултати да не бъдат оценявани изолирано. Определянето на електронното съдържание от KOH2 е реализирано чрез различни програмни подходи, а получените стойности са съпоставени с глобални и регионални наблюдателни продукти и с емпиричен модел на йоносферата. Отделно е изследвана чувствителността на резултатите към избора на глобална йоносферна карта. При многогодишния анализ е

отчетено силно неравномерното представяне на отделните години, поради което стандартният метод на най-малките квадрати е съпоставен с претеглен подход, при който всяка година получава еднаква обща статистическа тежест. Връзката с геомагнитната активност е разгледана след отделяне на основния слънчев и сезонен фон и е проверена чрез различни схеми за бутстрап анализ.

Към тези времеви мащаби е добавен и експериментален анализ на високочестотни 10 Hz GNSS наблюдения. Неговата цел не е да замени измерванията със специализирана сцинтилационна апаратура, а да провери каква допълнителна информация за краткопериодичните фазови флуктуации може да бъде извлечена от стандартен геодезически приемник. По този начин една и съща наблюдателна станция се използва за изследване на процеси от многогодишния мащаб на слънчевия цикъл до изменения, протичащи в рамките на минути.

Съществен принцип при разработването на изследването е възпроизводимостта на обработката. Значителна част от операциите по подготовка, преобразуване, анализ, валидация и графично представяне на данните са автоматизирани, а публикационната версия на разработените процедури е архивирана в Zenodo. Това позволява методическите решения да бъдат проследявани и при необходимост обработката да бъде повторена при разширяване на времевия ред на KOH2.

Значението на тази инфраструктура надхвърля рамките на конкретното изследване. Част от наблюденията на KOH2 вече са включени в международната антарктическа геодезическа инициатива GIANT-REGAIN, подкрепена от Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) и свързана с експертната група Geodetic Infrastructure in Antarctica (GIANT). По този начин българските GNSS наблюдения на о-в Ливингстън участват и в по-широките усилия за изграждане на обща геодезическа наблюдателна инфраструктура на Антарктика.

Монографията следователно не разглежда станция KOH2 единствено като източник на геодезически координати, нито единствено като средство за определяне на йоносферно електронно съдържание. Основната идея е да бъде използван пълният научен потенциал на натрупания наблюдателен архив и да бъде показано как една сезонно действаща GNSS станция в Антарктика може да свързва геодезията, геофизиката и изследването на горната атмосфера. Надявам се, че представените резултати ще бъдат полезни както за продължаването на наблюденията от KOH2, така и за бъдещото им включване в по-широки регионални и международни изследвания на Антарктика.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва благодарност на Българския антарктически институт (БАИ) и Националния център за полярни изследвания (НЦПИ) за дългогодишната организационна, логистична и научна подкрепа на изследванията в района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ на о-в Ливингстън.

Авторът изказва специална благодарност на проф. Христо Пимпирев за подкрепата на българските антарктически изследвания и за създадените възможности за провеждане на продължителни научни наблюдения на о-в Ливингстън.

Авторът благодари на доц. д-р Борислав Александров (УАСГ), гл. ас. д-р Гергана Георгиева (СУ), както и на останалите колеги, участвали през различни години в геодезическите и геофизичните изследвания, изграждането и поддържането на наблюдателната инфраструктура и събирането на данни в района на базата. Авторът изказва особена благодарност на Васил Гурев за теренната работа по стабилизирането на геодезическата точка KOH2, която впоследствие се превръща в основна наблюдателна станция за изследванията, представени в настоящата монография.

Авторът благодари и на всички участници в българските антарктически експедиции, чиято работа по осигуряването, експлоатацията и поддържането на научната инфраструктура прави възможно натрупването на продължителни данни от наблюдения в едни от най-труднодостъпните райони на света.

СЪДЪРЖАНИЕ

ПРЕДГОВОР....6
СПИСЪК НА ФИГУРИТЕ....10
СПИСЪК НА ТАБЛИЦИТЕ....12
СПИСЪК НА СЪКРАЩЕНИЯТА И ОЗНАЧЕНИЯТА....13
1. ВЪВЕДЕНИЕ....15
1.1. Актуалност на изследването....15
1.2. Състояние на изследванията и преглед на литературните източници....17
1.3. Научен проблем, обект и предмет на изследването....24
1.4. Цел и задачи на изследването....25
1.5. Обхват и методическа постановка....26
1.6. Структура на монографията....27
2. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА GNSS ИЗСЛЕДВАНИЯТА НА ЙОНОСФЕРАТА....29
2.1. Структура и изменчивост на земната йоносфера....29
2.2. Слънчева и геомагнитна активност и влияние върху йоносферата....34
2.3. GNSS системи, сигнали и наблюдавани величини....42
2.4. Разпространение на GNSS сигналите през йоносферата....48
2.5. Пълно електронно съдържание....52
2.6. Инструментални закъснения и неопределености....58
2.7. Показатели за краткопериодична изменчивост на TEC....64
2.8. Йоносферна сцинтилация....66
3. РАЙОН НА ИЗСЛЕДВАНЕ, ДАННИ И ОБРАБОТКА....70
3.1. Антарктически полуостров и о-в Ливингстън....71
3.2. Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“....71
3.3. GNSS станция KOH2....72
3.4. GNSS наблюдения....76
3.5. Навигационни данни и прецизни GNSS продукти....79
3.6. Външни данни и продукти, използвани в изследването....81
4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА TEC ОТ GNSS НАБЛЮДЕНИЯТА НА KOH2....86
4.1. Общ технологичен процес за определяне на TEC....86
4.2. Обработка чрез ryOASIS....87
4.3. Обработка чрез PyTECGg....94
4.4. Софтуерна среда....102
5. МЕТОДИКА И РЕЗУЛТАТИ ОТ ВАЛИДАЦИЯТА И СРАВНИТЕЛНИЯ АНАЛИЗ....109
5.1. Обща архитектура на валидацията и сравнителния анализ....109
5.2. Пространствено-времево съгласуване....111
5.3. Съпоставка с IGS Final GIM....113
5.4. Съпоставка с Madrigal....126
5.5. Климатологична съпоставка с PyIRI....133
5.6. Оценка на устойчивостта спрямо различни глобални йоносферни карти....139
5.7. Формиране на единна времево съгласувана извадка за многогодишния анализ....146
5.8. Обобщение....147
6. МНОГОГОДИШНИ ИЗМЕНЕНИЯ НА TEC ПРЕЗ 25-ИЯ СЛЪНЧЕВ ЦИКЪЛ....149
6.1. Изходни данни и показатели за многогодишния анализ....149
6.2. Годишни изменения на VTEC през периода 2019–2026 г....150
6.3. Месечно изменение на VTEC и F10.7 през периода 2019–2026 г....152
6.4. Зависимост на VTEC от слънчевата активност и сезонността....154
6.5. Връзка между отклоненията от фоновия VTEC и геомагнитната активност....157
6.6. Обобщение....167
7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН АНАЛИЗ НА КРАТКОПЕРИОДИЧНИ ФАЗОВИ ФЛУКТУАЦИИ ОТ 10 Hz GNSS НАБЛЮДЕНИЯ....169
7.1. Цел и обхват на експеримента....169
7.2. Методика за обработка....169
7.3. Резултати за представителното денонощие....171
7.4. Интерпретация и ограничения....174
7.5. Обобщение....174

8. ОБОБЩЕНА ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ.....176
8.1. Надеждност и представителност на локалните GNSS оценки на TEC.....176
8.2. Значение на избора на референтен йоносферен продукт.....177
8.3. Многогодишна изменчивост, слънчева и геомагнитна активност.....179
8.4. Високочестотните GNSS наблюдения като допълващ източник на информация.....180
8.5. Ограничения на изследването.....181
8.6. Перспективи за бъдещи изследвания.....183
9. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ПРИНОСИ.....184
9.1. Основни резултати.....184
9.2. Научни и методически приноси.....186
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....188
ЛИТЕРАТУРА.....190

СПИСЪК НА ФИГУРИТЕ

Фигура 2.1. Основни връзки в системата Слънце–слънчев вятър–магнитосфера–йоносфера и използвани показатели за слънчева и геомагнитна активност (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])....31
Фигура 2.2. Геометрично независима комбинация на двучестотни кодови и фазови GNSS наблюдения и основни приложения (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])....51
Фигура 2.3. Геометрия на определянето на наклонено и вертикално пълно електронно съдържание при модел на тънък йоносферен слой (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])....53
Фигура 2.4. Основни йоносферни показатели, извличани от GNSS наблюдения: TEC, ΔTEC (DTEC), ROT, ROTI и допълнителни показатели за краткопериодична изменчивост и сцинтилационни ефекти (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])....66
Фигура 3.1. Местоположение на GNSS станция KOH2 на о-в Ливингстън спрямо избрани близки перманентни GNSS и геомагнитни станции....70
Фигура 3.2. Местоположение на GNSS станцията KOH2 в района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“....73
Фигура 3.3. GNSS наблюдения от станция KOH2 на о-в Ливингстън с приемник Trimble R10 през м. януари 2015 г....73
Фигура 3.4. Принцип на формиране на еквивалентното вертикално пълно електронно съдържание (VEq) за станция KOH2 (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])....75
Фигура 3.5. Времево покритие на данните от станция KOH2 през периода 2019–2026 г....79
Фигура 4.1. Общ алгоритъм на обработката и анализа на GNSS измерванията в станция KOH2....86
Фигура 4.2. Основни компоненти, контролни проверки и организация на публикувания набор за възпроизводимост в Zenodo....107
Фигура 5.1. Пространствено и времево съгласуване на локалните TEC оценки от KOH2 с IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])....111
Фигура 5.2. Брой денонощия, включени в съпоставката с IGS Final GIM....118
Фигура 5.3. Годишно изменение на систематичното отместване на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо IGS Final GIM за периода 2019–2026 г....120
Фигура 5.4. Годишни стойности на систематичното отместване и средноквадратичната грешка при съпоставката на PyTECGg и pyOASIS с IGS Final GIM за периода 2019–2026 г....121
Фигура 5.5. Месечно изменение на RMSE на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо IGS Final GIM за периода 2019–2026 г....122
Фигура 5.6. Годишен коефициент на корелация на Пирсън между локалните TEC решения и IGS Final GIM за периода 2019–2026 г....124
Фигура 5.7. Съпоставка на годишното систематично отместване при използване на всички отделни наблюдения и при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни....125
Фигура 5.8. Годишно изменение на систематичното отместване на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г....130
Фигура 5.9. Годишни стойности на RMSE при съпоставката на PyTECGg и pyOASIS с Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г....131
Фигура 5.10. Годишен коефициент на корелация на Пирсън между локалните TEC решения и Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г....132
Фигура 5.11. Годишен дял на успешно съпоставените локални TEC стойности с Madrigal GNSS TEC....133
Фигура 5.12. Годишни средни разлики на PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC спрямо PyIRI за денонощията с налични данни през периода 2019–2026 г....137
Фигура 5.13. Годишни стойности на RMSE на PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC спрямо PyIRI за денонощията с налични данни....138
Фигура 5.14. Годишна медиана на денонощния коефициент на корелация на Пирсън между PyIRI и PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC....139

Фигура 5.15. Годишно систематично отместване на PyTECGg VTEC спрямо глобалните йоносферни карти CODE, ESA, JPL и UPC..... 143
Фигура 5.16. Годишно систематично отместване на pyOASIS VTEC спрямо глобалните йоносферни карти CODE, ESA, JPL и UPC..... 144
Фигура 5.17. Разлика между систематичните отмествания на PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC при използване на CODE, ESA, JPL и UPC..... 145
Фигура 6.1. Годишни средни стойности на PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и F10.7 за наличните 24-часови наблюдения през 2019–2026 г..... 151
Фигура 6.2. Съпоставимост на многогодишното изменение на PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC с изменението на слънчевия радиопоток F10.7 през периода 2019–2026 г. (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])..... 152
Фигура 6.3. Месечно изменение на средните стойности на PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и F10.7 за наличните общи часови епохи през периода 2019–2026 г..... 153
Фигура 6.4. Коефициент пред F10.7 в регресионния модел на VTEC при стандартен метод на най-малките квадрати и при претеглен метод на най-малките квадрати с еднаква обща статистическа тежест на отделните години..... 156
Фигура 6.5. Рангов коефициент на корелация на Спирман между отклоненията от фоновия модел на TEC и показателите за геомагнитна активност..... 159
Фигура 6.6. Годишна разлика между средноквадратичната грешка при геомагнитно смутени и спокойни денонощия за съпоставките на локалните TEC решения с IGS Final GIM..... 161
Фигура 6.7. Рангов коефициент на корелация на Спирман между избрани показатели за съответствие на TEC продуктите и геомагнитната активност при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия..... 164
Фигура 7.1. Последователност на обработката на високочестотни 10 Hz GNSS фазови наблюдения (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])..... 169
Фигура 7.2. Денонощен ход на медианата и 95-ия процентил на експерименталния показател за фазови флуктуации SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD за 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥40°..... 172
Фигура 7.3. Изменение на експерименталния показател за фазови флуктуации за избрани GPS и GLONASS спътници в интервала 16:30–17:30 UTC на 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥40°..... 173
Фигура 8.1. Схематично обобщение на многомащабния анализ на йоносферното електронно съдържание над KOH2 за периода 2019–2026 г. и връзката му със слънчевата и геомагнитната активност (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88])..... 176

СПИСЪК НА ТАБЛИЦИТЕ

Таблица 2.1. Носещи честоти на GNSS....44
Таблица 3.1. Основни характеристики на GNSS станция KOH2....74
Таблица 3.2. Разпределение на наличните сурови наблюдения....78
Таблица 5.1. Брой денонощия, включени в съпоставката с IGS Final GIM....118
Таблица 5.2. Средно годишно систематично отместване спрямо IGS Final GIM....119
Таблица 5.3. Годишни стойности на RMSE спрямо IGS Final GIM....120
Таблица 5.4. Месечно изменение на RMSE на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо IGS Final GIM за периода 2019–2026 г....121
Таблица 5.5. Годишен коефициент на корелация на Пирсън спрямо IGS Final GIM....123
Таблица 5.6. Средно систематично отместване при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни....124
Таблица 5.7. Брой денонощия с измервания, включени в съпоставката с Madrigal GNSS TEC....128
Таблица 5.8. Средно годишно систематично отместване спрямо Madrigal GNSS TEC....129
Таблица 5.9. Годишни стойности на RMSE спрямо Madrigal GNSS TEC....130
Таблица 5.10. Годишен коефициент на корелация на Пирсън между локалните TEC решения и Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г....131
Таблица 5.11. Средно систематично отместване спрямо Madrigal при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни....132
Таблица 5.12. Наличност на общите часови епохи за климатологичната съпоставка с PyIRI....135
Таблица 5.13. Средна разлика спрямо PyIRI при еднаква статистическа тежест на общите денонощия с налични данни....136
Таблица 5.14. Средна денонощна RMSE спрямо PyIRI....137
Таблица 5.15. Медиана на денонощния коефициент на корелация на Пирсън спрямо PyIRI....138
Таблица 5.16. Средно систематично отместване на PyTECGg VTEC спрямо индивидуалните GIM продукти при общи денонощия с налични данни....142
Таблица 5.17. Средно систематично отместване на pyOASIS VTEC спрямо индивидуалните GIM продукти при общи денонощия с налични данни....143
Таблица 5.18. Разлика между систематичните отмествания на PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо отделните GIM продукти....144
Таблица 5.19. Наличност на строгата обща часова извадка през периода 2019–2026 г....146
Таблица 6.1. Средни стойности на TEC и F10.7 за наличните денонощия през периода 2019–2026 г....150
Таблица 6.2. Резултати от регресионния анализ на VTEC спрямо F10.7 и сезонните компоненти....155
Таблица 6.3. Съпоставка между стандартната регресия и модела с еднаква статистическа тежест на годините....156
Таблица 6.4. Връзка между отклоненията от фоновия модел и избрани показатели за геомагнитна активност....158
Таблица 6.5. Изменение на избрани показатели за RMSE при геомагнитно смутени спрямо спокойни условия....160
Таблица 6.6. Бутстрап-устойчиви зависимости между избрани TEC показатели и геомагнитната активност при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия....165
Таблица 7.1. Основни статистически характеристики на експерименталния показател за фазови флуктуации за 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥30°....171

СПИСЪК НА СЪКРАЩЕНИЯТА И ОЗНАЧЕНИЯТА

Основни съкращения

Съкращение	Значение
BKG	*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* – Федерална агенция по картография и геодезия на Германия
CDDIS	*Crustal Dynamics Data Information System* – архив на NASA за геодезически и GNSS данни
CDMA	*Code Division Multiple Access* – множествен достъп с кодово разделяне
CEDAR	*Coupling, Energetics and Dynamics of Atmospheric Regions*
CODE	*Center for Orbit Determination in Europe*
DCB	*Differential Code Bias* – диференциално кодово закъснение
DOY	*Day of Year* – пореден ден от годината
ESA	*European Space Agency* – Европейска космическа агенция
FDMA	*Frequency Division Multiple Access* – множествен достъп с честотно разделяне
FDR	*False Discovery Rate* – дял на погрешно отхвърлените нулеви хипотези
GF	*Geometry-Free* – геометрично независима комбинация
GFZ	*GFZ German Research Centre for Geosciences* – Германски изследователски център по геонауки
GFZRNX	специализиран софтуер за обработка и преобразуване на RINEX данни
GIANT	*Geodetic Infrastructure in Antarctica*
GIANT-REGAIN	*Geodynamics In ANTarctica based on REprocessing GNSS dAta Initiative*
GIM	*Global Ionospheric Map* – глобална йоносферна карта
GLONASS	руска глобална навигационна спътникова система
GNSS	*Global Navigation Satellite Systems* – глобални навигационни спътникови системи
GPS	*Global Positioning System*
HDF5	*Hierarchical Data Format, version 5*
IGS	*International GNSS Service* – Международна GNSS служба
IONEX	*IONosphere map EXchange format* – формат за обмен на йоносферни карти
IPP	*Ionospheric Pierce Point* – йоносферна прободна точка
IRI	*International Reference Ionosphere* – Международна референтна йоносфера
JPL	*Jet Propulsion Laboratory*
KOH2	идентификатор на използваната GNSS станция при Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“
LLI	*Loss of Lock Indicator* – индикатор за прекъсване на фазовото проследяване
MAPGPS	глобален GNSS TEC продукт, разпространяван чрез CEDAR Madrigal
MGEX	*Multi-GNSS Experiment*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
OLS	*Ordinary Least Squares* – метод на най-малките квадрати
PyIRI	Python реализация на модела International Reference Ionosphere
pyOASIS	софтуерна среда за GNSS/йоносферна обработка, използвана като допълващ сравнителен подход
PyTECGg	Python пакет за определяне и калибриране на TEC от GNSS наблюдения
RINEX	*Receiver Independent Exchange Format* – независим от приемника формат за обмен на GNSS данни
RMSE	*Root Mean Square Error* – средноквадратична грешка
ROT	*Rate of TEC* – скорост на изменение на TEC
ROTI	*Rate of TEC Index* – индекс на изменчивостта на ROT
SAR	*Synthetic Aperture Radar* – радар със синтезирана апертура
SCAR	*Scientific Committee on Antarctic Research*

SILSO	*Sunspot Index and Long-term Solar Observations*
SP3	стандартен формат за прецизни орбитални продукти
STEC	*Slant Total Electron Content* – наклонено пълно електронно съдържание
T02	собствен суров формат на Trimble за GNSS наблюдения
TEC	*Total Electron Content* – пълно електронно съдържание
TECU	*Total Electron Content Unit* – единица за TEC; $1\ TECU = 10^{16}$ електрона/m²
UPC	*Universitat Politècnica de Catalunya*
UTC	*Coordinated Universal Time – координирано универсално време*
VEq	*Vertical Equivalent TEC* – еквивалентна вертикална TEC оценка за местоположението на станцията
VTEC	*Vertical Total Electron Content* – вертикално пълно електронно съдържание
WLS	*Weighted Least Squares* – претеглен метод на най-малките квадрати

Индекси, статистически и физични означения

$F10.7$	слънчев радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm
Kp	планетарен тричасов индекс на геомагнитната активност
ap	линейна тричасова величина, съответстваща на Kp
Ap	денонощен планетарен индекс на геомагнитната активност
Dst	индекс за измененията на хоризонталната компонента на геомагнитното поле, свързани основно с пръстеновия ток
$SYM-H$	геомагнитен индекс с висока времева разделителна способност, близък по физически смисъл до Dst
Δ_i	индивидуална разлика между две съпоставени оценки
$\bar{\Delta}$	систематично отместване – средна стойност на разликите Δ_i
r	коефициент на линейна корелация на Пирсън
ρ	рангов коефициент на корелация на Спирман
β	регресионен коефициент
n, N	брой наблюдения/елементи в съответната извадка
CI	Confidence Interval – доверителен интервал
p_{95}	95-и процентил
p_{99}	99-и процентил
S_4	стандартен индекс на амплитудната сцинтилация
Φ_{60}	стандартен показател за фазова сцинтилация, определян за 60-s интервал

1. ВЪВЕДЕНИЕ

1.1. Актуалност на изследването

Глобалните навигационни спътникови системи (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) са утвърден инструмент не само за позициониране, навигация и геодезически приложения, но и за дистанционно изследване на земната йоносфера. Дисперсионният характер на йоносферната плазма води до честотно зависимо въздействие върху разпространението на GNSS сигналите. Това позволява чрез двучестотни наблюдения да бъде определяно пълното електронно съдържание (Total Electron Content, TEC) по пътя на GNSS сигнала между спътника и приемника. Развитието на глобалните мрежи от постоянно действащи GNSS станции превръща този подход в един от основните методи за продължително наблюдение на пространствено-времевата изменчивост на йоносферата [52, 72, 103, 107].

Пълното електронно съдържание представлява интегрална характеристика на електронната концентрация в йоносферата и се изменя под въздействието на редица процеси в системата Слънце–магнитосфера–йоносфера–термосфера. Наблюдаваните изменения включват регулярни денонощни и сезонни компоненти, многогодишна изменчивост, свързана със слънчевия цикъл, както и краткотрайни отклонения при геомагнитни смущения [29, 64, 67, 75]. Поради това продължителните GNSS наблюдения позволяват в рамките на един и същ времеви ред да бъдат изследвани процеси с различни характерни времеви мащаби.

Особен научен интерес представлява поведението на йоносферата в полярните области и във високите географски ширини. Там нейното състояние е силно повлияно от взаимодействието между слънчевия вятър и магнитосферата, от преципитацията на енергетични частици в авроралните области и от преноса на плазма в полярната йоносфера. В резултат могат да се формират значителни пространствени градиенти на електронното съдържание, полярни плазмени структури и локални плазмени неоднородности [38, 69, 95, 100]. Подобни структури могат да бъдат съпроводени от бързи изменения на фазата на GNSS сигналите, йоносферна сцинтилация и затруднения при проследяването на фазата на носещия GNSS сигнал [18, 66, 112, 129, 132].

Изследването на тези процеси в Антарктика е свързано и със специфични наблюдателни ограничения. Плътността на действащата наземна инфраструктура е значително по-ниска в сравнение с много други части на света, а поддържането на продължителни наблюдения е затруднено от климатичните и логистичните условия. Поради това дългите времеви редове от отделни антарктически станции имат особено значение за изучаването на йоносферната изменчивост.

Ранните GPS изследвания в южните полярни области показват възможността за определяне на електронното съдържание от наземни станции и подчертават специфичните особености на спътниковите наблюдения при полярни условия [22, 36]. Последващи разработки потвърждават наличието на полярни плазмени структури в Южното полукълбо [69], значителни изменения на електронното съдържание над Антарктическия полуостров [47, 71, 111] и отчетлива сезонна и слънчево обусловена изменчивост в различни части на антарктическия сектор [79, 109].

Съществена част от изследванията в полярните области е насочена и към краткопериодичните йоносферни неоднородности. Регистрирани са фазови сцинтилации на GNSS сигнали в Антарктика както при условия на ниска слънчева активност [86], така и по време на геомагнитни бури [65, 101, 102]. Наблюдения от Южния полюс и други антарктически станции показват възможността високочестотните GNSS измервания да бъдат използвани за изучаване на локални плазмени структури [39, 121].

Особено значение за настоящото изследване има районът на Антарктическия полуостров и Южните Шетландски острови. За този регион са проведени изследвания на

фоновата изменчивост и смущенията на електронното съдържание [47, 71, 111], които показват значителната пространствено-времева динамика на йоносферата в непосредствена близост до о-в Ливингстън.

За самия о-в Ливингстън съществува продължителна традиция на геофизични и радиофизични наблюдения. Изследвани са йоносферните условия по високочестотна радиовръзка между Антарктика и Европа [16, 127], организацията и функционирането на геофизичната обсерватория при испанската база „Хуан Карлос I“ [97], както и геомагнитните вариации в района на острова [122]. Тези разработки потвърждават значението на Ливингстън като наблюдателна площадка за изследване на процесите в горната атмосфера и геокосмическата среда.

Важен контекст за настоящата монография е и развитието на българското научно присъствие на о-в Ливингстън. Началото на българската антарктическа дейност е поставено с първата българска експедиция през 1987–1988 г., а през следващите години Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ се развива като устойчива научна инфраструктура за провеждане на изследвания в района [9, 98, 99]. Натрупаните резултати от българската антарктическа програма в областта на науките за Земята, биологията и изследването на околната среда са обобщени в колективни научни издания [98].

Геодезическите изследвания постепенно се превръщат във важен компонент на българската научна дейност на острова. При проучванията около Българската антарктическа база са използвани GPS, класически геодезически и хидрографски измервания, както и цифрово моделиране на релефа [17]. Последващите изследвания систематизират развитието на геодезическите наблюдения и тяхното значение за изучаването на съвременните геофизични процеси на о-в Ливингстън [1].

Провеждани са и високоточни двучестотни GNSS наблюдения, свързани с геодинамични задачи и развитието на локална геодезическа мрежа [10, 60]. Постепенно кампанийният характер на част от тези наблюдения се допълва от сезонно действаща GNSS инфраструктура, включително станция KOH2.

Българските изследвания на острова придобиват и все по-изразен интегриран геофизичен характер. При подготовката на съвместни сеизмологични и геодезически изследвания са изпитани широколентова сеизмологична апаратура и GNSS приемници [24]. В следващ етап са развивани комплексни наблюдения на сеизмичността и строежа на земната кора, включително чрез съвместно използване на сеизмологични и GNSS измервания [40].

GNSS методите са приложени и при изследване на движението на ледниците. Георгиева, Димитрова и Гурев [48] съпоставят ледниково генерирани сеизмични събития с GNSS измервания на преместванията на ледниковата повърхност. Този подход е разширен в последващи проекти за съвместно изучаване на сеизмичността и ледниковата покривка на о-в Ливингстън [42]. Най-новите разработки включват и съчетаване на дистанционни наблюдения от Sentinel-1 с непосредствени GNSS измервания, използвани като наземна референция при определянето на скоростта на ледниците [133].

Тази последователност — от създаването на Българската антарктическа база, през топографските и геодезическите измервания, развитието на GPS и GNSS наблюденията и интеграцията им с други геофизични методи — представлява непосредствената научна и инфраструктурна предистория на използвания в настоящата монография времеви ред от KOH2.

Допълнителна актуалност на настоящото изследване произтича от неговия времеви обхват — **2019–2026 г.** Този период включва условията около минимума на слънчевата активност, възходящата фаза и периода на висока активност на 25-ия слънчев цикъл. Това създава възможност наблюденията от една и съща станция да бъдат използвани за проследяване на многогодишните изменения на йоносферното електронно съдържание при значително изменящо се слънчево въздействие.

Един от широко използваните показатели за количествено характеризиране на слънчевата активност е слънчевият радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm [118].

Български изследвания също показват неговата приложимост при моделиране и анализ на връзката между слънчевата активност и пълното електронно съдържание [82, 84]. Поради това оценката на тази зависимост представлява естествен компонент на многогодишното изследване.

Значително по-сложен е въпросът за реакцията на йоносферата при геомагнитни смущения. Геомагнитните бури могат да бъдат съпроводени както от увеличение, така и от намаление на електронната концентрация, а знакът и амплитудата на наблюдаваната реакция зависят от географското положение, сезона, местното време и развитието на конкретното смущение [29, 49, 75, 76]. Български изследвания на глобалната реакция на електронното съдържание също показват значителна пространствена неоднородност при силни геомагнитни събития [24, 25, 83, 90, 91]. Това налага геомагнитното въздействие да бъде разглеждано не като проста еднопосочна зависимост, а като част от сложната пространствено-времева динамика на йоносферата.

Друг актуален методически въпрос е надеждността на локално определеното електронно съдържание. GNSS оценките зависят от качеството на кодовите и фазовите наблюдения, инструменталните междучестотни отмествания, геометрията на наблюденията, приетия пространствен модел и конкретния алгоритъм за обработка [26, 35]. Поради това локален резултат не следва да бъде оценяван само чрез съпоставка с един външен продукт.

Развитието на глобалното йоносферно картографиране [52, 72, 107] и на продуктите на Международната GNSS служба [43, 51] предоставя важна основа за подобни сравнения. Съпоставките между различни глобални решения обаче показват, че те не са напълно еквивалентни и различията между тях се изменят във времето и пространството [89, 104, 130]. Това обосновава използването на няколко методически различни йоносферни продукта и отделен анализ на чувствителността към избраната глобална карта.

Наред с многогодишния и дневния анализ, високочестотните GNSS наблюдения предоставят възможност за изследване на краткопериодични фазови изменения. Физическите механизми на йоносферните нееднородности и сцинтилацията са подробно разглеждани в литературата [66, 129, 132], а разработени методики показват, че и геодезически GNSS приемници могат да бъдат използвани за характеризиране на фазови флуктуации при подходящ контрол на качеството [59].

Актуалността на настоящото изследване се определя следователно от съчетаването на продължителни GNSS наблюдения в антарктически условия, сравнителна оценка чрез няколко методически различни йоносферни продукта, анализ на многогодишната изменчивост през 25-ия слънчев цикъл, изследване на геомагнитно свързаните отклонения и експериментално използване на високочестотни фазови наблюдения. Подобна постановка позволява наблюденията от KOH2 да бъдат разглеждани едновременно като локален източник на информация за електронното съдържание и като средство за изучаване на йоносферните изменения в различни времеви мащаби.

1.2. Състояние на изследванията и преглед на литературните източници

1.2.1. Развитие на българските геодезически и геофизични изследвания на о-в Ливингстън

Българската научна дейност в Антарктика има вече дългогодишна история. Началото ѝ е поставено с първата българска антарктическа експедиция през 1987–1988 г., а последвалото изграждане и развитие на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ на о-в Ливингстън създава постоянна организационна и научна основа за провеждане на изследвания в района [9, 99]. Развитието на българската антарктическа програма и резултатите от различни научни направления са обобщени в колективното издание *Bulgarian Antarctic Research: A Synthesis* [98].

С разширяването на научната инфраструктура геодезическите изследвания придобиват все по-голямо значение. Александров и Цановски [2, 17] представят

резултати от геодезически и хидрографски изследвания в района на Българската антарктическа база, включващи GPS наблюдения, класически геодезически измервания, хидрографски методи и цифрово моделиране на релефа. Развитието на геодезическата наблюдателна инфраструктура включва и изграждането на първата българска мареографна станция на о-в Ливингстън, предназначена за наблюдение на морското ниво и за подпомагане на геодезическите и геофизичните изследвания в района [3].

Развитието на геодезическите наблюдения е систематизирано и в по-късни разработки, в които се разглежда приносът им към изучаването на съвременните геофизични процеси на о-в Ливингстън [4]. Преходът от кампанийни към по-продължителни наблюдения създава предпоставки геодезическата инфраструктура да бъде използвана не само за определяне на координати и деформации, но и за изследване на процеси в атмосферата и йоносферата.

Тази линия е продължена чрез изследвания, насочени към ролята на геодезическите наблюдения за проследяване на глобалните климатични промени [5]. Pashova и Alexandrov [93] представят първи резултати от анализа на приливните съставящи по мареографни регистрации от района на базата, а Dechev и съавтори [37] разработват уеб-базирана информационна среда за интегриране и представяне на данните от българските полярни изследвания.

Още по време на XXI Българска антарктическа експедиция (2012/2013 г.) са проведени високоточни GNSS наблюдения на първата GNSS станция край базата - KOH1, насочени както към геодезически задачи, така и към оценка на влиянието на йоносферните условия върху GNSS наблюденията в периода на нарастваща активност на 24-ия слънчев цикъл [10, 11, 12]. Последващото изграждане на локална геодезическа GNSS мрежа разширява възможностите за изучаване на движенията на земната повърхност и за пространствено свързване на различни геофизични наблюдения [60].

Особено значим е геодезическият проект, реализиран по време на 24-тата Българска антарктическа експедиция (2015/2016 г.) от Борислав Александров и Юри Цановски (УАСГ) и Петър Данчев и Георги Михайлов (Военно-географска служба към МО). В рамките на проекта са изградени и измерени геодезическа мрежа, извършени са наземни, GNSS, хидрографски и фотограметрични измервания и е приложено въздушно заснемане с безпилотна летателна система. Въз основа на получените данни през 2016 г. е създадена цифрова едромащабна топографска карта на района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ в два картни листа, в мащаб 1:2000 [1, 4, 8]. През следващата експедиция Данчев и Михайлов разширяват заснетата с безпилотна летателна система територия, като резултатите са използвани за допълване на съдържанието на топографските карти.

Българските изследвания постепенно придобиват и ясно изразен интердисциплинарен характер. Към тази линия на изследвания се отнасят и съвместните геолого-геодезични работи на нос Хана с участието на Данчев и Михайлов, при които геодезическите методи се използват за пространствено осигуряване и документиране на геоложките проучвания [7]. Паралелно с това Димитрова и съавтори [41] описват изпитването и подготовката на сеизмологична и GNSS апаратура за съвместни изследвания в района на Българската антарктическа база. Подобна постановка позволява едновременно да се проследяват различни прояви на геодинамичните и ледниковите процеси.

В последващ етап е развита система за наблюдение на сеизмичността и строежа на земната кора на о-в Ливингстън и прилежащите райони [40]. В тези изследвания участват Лилия Димитрова, Гергана Георгиева, Васил Гурев, Иван Георгиев и други български специалисти, като се съчетават сеизмологични и GNSS методи.

Особено показателно за развитието на това направление е използването на GNSS при изследване на динамиката на ледниците. Георгиева, Димитрова и Гурев [48] анализират ледниково генерирани сеизмични събития от ледник Перуника и ги съпоставят с GNSS измервания на преместванията на ледниковата повърхност. По този

начин геодезическите наблюдения се използват като количествена основа за интерпретация на регистрираната геофизична активност.

Този подход е продължен при съвместното изучаване на сеизмичността и ледниковата покривка на острова [42]. GNSS измерванията предоставят информация за движението на ледниците, която може да бъде съпоставена със сеизмични наблюдения и с други геофизични данни.

Паралелно с преките геодезически наблюдения се развива и приложението на спътниковите дистанционни методи за количествено изследване на динамиката на ледниците. Атанасова-Златарева и Николов разработват карти на скоростта на ледници на о-в Ливингстън въз основа на радарни изображения Sentinel-1 [21]. В последващо изследване са анализирани времеви редове от SAR данни за летните сезони 2021–2022 и 2022–2023 г., като е предвидено получените скорости да бъдат съпоставени и с архивни GNSS измервания на преместванията на точки върху ледник Перуника [20]. По този начин дистанционните и наземните геодезически наблюдения се разглеждат като взаимно допълващи се източници на информация за динамиката на ледниковата покривка.

Това направление е продължено и от специалисти на МГУ „Св. Иван Рилски“. Берданков и Александрова прилагат радарни дистанционни методи и метода на проследяване на преместването между последователни изображения (*offset tracking*) от Sentinel-1 за регистриране на движението на ледник Перуника [6]. Разработката разширява набора от геодезически и дистанционни подходи, използвани за наблюдение на ледниковите изменения в непосредствена близост до Българската антарктическа база.

Сред най-актуалните разработки са интеграцията на преките GNSS наблюдения със спътниковите дистанционни методи. Йорданов, Гурев и Георгиева [133] използват GNSS измервания като наземна референция при оценяване на скоростта на ледниците чрез изображения Sentinel-1. Също така, екип с участието на автора извършва през пролетта на 2018 г. наземно лазерно сканиране, георефериранo с помощта на данни от KOH2 [19]. Така GNSS се превръща в свързващ елемент между наземните геодезически наблюдения, геофизичния мониторинг и дистанционните изследвания.

Развитието на българската геодезическа инфраструктура на о-в Ливингстън достига нов етап с продължителните GNSS наблюдения от станция KOH2. Тяхното значение не се ограничава до националните изследователски задачи. Наблюденията от KOH2 са включени в международната инициатива GIANT-REGAIN (Geodynamics In ANTarctica based on REprocessing GNSS dAta Initiative), подкрепена от Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) и тясно свързана с експертната група Geodetic Infrastructure in Antarctica (GIANT). Проектът е насочен към събиране и еднородна преобработка на наличните GNSS наблюдения върху скална основа в Антарктика за периода 1995–2021 г. В публикувания обобщен набор KOH2 е изрично посочена сред станциите, които допринасят за увеличаване на пространственото покритие на антарктическата GNSS инфраструктура [27]. Следователно частта от многогодишния времеви ред на KOH2, попадаща в обхвата на GIANT-REGAIN, има приложение и в континенталния геодинамичен анализ на Антарктика [94].

По този начин българските геодезически изследвания на о-в Ливингстън обхващат последователно класически геодезически и хидрографски измервания, кампанийни и постоянни GNSS наблюдения, геодинамични изследвания, картографиране, дистанционно наблюдение на ледниците и интеграция с други геофизични методи. Това развитие се вписва в по-общата тенденция към интегриране на различни методи за придобиване, обработка, анализ и визуализация на пространствена информация в рамките на съвременните геопространствени технологии [15]. В по-широкия национален контекст развитието на GNSS технологиите в България е свързано с интегрирането на страната в европейските геодезически референтни системи и с изграждането на национална GNSS инфраструктура, разглеждани в работите на Милев и съавтори [13, 14, 77]. Настоящата монография разширява приложението на наблюдателната GNSS инфраструктура към системен анализ на

йоносферното електронно съдържание, като едновременно поставя KOH2 в контекста на продължителната българска научна дейност на о-в Ливингстън и на международната антарктическа геодезическа мрежа.

1.2.2. Определяне и картографиране на йоносферното електронно съдържание чрез GNSS

Използването на спътникови навигационни наблюдения за изследване на йоносферата се развива интензивно с разширяването на глобалната GPS, а впоследствие и GNSS наблюдателна инфраструктура. Mannucci и съавтори [72] представят една от основните методики за глобално картографиране на пълното електронно съдържание чрез наземни GPS наблюдения. Hernández-Pajares и съавтори [52] развиват подходи за глобално определяне на йоносферните параметри от разпределена мрежа от станции, а Schaer [107] систематизира методите за картографиране и прогнозиране на йоносферата чрез GPS.

С увеличаването на броя на постоянно действащите станции възниква възможност за автоматизирано получаване на големи масиви от йоносферни данни. Rideout и Coster [103] разработват система за автоматизирана обработка на GPS наблюдения и определяне на глобалното електронно съдържание, свързана с разпространението на данни чрез системата Madrigal.

Основен методически проблем при определянето на електронното съдържание е оценяването на инструменталните междучестотни отмествания. Ciraolo и съавтори [35] анализират влиянието на калибрационните грешки върху експериментално определеното електронно съдържание по направлението спътник–приемник. Brunini и Azpilicueta [26] оценяват точността на GPS-базираните стойности на наклоненото пълно електронно съдържание. Резултатите показват, че надеждната обработка изисква не само използване на двучестотната зависимост, но и подходящ контрол на инструменталните ефекти и качеството на наблюденията.

Развитието на Международната GNSS служба създава условия за системно глобално картографиране на йоносферата. Dow, Neilan и Rizos [43] разглеждат развитието на службата в условията на разширяващите се навигационни системи, а Hernández-Pajares и съавтори [51] оценяват глобалните карти на вертикалното пълно електронно съдържание като дългосрочен източник на йоносферна информация.

Глобалните карти обаче не представляват абсолютно точна локална референция. Orús и съавтори [89] извършват проверка на GPS-базирани карти чрез независимо определено електронно съдържание от спътникова алтиметрия. Roma-Dollase и съавтори [104] сравняват различни глобални GNSS решения в рамките на един слънчев цикъл и установяват систематични различия между тях. Wielgosz и съавтори [130] анализират качеството на глобалните карти при различни нива на слънчева активност.

Тези резултати са съществени за настоящото изследване, тъй като показват, че един глобален продукт не следва да се приема като абсолютно еталонна локална оценка. Съпоставянето с различни решения позволява да се оцени чувствителността на резултатите към избраната глобална йоносферна карта.

Наред с наблюдателно базираните продукти широко приложение имат емпиричните и климатологичните модели на йоносферата. Международният референтен модел на йоносферата представлява една от най-използваните системи за описание на средното състояние на йоносферната плазма. Bilitza и съавтори [23] представят развитието на IRI-2016, а програмната реализация PyIRI позволява моделните изчисления да бъдат включени в автоматизирани аналитични процедури [45].

При използването на подобен модел за сравнение следва да бъде разграничено моделното възпроизвеждане на известни климатологични зависимости от независимо наблюдателно потвърждение. Показатели за слънчевата активност участват в самото моделиране, поради което съответствието между моделното електронно съдържание и слънчевата активност не може да се разглежда като независимо доказателство за тази зависимост.

1.2.3. Български изследвания на йоносферното електронно съдържание

Съществен принос към методите за изследване и моделиране на йоносферата имат и български изследователи. Станков и Мухтаров [116] разглеждат използването на пълното електронно съдържание при реконструиране на височинния профил на електронната концентрация. Впоследствие Кутиев и съавтори [70] използват параметри, получени от GNSS оценки на електронното съдържание, за подобряване на моделното възстановяване на електронната концентрация.

По-нататъшно развитие на това направление е представено в работите на Мухтаров, Панчева, Андонов и Пашова [80, 81]. Чрез продължителни глобални GNSS редове е разработен и оценен емпиричен модел на пълното електронно съдържание, отчитащ измененията, свързани със слънчевия цикъл, сезонността и денонощния ход.

Тези разработки са непосредствено релевантни за анализа на продължителни GNSS времеви редове, тъй като показват необходимостта наблюдаваната изменчивост да бъде разглеждана като резултат от едновременното действие на процеси с различни характерни времеви мащаби.

Специално внимание в българските изследвания е отделено на геомагнитно обусловената изменчивост. Мухтаров, Андонов и Панчева [83] разработват глобален емпиричен модел на реакцията на пълното електронно съдържание към геомагнитната активност, както и пространствената структура на йоносферните аномалии при геомагнитни бури [90].

Регионално приложение на подобна постановка е разработено за Балканския полуостров [82]. Слънчевото въздействие е характеризирано чрез слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm, а геомагнитното — чрез индекса **Kp**. Макар изследваният район да е различен от Антарктика, методическият подход за разграничаване на слънчевата, сезонната и геомагнитно свързаната изменчивост е релевантен и за настоящото изследване.

По-новите български разработки продължават тази линия. Мухтаров и Божилова [84] анализират влиянието на краткопериодичните изменения на слънчевата активност върху електронното съдържание. Панчева, Мухтаров и Божилова [91] изследват продължителните пространствени изменения на глобалното електронно съдържание при геомагнитна буря, както и глобалната йоносферна реакция при екстремното геомагнитно събитие през май 2024 г. [24]. Линията е продължена и с анализ на по-нови геомагнитни събития [25].

Паралелно с глобалните модели, български изследвания разглеждат и локалната реакция на йоносферата и GNSS наблюденията при силни геомагнитни смущения. Сребров и Пашова [113, 114] анализират измененията на параметрите на GNSS сигнала и съпоставят определено от GPS електронно съдържание с моделни йоносферни оценки при силни геомагнитни бури. В екип с Кунчев те използват непрекъснат вълнов анализ за изследване на локалните прояви на екстремната геомагнитна буря от 29–31 октомври 2003 г. [115], а впоследствие разширяват подхода чрез съвместно използване на мултидисциплинарни геомагнитни, йоносферни, GNSS и спътникови данни [92].

Съвкупността от посочените публикации показва наличието на утвърдена българска научна линия в областта на GNSS-базираното изследване и моделиране на пълното електронно съдържание, неговата зависимост от слънчевата активност и реакцията на йоносферата при геомагнитни смущения.

1.2.4. Слънчева и геомагнитна изменчивост на йоносферата

Дългопериодичните изменения на йоносферата са тясно свързани с измененията в слънчевото излъчване. Един от най-разпространените показатели за слънчевата активност е слънчевият радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm. Tapping [118] разглежда физическия произход, измерването и приложението на този показател, който широко се използва като косвен индикатор за измененията в слънчевото излъчване, влияещо върху горната атмосфера.

Разграничаването на това дългопериодично влияние от реакцията при геомагнитни смущения представлява по-сложен проблем. Gonzalez и съавтори [49] систематизират основните характеристики на геомагнитните бури. Индексът Dst и свързаните с него изменения на магнитното поле са разглеждани от Sugiura [117] и Iyemori [58], а индексът Kp и производните от него показатели за геомагнитна активност са обобщени от Matzka и съавтори [73].

От гледна точка на йоносферната реакция Buonsanto [29] показва разнообразието на физическите механизми, които могат да доведат както до положителни, така и до отрицателни йоносферни бури. Mendillo [75] разглежда закономерностите на буревата реакция чрез пълното електронно съдържание, а Mendillo и Klobuchar [76] обобщават пространственото и времевото развитие на тези изменения.

Общият извод от тези разработки е, че реакцията на йоносферата при геомагнитно смущение зависи от географското и геомагнитното положение, местното време, сезона, фазата и продължителността на смущението и състоянието на термосферата. Поради това локалната реакция не може да се описва чрез универсално увеличение или намаление на електронното съдържание.

За статистическото изследване на геомагнитното влияние следователно е целесъобразно основният слънчев и сезонен фон да бъде разграничен от краткопериодичните отклонения. Освен изменението на самото локално електронно съдържание може да бъде изследвана и промяната в съгласуваността между локалните и глобалните йоносферни оценки.

1.2.5. Йоносферна изменчивост в полярните области и фазови флуктуации

В полярните области особено значение имат плазмените структури, резките пространствени градиенти и процесите на пренос на йоносферна плазма. Pi и съавтори [95] демонстрират възможността GNSS мрежите да бъдат използвани за мониторинг на йоносферни нееднородности. De Franceschi и съавтори [38] изследват динамиката на плазмени структури във високите географски ширини по време на силни геомагнитни смущения, а Prikryl и съавтори [100] разглеждат съвместно измененията на електронното съдържание, фазовата сцинтилация и прекъсванията при проследяване на GNSS сигналите.

Spogli и съавтори [112] анализират пространственото и времевото разпределение на GPS сцинтилациите в полярните и умерените географски ширини. Andalsvik и Jacobsen [18] показват, че значими смущения в GNSS наблюденията в полярните области могат да бъдат регистрирани и при събития, които не се характеризират като екстремни геомагнитни бури.

По-нови изследвания показват също, че наличието на полярна плазмена структура не предполага задължително силна фазова или амплитудна сцинтилация [30]. Поради това пространствените структури на електронното съдържание и краткопериодичните изменения на GNSS сигналите следва да бъдат разглеждани като свързани, но не напълно еквивалентни характеристики на състоянието на йоносферата.

Физическата връзка между йоносферните нееднородности и сцинтилацията на радиосигналите е разгледана от Yeh и Liu [132], а Wernik, Secan и Fremouw [129] обобщават развитието на представите за тези процеси. Kintner, Ledvina и de Paula [66] анализират конкретното им въздействие върху GPS наблюденията, а Van Dierendonck, Klobuchar и Hua [125] разглеждат принципите за наблюдение чрез специализирани сцинтилационни приемници.

За настоящото изследване е особено релевантна възможността фазовите изменения да бъдат характеризирани и чрез стандартни геодезически GNSS приемници. Juan и съавтори [59] показват приложимостта на подобен подход при подходящо филтриране и контрол на качеството. Това създава методическа основа за експерименталното използване на високочестотните данни от KOH2, като едновременно с това изисква получените показатели да бъдат ясно разграничени от стандартните сцинтилационни индекси.

1.2.6. Изследвания на йоносферата в Антарктика

Специализираните изследвания на антарктическата йоносфера имат продължителна история. Beggs, Essex и Rasch [22] представят наблюдения на пълното електронно съдържание от станция Casey, а Clynch и Henry [36] разглеждат влиянието на полярната йоносфера върху GPS и диференциалните GPS наблюдения.

Krankowski и съавтори [69] установяват полярни плазмени структури чрез измененията на електронното съдържание, регистрирани от GPS станции в Южното полукълбо. Тези резултати показват възможността наземните GNSS наблюдения да бъдат използвани за проследяване на пространствената динамика на плазмата и в южната полярна област.

За Антарктическия полуостров особено релевантни са изследванията на Lisachenko и съавтори [71], Sopin и съавтори [111] и Galushko и съавтори [47]. В тях са разгледани измененията на пълното електронно съдържание, фоновата му изменчивост и статистиката на йоносферните смущения. Тези публикации, наред с [31, 119, 134], представляват важен регионален контекст за настоящото изследване, тъй като о-в Ливингстън е част от същия географски сектор.

Mosert и съавтори [79] анализират измененията на параметри на F2 областта и GPS-базираното пълно електронно съдържание в антарктическия сектор. Seemala и съавтори [109] изследват сезонната зависимост и влиянието на слънчевата активност върху електронното съдържание над антарктическа станция.

Значителна група изследвания е насочена към фазовите флуктуации и сцинтилацията. Ngwira, McKinnell и Cilliers [86] регистрират фазова сцинтилация на антарктическа станция при условия на слънчев минимум. Kinrade и съавтори [65] разглеждат продължително сцинтилационно събитие над Антарктика по време на геомагнитна буря. Deshpande и съавтори [39] представят резултати от специализиран GPS приемник на Южния полюс, а Tiwari и съавтори [121] анализират йоносферни нееднородности чрез GPS наблюдения.

Priyadarshi, Zhang и Ma [102] разглеждат сцинтилационни прояви в Антарктика при геомагнитно смутени условия, а Priyadarshi, Zhang и Wang [101] сравняват моделни и наблюдавани характеристики на сцинтилацията. Тези резултати показват, че високочестотните GNSS наблюдения представляват ценен допълващ източник на информация за краткопериодичната динамика на антарктическата йоносфера.

Макар и не точно свързани с йоносферата, в статията на Козарев [68] са представени първоначални научни данни, събрани от българската астрономическа обсерватория в Антарктида. Разположена в базата „Св. Климент Охридски“ на остров Ливингстън, обсерваторията се възползва от уникалните полярни условия – като продължителните зимни нощи и минималното светлинно замърсяване – за провеждане на наблюдения на далечния космос.

За самия о-в Ливингстън специализираната литература е насочена в значителна степен към геомагнитни, радиофизични, геодезически, глациоложки и други геофизични наблюдения. Това подчертава научната значимост на района, но едновременно с това показва възможността наличната GNSS инфраструктура да бъде използвана по-пълноценно и за продължителен анализ на йоносферното електронно съдържание.

1.2.7. Изводи от литературния обзор и обосновка на настоящото изследване

Прегледът на литературните източници показва наличие на значителна международна база от разработки по определяне на пълното електронно съдържание от GNSS наблюдения, глобално йоносферно картографиране, емпирично моделиране, анализ на слънчевоцикличната и геомагнитната изменчивост и изследване на плазмените нееднородности в полярните области.

Съществува и утвърдена група български разработки в областта на моделирането на пълното електронно съдържание и неговата реакция спрямо слънчевото и геомагнитното въздействие [24, 25, 70, 80, 81, 82, 83, 84, 90, 91, 116]. Паралелно с това е развита последователна българска линия на антарктически

геодезически и геофизични изследвания, включваща изграждането на научната инфраструктура, геодезическото и хидрографското картиране, кампанийни и постоянни GNSS наблюдения, сеизмологичен мониторинг и GNSS изследвания на динамиката на ледниците [1, 9, 10, 17, 40, 41, 42, 48, 60, 98, 99, 133].

В прегледаните литературни източници обаче не беше установено изследване за района на Българската антарктическа база, което да обединява в една постановка многогодишно локално определяне на йоносферното електронно съдържание от станция KOH2, съпоставка с няколко методически различни йоносферни продукта, анализ на чувствителността спрямо избора на глобална йоносферна карта, изследване на развитието през 25-ия слънчев цикъл, оценка на геомагнитно свързаните отклонения след отделяне на основния слънчев и сезонен фон и експериментален анализ на високочестотни фазови GNSS наблюдения.

Настоящата монография се позиционира именно в това съчетаване на данни, методи и времеви мащаби. Не се приема, че отделните използвани методи са нови сами по себе си. Научната постановка се основава на съвместното им приложение към един продължителен локален времеви ред от GNSS измервания на KOH2 и на системната оценка на съгласуваността между различни представяния на състоянието на йоносферата.

1.3. Научен проблем, обект и предмет на изследването

Съвременните GNSS методи позволяват от постоянно действаща станция да бъде получен продължителен времеви ред на локалното йоносферно електронно съдържание. Самото наличие на такъв ред обаче не е достатъчно за еднозначна научна интерпретация. Получените стойности зависят от наличността и качеството на първичните наблюдения, използваните двучестотни комбинации, оценката на инструменталните отмествания, начина на пространствено преобразуване и конкретната програмна реализация.

Допълнителна трудност произтича от факта, че различните външни източници на информация за йоносферното електронно съдържание не представляват напълно еквивалентни оценки. Локалното решение от една GNSS станция, глобалната йоносферна карта, продуктът, получен чрез различна наблюдателна мрежа, и емпиричният модел имат различна пространствена и времева представителност. Поради това различията между тях могат да отразяват както методическите особености на отделните продукти, така и реалната пространствено-времева нееднородност на йоносферата.

Този проблем е особено значим в Антарктика, където наземната наблюдателна инфраструктура е сравнително рядка, а процесите в полярната йоносфера могат да предизвикват значителни локални и регионални изменения на електронната концентрация.

Допълнителна особеност на използвания в настоящото изследване набор е неравномерното времево покритие през периода 2019–2026 г. След подготовката и контрола на данните в многогодишния анализ са включени общо 326 денонощия с налични данни, като 176 от тях принадлежат на 2024 г. При обикновено обединяване на всички наблюдения тази година би получила значително по-голяма статистическа тежест от останалите. Следователно е необходимо да бъде оценено не само наличието на статистически зависимости, но и тяхната чувствителност към неравномерното представяне на отделните години.

На тази основа **основният научен проблем** на настоящата монография се формулира като необходимостта да бъде установено доколко локално определеното от GNSS наблюдения йоносферно електронно съдържание над о-в Ливингстън представя надеждно йоносферната изменчивост и как неговото поведение и съгласуваността му с различни външни йоносферни продукти се изменят при променящи се слънчеви, сезонни и геомагнитни условия през 25-ия слънчев цикъл.

Към този проблем се добавя въпросът доколко високочестотните геодезически GNSS наблюдения от същата станция могат да предоставят допълнителна информация за краткопериодични фазови изменения, които не се проявяват в часовите и дневните стойности на електронното съдържание.

Обект на изследването е пространствено-времевата изменчивост на електронното съдържание на йоносферата над района на о-в Ливингстън, Южни Шетландски острови, Антарктика.

Предмет на изследването са методите за определяне и оценка на йоносферното електронно съдържание от двучестотни GNSS наблюдения на станция KOH2, съпоставимостта на получените локални оценки с различни външни йоносферни продукти, измененията им във връзка със слънчевата, сезонната и геомагнитната активност и възможността високочестотните фазови наблюдения да бъдат използвани за характеризиране на краткопериодичната йоносферна изменчивост.

1.4. Цел и задачи на изследването

Основната цел на изследването е да се разработи, приложи и оцени последователна методика за определяне и анализ на йоносферното електронно съдържание от GNSS наблюдения на станция KOH2 и чрез нея да се изследват неговата представителност и пространствено-времева изменчивост над о-в Ливингстън през периода 2019–2026 г. във връзка със слънчевата, сезонната и геомагнитната активност.

За постигането на тази цел са поставени следните задачи:

1. **Да се систематизират теоретичните и методическите основи** на определянето на йоносферното електронно съдържание чрез двучестотни GNSS наблюдения, включително особеностите на йоносферната изменчивост в полярните области.
2. **Да се организира, унифицира и подготви многогодишният наблюдателен архив на станция KOH2**, като се отчетат различните първични формати, честоти на запис, периоди на наличност и изискванията за контрол на качеството.
3. **Да се получат локални оценки на йоносферното електронно съдържание чрез две различни програмни обработки — PyTECGg и pyOASIS**, и да се оцени тяхната взаимна съгласуваност.
4. **Да се извърши валидация чрез съпоставка с няколко методически различни външни йоносферни продукта**, включително окончателните глобални йоносферни карти на Международната GNSS служба, наблюдателно базирания продукт Madrigal GNSS TEC и моделните оценки на PyIRI.
5. **Да се оцени чувствителността на сравнителните резултати към избора на глобален йоносферен продукт** чрез отделните решения на аналитичните центрове CODE, ESA, JPL и UPC, без те да се разглеждат като четири независими валидации.
6. **Да се формират времево съгласувани извадки и единни статистически критерии**, позволяващи локалните и външните йоносферни продукти да бъдат сравнявани за едни и същи моменти.
7. **Да се изследват многогодишните и сезонните изменения на йоносферното електронно съдържание през периода 2019–2026 г.** и да се оцени зависимостта им от слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm.
8. **Да се оцени влиянието на неравномерното времево покритие върху многогодишните статистически зависимости** чрез сравнение между метода на най-малките квадрати (Ordinary Least Squares, OLS) и претегления метод на най-малките квадрати (Weighted Least Squares, WLS), при който отделните години имат еднаква обща статистическа тежест.

9. **Да се изследва връзката между геомагнитната активност и краткопериодичните отклонения на локалните и външните йоносферни оценки** след отстраняване на основния слънчев и сезонен фон, чрез сравнение на спокойни и смутени условия, анализ при времево отместване и оценка на устойчивостта чрез бутстрап.
10. **Да се разработи и приложи експериментален подход за анализ на високочестотни 10 Hz GNSS наблюдения**, основан на двучестотни геометрично независими фазови комбинации, с цел оценка на възможността за регистриране на краткопериодични фазови флуктуации над района на станцията.

1.5. Обхват и методическа постановка

Изследването е пространствено съсредоточено върху района на сезонно действащата GNSS станция KOH2 на о-в Ливингстън, Южни Шетландски острови, Антарктика. Основният експериментален материал се състои от двучестотни GNSS наблюдения на станцията, налични с различна честота на запис и в различни първични формати.

Основният времеви обхват е 2019–2026 г., което позволява да бъде разгледана съществена част от развитието на 25-ия слънчев цикъл. Наличността на наблюденията не е равномерна. След подготовката и прилагането на критериите за допустимост в многогодишния набор са включени общо 326 денонощия с налични данни. Разпределението им между отделните години е силно неравномерно, като повече от половината принадлежат на 2024 г. Поради това наборът не се интерпретира като равномерно представена климатологична редица.

Предварителната подготовка включва преобразуване и унифициране на първичните GNSS наблюдения, създаване на стандартизирани наблюдателни файлове, проверка на времевото покритие и подготовка на необходимите навигационни и прецизни орбитални продукти. Използваните за автоматизация на обработката и валидацията собствени скриптове са архивирани в Zenodo като *KOH2 GNSS Ionospheric TEC Processing and Validation Scripts*, Version 1.0.1 [62].

Определянето на йоносферното електронно съдържание се основава на двучестотни кодови и фазови GNSS наблюдения. Чрез геометрично независими линейни комбинации (*geometry-free combinations, GF*) се отделя честотно зависимата йоносферна компонента от основните честотно независими влияния. Теоретичната основа и конкретните комбинации са разгледани подробно в Глава 2.

За локалното определяне на електронното съдържание са използвани две различни програмни обработки — PyTECGg и pyOASIS. Основният многогодишен локален времеви ред е формиран чрез PyTECGg, докато pyOASIS се използва предимно за допълваща сравнителна оценка и диагностична проверка. Тъй като и двете обработки използват наблюденията от една и съща станция, тяхната съпоставка не се разглежда като независима външна валидация. Външната оценка на локалните резултати включва продукти с различен произход и пространствено представяне. Използвани са окончателните глобални йоносферни карти на Международната GNSS служба, наблюдателно базираният продукт Madrigal GNSS TEC и моделните оценки на PyIRI.

PyIRI се използва като моделен климатологичен фон, а не като независимо потвърждение на зависимостта между електронното съдържание и слънчевата активност, тъй като параметри, свързани със слънчевата активност, участват като входни величини в модела. Допълнително са използвани индивидуалните глобални йоносферни решения на аналитичните центрове CODE, ESA, JPL и UPC. Те не се разглеждат като четири независими валидации, а като основа за анализ на чувствителността спрямо избора на глобален йоносферен продукт [104, 130].

За ограничаване на влиянието на различната времева наличност между продуктите сравнителният анализ се извършва върху общи времево съгласувани извадки. По този начин статистическите характеристики се определят за едни и същи

моменти и установените различия не се смесват с различия в наблюдателното покритие.

Многогодишният анализ е насочен към разграничаване на влиянието на слънчевата активност и сезонността. Слънчевата активност е представена чрез слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm [118], а сезонният ход — чрез годишна и полугодишна хармонична компонента. Поради силно неравномерното представяне на отделните години е извършен и анализ на чувствителността към статистическото претегляне. Резултатите, получени чрез метода на най-малките квадрати, са сравнени с резултатите от претегления метод на най-малките квадрати, при който всяка година получава еднаква обща статистическа тежест.

Геомагнитно свързаната изменчивост се анализира след отстраняване на основния слънчев и сезонен фон. Използвани са показателите Kp, Dst и SYM-H, характеризиращи различни аспекти на геомагнитната активност [49, 58, 73, 117]. Разглеждат се както остатъчните изменения на локалното електронно съдържание, така и различията между отделните йоносферни продукти.

За допълнителна оценка се сравняват спокойни и геомагнитно смутени денонощия. Анализът е разширен и чрез времево отместване, при което анализираният показател за денонощието D се съпоставя с геомагнитната активност през същото денонощие D, през предходното денонощие $D-1$ и две денонощия по-рано $D-2$.

Устойчивостта на установените зависимости се оценява чрез два допълващи се подхода за преизвадков анализ. Бутстрапът по години проверява чувствителността на резултатите към неравномерното представяне на отделните години, а 7-дневният блоков бутстрап отчита зависимостта между близки във времето наблюдения.

Последната част на изследването има експериментален характер и използва високочестотни GNSS наблюдения с честота 10 Hz за 1 януари 2025 г. Анализът се основава на двучестотни геометрично независими фазови комбинации, контрол на непрекъснатостта на наблюденията, високочестотно филтриране и ограничения според височината на спътниците.

Полученият показател се използва за характеризиране на краткопериодичните фазови флуктуации и не се отъждествява със стандартен сцинтилационен индекс. Особено значение при интерпретацията има едновременното регистриране на повишени стойности при няколко различни GPS и GLONASS спътника, което намалява вероятността наблюдаваното изменение да е резултат единствено от локален ефект по едно направление на наблюдение.

По този начин методическата постановка на монографията обхваща три взаимно допълващи се времеви равнища: многогодишна изменчивост, свързана предимно със слънчевия цикъл и сезонността; дневни отклонения, разглеждани във връзка с геомагнитната активност; и краткопериодични фазови изменения, анализирани чрез високочестотните GNSS наблюдения.

1.6. Структура на монографията

Монографията е структурирана в девет глави, последвани от заключение и литература. Последователността на изложението преминава от теоретичните основи и характеристиката на използваните данни към методите за обработка, сравнителната оценка, анализа на резултатите в различни времеви мащаби и тяхната обобщена интерпретация. Допълнителните данни и резултатни таблици, необходими за независима проверка на основните количествени резултати, са публикувани в специализирания набор за възпроизводимост [63].

Глава 1 „Въведение“ обосновава актуалността на изследването, представя състоянието на научните разработки по разглежданата проблематика, формулира научния проблем, обекта, предмета, целта и задачите и определя обхвата и методическата постановка на работата.

Глава 2 „Теоретични основи на GNSS изследванията на йоносферата“ представя физическата и методическата основа за интерпретиране на GNSS

наблюденията. Разгледани са структурата и изменчивостта на йоносферата, слънчевата и геомагнитната активност, основните GNSS наблюдавани величини, разпространението на сигналите през йоносферната плазма, двучестотните линейни комбинации, йоносферното електронно съдържание и основните източници на неопределеност.

Глава 3 „Район на изследване, данни и обработка“ характеризира о-в Ливингстън и станция KOH2, периода и наличността на GNSS наблюденията, организацията на първичния архив и използваните външни йоносферни, слънчеви и геомагнитни данни. Особено внимание е отделено на неравномерното времево покритие и неговото значение за последващия статистически анализ.

Глава 4 „Определяне на TEC от GNSS наблюденията на KOH2“ представя последователността за подготовка и обработка на наблюденията и методите за получаване на локални оценки чрез PyTECGg и pyOASIS. Разгледани са предварителната обработка, двучестотните комбинации, контролът на качеството и формирането на крайните времеви редове.

Глава 5 „Методика и резултати от валидацията и сравнителния анализ“ оценява съгласуваността на локалните решения с външни йоносферни продукти. Извършени са съпоставки с окончателните глобални йоносферни карти на Международната GNSS служба, Madrigal GNSS TEC и PyIRI, както и анализ на чувствителността спрямо индивидуалните глобални решения на CODE, ESA, JPL и UPC.

Глава 6 „Многогодишни изменения на TEC през 25-ия слънчев цикъл“ разглежда годишната и месечната изменчивост през периода 2019–2026 г., зависимостта от слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm и чувствителността на резултатите към неравномерното представяне на отделните години. Анализирани са също остатъчните изменения и различията между йоносферните продукти във връзка с геомагнитната активност, спокойните и смутените условия и времевото отместване. Статистическата устойчивост на резултатите е проверена чрез бутстрап по години и 7-дневен блоков бутстрап.

Глава 7 „Експериментален анализ на краткопериодични фазови флуктуации от 10 Hz GNSS наблюдения“ разширява изследването към значително по-кратки времеви мащаби. Разработена и приложена е процедура за анализ на двучестотни геометрично независими фазови комбинации от високочестотните наблюдения за представително денонощие. Оценена е възможността за установяване на ограничени интервали с едновременно повишени фазови флуктуации при няколко различни спътника, като получените показатели са ясно разграничени от стандартните сцинтилационни индекси.

Глава 8 „Обобщена интерпретация на резултатите“ обединява резултатите от локалното определяне, валидацията, многогодишния анализ, изследването на геомагнитно свързаните изменения и високочестотния експеримент. Обсъждат се надеждността и представителността на локалните оценки, значението на избора на референтен йоносферен продукт, ограниченията на изследването и перспективите за неговото развитие.

Глава 9 „Основни резултати и научни приноси“ систематизира получените резултати, формулира научните и методическите приноси и определя приложната стойност на разработените процедури.

В **Заключението** са обобщени основните закономерности, установени чрез анализа в различни времеви мащаби, и са очертани възможностите за продължаване на времевия ред на KOH2, включване на допълнителни антарктически станции, разширяване на високочестотния анализ и независимо валидиране на краткопериодичните фазови изменения.

2. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА GNSS ИЗСЛЕДВАНИЯТА НА ЙОНОСФЕРАТА

Използването на GNSS наблюдения за изследване на йоносферата се основава на физическата връзка между електронната концентрация в йоносферната плазма и разпространението на радиосигналите. Поради дисперсионния характер на йоносферата кодовите и фазовите GNSS наблюдения съдържат честотно зависима компонента, чрез която може да бъде определено пълното електронно съдържание по пътя на сигнала. Коректното извличане и интерпретиране на тази информация изисква познаване както на физическите процеси в йоносферата, така и на особеностите на GNSS сигналите и измерванията.

Изменчивостта на електронното съдържание се определя от съвместното действие на слънчевото излъчване, атмосферния състав и динамика, геомагнитното поле и процесите на взаимодействие между слънчевия вятър и магнитосферата. Тези фактори предизвикват изменения в широк диапазон от времеви и пространствени мащаби – от денонощни, сезонни и свързани със слънчевия цикъл вариации до краткопериодични смущения и пространствени неоднородности. Особено сложна е тази изменчивост във високите географски ширини, където йоносферата е силно свързана с процесите в магнитосферата.

В настоящата глава последователно са разгледани структурата и изменчивостта на земната йоносфера, влиянието на слънчевата и геомагнитната активност, основните характеристики на GNSS системите и наблюдаваните величини, разпространението на GNSS сигналите през йоносферата и принципите за определяне на STEC и VTEC. Разгледани са също инструменталните влияния и основните източници на грешки, показателите за краткопериодични изменения на TEC и физическите основи на йоносферната сцинтилация. Тази теоретична основа служи за обосноваване на методите за обработка и анализ, приложени в следващите глави.

2.1. Структура и изменчивост на земната йоносфера

2.1.1. Образуване и основни области на йоносферата

Йоносферата представлява йонизираната част на горната земна атмосфера, в която концентрацията на свободни електрони и йони е достатъчно висока, за да оказва съществено влияние върху разпространението на радиовълните. Тя не представлява отделен атмосферен слой с ясно определени граници, а област, в която неутралната атмосфера и йонизираната плазма съществуват съвместно. Йоносферните свойства се определят от взаимодействието между слънчевото излъчване, състава и плътността на неутралната атмосфера, химичните процеси, динамиката на плазмата и влиянието на земното магнитно поле [64, 108].

Основният източник на йонизация в земната йоносфера е късовълновото слънчево електромагнитно излъчване, главно в ултравиолетовия и екстремния ултравиолетов диапазон, както и рентгеновото излъчване. При поглъщането на фотон с достатъчно висока енергия от неутрален атом или молекула може да настъпи фотойонизация:

(1) $$X + h\nu \rightarrow X^{+¿+e^{-¿¿}¿},$$

където X е неутрална частица, $h\nu$ е енергията на падащия фотон, $X^{+¿¿}$ е полученият положителен йон, а $e^{-¿¿}$ – освободеният електрон.

За настъпването на фотойонизация е необходимо енергията на фотона да превишава йонизационната енергия на съответната частица:

(2) $$h\nu \geq E_i,$$

където E_i е йонизационна енергия. Поради различните спектрални характеристики на слънчевото излъчване и различния химичен състав на атмосферата ефективността на йонизацията се изменя значително с височината.

Концентрацията на свободни електрони N_e във всеки момент се определя от съотношението между процесите на тяхното образуване, загуба и пренос. В общ вид изменението на електронната концентрация може да бъде представено чрез уравнение на непрекъснатостта:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = q - L - \nabla \cdot \left(N_e v \right), \quad (3)$$

където q е скоростта на образуване на свободни електрони, L представя загубите вследствие на рекомбинация и други химични процеси, а v е скоростта на пренос на плазмата.

Това уравнение показва, че електронната концентрация не се определя единствено от интензивността на слънчевото излъчване. В различните височинни области относителното значение на фотойонизацията, рекомбинацията, дифузията и динамичния пренос е различно. В по-ниските части на йоносферата химичните процеси и рекомбинацията имат по-силно влияние, докато на по-големи височини постепенно нараства значението на дифузията и движението на плазмата по силовите линии на геомагнитното поле [108].

Вертикалното разпределение на електронната концентрация е резултат от конкуренцията между два основни фактора. С увеличаване на височината неутралната атмосфера става по-разредена, което намалява броя на частиците, които могат да бъдат йонизирани. В същото време проникващото слънчево излъчване се поглъща постепенно при преминаването си през атмосферата. Поради това максимумът на електронната концентрация не се намира нито в най-високата, нито в най-ниската част на йоносферата, а на междинни височини, където съчетанието между наличието на неутрални частици и интензивността на йонизиращото излъчване е най-благоприятно.

В класическото описание на фотохимично формирана йоносфера тази зависимост се представя чрез профила на Чапман. Реалната земна йоносфера е значително по-сложна, тъй като атмосферният състав, температурите, ветровете, електрическите полета и геомагнитното поле също участват във формирането и пространственото преразпределение на плазмата. Въпреки това моделът на Чапман дава важна физическа основа за разбирането на появата на максимум в електронната концентрация.

Йонизацията започва да оказва съществено влияние върху радиовълните приблизително от височини около 60 km, а йоносферната плазма продължава на стотици километри над земната повърхност, като във височина постепенно преминава към плазмосферата. Поради липсата на рязка горна граница конкретният височинен обхват, разглеждан като „йоносфера“, зависи и от целта на изследването.

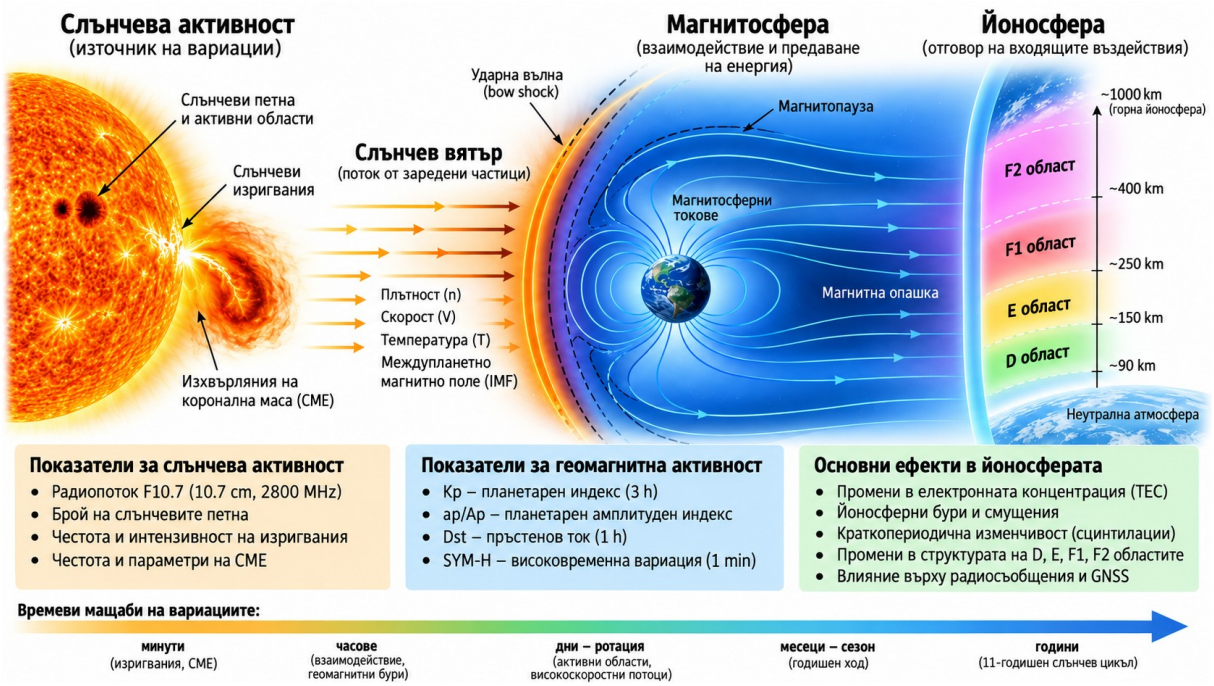
Електронната концентрация има ясно изразена вертикална структура. Въз основа на характерните максимуми и особеностите на йонизационните и рекомбинационните процеси йоносферата традиционно се разделя на **D, E и F области**, като F областта при определени условия се подразделя на F1 и F2. Това разделение е физически полезно, но границите между отделните области не са постоянни и се изменят в зависимост от местното време, сезона, географското положение и слънчевата и геомагнитната активност.

Подробните характеристики на D, E и F областите и тяхното значение за разпределението на електронната концентрация са разгледани в §2.1.2.

2.1.2. D, E и F области

Вертикалната структура на йоносферата се характеризира с няколко основни области, които се различават по височина, електронна концентрация, химичен състав и

преобладаващи физични процеси. Традиционно се разграничават **D, E и F области**, като F областта при определени условия се подразделя на F1 и F2 (Фигура 2.1). Това разделение е условно, тъй като преходите между отделните области не са резки, а височината и интензивността на максимумите се изменят във времето и пространството [64, 108].



Фигура 2.1. Основни връзки в системата Слънце–слънчев вятър–магнитосфера–йоносфера и използвани показатели за слънчева и геомагнитна активност (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

D областта се намира приблизително между 60 и 90 km височина. В нея електронната концентрация е сравнително ниска, а неутралната атмосфера все още е достатъчно плътна, така че сблъсъците между заредените и неутралните частици имат съществено значение. Йонизацията се поддържа главно от рентгеновото и ултравиолетовото слънчево излъчване, както и от други енергийни източници. Поради високата честота на сблъсъците D областта е особено важна за поглъщането на радиовълните в определени честотни диапазони. През нощта електронната концентрация в нея значително намалява, тъй като източникът на фотойонизация отслабва, а рекомбинационните процеси протичат сравнително бързо.

E областта е разположена приблизително между 90 и 150 km. В нея електронната концентрация е по-висока в сравнение с D областта, а влиянието на слънчевото излъчване върху йонизацията остава силно. Максимумът на електронната концентрация обикновено се наблюдава през дневните часове, докато през нощта E областта отслабва значително. В този височинен диапазон могат да възникват и локализирани слоеве с повишена електронна концентрация, известни като **спорадичен E слой (Es)**, чието формиране е свързано с взаимодействие между атмосферните ветрове, йонния състав и геомагнитното поле.

F областта се простира приблизително от 150 km до няколкостотин километра височина и съдържа основната част от електронното съдържание на йоносферата. През дневните часове тя често се разделя на **F1** и **F2** области. F1 обикновено се формира на по-ниска височина и е по-тясно свързана с фотохимичното равновесие, докато F2 се намира по-високо и се определя в значителна степен и от процесите на дифузия и транспорт.

F2 областта е особено важна за GNSS-базираните изследвания, тъй като в нея обикновено се намира максималната електронна концентрация в йоносферата. Тя се характеризира чрез параметрите $N_m F2$ – максималната електронна концентрация, и $h_m F2$ – височината на този максимум. Свързаната критична честота $f_o F2$ е пропорционална на квадратния корен от максималната електронна концентрация и традиционно се използва при описанието на F2 областта.

През нощта ясно изразеното разделяне между F1 и F2 обикновено изчезва и F областта може да се разглежда като единен слой. За разлика от D и E областите, електронната концентрация във F областта не намалява толкова бързо след залез, тъй като на тези височини неутралната атмосфера е значително по-разредена и характерните времена на загуба на плазма са по-дълги.

В контекста на GNSS наблюденията приносът към STEC се формира интегрално по целия път на сигнала през йоносферата, а не само в отделна област. Въпреки това F областта, и особено F2, обикновено има доминиращ принос към пълното електронно съдържание. По-ниските области също могат да имат значение, особено при повишена слънчева активност, геомагнитни смущения или наличие на локални йонизационни структури.

Вертикалното положение и електронната концентрация в D, E и F областите се изменят в зависимост от местното време, сезона, слънчевата активност и геомагнитните условия. Тези изменения формират част от общата времева изменчивост на йоносферата, разгледана в следващия подраздел.

2.1.3. Денонощни и сезонни изменения

Йоносферата се характеризира с ясно изразена времева изменчивост, обусловена основно от промяната на слънчевото облъчване, атмосферния състав и динамичните процеси в горната атмосфера. Сред най-устойчивите прояви на тази изменчивост са денонощните и сезонните изменения на електронната концентрация и на TEC [64, 108].

Денонощният ход е пряко свързан с редуването на осветена и неосветена част на атмосферата. След изгрев интензивността на фотойонизацията нараства, което води до постепенно увеличаване на електронната концентрация. Максималните стойности обикновено се достигат през дневните часове, но точният момент на максимума може да се различава в зависимост от височината, географското положение, сезона и състоянието на йоносферата.

След залез образуването на нови електрони чрез фотойонизация рязко намалява, докато процесите на рекомбинация и транспорт продължават. В резултат електронната концентрация в по-ниските области на йоносферата намалява сравнително бързо, докато във F областта спадът е по-бавен. Това е една от причините значителна част от електронното съдържание да се запазва и през нощта.

Денонощният ход на TEC не следва непременно непосредствено изменението на слънчевата височина. Времето на максималните стойности може да бъде изместено спрямо местния пладне поради ролята на плазмения транспорт, неутралните ветрове, електрическите полета и различните характерни времена на химичните процеси. Поради това денонощната изменчивост трябва да се разглежда като резултат от съвместното действие на фотохимични и динамични процеси.

Сезонните изменения са свързани с промяната на слънчевото облъчване през годината, но не се определят единствено от продължителността на деня и височината на Слънцето над хоризонта. Съществено значение имат и сезонните промени в температурата, състава и циркулацията на термосферата, които влияят върху скоростите на образуване, загуба и транспорт на йоносферната плазма.

При прост фотохимичен модел би се очаквало най-висока електронна концентрация през местното лято, когато слънчевото облъчване е по-интензивно. Наблюденията обаче показват, че това не винаги е така. В определени географски области и периоди електронната концентрация във F2 областта и TEC могат да бъдат

по-високи през зимата, отколкото през лятото. Това явление е известно като зимна аномалия и е свързано в значителна степен със сезонните изменения на състава на термосферата и по-специално със съотношението между атомния кислород и молекулните компоненти на атмосферата.

Освен годишния ход се наблюдават и полугодишни изменения, при които електронната концентрация и TEC могат да показват повишени стойности около равноденствията. Техният произход е комплексен и е свързан с промени в термосферния състав, глобалната атмосферна циркулация, слънчевото облъчване и взаимодействието между магнитосферата и йоносферата.

Във високите географски ширини денонощният и сезонният ход се усложняват допълнително от големите промени в продължителността на осветяване през годината. В полярните райони съществуват периоди на продължително дневно или нощно осветяване, поради което класическата схема на дневно нарастване и нощно намаляване на електронната концентрация може да бъде значително изменена. Наред с това динамичните процеси, свързани с магнитосферното въздействие, могат да имат съществен принос към наблюдаваната изменчивост.

Поради тези причини денонощните и сезонните изменения на TEC не следва да се интерпретират единствено като пряк отговор на слънчевото облъчване. Те представляват резултат от взаимодействието между фотойонизацията, химичните процеси, атмосферната динамика и плазмения транспорт. Тази сложност е особено важна при многогодишни GNSS изследвания, при които е необходимо естествената денонощна и сезонна изменчивост да бъде разграничавана от измененията, свързани със слънчевия цикъл и геомагнитните смущения.

2.1.4. Пространствена изменчивост и особености във високите географски ширини

Йоносферата се характеризира със значителна пространствена изменчивост, която се проявява както във вертикално, така и в хоризонтално направление. Електронната концентрация и TEC се изменят в зависимост от географската ширина и дължина, местното време, сезона, слънчевата активност и геомагнитните условия. Наред с пространствените структури с голям обхват могат да се наблюдават и плазмени неоднородности с по-малки пространствени размери, обусловени от динамични процеси в йоносферната плазма [64, 108].

Съществен фактор за пространствената организация на йоносферата е земното магнитно поле. Движението на заредените частици е силно зависимо от неговата конфигурация, поради което географската и геомагнитната ширина не са взаимозаменяеми характеристики. Особено отчетливо това се проявява във високите географски ширини, където взаимодействието между магнитосферата и йоносферата има съществено влияние върху разпределението и движението на плазмата.

В полярните и авроралните области част от енергията и плазмата от магнитосферата се предават непосредствено към горната атмосфера. Основни механизми са ускоряването и утаяването на заредени частици, електрическите полета и свързаната с тях плазмена конвекция, както и протичането на електрически токове между магнитосферата и йоносферата. Тези процеси могат да променят електронната концентрация, температурата, химичния състав и движението на йоносферната плазма.

Важна област е авроралният овал, в който вероятността за утаяване на енергийни частици и възникване на полярни сияния е повишена. Положението и ширината на авроралния овал не са постоянни, а се изменят в зависимост от състоянието на магнитосферата и геомагнитната активност. При усилване на геомагнитните смущения областта на засилено магнитосферно въздействие може да се разширява към по-ниски геомагнитни ширини.

Към полюса от авроралната област се намира полярната шапка, в която движението на плазмата е силно повлияно от магнитосферната конвекция и взаимодействието със слънчевия вятър. В тази област могат да се наблюдават

регионални структури с повишена електронна концентрация, пренасяни през полярната шапка, както и области с понижено електронно съдържание. Пространствените граници между такива структури могат да бъдат свързани със значителни градиенти на TEC.

Характерна особеност на йоносферата във високите географски ширини е наличието на значителна изменчивост на различни пространствени мащаби. Регионалните особености на разпределението могат да бъдат съпроводени от по-малки плазмени неоднородности, които възникват и се развиват вследствие на динамиката на плазмата и различни видове неустойчивости. При преминаването на GNSS сигналите през подобни области могат да се наблюдават бързи изменения на фазата, на електронното съдържание по пътя на сигнала и при определени условия – сцинтилационни ефекти.

За разлика от ниските и средните географски ширини, където слънчевото облъчване и фотохимичните процеси често определят основната част от регулярната изменчивост, във високите географски ширини значението на магнитосферното въздействие е по-голямо. Поради това измененията на TEC могат да бъдат значителни и в периоди, когато непосредствените промени в слънчевото облъчване са сравнително малки.

Особено сложни условия възникват по време на геомагнитни смущения. Промените в магнитосферната конвекция, утаяването на частици, електрическите полета, нагряването на горната атмосфера и измененията в нейния състав могат да предизвикат както увеличаване, така и намаляване на електронната концентрация. Отговорът на йоносферата не е еднакъв във всички райони и зависи от местното време, геомагнитното положение, сезона и развитието на конкретното смущение.

Тази особеност е от съществено значение при интерпретирането на продължителни GNSS наблюдения в Антарктика. Измененията на TEC не могат да бъдат разглеждани единствено като следствие от денонощния и сезонния ход на слънчевото облъчване, а трябва да бъдат анализирани и във връзка със състоянието на магнитосферата и геомагнитната активност. Физическите механизми на тази връзка и използваните показатели за слънчева и геомагнитна активност са разгледани в §2.2.

2.2. Слънчева и геомагнитна активност и влияние върху йоносферата

Състоянието на земната йоносфера е тясно свързано със слънчевата активност и с процесите на взаимодействие между слънчевия вятър, междупланетното магнитно поле и земната магнитосфера. Слънчевото електромагнитно излъчване определя основната част от фотойонизацията в горната атмосфера, докато промените в потока на слънчевия вятър и магнитното поле могат да предизвикат съществени изменения в магнитосферата, термосферата и йоносферата.

Тези въздействия се проявяват в различни времеви мащаби. Дългопериодичните изменения са свързани основно с приблизително 11-годишния слънчев цикъл, докато по-кратките вариации могат да бъдат обусловени от въртенето на Слънцето, развитието на активни области, слънчеви изригвания, изхвърляния на коронална маса и високоскоростни потоци на слънчевия вятър. Когато такива изменения предизвикат значително смущение на земната магнитосфера, възникват геомагнитни смущения и бури, които могат съществено да променят пространственото разпределение и времевото развитие на електронната концентрация.

За количественото характеризиране на тези процеси се използват различни показатели. Слънчевата активност може да бъде описвана чрез радиопотока F10.7 и броя на слънчевите петна, а геомагнитното състояние – чрез индекси като Kp, ap/Ap, Dst и SYM-H. Тези величини характеризират различни аспекти на системата Слънце–слънчев вятър–магнитосфера–йоносфера и поради това тяхната интерпретация изисква разглеждане на физическия произход и времевата им разделителна способност.

2.2.1. Слънчев цикъл и слънчева активност

Слънчевата активност се изменя квазипериодично във времето, като най-изразеният дългопериодичен компонент е приблизително 11-годишният слънчев цикъл. Той се характеризира с последователно преминаване между периоди на минимална и максимална активност, които се проявяват чрез изменения в броя и разпределението на слънчевите петна, интензивността на слънчевото електромагнитно излъчване и честотата на различни активни явления.

Слънчевите петна представляват области във фотосферата с по-ниска температура от околната повърхност и със силно магнитно поле. Техният брой обикновено е малък около слънчевия минимум и нараства при приближаване към максимума на цикъла. Наред с увеличаването на броя на активните области се изменят и излъчването в ултравиолетовия и екстремния ултравиолетов диапазон, както и вероятността за възникване на слънчеви изригвания и изхвърляния на коронална маса.

Слънчевият цикъл е свързан с развитието на магнитното поле на Слънцето. При преминаването от един минимум към следващия магнитната конфигурация постепенно се изменя, а около максимума глобалното магнитно поле претърпява обръщане на полярността. Пълното възстановяване на първоначалната магнитна полярност изисква приблизително два последователни 11-годишни цикъла, поради което магнитният цикъл на Слънцето е с продължителност приблизително 22 години.

За йоносферата особено значение има изменението на късовълновото слънчево излъчване. При повишена слънчева активност потокът в екстремния ултравиолетов диапазон обикновено нараства, което увеличава скоростта на фотойонизация в горната атмосфера. В резултат средните стойности на електронната концентрация и TEC обикновено са по-високи около слънчевия максимум в сравнение с периодите около минимум [64, 108].

Тази зависимост обаче не е строго линейна. Реакцията на йоносферата зависи от географското положение, местното време, сезона, атмосферния състав и динамиката, както и от текущото геомагнитно състояние. При еднакво ниво на обща слънчева активност могат да се наблюдават различни стойности на TEC в зависимост от тези допълнителни фактори.

Наред с приблизително 11-годишния цикъл в слънчевата активност се наблюдават и вариации с по-кратки времеви мащаби. Важна е приблизително 27-дневната повторяемост, свързана с въртенето на Слънцето и повторното ориентиране на дълготраещи активни области и коронални структури спрямо Земята. Към тях се добавят и краткотрайни събития като слънчеви изригвания и изхвърляния на коронална маса, които могат да предизвикат бързи изменения в космическата среда.

Слънчевата активност влияе върху йоносферата по два основни начина: чрез измененията на йонизиращото електромагнитно излъчване и чрез измененията в слънчевия вятър и междупланетното магнитно поле, които могат да въздействат върху земната магнитосфера. Първият механизъм е основен за дългопериодичната изменчивост на електронното съдържание, докато вторият има особено значение при геомагнитни смущения.

За количественото описание на дългопериодичните изменения на слънчевата активност в йоносферните изследвания широко се използват радиопотокът F10.7 и броят на слънчевите петна, разгледани в §2.2.2.

2.2.2. Радиопоток F10.7 и брой слънчеви петна

Дългопериодичните изменения на слънчевата активност могат да бъдат характеризирани чрез различни наблюдавани величини. Сред най-широко използваните в изследванията на йоносферата са слънчевият радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm – F10.7, и числото на слънчевите петна. Двата показателя са свързани със слънчевата активност, но се основават на различни физически наблюдения и не са взаимозаменяеми.

F10.7 представлява спектралната плътност на слънчевия радиопоток при честота приблизително 2800 MHz, съответстваща на дължина на вълната 10.7 cm. Стойностите му обикновено се изразяват в единици слънчев радиопоток (*solar flux unit – sfu*), като:

(4) $$1\,sfu = 10^{-22}\,W\,m^{-2}\,Hz^{-1}$$

Радиоизлъчването при 10.7 cm се формира в горните слоеве на слънчевата атмосфера и се изменя в зависимост от развитието на активните области. Поради относително непрекъснатото му измерване, добрата времева съпоставимост и устойчивата му връзка с общото ниво на слънчевата активност F10.7 се използва широко като неин количествен показател [118].

Особено важно за йоносферните изследвания е, че F10.7 е добре корелиран с измененията на слънчевото ултравиолетово и екстремно ултравиолетово излъчване, което е непосредствен източник на фотойонизация в горната атмосфера. Самият F10.7 не е измерване на йонизиращото излъчване, а негов широко използван косвен показател. Поради тази причина той участва като входна величина или показател за слънчевата активност в редица емпирични модели на термосферата и йоносферата [118].

При ниска слънчева активност F10.7 обикновено има сравнително малки стойности, докато около слънчев максимум неговото средно ниво и амплитудата на измененията нарастват. Върху дългопериодичния ход се наслагват и по-кратки изменения, включително приблизително 27-дневна повторяемост, свързана с въртенето на Слънцето и повторната поява на дългоживеещи активни области.

Друг традиционен показател е числото на слънчевите петна. То не представлява просто преброяване на всички видими петна, а индекс, който отчита както броя на отделните петна, така и броя на групите, в които те са организирани. Класическата форма на числото на Волф може да бъде представена като:

(5) $$R = k\left(10\,g + s\right),$$

където g е броят на наблюдаваните групи слънчеви петна, s е броят на отделните петна, а k е коефициент за привеждане на наблюденията към единна скала.

Съвременните дългосрочни редове се публикуват като International Sunspot Number от World Data Center – SILSO към Кралската обсерватория на Белгия. Този индекс позволява развитието на слънчевата активност да бъде проследявано за период, значително по-дълъг от наличния инструментален ред на F10.7 [110].

F10.7 и числото на слънчевите петна обикновено показват сходно развитие през слънчевия цикъл, но зависимостта между тях не е строго линейна. Причината е, че двата показателя характеризират различни прояви на слънчевата магнитна активност. В отделни периоди еднакво или близко число на слънчевите петна може да бъде съпроводено от различен радиопоток F10.7 и обратно.

За анализа на йоносферното електронно съдържание F10.7 има особено практическо значение, тъй като е по-тясно свързан с вариациите на излъчването, участващо във формирането на йоносферата. Числото на слънчевите петна предоставя допълнителна независима характеристика на развитието на слънчевия цикъл. Съвместното им разглеждане позволява по-пълно описание на дългопериодичната слънчева активност, без да се приема, че двата показателя съдържат една и съща информация.

В последващия анализ конкретните източници и времевата разделителна способност на използваните стойности на F10.7 и числото на слънчевите петна се разглеждат в раздела за входните данни, докато тяхната връзка с измененията на TEC се оценява отделно в аналитичната част на изследването.

2.2.3. Слънчев вятър, междупланетно магнитно поле и геоефективни явления

Слънчевият вятър представлява непрекъснат поток от йонизирана плазма, изхвърляна от слънчевата корона в междупланетното пространство. Той се състои основно от протони и електрони и пренася със себе си слънчевото магнитно поле, което в междупланетното пространство се разглежда като междупланетно магнитно поле (Interplanetary Magnetic Field – IMF). Скоростта, плътността и температурата на слънчевия вятър, както и големината и ориентацията на IMF, се изменят значително във времето и определят в голяма степен условията на взаимодействие със земната магнитосфера [67].

Поради въртенето на Слънцето и радиалното движение на слънчевия вятър междупланетното магнитно поле придобива характерна спираловидна конфигурация. При достигането до Земята неговата ориентация спрямо земното магнитно поле има особено значение за количеството енергия и плазма, което може да бъде предадено към магнитосферата.

Съществена роля играе компонентата B_z на междупланетното магнитно поле, обикновено разглеждана в геоцентричната слънчево-магнитосферна координатна система. Когато B_z е насочена на юг и следователно е противоположна на земното магнитно поле от дневната страна на магнитосферата, се създават благоприятни условия за магнитно пресъединяване (от англ. *magnetic reconnection*). Чрез този процес се усилва преносът на енергия и импулс от слънчевия вятър към магнитосферата [49].

Продължителното наличие на силно отрицателна B_z, особено в съчетание с висока скорост на слънчевия вятър, е един от основните фактори за възникване на силни геомагнитни смущения. Геоефективността обаче не се определя само от една величина. Значение имат също общата големина на междупланетното магнитно поле, скоростта и плътността на слънчевия вятър, неговото динамично налягане, продължителността на благоприятната магнитна ориентация и предходното състояние на магнитосферата [49].

Особено съществени изменения на условията в междупланетното пространство могат да бъдат предизвикани от изхвърляния на коронална маса (Coronal Mass Ejections – CME). След разпространението им в междупланетното пространство тези структури могат да достигнат до Земята като междупланетни изхвърляния на коронална маса. Те често са съпроводени от усилено магнитно поле, резки промени в скоростта и плътността на слънчевия вятър и при достатъчно южно ориентирана магнитна компонента могат да предизвикат значителни геомагнитни смущения.

Друг важен източник на геомагнитна активност са високоскоростните потоци на слънчевия вятър, които обикновено произхождат от коронални дупки. При взаимодействието им с предхождащ по-бавен слънчев вятър могат да се формират области на компресия, известни като коротиращи взаимодействени области (Corotating Interaction Regions – CIR). Тъй като дългоживеещи коронални дупки могат да се наблюдават при последователни завъртания на Слънцето, свързаните с тях смущения често проявяват приблизително 27-дневна повторяемост.

Рязкото увеличаване на динамичното налягане на слънчевия вятър може да предизвика бързо компресиране на магнитосферата. Такива промени често се свързват с междупланетни ударни вълни и компресионни области пред бързо движещи се плазмени структури. Самото увеличено налягане обаче не е достатъчно условие за развитие на силна геомагнитна буря; ключово значение има ефективното магнитно свързване между слънчевия вятър и магнитосферата.

Понятието геоефективност описва способността на дадена структура или състояние на слънчевия вятър да предизвика измерим отговор на земната магнитосфера и свързаните с нея йоносферни и термосферни процеси. Следователно едно слънчево събитие не трябва автоматично да се приема за геоефективно само поради големината му при Слънцето. Значение имат посоката на разпространение към Земята, структурата и ориентацията на пренасяното магнитно поле и условията при достигането му до магнитосферата.

Във високите географски ширини промените в слънчевия вятър и IMF могат сравнително бързо да се проявят чрез изменения на магнитосферната конвекция, електрическите полета, утаяването на заредени частици и токовите системи. Тези процеси създават условия за бързи изменения в разпределението и движението на йоносферната плазма и по този начин могат да повлияят върху наблюдаваните стойности на TEC.

Когато енергийният пренос от слънчевия вятър към магнитосферата стане достатъчно интензивен и продължителен, може да се развие геомагнитна буря. Нейните основни характеристики и връзката с измененията в йоносферата са разгледани в §2.2.4.

2.2.4. Геомагнитна активност и геомагнитни бури

Геомагнитната активност отразява измененията на земното магнитно поле, породени от променливи токови системи в магнитосферата и йоносферата. Тези изменения могат да бъдат с различна продължителност и пространствен обхват – от сравнително слаби флуктуации до силни глобални смущения, определяни като геомагнитни бури. Основният външен източник на енергия за тези процеси е слънчевият вятър и неговото взаимодействие със земната магнитосфера [49, 67].

Геомагнитната буря представлява продължително и значително смущение на магнитосферата, при което се изменят конфигурацията на магнитното поле, токовите системи и движението на плазмата. Често развитието на бурята започва след пристигането на междупланетна ударна вълна или компресионна област, която рязко увеличава динамичното налягане на слънчевия вятър и предизвиква компресиране на магнитосферата. Такъв начален отговор може да се прояви като бързо изменение на наземно измерваното магнитно поле.

Особено важна за последващото развитие на бурята е продължителната южна компонента на междупланетното магнитно поле. При такива условия магнитното пресъединяване от дневната страна на магнитосферата се усилва и се увеличава преносът на енергия към магнитосферната система. Част от тази енергия се преразпределя към магнитната опашка, авроралните области и вътрешната магнитосфера.

Класическото развитие на силна геомагнитна буря често се описва чрез начална, главна и възстановителна фаза. Началната фаза може да бъде свързана с рязкото компресиране на магнитосферата. По време на главната фаза се усилва пръстеновият ток във вътрешната магнитосфера, което води до понижаване на хоризонталната компонента на магнитното поле, измервана в ниските и средните географски ширини. Във възстановителната фаза натрупаната енергия постепенно се разсейва и магнитното поле се връща към по-спокойни стойности [49].

Пръстеновият ток се формира от енергийни заредени частици, които се движат около Земята във вътрешната магнитосфера. При усилването му неговото магнитно поле частично се противопоставя на основното земно магнитно поле. Този ефект е един от основните физически механизми, които се отразяват в индексите Dst и SYM-H, разгледани в §2.2.6.

Наред с пръстеновия ток по време на геомагнитни смущения се усилват и други токови системи – авроралните електроструи, токовете по силовите линии на магнитното поле и токовете в магнитопаузата. Поради различния им пространствен обхват отделните геомагнитни индекси реагират на различни компоненти на общото смущение и не трябва да се разглеждат като напълно еквивалентни показатели.

Във високите географски ширини въздействието на геомагнитните смущения върху йоносферата може да бъде особено силно. Усилването на електрическите полета и плазмената конвекция, утаяването на енергийни частици и нарастването на токовете в авроралната йоносфера могат да доведат до бързи изменения на електронната концентрация и до формиране на значителни пространствени градиенти.

Допълнително значение има джауловото нагряване на горната атмосфера, свързано с протичането на електрически токове в йоносферата. То може да предизвика

повишаване на температурата и изменения в състава и циркулацията на термосферата. Тези промени от своя страна влияят върху скоростите на йонно-химичните реакции и могат да променят електронната концентрация дори в райони, отдалечени от първоначалната област на енергийно въздействие [108].

Реакцията на йоносферата по време на геомагнитна буря не е еднопосочна. В различни фази и географски райони могат да се наблюдават както увеличения, така и намаления на TEC. Тези изменения често се обозначават съответно като положителна и отрицателна йоносферна буря, но конкретният отговор зависи от местното време, сезона, геомагнитното положение и развитието на самото смущение.

Поради сложния характер на магнитосферно-йоносферното взаимодействие интензивността на една геомагнитна буря не може да бъде описана напълно с един-единствен показател. За количественото ѝ характеризиране се използват различни индекси, които отразяват различни токови системи и времеви мащаби. В настоящото изследване основно значение имат Kp, ap/Ap, Dst и SYM-H, чиито физически смисъл и особености са разгледани в следващите подраздели.

2.2.5. Индекси Kp и ap/Ap

За количествено характеризиране на планетарната геомагнитна активност широко се използва **Kp** индексът и производните от него **ap** и **Ap**. Те се определят от наземни магнитни наблюдения и описват общото ниво на геомагнитните смущения, но се различават по своята скала и времева представителност [73].

Kp е планетарен индекс, получен чрез съвместна обработка на локалните K индекси от мрежа от геомагнитни обсерватории. Той характеризира амплитудата на нерегулярните изменения на геомагнитното поле за последователни тричасови интервали. За всяко денонощие се определят осем Kp стойности, съответстващи на интервалите 00–03, 03–06, 06–09, 09–12, 12–15, 15–18, 18–21 и 21–24 UTC.

Kp се представя по квазилогаритмична скала от 0 до 9, като между целите стойности се използват междинни степени, традиционно означавани чрез „–“, „o“ и „+“. Ниските стойности са характерни за спокойни геомагнитни условия, докато високите стойности показват нарастваща интензивност на глобалното геомагнитно смущение. Поради нелинейния характер на скалата разликата между две последователни стойности на Kp не представлява еднаква промяна на амплитудата на магнитното смущение.

За по-удобно количествено представяне на геомагнитната активност Kp се преобразува в **ap** индекс. **ap** е тричасова еквивалентна планетарна амплитуда и се определя чрез стандартно съответствие между отделните стойности на Kp и линейна по отношение на амплитудата скала. По този начин стойностите на ap позволяват по-подходящо количествено сравнение и осредняване в сравнение с директното използване на квазилогаритмичния Kp [73].

За едно денонощие се получават осем стойности на ap. От тях се определя дневният индекс **Ap** като тяхната средна аритметична стойност:

$$A_p = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} a_{p,i}, \quad (6)$$

където $a_{p,i}$ са осемте тричасови стойности за съответното денонощие. В официалния продукт на GFZ Ap се представя като дневна еквивалентна планетарна амплитуда [73].

По този начин Kp и ap описват геомагнитната активност с тричасова времева разделителна способност, докато Ap характеризира общото ниво на активност за дадено денонощие. Kp е особено удобен за класифициране на геомагнитните условия и за идентифициране на интервали с повишена активност, докато ap и Ap са по-подходящи за количествени и статистически анализи.

Следва да се има предвид, че тези индекси представляват планетарни характеристики, получени от мрежа от магнитни обсерватории. Те не описват непосредствено локалното магнитно смущение в района на дадена GNSS станция. Това разграничение е особено важно във високите географски ширини, където локалните магнитни вариации могат да бъдат значително по-силни и по-бързи от общата планетарна характеристика, представена чрез Kp или Ap.

При интерпретирането на краткотрайни йоносферни изменения трябва да бъде отчетена и тричасовата времева разделителна способност на Kp и ap. Тя е подходяща за описание на общата геомагнитна обстановка, но не позволява точно определяне на времето на бързи магнитосферни изменения в рамките на тричасовия интервал. За анализ с по-висока времева разделителна способност са полезни други индекси, сред които SYM-H, разгледан заедно с Dst в §2.2.6.

2.2.6. Индекси Dst и SYM-H

Индексите **Dst** и **SYM-H** се използват за характеризиране на глобалните изменения на хоризонталната компонента на земното магнитно поле, свързани преди всичко с развитието на токовите системи във вътрешната магнитосфера по време на геомагнитни смущения. И двата индекса се изразяват в нанотесли (nT), но се различават по начина на изчисляване, използваната мрежа от магнитни обсерватории и най-вече по времевата си разделителна способност [58, 117].

Dst (Disturbance Storm Time) представлява индекс с едночасова времева разделителна способност. Той се получава от измененията на хоризонталната компонента на магнитното поле, регистрирани в обсерватории в ниските и средните геомагнитни ширини, след отстраняване на основното магнитно поле, дългопериодичния му ход и регулярната денонощна вариация. При изчисляването стойностите от отделните станции се нормализират спрямо геомагнитната ширина и се комбинират така, че да представят приблизително осево симетричната част на магнитното смущение [117, 131].

По време на главната фаза на геомагнитна буря Dst обикновено придобива отрицателни стойности. Това понижение е свързано в значителна степен с усилването на пръстеновия ток, чието магнитно поле противодейства на основното земно магнитно поле. Колкото по-силно е отрицателното отклонение на Dst, толкова по-интензивно обикновено е глобалното смущение във вътрешната магнитосфера.

Dst обаче не трябва да се разглежда като пряко измерване единствено на пръстеновия ток. В наблюдаваното магнитно смущение могат да участват и други токови системи, включително токове в магнитопаузата, токове по силовите линии и други магнитосферни и йоносферни приноси. Следователно Dst е интегрален геомагнитен показател, макар пръстеновият ток да има основно значение за характерното отрицателно изменение по време на главната фаза на бурите [49].

Едночасовата разделителна способност на Dst е подходяща за проследяване на общото развитие на геомагнитната буря, но може да прикрие по-бързи изменения в магнитното поле. За анализ на процеси с по-кратък времеви мащаб се използва индексът **SYM-H**, който има сходен физически смисъл, но се определя с едноминутна времева разделителна способност [58, 131].

SYM-H характеризира надлъжно симетричната компонента на измененията на хоризонталното магнитно поле, получена от мрежа от обсерватории в ниските и средните геомагнитни ширини. При изчисляването му стойностите се определят за всяка минута и се коригират спрямо геомагнитната ширина. По този начин SYM-H може да се разглежда като високовремево-разделителен показател, близък по физически смисъл до Dst, макар алгоритмите и използваните станции да не са идентични [58, 131].

При спокойни условия стойностите на Dst и SYM-H обикновено са сравнително близки до нулата, като могат да се наблюдават положителни и отрицателни отклонения. По време на геомагнитна буря силното отрицателно развитие на двата индекса характеризира усилването на глобалното магнитосферно смущение. Възстановяването

им към по-малко отрицателни стойности съответства на постепенното отслабване на токовите системи през възстановителната фаза.

Важна особеност на SYM-H е способността му да показва бързи изменения, които се изглаждат при едночасовото осредняване на Dst. Това го прави особено полезен при съпоставяне с GNSS наблюдения и други величини с висока времева разделителна способност. Същевременно по-високата честота на данните не означава, че SYM-H представлява локален индекс – подобно на Dst, той характеризира глобална, приблизително надлъжно симетрична компонента на геомагнитното смущение.

Поради различната времева разделителна способност Dst и SYM-H могат да се използват взаимно допълващо се. Dst е подходящ за описание на общото развитие и интензивността на геомагнитните бури, докато SYM-H позволява по-точно времево съпоставяне на краткотрайни магнитосферни изменения с наблюдаваните промени в йоносферата. Заедно с Kp и ap/Ap те предоставят информация за различни аспекти и времеви мащаби на геомагнитната активност.

В настоящото изследване конкретните числови редове на Dst и SYM-H и техните източници са описани в раздела за входните данни, докато физическата им връзка с измененията на TEC се разглежда в следващия подраздел.

2.2.7. Реакция на йоносферата при геомагнитни смущения

Геомагнитните смущения могат да предизвикат съществени изменения в електронната концентрация и TEC чрез едновременното действие на електрически полета, плазмен транспорт, утаяване на енергийни частици, нагряване на горната атмосфера и промени в нейния състав. Поради взаимодействието между тези процеси йоносферният отговор може да бъде различен по знак, амплитуда и продължителност в зависимост от географското положение, местното време, сезона и фазата на геомагнитното смущение [64, 108].

Измененията на TEC по време на геомагнитни бури често се описват като положителна или отрицателна йоносферна буря. При положителна фаза електронната концентрация и TEC се увеличават спрямо характерните стойности за спокойни условия, докато при отрицателна фаза се наблюдава тяхното намаляване. Двете прояви могат да възникнат последователно в рамките на една и съща геомагнитна буря и не е задължително да се наблюдават едновременно във всички географски области [108].

Един от важните механизми за положителен отговор е усиленият транспорт на плазма. Промените в магнитосферната конвекция и електрическите полета могат да преразпределят йоносферната плазма и да повишат електронната концентрация в определени области. Неутралните ветрове в термосферата също могат да преместват йонизираната компонента по силовите линии на геомагнитното поле и по този начин да изменят височината на F2 областта и скоростта на загуба на плазма.

При отрицателната фаза съществено значение могат да имат измененията в състава на термосферата. Джауловото нагряване и утаяването на енергийни частици повишават температурата на горната атмосфера и предизвикват нейното разширяване и промени в глобалната циркулация. В резултат могат да настъпят изменения в относителното съдържание на атомен кислород и молекулни компоненти. Увеличаването на относителния принос на молекулните съставки ускорява процесите, водещи до загуба на свободни електрони, и може да доведе до понижаване на електронната концентрация във F областта [64, 108].

Особено бърз и пространствено нееднороден може да бъде отговорът във високите географски ширини. Там измененията на магнитосферната конвекция и електрическите полета непосредствено влияят върху движението на плазмата, а утаяването на енергийни частици може едновременно да създава допълнителна йонизация и да изменя локалната електродинамика. Положението на авроралния овал и границите между различните режими на плазмена конвекция също се изменят при повишена геомагнитна активност.

В тези условия могат да се формират и пренасят области с повишена или понижена електронна концентрация, разделени от значителни пространствени градиенти. Движението на такива структури през полярните области може да предизвика съществени изменения на TEC за сравнително кратки времеви интервали. Върху техните граници и вътре в самите структури могат да се развиват по-малки плазмени неоднородности, които допълнително увеличават пространствената и времевата изменчивост [64].

Поради това зависимостта между интензивността на геомагнитната активност и TEC не е еднозначна. Например силно отрицателен Dst или висока стойност на Kp не означават непременно намаляване на TEC в конкретна точка и момент. В зависимост от развитието на бурята могат да бъдат наблюдавани увеличение, намаление или последователност от двете. Възможно е също максималният йоносферен отговор да бъде изместен във времето спрямо максимума на съответния геомагнитен индекс.

Тази особеност е важна и при статистически анализ на връзката между TEC и показателите за геомагнитна активност. Корелацията между две величини сама по себе си не доказва причинно-следствена връзка, а използването на дневни или месечни средни стойности може да изглади краткотрайни изменения и времеви закъснения. Дългопериодичният анализ и анализът на отделни силни събития предоставят различна, взаимно допълваща се информация за реакцията на йоносферата.

В анализа слънчевите и геомагнитните показатели се използват като външни характеристики на средата, с които се съпоставят наблюдаваните изменения на TEC. Интерпретацията се извършва с оглед на различната времева разделителна способност и физически смисъл на F10.7, Kp, ap, Dst и SYM-H, без наблюдаваните статистически зависимости сами по себе си да се приемат като доказателство за причинност.

2.3. GNSS системи, сигнали и наблюдавани величини

Глобалните навигационни спътникови системи (Global Navigation Satellite Systems – GNSS) осигуряват непрекъснато излъчване на радиосигнали от спътници с точно определени орбити и времеви скали. Основното им предназначение е определяне на положение, скорост и време, но същите наблюдения съдържат информация и за средата, през която сигналите се разпространяват. Затова GNSS намират приложение не само в навигацията и геодезията, но и при изследването на атмосферата и йоносферата [54, 120].

При преминаването си от спътника до приемника GNSS сигналът се влияе от геометричното разстояние, часовниците на спътника и приемника, тропосферата, йоносферата, инструменталните характеристики на предавателната и приемната апаратура, многопътността и измервателния шум. Част от тези влияния представляват източници на грешки при позициониране, но при йоносферните изследвания честотно зависимото въздействие на йоносферата представлява полезен сигнал, от който може да бъде определено електронното съдържание по пътя на GNSS сигнала.

Особено значение има възможността един и същ спътник да бъде наблюдаван на две или повече носещи честоти. Поради дисперсионните свойства на йоносферата нейното въздействие върху GNSS сигналите зависи от честотата. Съпоставянето на наблюденията на различни честоти позволява да бъдат елиминирани голяма част от общите геометрични компоненти и да бъде отделена честотно зависимата йоносферна част. Този принцип е основата на двучестотното определяне на TEC, разгледано подробно в §2.4.

2.3.1. Глобални навигационни спътникови системи

Към съвременните глобални навигационни спътникови системи се отнасят американската GPS, руската GLONASS, европейската Galileo и китайската BeiDou. Те са разработени независимо и се различават по структурата на съзвездията, използваните сигнали, честотните планове и навигационните съобщения, но се основават на общ

принцип – определяне на времето за разпространение и фазовите характеристики на радиосигнали, излъчвани от спътници с известни орбити [120].

В общ вид една GNSS включва три основни сегмента: космически, контролен и потребителски. Космическият сегмент се състои от спътниковото съзвездие, което излъчва навигационни сигнали и съобщения. Контролният сегмент осигурява наблюдението на спътниците, определянето и прогнозирането на орбитите, синхронизирането и контрола на бордовите часовници и поддържането на навигационната информация. Потребителският сегмент включва GNSS приемниците, които регистрират излъчените сигнали и формират кодови, фазови и други наблюдения [54].

Спътниците на глобалните системи се разполагат основно на средни околоземни орбити, което позволява едновременно наблюдение на множество спътници от голяма част от земната повърхност. Използването на няколко съзвездия увеличава броя на достъпните сигнали, подобрява геометрията на наблюденията и осигурява по-голяма непрекъснатост на измерванията. За йоносферните изследвания това води и до по-голям брой направления спътник–приемник, по които може да бъде оценявано електронното съдържание.

Основата на GNSS измерванията е високоточната времева система. Спътниците са оборудвани с атомни честотни стандарти, а излъчваните сигнали съдържат кодови последователности и носещи вълни с точно определени честоти. Приемникът сравнява приетия сигнал със собствено генериран негов еквивалент и по този начин формира различни типове наблюдения.

За геодезическите и йоносферните приложения основно значение имат два вида наблюдения – кодовите псевдоразстояния и фазовите измервания на носещата вълна. Кодовите измервания предоставят информация за времето за разпространение на сигнала и позволяват определяне на абсолютното разстояние с по-ниска точност. Фазовите измервания са значително по-прецизни по отношение на относителните изменения, но съдържат неизвестна фазова неопределеност. Техните характеристики са разгледани отделно в §2.3.3 и §2.3.4.

От гледна точка на йоносферните изследвания особено важно е, че съвременните GNSS излъчват сигнали в няколко честотни диапазона. Това позволява едновременно наблюдение на един и същ път на разпространение на различни честоти и използване на честотната зависимост на йоносферното влияние за определяне на STEC. Основните честоти и структурата на сигналите са разгледани в §2.3.2.

2.3.2. Структура на GNSS сигналите и носещи честоти

GNSS спътниците излъчват радиосигнали в няколко честотни диапазона от L-обхвата. Всеки сигнал се формира върху носеща вълна с точно определена честота, която се модулира с псевдослучайна кодова последователност и, при съответните сигнали, с навигационно съобщение. Тази структура позволява на приемника едновременно да идентифицира източника на сигнала, да определя времето на неговото разпространение и да извършва фазови измервания на носещата вълна [54, 120].

Псевдослучайните кодови последователности са предварително известни на приемника. Чрез сравнение между приетата и генерираната в приемника кодова последователност се определя кодовото закъснение, което е в основата на измерването на псевдоразстоянието. Едновременно с това приемникът проследява фазата на носещата вълна, което позволява формирането на значително по-прецизни фазови наблюдения.

За GPS основните носещи честоти са L1, L2 и L5:

$$f_{L1} = 1575.42\,MHz$$
$$f_{L2} = 1227.60\,MHz$$
$$f_{L5} = 1176.45\,MHz$$

Тези честоти са кохерентно получени от основна честота 10.23 MHz. Официалните интерфейсни спецификации на GPS определят L1 и L2 в IS-GPS-200, а L5 – в IS-GPS-705 [123, 124].

При Galileo основните отворени сигнали се излъчват в диапазоните E1, E5a, E5b и E6. Носещите им честоти са съответно 1575.420, 1176.450, 1207.140 и 1278.750 MHz, като E5a и E5b могат да се разглеждат и като части на широколентовия E5 сигнал с централна честота 1191.795 MHz [44].

BeiDou използва няколко граждански сигнала, сред които B1I, B1C, B2I, B2a и B3I. Част от по-новите сигнали на BDS-3 използват честоти, съвпадащи с тези на GPS и Galileo, например B1C при 1575.42 MHz и B2a при 1176.45 MHz. Това улеснява разработването на многочестотни и многосистемни GNSS приемници [32, 33, 34]. Официалните интерфейсни документи на BeiDou се публикуват отделно за съответните отворени сигнали.

При традиционните сигнали на GLONASS е приложен принцип на множествен достъп с честотно разделяне (Frequency Division Multiple Access – FDMA). При него различните спътници се разграничават чрез различни носещи честоти, определени от съответния честотен канал k. Поради това носещите честоти L1 и L2 не са еднакви за всички GLONASS спътници:

$$f_{L1,k} = 1602.0 + k \cdot 0.5625 \ MHz \quad f_{L2,k} = 1246.0 + k \cdot 0.4375 \ MHz$$

При модернизирането на GLONASS са въведени и сигнали, използващи множествен достъп с кодово разделяне (Code Division Multiple Access – CDMA). При този принцип различните спътници могат да излъчват върху една и съща носеща честота, като сигналите им се разграничават чрез различни кодови последователности. Отвореният сигнал L3OC например се излъчва на обща носеща честота 1202.025 MHz [105, 106, 120]. Това уточнение е важно за йоносферната обработка. При класическите GLONASS L1/L2 FDMA сигнали във формулите, зависещи от f_1 и f_2, трябва да се използват конкретните честоти за съответния честотен канал на спътника. При CDMA сигнал като L3OC номиналната носеща честота е обща за всички спътници.

За обобщение основните честоти, които имат значение за двучестотните йоносферни наблюдения, са представени в Таблица 2.1.

Таблица 2.1. Носещи честоти на GNSS

Система	Сигнал/диапазон	Носеща честота (MHz)
GPS	L1	1575.42
GPS	L2	1227.60
GPS	L5	1176.45
Galileo	E1	1575.42
Galileo	E5a	1176.45
Galileo	E5b	1207.14
Galileo	E6	1278.75
BeiDou	B1I	1561.098
BeiDou	B1C	1575.42
BeiDou	B2I	1207.14
BeiDou	B2a	1176.45
BeiDou	B3I	1268.52
GLONASS	L1, FDMA	$1602 + k \cdot 0.5625$
GLONASS	L2, FDMA	$1246 + k \cdot 0.4375$
GLONASS	L3OC, CDMA	1202.025

Наличието на няколко сигнала върху една и съща или близки носещи честоти не означава, че съответните кодови наблюдения са идентични. Различните сигнали могат да използват различни кодови последователности, модулации и навигационни съобщения и да преминават през различни електронни трактове в спътника и

приемника. Поради това при високоточна обработка е важно да се отчита **конкретният тип наблюдаван сигнал**, а не само неговата носеща честота. Именно тези характеристики, зависещи от конкретния сигнал, са свързани и с инструменталните кодови закъснения, разгледани в §2.6.1.

От гледна точка на изследването на йоносферата най-същественото свойство е наличието на наблюдения към един и същ спътник на две или повече честоти. Йоносферното влияние от първи порядък е обратно пропорционално на квадрата на носещата честота, поради което едно и също електронно съдържание предизвиква различно въздействие върху сигналите на различните честоти. Разликата между тези въздействия позволява отделянето на йоносферната компонента чрез геометрично независимата линейна комбинация, разгледана в §2.4.3.

2.3.3. Кодови наблюдения и псевдоразстояния

Кодовите GNSS наблюдения се основават на измерването на времето за разпространение на модулираната кодова последователност от спътника до приемника. Приемникът генерира копие на известния код и определя времевото отместване, при което той се съгласува с приетия сигнал. Умножаването на измереното времево закъснение по скоростта на светлината дава оценка на разстоянието между спътника и приемника [54, 120]:

$$P = c\,\Delta t\,, \tag{7}$$

където P е измереното псевдоразстояние, c е скоростта на светлината, а Δt е измереното време за разпространение на сигнала.

Получената величина се нарича псевдоразстояние, а не геометрично разстояние, тъй като съдържа не само действителното разстояние между спътника и приемника, но и влиянието на несинхронизираните им часовници, атмосферата, инструменталните закъснения, многопътността и измервателния шум. Пълният модел на кодовото наблюдение и отделянето на йоносферната компонента са разгледани в §2.4.2.

Кодовото измерване не определя непосредствено времето на преминаване на един физически импулс. На практика приемникът оценява отместването между приетата кодова последователност и локално генерираното нейно копие. Точността на определяне на това отместване зависи от структурата и честотната ширина на сигнала, качеството на приемане и характеристиките на приемника.

Йоносферата предизвиква групово закъснение на модулиращия код. Поради дисперсионния характер на йоносферната плазма величината на това закъснение е честотно зависима и от първи порядък е пропорционална на TEC по пътя на сигнала и обратно пропорционална на квадрата на носещата честота. Тази зависимост е разгледана подробно в §2.4 и е основата за използването на двучестотни кодови наблюдения при определяне на STEC.

Основно предимство на кодовите наблюдения е, че при непрекъснато проследяване те не съдържат неизвестен цял брой цикли, аналогичен на фазовата неопределеност. Поради това те предоставят информация за абсолютното ниво на измерваната величина. При определянето на TEC обаче тази информация е повлияна от диференциалните кодови закъснения на спътника и приемника, разгледани в §2.6.1.

Основният недостатък на кодовите наблюдения е сравнително по-високият измервателен шум. Те са и по-чувствителни към многопътност в сравнение с фазовите измервания на носещата вълна. Поради тази причина директно определените от кодови разлики стойности на TEC обикновено са по-шумни и не са оптимални за проследяване на малки и бързи изменения [120].

При съвременните многочестотни GNSS приемници за една носеща честота могат да бъдат налични различни кодови сигнали. Те могат да се различават по кодова структура и модулация и да бъдат подложени на различни инструментални закъснения. Следователно при високоточната обработка трябва да се отчита не само честотата, но и конкретният тип използван кодов сигнал.

Комбинирането на кодовите наблюдения с по-прецизните фазови измервания позволява да се използват взаимно допълващите се свойства на двата типа данни. Кодът предоставя информация за константното отместване, докато фазовите наблюдения позволяват много по-точно проследяване на измененията във времето. Този принцип е разгледан подробно в §2.6.3.

2.3.4. Фазови измервания на носещата вълна

Фазовите GNSS наблюдения се получават чрез сравнение между фазата на приетата носеща вълна и фазата на локално генериран сигнал в приемника. Тъй като дължината на носещата вълна е значително по-малка от еквивалентната дължина на кодовата последователност, фазовите измервания позволяват много по-прецизно проследяване на относителните изменения на разстоянието между спътника и приемника [54, 120].

Измерената фазова величина първоначално се представя в цикли. За преобразуване в единици дължина се използва дължината на носещата вълна:

$$\lambda_i = \frac{c}{f_i}, \tag{8}$$

където λ_i е дължината на носещата вълна за честота f_i, а c е скоростта на светлината.

За разлика от кодовото наблюдение, фазовото измерване не определя непосредствено абсолютното разстояние между спътника и приемника. При началното захващане на сигнала приемникът определя дробната част на фазата, но пълният брой цели цикли между спътника и приемника остава неизвестен. Тази неизвестна величина се обозначава с N_i и представлява фазовата неопределеност. Нейните свойства и ролята ѝ при обработката са разгледани подробно в §2.6.2.

Докато проследяването на даден спътников сигнал остава непрекъснато и не възникне цикличен скок, фазовата неопределеност запазва постоянна стойност. Това позволява фазовите наблюдения да описват с висока точност относителните изменения във времето. Именно тази характеристика ги прави особено ценни при изследване на малки и бързи изменения на електронното съдържание.

Йоносферата въздейства върху фазовото наблюдение по различен начин в сравнение с кодовото. Докато кодовата модулация претърпява групово закъснение, фазата на носещата вълна претърпява фазово избързване, като йоносферният член влиза с отрицателен знак в уравнението на фазовото наблюдение. Физическата причина за тази разлика е разгледана в §2.4.1 и §2.4.2.

Високата относителна точност на фазовите наблюдения е съпроводена и с по-големи изисквания към тяхната непрекъснатост. Загуба на проследяване или цикличен скок променя фазовата неопределеност и разделя наблюденията на отделни непрекъснати интервали. Поради това контролът за циклични скокове и прекъсвания е съществен етап при всяка високоточна фазова обработка.

Фазовите измервания са чувствителни и към редица други влияния, включително инструментални фазови закъснения, многопътност, фазово навиване вследствие на относителната ориентация на антените, часовникови ефекти и измервателен шум. Част от тези влияния могат да бъдат моделирани или елиминирани чрез подходящи линейни комбинации, а други трябва да бъдат отчетени чрез допълнителни корекции и контрол на качеството.

За йоносферните изследвания особено важно е комбинирането на фазови наблюдения на две или повече честоти. Тъй като геометричните и голяма част от недисперсионните компоненти са общи за наблюденията на различните честоти, тяхното подходящо комбиниране позволява да бъде отделена честотно зависимата йоносферна част. Този принцип е развит в §2.4.3 чрез геометрично независимата линейна комбинация.

2.3.5. Двучестотни наблюдения и значение за йоносферните изследвания

Двучестотните GNSS наблюдения имат основно значение за изследването на йоносферата, тъй като позволяват използването на нейните дисперсионни свойства за отделяне на честотно зависимата компонента от останалите влияния в наблюденията. При едновременно проследяване на един и същ спътник на две носещи честоти геометричното разстояние и голяма част от недисперсионните компоненти са общи за двете наблюдения, докато йоносферният ефект се различава в зависимост от честотата [54, 120].

Йоносферното влияние от първи порядък е обратно пропорционално на квадрата на носещата честота:

$$I_f \propto \frac{1}{f^2} \tag{9}$$

Поради това едно и също електронно съдържание по пътя на GNSS сигнала предизвиква различно кодово закъснение и фазово избързване на различните честоти. Съпоставянето на тези въздействия позволява да бъде извлечена информация за STEC, без да е необходимо предварително да бъде известно геометричното разстояние между спътника и приемника.

При формиране на подходяща разлика между наблюденията на две честоти общите геометрични компоненти се елиминират или силно се редуцират. Получената комбинация съдържа предимно честотно зависимия йоносферен компонент, инструменталните закъснения, фазовите неопределености при фазовите наблюдения и измервателния шум. Този принцип е в основата на геометрично независимата линейна комбинация, разгледана подробно в §2.4.3.

Кодовите и фазовите двучестотни наблюдения предоставят взаимно допълваща се информация. Разликата между кодовите наблюдения позволява да бъде оценена абсолютната компонента, но се характеризира с по-висок шум и е повлияна от диференциалните кодови закъснения. Фазовата комбинация има значително по-нисък шум и позволява прецизно проследяване на измененията във времето, но съдържа константно отместване, определено от фазовите неопределености и инструменталните фазови закъснения.

Поради това в практическата обработка за определяне на TEC често се използва съвместно кодовата и фазовата информация. Кодът осигурява необходимата информация за константното отместване, а фазовите измервания позволяват неговото прецизно проследяване във времето. Принципът на това кодово-фазово привеждане е разгледан в §2.6.3.

Двучестотният подход позволява също по-надеждно откриване на циклични скокове и други несъответствия между наблюденията, тъй като внезапните промени на една от честотите се проявяват отчетливо в линейните комбинации. Това е особено важно при автоматизирана обработка на дълги времеви редове и при изследване на краткопериодични изменения на TEC.

Следва да се има предвид, че при различните GNSS системи конкретните двойки сигнали и носещите им честоти могат да бъдат различни. При GPS например често се използват комбинации L1/L2 или L1/L5, докато при GLONASS традиционните L1/L2 сигнали използват честотно разделяне между спътниците. Следователно коефициентите във формулите за определяне на йоносферното влияние трябва да се изчисляват с конкретните носещи честоти на използваните наблюдения.

При многосистемните и многочестотните GNSS приемници наличието на повече от две честоти позволява формиране на допълнителни линейни комбинации, подобряване на контрола на качеството и по-гъвкаво оценяване на инструменталните влияния. Независимо от броя на използваните честоти обаче основният физически принцип остава един и същ – използване на честотната зависимост на йоносферното въздействие за отделяне и количествено определяне на електронното съдържание.

2.4. Разпространение на GNSS сигналите през йоносферата

2.4.1. Дисперсионни свойства на йоносферата

Йоносферата представлява йонизирана част от земната атмосфера, съдържаща свободни електрони и йони. При разпространението на радиосигнали нейните електромагнитни свойства се различават от тези на неутралната атмосфера. От особено значение за GNSS е, че йоносферата представлява дисперсионна среда, т.е. скоростта на разпространение на електромагнитната вълна зависи от нейната честота [54, 120].

При опростен модел на студена плазма, при който сблъсъците между частиците се пренебрегват (от англ. *collisionless plasma*), и при пренебрегване на влиянието на земното магнитно поле, плазмената честота се определя от:

$$f_p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}, \quad (10)$$

където f_p е плазмената честота, N_e е концентрацията на свободни електрони, e е елементарният електричен заряд, ε_0 е диелектричната проницаемост на вакуума, а m_e е масата на електрона.

За честоти, значително по-високи от плазмената честота, каквито са носещите честоти на GNSS сигналите, фазовият показател на пречупване на йоносферата може в първо приближение да бъде представен като:

$$n_{ph} \approx 1 - \frac{40.3\, N_e}{f^2}, \quad (11)$$

където n_{ph} е фазовият показател на пречупване, N_e е концентрацията на свободни електрони в m^{-3}, а f е честотата на сигнала в Hz.

Съответният групов показател на пречупване има противоположен знак на йоносферния член:

$$n_{gr} \approx 1 + \frac{40.3\, N_e}{f^2} \quad (12)$$

Разликата между фазовия и груповия показател на пречупване определя противоположното проявление на йоносферния ефект при кодовите и фазовите GNSS наблюдения. В йоносферната плазма груповият показател на пречупване е по-голям от единица, което води до закъснение на кодовите наблюдения. Фазовият показател на пречупване е по-малък от единица, поради което при фазовите измервания на носещата вълна се наблюдава фазово избързване. Разликата между двата ефекта е следствие от дисперсионните свойства на йоносферата. Фазовата скорост при тези условия може формално да надвишава скоростта на светлината във вакуум, но това не означава пренасяне на информация или енергия със свръхсветлинна скорост.[1]

Първият по големина йоносферен ефект върху GNSS наблюденията е обратно пропорционален на квадрата на честотата:

[1] **Фазовата скорост** може да бъде по-голяма от скоростта на светлината във вакуум, без това да нарушава теорията на относителността. Причината е, че фазовата скорост не представлява скоростта, с която се пренасят информация или енергия. **Груповата скорост** е тази, която е свързана с разпространението на модулацията и информацията, така че няма свръхсветлинно предаване на информация.

(13) $$I_f = \frac{40.3}{f^2} STEC,$$

където I_f е йоносферен ефект от първи порядък, изразен като еквивалентна дължина, а $STEC$ е пълното електронно съдържание по пътя на GNSS сигнала между спътника и приемника:

(14) $$STEC = \int_{satellite}^{receiver} N_e(s)\,ds$$

В тази зависимост $STEC$ се изразява в $electrons\ m^{-2}$. За практически приложения се използва единицата TECU:

(15) $$1\,TECU = 10^{16}\,electrons\,m^{-2}$$

Обратноквадратичната зависимост от честотата има основно значение за йоносферните GNSS изследвания. Един и същ електронен слой предизвиква различен по големина ефект върху сигналите, излъчвани на различни носещи честоти. Следователно едновременните наблюдения на две или повече честоти позволяват честотно независимите компоненти на измерването да бъдат отделени от дисперсионния йоносферен ефект.

За две честоти f_1 и f_2отношението между йоносферни ефекти от първи порядък[2] е:

(16) $$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2^2}{f_1^2}$$

Доминиращият йоносферен ефект от първи порядък върху GNSS наблюденията е обратно пропорционален на квадрата на честотата на сигнала. Именно това различие се използва при формирането на геометрично независимата линейна комбинация, разгледана в §2.4.3, и при последващото определяне на STEC.

2.4.2. Йоносферно влияние върху кодовите и фазовите GNSS наблюдения

За кодово наблюдение на честота f_i опростеното уравнение може да се представи във вида:

(17) $$P_i = \rho + c(\delta t_r - \delta t_s) + T + I_i + b_i^P + \varepsilon_i^P,$$

където P_i е кодовото наблюдение, ρ е геометричното разстояние между спътника и приемника, c е скоростта на светлината, δt_r и δt_s са часовниковите отклонения на приемника и спътника, Tе тропосферното закъснение, I_i е йоносферното закъснение за съответната честота, b_i^P обобщава инструменталните кодови закъснения, а ε_i^Pсъдържа измервателния шум и останалите немоделирани ефекти.

За фазовото наблюдение, изразено в единици дължина, съответното уравнение може да се запише като:

[2] Терминът „първи порядък“ означава водещия член в приближеното представяне на йоносферното влияние върху GNSS сигнала. При стандартните GNSS честоти този член е значително по-голям от ефектите от по-висок порядък и представлява основата за определянето на TEC от двучестотни наблюдения.

(18) $$L_i = \rho + c\left(\delta t_r - \delta t_s\right) + T - I_i + \lambda_i N_i + b_i^L + \varepsilon_i^L,$$

където L_i е фазовото наблюдение, λ_i е дължината на вълната, N_i е целочислената фазова неопределеност, b_i^L представлява фазовите инструментални членове, а ε_i^L – измервателният шум и останалите немоделирани влияния.

Различният знак на йоносферния член в кодовите и фазовите наблюдения отразява различното въздействие на дисперсионната йоносфера върху груповата и фазовата скорост на GNSS сигнала. При кодовите измервания йоносферата предизвиква закъснение, докато при фазовите наблюдения се проявява фазово изпреварване.

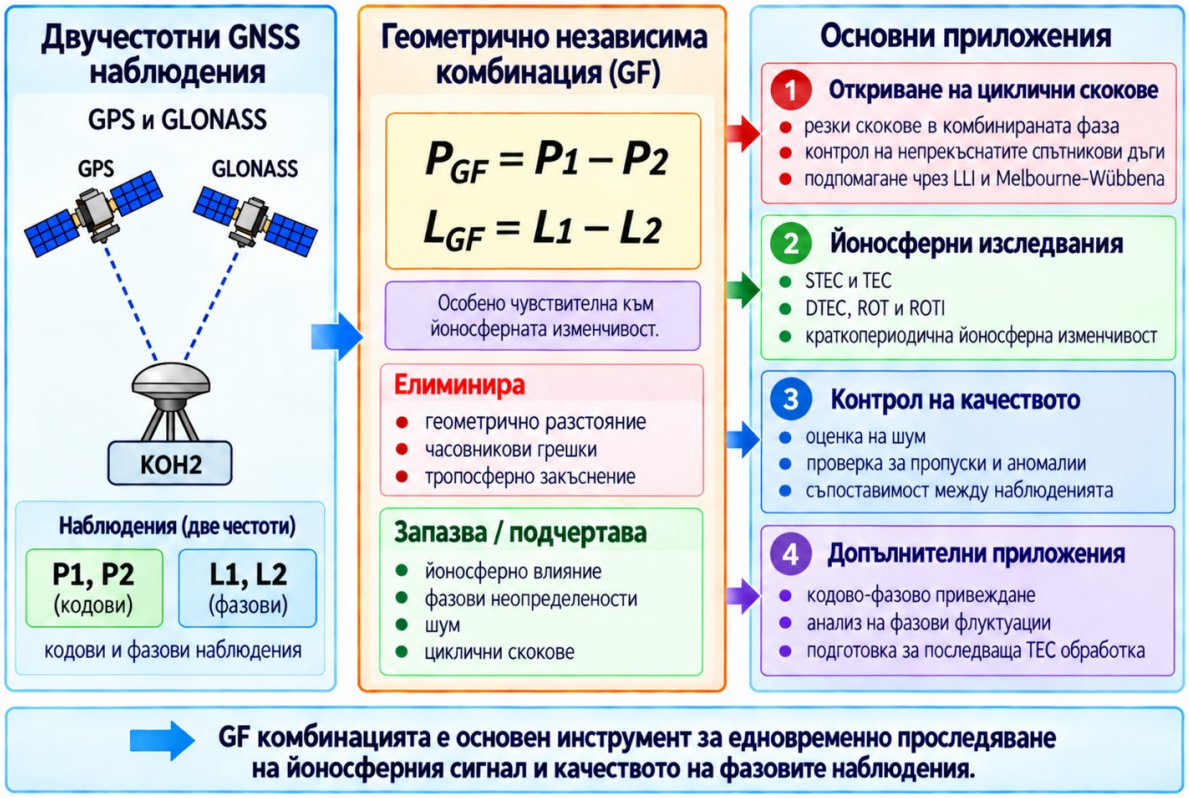
В първо приближение йоносферният член зависи обратно пропорционално на квадрата на честотата:

(19) $$I_i = \frac{40.3}{f_i^2} STEC,$$

където STEC е пълното електронно съдържание по пътя на GNSS сигнала между спътника и приемника, изразено в общо количество електрони на квадратен метър.

2.4.3. Геометрично независима линейна комбинация

Едно от основните предимства на двучестотните GNSS наблюдения при изследване на йоносферата е възможността да се формира геометрично независима линейна комбинация (*geometry-free combination, GF*). При нея чрез комбиниране на наблюденията на две различни честоти се елиминират членовете, които в първо приближение са еднакви за двете честоти, включително геометричното разстояние между спътника и приемника, часовниковите отклонения и тропосферното закъснение (Фигура 2.2). Същевременно честотно зависимият йоносферен член се запазва.



Фигура 2.2. Геометрично независима комбинация на двучестотни кодови и фазови GNSS наблюдения и основни приложения (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

За две честоти f_1 и f_2 геометрично независимата кодова комбинация може да бъде дефинирана като:

(20) $$P_{GF} = P_2 - P_1$$

След заместване на уравненията за P_1 и P_2 общите честотно независими членове се елиминират и се получава:

(21) $$P_{GF} = I_2 - I_1 + \left(b_2^P - b_1^P\right) + \left(\varepsilon_2^P - \varepsilon_1^P\right),$$

или, използвайки честотната зависимост на йоносферния член:

(22) $$P_{GF} = 40.3\, STEC \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2}\right) + B_{GF}^P + \varepsilon_{GF}^P,$$

където P_{GF} е геометрично независимата кодова комбинация; $STEC$ е пълното електронно съдържание по пътя на GNSS сигнала между спътника и приемника; f_1и f_2са

носещите честоти; B_{GF}^{P} е диференциалното инструментално кодово закъснение[3], а ε_{GF}^{P} обобщава шума на кодовите наблюдения и останалите немоделирани ефекти.

По аналогичен начин за фазовите наблюдения може да се формира комбинацията:

(23) $$L_{GF} = L_1 - L_2$$

При избраната знакова конвенция йоносферният член има същия знак като при $P_2 - P_1$, така че:

(24) $$L_{GF} = 40.3\, STEC \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) + B_{GF}^{L} + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{GF}^{L}$$

В GF комбинациите се елиминират геометричното разстояние, часовниковите членове и тропосферното закъснение, докато йоносферният ефект се запазва и се усилва като разлика между неговото въздействие върху двете честоти. Именно това свойство прави геометрично независимата комбинация основен инструмент при определянето на пълното електронно съдържание от двучестотни GNSS наблюдения.

Фазовата GF комбинация е значително по-ниско шумна от кодовата и поради това позволява много по-точно проследяване на измененията на STEC във времето. Тя обаче съдържа неизвестен постоянен член, свързан преди всичко с фазовите неопределености. Фазовите наблюдения сами по себе си не определят еднозначно абсолютната стойност на TEC за даден непрекъснат интервал на проследяване на спътника.

На практика кодовите и фазовите GF комбинации често се използват съвместно: кодовите наблюдения предоставят информация за абсолютното отместване, а фазовите – значително по-прецизна информация за относителните изменения във времето. Процедурата за привеждане на фазовата комбинация към кодовата е разгледана отделно в §2.6.3.

2.5. Пълно електронно съдържание

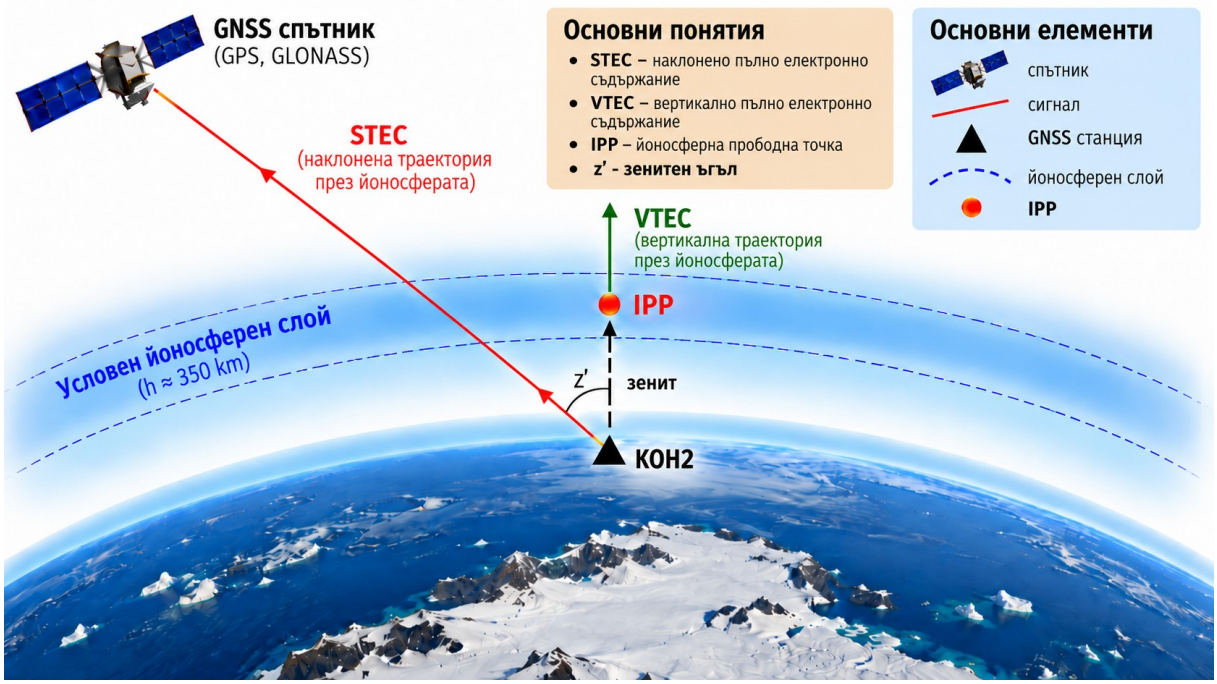
Пълното електронно съдържание (Total Electron Content – TEC) е една от основните интегрални характеристики на йоносферата, използвани при анализа на GNSS наблюдения. То описва общия брой свободни електрони по определено направление на разпространение на радиосигнала и поради това е непосредствено свързано с йоносферното закъснение и фазовото избързване, разгледани в §2.4.

В зависимост от направлението, по което се извършва интегрирането на електронната концентрация, се разграничават наклонено пълно електронно съдържание (STEC) и вертикално пълно електронно съдържание (VTEC). STEC се отнася за действителния път на GNSS сигнала между спътника и приемника, докато VTEC представлява приведена към вертикалното направление величина и позволява по-удобно пространствено и времево сравнение на йоносферното състояние. [54, 120].

Преминаването от STEC към VTEC изисква да бъде отчетена геометрията на наблюдението. За тази цел се въвеждат положението на йоносферната прободна точка

[3] Кодовото измерване на всяка честота съдържа не само геометрията и йоносферното закъснение, но и инструментално закъснение, възникващо при преминаването на сигнала през електронните компоненти на спътника и приемника. То не е еднакво за различните честоти и различните GNSS сигнали. Диференциалният инструментален кодов член B_{GF}^{P} възниква поради различните хардуерни закъснения на кодовите наблюдения на двете честоти и включва принос както от приемника, така и от спътника. Той е свързан с диференциалните кодови закъснения (Differential Code Biases – DCB) и трябва да бъде оценен или отчетен при определяне на абсолютните стойности на STEC.

(Ionospheric Pierce Point – IPP) и функция за преобразуване, чрез която се отчита увеличеният път на сигнала през йоносферния слой при наблюдения на спътници с по-малка височина над хоризонта.



Фигура 2.3. Геометрия на определянето на наклонено и вертикално пълно електронно съдържание при модел на тънък йоносферен слой (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

В следващите подраздели са разгледани дефинициите на STEC и VTEC, геометрията на IPP и връзката между наклоненото и вертикалното пълно електронно съдържание.

2.5.1. Наклонено пълно електронно съдържание – STEC

Пълното електронно съдържание представлява интегрална характеристика на електронната концентрация в йоносферата. При GNSS наблюденията сигналът се разпространява по пътя между спътника и наземния приемник, поради което непосредствено определяната величина е наклоненото пълно електронно съдържание STEC. То се дефинира като интеграл на концентрацията на свободните електрони N_e по пътя на разпространение на GNSS сигнала:

$$STEC = \int_{satellite}^{receiver} N_e(s)\,ds, \tag{25}$$

където $N_e(s)$ е концентрацията на свободни електрони в съответната точка от пътя на сигнала, а ds е елемент от този път. Размерността на STEC е брой електрони на единица площ, като в практиката се използва единицата TECU:

$$1\,TECU = 10^{16}\,electrons\,m^{-2} \tag{26}$$

Стойността на STEC зависи не само от моментното състояние на йоносферата, но и от геометрията между спътника и приемника. При малка височина на спътника над хоризонта пътят на сигнала през йоносферата е по-дълъг, поради което STEC обикновено е по-голямо от вертикалното пълно електронно съдържание над съответния

район. С увеличаване на височината на спътника направлението на сигнала се доближава до вертикалното и разликата между STEC и VTEC намалява.

Йоносферното влияние от първи порядък върху GNSS сигнала е пряко пропорционално на STEC и обратно пропорционално на квадрата на носещата честота, съгласно уравнение (19). Имайки предвид (20) и при пренебрегване или предварително отчитане на инструменталните членове, връзката със STEC е:

$$P_{GF} = 40.3\, STEC \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right) \tag{27}$$

Оттук STEC може да бъде изразено като:

$$STEC = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3\left(f_1^2 - f_2^2\right)} P_{GF}, \tag{28}$$

а при представяне в TECU:

$$STEC\left[TECU\right] = \frac{1}{10^{16}} \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3\left(f_1^2 - f_2^2\right)} P_{GF} \tag{29}$$

Тези зависимости показват принципа на определяне на STEC, но при реални GNSS наблюдения геометрично независимата комбинация съдържа и инструментални членове на спътника и приемника, измервателен шум и други немоделирани влияния. Поради това директното преобразуване на кодовата GF комбинация не е достатъчно за получаване на високоточни абсолютни стойности на STEC. Ролята на диференциалните кодови закъснения и фазовите неопределености е разгледана в §2.6.

Фазовите наблюдения на носещата вълна също позволяват определяне на измененията на STEC и поради значително по-ниския си шум са особено подходящи за проследяване на неговата времева изменчивост. Те обаче съдържат неизвестна фазова неопределеност, поради което абсолютното отместване на фазово определената последователност трябва да бъде оценено чрез съвместното използване на кодови и фазови наблюдения. Тази процедура е разгледана в §2.6.3.

В резултат на обработката за всеки наблюдаван спътник се получава последователност от стойности на STEC, отнасящи се за конкретния път на GNSS сигнала между спътника и приемника. Следователно стойностите от различни спътници и различни моменти не могат да бъдат сравнявани непосредствено единствено като локална характеристика над станцията, тъй като се отнасят за различна геометрия на наблюдение. За пространственото им съпоставяне е необходимо STEC да бъде преобразувано към вертикално пълно електронно съдържание – VTEC.

2.5.2. Вертикално пълно електронно съдържание – VTEC

За да се намали влиянието на различната геометрия на наблюдение и да се осигури по-съпоставимо представяне на йоносферното състояние, STEC се преобразува във вертикално пълно електронно съдържание – VTEC. За разлика от STEC, което се отнася за действителния наклонен път на сигнала между спътника и приемника, VTEC характеризира електронното съдържание по еквивалентно вертикално направление.

В общ вид VTEC може да бъде представено като интеграл на електронната концентрация по вертикалата:

$$VTEC = \int_{h_1}^{h_2} N_e(h)\, dh, \tag{30}$$

където $N_e(h)$ е концентрацията на свободни електрони като функция на височината, а h_1 и h_2 определят разглеждания височинен интервал на йоносферата. Подобно на STEC, VTEC се изразява в TECU.

При GNSS наблюденията VTEC обикновено не се определя чрез непосредствено интегриране по вертикала, а се получава от измереното STEC чрез отчитане на геометрията на пътя на сигнала през йоносферата. В общ вид връзката между двете величини може да се запише като:

(31) $$STEC = M(E)\,VTEC,$$

откъдето

(32) $$VTEC = \frac{STEC}{M(E)},$$

където $M(E)$ е функцията за преобразуване, зависеща основно от височината E на наблюдавания спътник над хоризонта и от приетия геометричен модел на йоносферата. Конкретният вид на $M(E)$ е разгледан в §2.5.4.

Тъй като при малки височини на спътника пътят на сигнала през йоносферата е по-дълъг, стойността на $M(E)$ е по-голяма и STEC може значително да надвишава съответното VTEC. При увеличаване на височината на спътника тази разлика намалява, а при направление, близко до зенита, функцията за преобразуване се доближава до единица и STEC се доближава по стойност до VTEC.

При широко използвания модел на условен сферичен йоносферен слой преобразуването се отнася към точката, в която направлението спътник–приемник пресича условния йоносферен слой. Тази точка се означава като IPP и нейното положение зависи от координатите на приемника, азимута и височината на спътника и приетата височина на йоносферния слой. Геометрията на IPP е разгледана в §2.5.3.

VTEC, получено от дадено GNSS наблюдение, е стойност, отнесена към съответната IPP, а не непременно към пространството непосредствено над приемника. Това разграничение е особено важно при едновременно използване на наблюдения към множество спътници, тъй като техните IPP могат да бъдат разположени на значителни разстояния една от друга.

Преобразуването от STEC към VTEC позволява съществено да се намали геометрично обусловената разлика между наблюденията към спътници с различна височина над хоризонта. Намалената зависимост от геометрията на наблюдението прави VTEC по-подходяща величина за анализ на пространствените и времевите изменения на йоносферата, както и за съпоставка с глобални и регионални карти на пълното електронно съдържание.

2.5.3. Йоносферна прободна точка – IPP

При преобразуването на STEC във VTEC е необходимо да се определи пространственото положение, към което се отнася получената вертикална стойност. За тази цел широко се използва модел на условен сферичен йоносферен слой, при който пространствено разпределената йоносфера условно се представя чрез сферична повърхнина, разположена на определена височина над земната повърхност [107, 120].

Точката, в която пътят на GNSS сигнала между спътника и приемника пресича този условен слой, се нарича йоносферна прободна точка – IPP. Тя представлява геометрична конструкция и не означава, че свободните електрони действително са концентрирани в един слой или в една точка. IPP позволява пространствено разпределеното йоносферно въздействие по пътя на сигнала да бъде отнесено към конкретно положение върху условния слой.

Геометрията на IPP зависи от положението на приемника, азимута и височината на наблюдавания спътник над хоризонта, приетия радиус на Земята и височината на

условния йоносферен слой. При сферично приближение зенитният ъгъл на сигнала в IPP може да се определи от:

$$z' = \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h_I}\cos E\right), \quad (33)$$

където R_E е приетият радиус на Земята, h_I е височината на условния йоносферен слой, E е височината на спътника над хоризонта в точката на приемника, а z' е зенитният ъгъл на пътя на сигнала в IPP.

Ъгловото разстояние по земната сфера между положението на приемника и IPP се определя като:

$$\psi = \frac{\pi}{2} - E - z', \quad (34)$$

където ψ е геоцентричният ъгъл между радиус-векторите към приемника и към IPP. Ако географските координати на приемника са φ_r и λ_r, а азимутът към спътника е A, географската ширина на IPP може да бъде определена чрез:

$$\varphi_{IPP} = \arcsin\left(\sin\varphi_r \cos\psi + \cos\varphi_r \sin\psi \cos A\right), \quad (35)$$

а географската дължина – чрез:

$$\lambda_{IPP} = \lambda_r + atan2\left(\sin\psi \sin A, \cos\varphi_r \cos\psi - \sin\varphi_r \sin\psi \cos A\right), \quad (36)$$

където A се отчита от север по посока на часовниковата стрелка. Тези зависимости позволяват за всяка наблюдателна епоха да бъде определено положението на IPP за съответния спътник.

Положението на IPP се изменя непрекъснато вследствие на движението на GNSS спътника. Следователно последователните наблюдения към един и същ спътник описват различни положения върху условния йоносферен слой. При едновременно наблюдение на множество спътници се формира множество от IPP, разположени на различни разстояния и направления спрямо станцията.

Разстоянието между IPP и местоположението на приемника нараства при намаляване на височината на спътника над хоризонта. Това има две важни последици. От една страна, пътят на сигнала през йоносферата става по-дълъг и разликата между STEC и VTEC се увеличава. От друга страна, получената стойност на VTEC се отнася за област, която може да бъде значително отдалечена от станцията. Поради това наблюденията при малки височини над хоризонта са по-чувствителни както към пространствените градиенти в йоносферата, така и към многопътността и други локални влияния.

Приетата височина h_I също влияе върху изчисленото положение на IPP. Различни методи и глобални йоносферни продукти могат да използват различни ефективни височини на тънкия слой, поради което при пространствени сравнения трябва да се отчита конкретният модел, използван от съответната обработваща процедура.

След определяне на геометрията на IPP зенитният ъгъл z' се използва и при преобразуването между STEC и VTEC. Съответната функция за геометрично преобразуване е разгледана в §2.5.4.

2.5.4. Функция за геометрично преобразуване между STEC и VTEC

Преобразуването на STEC във VTEC се извършва чрез геометрична преобразувателна (мапинг) функция, която отчита различната дължина на пътя на GNSS сигнала през йоносферата в зависимост от геометрията на наблюдението. При широко използвания модел на тънък сферичен йоносферен слой тази зависимост се определя от височината на спътника над хоризонта, приетия радиус на Земята и ефективната височина на йоносферния слой [107, 120].

Като се имат предвид формулите за връзка между STEC и VTEC (31), (32) и (33), функцията може да се представи във вида:

$$M(E)=\frac{1}{\cos z'}, \quad (37)$$

а след заместване може да бъде записана непосредствено като функция на височината на спътника:

$$M(E)=\left[1-\left(\frac{R_E}{R_E+h_I}\cos E\right)^2\right]^{-1/2}, \quad (38)$$

където R_E е приетият радиус на Земята, а h_I е ефективната височина на условния йоносферен слой. Съответно VTEC може да бъде получено непосредствено от STEC чрез:

$$VTEC=STEC\cos z' \quad (39)$$

или:

$$VTEC=STEC\sqrt{1-\left(\frac{R_E}{R_E+h_I}\cos E\right)^2} \quad (40)$$

При наблюдение на спътник близо до зенита E се доближава до 90°, z' клони към нула и $M(E)$ се доближава до единица. В този случай STEC и VTEC имат близки стойности. При намаляване на височината на спътника $M(E)$ нараства, тъй като пътят на сигнала през условния йоносферен слой става по-дълъг.

Използването на функцията за преобразуване позволява наблюденията към спътници с различна геометрия да бъдат приведени към съпоставими вертикални стойности. Това е съществено при комбиниране на наблюдения от множество спътници и при сравнение на локално определените стойности с глобални и регионални продукти, които обикновено представят TEC във вертикална форма.

Моделът на тънък слой представлява приближение на реалната вертикална структура на йоносферата. Свободните електрони са разпределени в значителен височинен диапазон, а действителното разпределение се изменя във времето и пространството. Поради това изборът на ефективна височина h_I оказва влияние както върху функцията за преобразуване, така и върху определеното положение на IPP. Ефектът на това приближение се увеличава при наблюдения с малка височина на спътника над хоризонта.

Поради по-голямата чувствителност към геометричния модел, пространствените градиенти на йоносферата, многопътността и други грешки, при практическата обработка обикновено се въвежда минимално допустима височина на спътниците. Конкретните ограничения и параметри на функцията за преобразуване, приложени в отделните процедури за обработка в настоящото изследване, са разгледани в Глава 4.

2.6. Инструментални закъснения и неопределености

Определянето на TEC от GNSS наблюденията не зависи единствено от дисперсионното влияние на йоносферата. Кодовите и фазовите измервания съдържат допълнителни компоненти, свързани с апаратурните закъснения на спътника и приемника, фазовите неопределености, измервателния шум, многопътността, цикличните скокове и прекъсванията в проследяването на сигналите. Част от тези влияния се елиминират при формирането на геометрично независимата комбинация, докато други остават в нея и трябва да бъдат отчетени при определянето на TEC.

Особено значение за абсолютната оценка на STEC имат диференциалните кодови закъснения. При фазовите наблюдения основен специфичен член е фазовата неопределеност, която поражда константно отместване за всеки непрекъснат интервал на проследяване. Поради различните свойства на кодовите и фазовите измервания тяхното съвместно използване позволява да бъдат съчетани информацията за абсолютната стойност, съдържаща се в кодовите псевдоразстояния, и значително по-ниският шум на фазовите наблюдения.

2.6.1. Диференциални кодови закъснения – DCB

GNSS сигналите на различните честоти и с различна кодова модулация преминават през различни електронни компоненти както на спътника, така и на приемника. Поради това кодовите измервания съдържат инструментални закъснения, чиято стойност зависи от конкретния използван сигнал. При формирането на разлика между кодови наблюдения на две честоти тези закъснения не се елиминират напълно, а остава тяхната разлика, известна като диференциално кодово закъснение (Differential Code Bias – DCB) [107, 120].

Ако инструменталните кодови закъснения за приемника на двете честоти са $b^P_{r,1}$ и $b^P_{r,2}$, а съответните закъснения за спътника са $b^P_{s,1}$ и $b^P_{s,2}$, и имайки предвид (20), то общият диференциален инструментален член може да се представи като:

$$B^P_{GF} = \left(b^P_{r,2} - b^P_{r,1}\right) + \left(b^P_{s,2} - b^P_{s,1}\right) \tag{41}$$

Имайки предвид представянето на геометрично независимата кодова комбинация в (22) се вижда, че измерената стойност на P_{GF} съдържа не само йоносферния ефект, но и диференциалните инструментални закъснения на спътника и приемника. Ако това закъснение не бъде отчетено, то се преобразува непосредствено в систематично отместване на определеното STEC.

Обикновено се разграничават два компонента на инструменталното закъснение – свързан със спътниковата апаратура и свързан с приемника. Спътниковият DCB характеризира разликата между инструменталните закъснения на съответните кодови сигнали в апаратурата на даден спътник, докато DCB на приемника описва аналогичната разлика в електрониката на GNSS приемника. Общото влияние върху наблюдаваната геометрично независима комбинация е резултат от двата компонента.

DCB може да се представи във времеви единици, обикновено наносекунди. При необходимост съответното еквивалентно отместване в единици дължина се получава чрез:

$$B^P = c\, DCB, \tag{42}$$

където c е скоростта на светлината. Поради пряката връзка между геометрично независимата кодова комбинация и STEC, дори сравнително малки инструментални закъснения могат да доведат до измерима промяна на абсолютната стойност на TEC.

При две честоти съответният принос към STEC може да бъде представен като:

(43) $$\Delta STEC_{DCB} = \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3\left(f_1^2 - f_2^2\right)} B_{GF}^P,$$

като знакът на резултата зависи от приетия ред на формиране на кодовата комбинация и от използваната конвенция за DCB. Поради това при комбиниране на DCB продукти и GNSS наблюдения е необходимо да се следи еднозначно кои кодови сигнали участват в съответната величина и как е дефиниран нейният знак.

Диференциалните кодови закъснения могат да бъдат получени от външни калибрационни продукти или да бъдат оценени в рамките на конкретната обработваща процедура. В съвременните GNSS продукти инструменталните отмествания могат да бъдат представяни и като отмествания, специфични за отделните наблюдавани сигнали, от разликите между които се формират съответните DCB. Независимо от конкретния начин на представяне, тяхното отчитане е необходимо при определяне на абсолютни стойности на STEC.

За анализ на измененията на TEC във времето дадено приблизително константно инструментално закъснение може да има по-малко влияние върху краткопериодичната изменчивост, отколкото върху абсолютното TEC. При многогодишни наблюдения обаче не може да се приема предварително, че инструменталните характеристики на приемника и на отделните наблюдавани сигнали остават непроменени за целия период. Това налага DCB да бъдат разглеждани като самостоятелен компонент на обработката, а не като част от самия йоносферен сигнал.

2.6.2. Фазови неопределености

Фазовите измервания на носещата вълна се характеризират с много по-нисък измервателен шум в сравнение с кодовите псевдоразстояния, но съдържат специфична неизвестна величина – фазовата неопределеност. Причината е, че при началното установяване на проследяването приемникът може да определи текущата фаза на приетия сигнал, но не може непосредствено да установи пълния брой цели цикли на носещата вълна между спътника и приемника [54, 120].

В уравнението на фазовото наблюдение (18) фазовата неопределеност за честота f_i се представя чрез N_i. Нейният принос в единици дължина се изразява чрез $\lambda_i N_i$, където λ_i е дължината на носещата вълна, а N_i е неизвестният брой цели цикли.

Докато проследяването на съответния спътников сигнал остава непрекъснато и не възникне цикличен скок, N_i запазва константна стойност. Това позволява фазовите измервания да описват с висока точност относителните изменения на наблюдаваната величина, въпреки че абсолютното отместване на фазовата последователност остава неизвестно.

При двучестотната обработка фазовите неопределености на двете честоти се комбинират. Техният принос към фазовата GF комбинация е:

(44) $$\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

Заедно с диференциалните фазови инструментални закъснения този принос формира общото константно отместване на фазовата GF комбинация:

(45) $$C_{GF}^L = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + B_{GF}^L$$

Поради това фазовата GF комбинация позволява много точно определяне на **измененията на STEC**, но сама по себе си не осигурява еднозначно абсолютната му стойност. За тази цел е необходима допълнителна информация, например от кодовите наблюдения, чрез която да бъде оценено константното отместване на фазовата последователност. Съвместното използване на кодовите и фазовите наблюдения за тази цел е разгледано в §2.6.3.

Важно значение имат **цикличните скокове**. При загуба или нарушаване на непрекъснатото фазово проследяване броят на отчетените цикли може да се промени с цяло число. Ако промяната за честота f_i е ΔN_i, съответният скок във фазовото наблюдение е:

(46) $$\Delta L_i = \lambda_i \Delta N_i$$

Това нарушава константността на фазовата неопределеност и разделя наблюденията към съответния спътник на отделни непрекъснати интервали. След всеки такъв скок константното отместване трябва да бъде оценено отново. Откриването и обработката на цикличните скокове поради това са съществена част от предварителната проверка на фазовите GNSS наблюдения.

При реалната обработка оценяваната фазова неопределеност невинаги може да бъде разглеждана като чисто целочислена величина. Недиференцираните наблюдения съдържат и фазови инструментални закъснения, а при формирането на линейни комбинации се комбинират неопределеностите на няколко честоти. Поради това при анализа на TEC по-съществен е фактът, че полученият фазов компонент остава **константен в рамките на непрекъснат интервал на проследяване**, отколкото неговото непосредствено определяне като цяло число.

Това свойство е основата за използването на фазовите наблюдения при високоточния анализ на TEC: те осигуряват прецизно проследяване на относителните изменения, докато кодовите наблюдения предоставят необходимата информация за определяне на константното отместване на фазовата последователност.

2.6.3. Съвместно използване на кодови и фазови наблюдения при определяне на TEC

Кодовите и фазовите GNSS наблюдения имат различни характеристики при определянето на TEC. Кодовите псевдоразстояния съдържат информация, необходима за определяне на абсолютното отместване на йоносферно чувствителната комбинация, но се характеризират с относително висок измервателен шум и по-силно влияние на многопътността. Фазовите измервания на носещата вълна са значително по-прецизни и позволяват точно проследяване на измененията във времето, но съдържат фазови неопределености и инструментални закъснения, които се проявяват като константно отместване в рамките на всеки непрекъснат интервал на проследяване.

След формирането на разгледаните в §2.4.3 геометрично независими линейни комбинации кодовата комбинация може в опростен вид да бъде представена като:

(47) $$P_{GF}(t) = I_{GF}(t) + B^P_{GF} + \varepsilon^P_{GF}(t),$$

а фазовата – като:

(48) $$L_{GF}(t) = I_{GF}(t) + C^L_{GF} + \varepsilon^L_{GF}(t)$$

където $I_{GF}(t)$ е честотно зависимият йоносферен компонент, B^P_{GF} е диференциалното инструментално закъснение в кодовата комбинация, C^L_{GF} е общото константно отместване на фазовата GF комбинация, дефинирано в §2.6.2, а $\varepsilon^P_{GF}(t)$ и $\varepsilon^L_{GF}(t)$ представят измервателния шум и останалите немоделирани влияния.

И двете комбинации съдържат едни и същи изменения на йоносферния член $I_{GF}(t)$, но са отместени една спрямо друга с приблизително постоянна величина в рамките на непрекъснат интервал без циклични скокове. Разликата между кодовата и фазовата комбинация може да се запише като:

(49) $$P_{GF}(t)-L_{GF}(t)=B_{GF}^{P}-C_{GF}^{L}+\varepsilon_{GF}^{P}(t)-\varepsilon_{GF}^{L}(t)$$

Тъй като общият йоносферен член се елиминира в тази разлика, при достатъчно продължителна и непрекъсната последователност от наблюдения може да бъде оценено адитивното отместване между кодовата и фазовата комбинация. В общ вид неговата оценка може да бъде представена като:

(50) $$\hat{\Delta}_{PL}=Est\left[P_{GF}(t)-L_{GF}(t)\right]$$

където Est означава подходящ статистически оценител, приложен върху валидните наблюдения в съответния непрекъснат интервал. В зависимост от конкретния метод могат да бъдат използвани средни, претеглени или устойчиви спрямо груби грешки оценки.

След определянето на $\hat{\Delta}_{PL}$ фазовата комбинация се привежда към кодовата чрез:

(51) $$L_{GF}^{прив}(t)=L_{GF}(t)+\hat{\Delta}_{PL}$$

Тази операция позволява да бъдат съчетани основните предимства на двата типа наблюдения. От кодовите измервания се получава информация за адитивното отместване на фазовата последователност, докато фазовите измервания осигуряват значително по-нисък шум и по-прецизно проследяване на измененията на TEC във времето. В резултат се получава непрекъсната фазово базирана оценка, приведена към кодовата референция.

Привеждането (*leveling*) на фазовата към кодовата GF комбинация не трябва да се смесва с изглаждането (*smoothing*) на кодовите псевдоразстояния по фазата на носещата вълна; при първата процедура се оценява константното отместване на фазовата последователност, докато при втората основната цел е намаляване на шума на кодовите наблюдения.

Важно е да се подчертае, че привеждането не отстранява автоматично DCB. Диференциалното инструментално закъснение B_{GF}^{P}, съдържащо се в кодовата комбинация, участва в оцененото константно отместване и съответно се пренася в приведената фазова комбинация. Поради това за получаване на коректни абсолютни стойности на STEC инструменталните закъснения на спътника и приемника трябва да бъдат отчетени или оценени чрез съответната обработваща процедура.

Привеждането се извършва поотделно за всеки непрекъснат интервал на проследяване. При възникване на цикличен скок фазовата неопределеност се променя и досегашната оценка на константното отместване престава да бъде валидна. След такова прекъсване $\hat{\Delta}_{PL}$ трябва да бъде определено отново. Поради това откриването на циклични скокове, пропуски и груби грешки е съществен предварителен етап при съвместната обработка на кодовите и фазовите наблюдения.

Точността на привеждането зависи и от качеството на кодовите измервания. Поради по-високия им шум, многопътността и по-неблагоприятната геометрия при малки височини на спътника над хоризонта, отделни кодови наблюдения могат да доведат до неточна оценка на адитивното отместване. Затова в практическите алгоритми обикновено се използват проверки за качеството на наблюденията, ограничения по височина на спътника и подходящи статистически процедури за оценяване на разликата между кодовата и фазовата комбинация.

Съвместното използване на кодови и фазови наблюдения по този начин позволява получаването на TEC последователности, които съчетават информацията от кодовите измервания с високата относителна точност на фазовите измервания. Този принцип е приложен и в обработващите процедури, използвани в настоящото изследване.

2.6.4. Циклични скокове и прекъсвания на наблюденията

Непрекъснатостта на фазовите наблюдения е основно условие за тяхното използване при високоточно определяне на измененията на TEC. Докато GNSS приемникът проследява непрекъснато даден сигнал, фазовата неопределеност остава константна. При нарушаване на това проследяване може да възникне цикличен скок (*cycle slip*) – внезапна промяна на отчетения брой цели цикли на фазовото измерване [54, 120].

Ако фазовата неопределеност на честота f_iсе промени от N_i на $N_i+\Delta N_i$, съответната промяна във фазовото наблюдение, изразено в единици дължина, е:

(52) $$\Delta L_i=\lambda_i \Delta N_i,$$

където λ_i е дължината на носещата вълна, а ΔN_i е промяната на фазовата неопределеност в цели цикли.

Цикличните скокове могат да бъдат предизвикани от временно отслабване или загуба на GNSS сигнала, препятствия по пътя на разпространението, многопътност, ниско отношение сигнал/шум, смущения в приемането или бързи изменения на средата на разпространение. При силно динамични йоносферни условия също могат да възникнат бързи фазови изменения, които затрудняват непрекъснатото проследяване на сигнала.

В геометрично независимата фазова комбинация цикличен скок на която и да е от използваните честоти води до промяна на константното отместване. При комбинацията $L_{GF}=L_1-L_2$ тази промяна може да бъде представена като:

(53) $$\Delta L_{GF}=\lambda_1 \Delta N_1-\lambda_2 \Delta N_2$$

Следователно една и съща оценка на константното отместване не може да бъде използвана от двете страни на цикличния скок. Наблюденията трябва да бъдат разделени на отделни непрекъснати интервали, за всеки от които фазовата неопределеност и съответното кодово-фазово привеждане се разглеждат независимо.

Цикличният скок трябва да се разграничава от обикновен пропуск в наблюденията. Пропускът представлява липса на измервания за една или повече последователни епохи, докато цикличният скок означава изменение на фазовата неопределеност. Двете явления често са свързани, тъй като загубата на проследяване може едновременно да предизвика пропуск и последващо повторно установяване на фазовото наблюдение с нова стойност на неопределеността.

Откриването на циклични скокове може да се основава на измененията на отделните фазови наблюдения или на подходящи линейни комбинации. Двучестотните комбинации са особено полезни, тъй като позволяват да бъдат потиснати част от общите геометрични влияния и да бъдат откроени внезапни несъответствия между последователните фазови измервания. В практическите алгоритми тези проверки могат да бъдат допълнени с информация за качеството на проследяването, записана от GNSS приемника.

За определянето на TEC правилното откриване на цикличните скокове е особено важно, тъй като незасечена промяна на фазовата неопределеност може да бъде интерпретирана погрешно като рязко изменение на йоносферното електронно съдържание. Обратно, неправилното разделяне на непрекъсната последователност може да доведе до ненужно преоценяване на константното отместване и до влошаване на непрекъснатостта на получените TEC стойности.

Поради това проверката за циклични скокове и прекъсвания предхожда процедурите за кодово-фазово привеждане и окончателното определяне на TEC. Конкретните критерии за контрол на наблюденията в използваните в настоящото изследване процедури за обработка са представени в Глава 4.

2.6.5. Многопътност, измервателен шум и други източници на грешки

Освен инструменталните закъснения и фазовите неопределености, GNSS наблюденията се влияят и от редица други фактори, които могат да влошат точността на определянето на TEC. Сред най-съществените са многопътността, измервателният шум, неблагоприятната геометрия на наблюдение, смущенията в приемането и краткотрайните загуби на проследяване.

Многопътността възниква, когато до антената достигат не само директно разпространяващият се GNSS сигнал, но и негови отражения от околни повърхности. Интерференцията между директния и отразените сигнали изменя както кодовите, така и фазовите наблюдения. Ефектът обикновено е по-силен при малки височини на спътника над хоризонта, когато вероятността за отражения от терена, конструктивни елементи и други обекти в близост до антената е по-голяма.

Кодовите псевдоразстояния са значително по-чувствителни към многопътност и измервателен шум в сравнение с фазовите измервания на носещата вълна. Това е една от основните причини фазовите наблюдения да се използват за високоточен анализ на относителните изменения на TEC, докато кодовите наблюдения се използват преди всичко за оценяване на константното отместване и на абсолютната компонента.

В общ вид измервателният шум може да бъде представен като добавъчна случайна компонента към съответното наблюдение:

(54) $$P_i^{obs} = P_i + \varepsilon_i^P$$

и

(55) $$L_i^{obs} = L_i + \varepsilon_i^L,$$

където ε_i^P и ε_i^L представят шумовите и останалите немоделирани компоненти на кодовото и фазовото наблюдение. Обикновено:

(56) $$\sigma_{\varepsilon^L} \ll \sigma_{\varepsilon^P},$$

т.е. стандартното отклонение на фазовия измервателен шум е значително по-малко от това на кодовия.

При формирането на геометрично независимите комбинации шумът от отделните честоти също се комбинира. Ако се приеме, че шумовете на двете кодови наблюдения са некорелирани, дисперсията на кодовата GF комбинация може да се представи приблизително като:

(57) $$\sigma^2_{P_{GF}} = \sigma^2_{P_1} + \sigma^2_{P_2},$$

а аналогично за фазовата комбинация:

(58) $$\sigma^2_{L_{GF}} = \sigma^2_{L_1} + \sigma^2_{L_2}$$

Това показва, че формирането на разлика между две наблюдения **не** елиминира измервателния шум. Напротив, при некорелирани грешки той се натрупва статистически в получената комбинация.

Качеството на GNSS наблюденията зависи и от височината на спътника над хоризонта. При малки височини сигналът преминава по-дълъг път през атмосферата, а влиянието на многопътността и отраженията от обекти и повърхности в непосредствена близост до антената, както и на пространствените градиенти в йоносферата, обикновено се увеличава. Едновременно с това геометричното преобразуване между STEC и VTEC става по-чувствително към приетия модел на йоносферния слой. Поради тази причина

при практическата обработка често се въвежда минимална допустима височина на спътниците.

Допълнителен показател за качеството на приемането е отношението сигнал/шум C/N_0. По-ниските стойности на C/N_0 обикновено са свързани с по-неблагоприятни условия за проследяване и с увеличаване на вероятността за повишен измервателен шум, загуба на проследяване или циклични скокове. Само по себе си C/N_0 обаче не представлява директна оценка на йоносферното състояние, тъй като се влияе и от характеристиките на антената, приемника, геометрията и локалните условия.

При обработката могат да възникнат и други грешки, свързани с некоректни или непълни метаданни, несъответствие на използваните типове GNSS сигнали, неточно определени орбити, грешки при времевото съгласуване и неправилно идентифициране на прекъсванията в наблюденията. При многогодишна автоматизирана обработка тези фактори имат особено значение, тъй като дори малки несъответствия в отделни файлове могат да се проявят като систематични различия между отделни наблюдателни периоди.

Поради това надеждното определяне на TEC изисква последователен контрол на качеството на входните наблюдения, идентифициране на прекъсванията и цикличните скокове, ограничаване на наблюденията с неблагоприятна геометрия и проверка на метаданните и използваните GNSS продукти. Конкретните критерии за подбор и контрол, приложени за обработката в настоящото изследване, са представени в Глава 4.

2.7. Показатели за краткопериодична изменчивост на TEC

Освен абсолютните стойности на STEC и VTEC, GNSS наблюденията позволяват да бъдат изследвани и техните изменения в по-кратки времеви интервали. За тази цел се използват показатели, основани на времевите изменения на TEC или на отклоненията му спрямо локално определен фон. Те позволяват да бъдат откроени краткопериодични вариации, които могат да останат слабо изразени в абсолютните стойности на TEC.

Такива показатели не представляват самостоятелни измервания на електронното съдържание, а се получават чрез последваща обработка на GNSS-базираните TEC оценки. Тяхната стойност зависи не само от състоянието на йоносферата, но и от честотата на регистрация, продължителността на използвания времеви прозорец, качеството на фазовите наблюдения и приетия алгоритъм за обработка.

2.7.1. Скорост на изменение на TEC – ROT

Един от най-простите показатели за краткопериодична изменчивост е скоростта на изменение на TEC (Rate of TEC – ROT). Тя характеризира промяната на TEC за единица време и може да бъде определена между две последователни епохи като:

$$ROT\left(t_k\right)=\frac{TEC\left(t_k\right)-TEC\left(t_{k-1}\right)}{t_k-t_{k-1}} \quad (59)$$

Когато TEC се изразява в TECU, а времевият интервал – в минути, единицата на ROT е $TECU\ min^{-1}$.

За определянето на ROT обикновено се използват фазово базирани TEC стойности, тъй като по-ниският шум на фазовите измервания позволява по-надеждно откриване на малките изменения между последователни епохи. Константното отместване на дадена непрекъсната фазова последователност се елиминира при формирането на разликата между последователните стойности, което прави ROT по-слабо чувствителен към абсолютното ниво на TEC.

Това предимство е валидно само в рамките на непрекъснат интервал на проследяване. Цикличен скок или неустановено прекъсване може да предизвика

изкуствено голяма стойност на ROT и да бъде интерпретирано погрешно като бързо йоносферно изменение. Надеждното определяне на ROT изисква предварителен контрол на непрекъснатостта и качеството на фазовите наблюдения.

2.7.2. Индекс ROTI

За статистическо характеризиране на изменчивостта на ROT е въведен индексът ROTI (Rate of TEC Index) [95]. Той се определя като стандартното отклонение на ROT в зададен времеви прозорец:

(60) $$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2},$$

където ъгловите скоби означават осредняване върху избрания времеви интервал.

ROTI характеризира степента на краткопериодична изменчивост на TEC, а не неговата абсолютна стойност. Малките стойности съответстват на относително плавни изменения на TEC, докато увеличаването на ROTI показва по-силни флуктуации по пътя на GNSS сигнала. Индексът е широко използван като показател за наличието на йоносферни нееднородности и за оценка на тяхното въздействие върху GNSS сигналите. Класическата дефиниция на Pi et al. [95] използва стандартното отклонение на ROT в 5-минутен интервал.

Стойността на ROTI зависи от честотата на регистрация и продължителността на времевия прозорец, поради което непосредственото сравнение на резултати с различни настройки не е коректно без отчитане на тези различия. В конкретната реализация на OASIS ROTI се определя в 1-минутни прозорци върху предварително приведените GF комбинации.

ROTI не е пряк измерител на амплитудната или фазовата сцинтилация и не трябва да се отъждествява със специализираните сцинтилационни индекси. Той представлява GNSS-базиран показател за бързата изменчивост на TEC, който може да бъде получен и от стандартни геодезически приемници.

2.7.3. Отклонение на TEC спрямо локалния фон – ΔTEC

Друг подход за откроряване на краткопериодичните изменения е отстраняването на бавно изменящата се фонова компонента на TEC. В общ вид отклонението може да бъде представено като:

(61) $$\Delta TEC(t) = TEC(t) - TEC_{bg}(t),$$

където $TEC_{bg}(t)$ е оценка на бавно изменящия се фон.

Стойностите на ΔTEC могат да бъдат както положителни, така и отрицателни и показват отклонението на наблюдаваното TEC спрямо избраната фонова зависимост. По този начин се потискат по-бавните денонощни и геометрично обусловени изменения и се откроряват вариации с по-кратък времеви мащаб.

За разлика от ROTI, за ΔTEC няма единна универсална процедура за определяне на фоновата компонента. В различни изследвания могат да бъдат използвани полиномиално приближение, плъзгащо осредняване, филтриране или други методи за отстраняване на бавно изменящия се фон. В използваната в настоящото изследване обработваща линия чрез OASIS ΔTEC се определя като разлика между 15-минутна и 60-минутна плъзгаща средна на приведената GF комбинация:

(62) $$\Delta TEC(t) = \overline{TEC}_{15\,min}(t) - \overline{TEC}_{60\,min}(t)$$

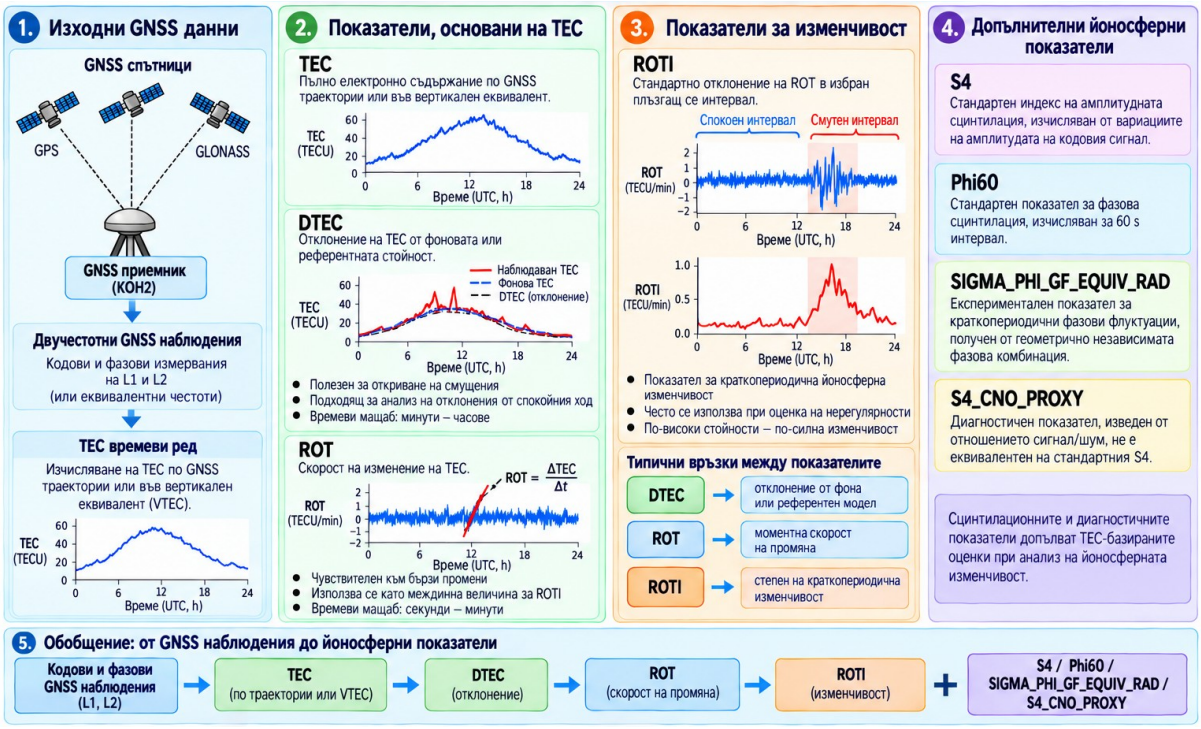
По-краткият 15-минутен прозорец следва по-бързите изменения на сигнала, докато 60-минутното осредняване представя по-бавно изменящия се фон. Разликата между тях подчертава вариации с междинен времеви мащаб и потиска както бавната фонова компонента, така и част от високочестотния шум. OASIS определя тази величина като TEC anomaly index (ΔTEC).

2.7.4. Интерпретация и ограничения

ROT, ROTI и ΔTEC описват различни характеристики на времевата изменчивост и не са взаимозаменяеми. ROT характеризира скоростта на изменение между последователни епохи; ROTI характеризира статистическата изменчивост на ROT в определен времеви прозорец; ΔTEC показва отклонението спрямо избрана фонова компонента.

Повишаването на тези показатели може да бъде свързано с наличие на по-силна пространствена или времева изменчивост на електронното съдържание, но само по себе си не позволява еднозначно да бъде определен физическият механизъм, който я причинява. Наблюдаваните стойности могат да бъдат повлияни и от геометрията приемник–спътник, многопътността, циклични скокове, измервателния шум и избраните параметри на обработката.

Интерпретацията на тези показатели трябва да отчита едновременно качеството на GNSS наблюденията, състоянието на йоносферата и геомагнитната обстановка. Конкретното им изчисляване в обработващата процедура чрез ruOASIS е представено в Глава 4.



Фигура 2.4. Основни йоносферни показатели, извличани от GNSS наблюдения: TEC, ΔTEC (DTEC), ROT, ROTI и допълнителни показатели за краткопериодична изменчивост и сцинтилационни ефекти (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

2.8. Йоносферна сцинтилация

Йоносферната сцинтилация представлява бързи изменения на амплитудата и фазата на радиосигнал, възникващи при преминаването му през области с

пространствени нееднородности на електронната концентрация в йоносферата. При GNSS тези изменения могат да се проявят като флуктуации на мощността на приемания сигнал и на фазовото измерване на носещата вълна и при достатъчно силно проявление могат да затруднят проследяването на сигнала от приемника [66, 132].

Физическият механизъм е свързан с пространствените изменения на показателя на пречупване в йоносферната плазма. При разпространението на радиовълната през среда с нееднородна електронна концентрация различни части от фронта на вълната претърпяват различни фазови изменения. Последващата интерференция може да предизвика вариации както на фазата, така и на амплитудата на приемания сигнал.

Характерът и интензивността на сцинтилацията зависят от размерите и структурата на йоносферните нееднородности, честотата на сигнала, геометрията на разпространението и динамиката на плазмата. Поради дисперсионните свойства на йоносферата въздействието обикновено е по-силно при по-ниски радиочестоти.

2.8.1. Амплитудна сцинтилация и индекс S4

Амплитудната сцинтилация се характеризира с бързи флуктуации на интензитета на приемания GNSS сигнал. Един от най-разпространените показатели за нейното количествено описание е индексът S_4, дефиниран като нормализираното стандартно отклонение на интензитета на сигнала [125]:

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}, \quad (63)$$

където I е интензитетът на приемания сигнал, а ъгловите скоби означават осредняване в определен времеви интервал.

Еквивалентно:

$$S_4 = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}, \quad (64)$$

където σ_I е стандартното отклонение на интензитета.

При липса на значителни амплитудни флуктуации S_4 има малка стойност, докато увеличаването му показва нарастване на относителните изменения на интензитета. Наблюдаваната стойност обаче съдържа не само евентуалния йоносферен принос, но и влиянието на топлинния шум, приемната апаратура, многопътността и други фактори. Поради това специализираните алгоритми за оценка на S_4 включват подходящ контрол и корекции на измервателния шум.

Следва да се прави ясно разграничение между непосредствено определен S_4 и показатели, получени от C/N_0 на стандартен геодезически GNSS приемник. Макар измененията на C/N_0 да могат да съдържат информация за вариации в силата на приемания сигнал, получен от тях показател не може автоматично да се приема за стандартен сцинтилационен индекс S_4 без необходимата честота на измерване, калибриране и обработка.

2.8.2. Фазова сцинтилация

Фазовата сцинтилация се проявява като бързи флуктуации на фазата на приемания сигнал. За количественото ѝ описание широко се използва стандартното отклонение на фазата след отстраняване на бавно изменящата се компонента, обикновено означавано с σ_ϕ:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\langle \phi_d^2 \rangle - \langle \phi_d \rangle^2}, \quad (65)$$

където ϕ_d е фазовата последователност след отстраняване на бавно изменящата се компонента. Когато фазата се изразява в радиани, σ_ϕ също се изразява в радиани.

Отстраняването на бавно изменящата се компонента е съществен етап при определянето на фазовата сцинтилация. Измерената фаза съдържа не само бързите флуктуации, представляващи интерес, но и много по-бавни изменения, свързани с относителното движение между спътника и приемника, часовниковите компоненти, тропосферата и регионалните изменения на йоносферата. За отделянето им се използва високочестотно филтриране или друга подходяща процедура за отстраняване на бавно изменящата се компонента.

При използване на стандартни геодезически GNSS приемници фазовите флуктуации могат да бъдат оценявани и чрез подход, известен като геодезическо отстраняване на тренда **(***geodetic detrending***)**. При него от фазовите наблюдения предварително се отстраняват моделираните геометрични, часовникови, тропосферни и други недисперсионни компоненти чрез прецизни GNSS продукти и геодезически модели, след което остатъчната фазова последователност се използва за анализ на бързите флуктуации [59]. Този подход е различен от директното отстраняване на тренда чрез високочестотно филтриране и от използването на двучестотна геометрично независима комбинация.

Следователно стойността на σ_ϕне зависи единствено от самите наблюдения, а и от използвания метод за отстраняване на тренда, граничната честота на филтъра, честотата на регистрация и продължителността на интервала, върху който се изчислява стандартното отклонение. Тези параметри трябва да бъдат посочени при представяне и сравнение на резултатите.

2.8.3. Изисквания към GNSS наблюденията

Надеждното характеризиране на бързите амплитудни и фазови флуктуации изисква значително по-висока честота на регистрация в сравнение с обичайните 30 s или 1 s GNSS наблюдения, използвани при стандартни геодезически приложения. Специализираните приемници за наблюдение на йоносферна сцинтилация записват необходимите величини с висока честота и прилагат алгоритми за отделяне на бавно изменящите се компоненти и оценяване на измервателния шум [66, 125].

Стандартните геодезически GNSS приемници могат също да предоставят високочестотни фазови и сигнални наблюдения. Тяхното използване позволява да бъдат изследвани краткопериодични флуктуации, но резултатите трябва да се интерпретират с внимание, когато приемникът не предоставя специализираните вътрешни измервания и алгоритми, използвани при определянето на стандартните сцинтилационни индекси.

Особено важно е разграничаването на йоносферните фазови флуктуации от други компоненти в измерената фаза. Фазовите наблюдения на една честота съдържат както дисперсионни йоносферни, така и недисперсионни влияния, включително геометрични изменения, вибрации, движение на антената, часовникови ефекти, многопътност и измервателен шум. Подходящите двучестотни линейни комбинации потискат значителна част от общите недисперсионни компоненти и подобряват отделянето на честотно зависимата част на сигнала.

2.8.4. Връзка с показателите за изменчивост на TEC

Фазовата и амплитудната сцинтилация трябва да се разграничават от показателите ROT, ROTI и ΔTEC, разгледани в §2.7. Последните характеризират измененията на електронното съдържание по пътя на GNSS сигнала на съответните времеви мащаби, докато S_4 и σ_ϕ са насочени непосредствено към бързите амплитудни и фазови флуктуации на приемания радиосигнал.

Повишени стойности на ROTI могат да съпътстват условия, при които възниква сцинтилация, тъй като и двата типа показатели могат да бъдат повлияни от йоносферни нееднородности. Между тях обаче няма еднозначно съответствие и ROTI не представлява заместител на S_4 или σ_ϕ. Наличието на повишена краткопериодична изменчивост на TEC само по себе си не доказва наличие на сцинтилация.

Това разграничение е особено важно при използването на стандартни геодезически GNSS наблюдения. От тях могат да бъдат изведени показатели за краткопериодичните фазови и амплитудни изменения, но когато методиката се различава от тази на специализираните сцинтилационни приемници, получените величини трябва да бъдат обозначавани и интерпретирани като експериментални показатели, а не като непосредствени измервания на стандартните сцинтилационни индекси.

3. РАЙОН НА ИЗСЛЕДВАНЕ, ДАННИ И ОБРАБОТКА

Настоящото изследване е базирано на многогодишни GNSS наблюдения, извършвани в района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ на о-в Ливингстън, архипелаг Южни Шетландски острови (Фигура 3.1). Разположението на наблюдателната станция във високите южни ширини предоставя възможност за изследване на поведението на йоносферното пълно електронно съдържание при условия, които съществено се различават от тези в средните и ниските географски ширини.

Изследваният период обхваща 2019–2026 г. и включва значителна част от развитието на 25-ия слънчев цикъл – от неговата начална нискоактивна фаза до периода на висока слънчева активност. Това позволява измененията на определеното от GNSS наблюденията пълно електронно съдържание да бъдат анализирани не само като краткопериодични вариации, но и в контекста на многогодишните изменения на слънчевата и геомагнитната активност.

Основният експериментален източник на данни са наблюденията от GNSS станция KOH2. За тяхната обработка и последваща оценка са използвани различни типове допълнителни данни и продукти: навигационни и прецизни GNSS орбити, глобални йоносферни карти, регионални GNSS TEC продукти, емпиричен модел на йоносферата, както и данни за слънчевата и геомагнитната активност.



Фигура 3.1. Местоположение на GNSS станция KOH2 на о-в Ливингстън спрямо избрани близки перманентни GNSS и геомагнитни станции.

Източник: адаптиран фрагмент от Камбуров и Иванов [61]. Редакция и допълнителни означения от автора. Крайбрежната линия и картографската основа са адаптирани за целите на монографията; позициите на станциите са нанесени по публикувани координатни данни. Оригиналът и настоящата адаптация са лицензирани под CC BY-SA 4.0.

Комбинираното използване на тези независими или методично различни източници позволява да бъде изградена многостепенна схема за оценка на получените резултати. Тя включва както сравнение на определените от станцията стойности на

VTEC с глобални и регионални йоносферни продукти, така и анализ на тяхната зависимост от условията в слънчево-земната система.

3.1. Антарктически полуостров и о-в Ливингстън

О-в Ливингстън е част от архипелага Южни Шетландски острови, разположен северозападно от Антарктическия полуостров. Островът се намира във високите южни географски ширини и представлява подходящ район за провеждане на геодезически, геофизични, метеорологични и йоносферни наблюдения.

Южните Шетландски острови са отделени от Антарктическия полуостров посредством протока Брансфийлд и се намират в преходна област между океанската среда на Южния океан и континенталната Антарктика. Географското положение на архипелага определя специфични атмосферни и геофизични условия, характеризиращи се със силно изразена динамичност и значителни сезонни изменения.

О-в Ливингстън е в голяма степен покрит от ледници и ледникови куполи, като свободните от лед пространства са концентрирани главно в крайбрежните райони и върху отделни скалисти полуострови. Българската антарктическа база е разположена на полуостров Хърд в западната част на острова.

От гледна точка на йоносферните изследвания особено значение има разположението на района във високите географски ширини. В тези ширини състоянието на йоносферата може да бъде силно повлияно от процеси, свързани с взаимодействието между слънчевия вятър, междупланетното магнитно поле и земната магнитосфера. В сравнение със средните географски ширини, йоносферата във високите географски ширини се характеризира с по-сложна пространствена и времева изменчивост, особено при повишена геомагнитна активност.

Тази особеност е от съществено значение за интерпретацията на GNSS наблюденията. Йоносферното закъснение на радиосигналите, регистрирани от наземния приемник, зависи от интегралното количество свободни електрони по пътя на сигнала между спътника и приемника. Поради това продължителните GNSS наблюдения от един и същ пункт могат да се използват за проследяване както на денонощните и сезонните вариации на електронното съдържание, така и на измененията, свързани със слънчевия цикъл и отделни геомагнитни смущения.

Положението на о-в Ливингстън създава и допълнителни предимства за подобен тип изследвания. За разлика от голяма част от Антарктида, където постоянно действащите GNSS станции са пространствено разредени, наличието на продължителни наблюдателни серии в района на Българската антарктическа база позволява да бъдат изследвани локалните особености на йоносферата и да бъдат съпоставени с глобални йоносферни модели и карти.

В настоящата работа о-в Ливингстън се разглежда не само като географски район на изследване, а и като експериментална площадка във високите южни географски ширини за оценка на възможностите на GNSS наблюденията за определяне и мониторинг на пълно електронно съдържание в йоносферата.

3.2. Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“

Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ е разположена на о-в Ливингстън, в района на полуостров Хърд. Базата представлява основната инфраструктура за осъществяване на българската научноизследователска дейност в Антарктика и се използва за провеждане на изследвания в различни области на науките за Земята, биологията, метеорологията, геофизиката и други научни направления.

Географското положение на базата позволява развитието на дългосрочни геодезически и геофизични наблюдения. GNSS измерванията са особено подходящи за подобни условия, тъй като след изграждането и стабилизирането на наблюдателния пункт те позволяват автоматизирано получаване на многокомпонентна информация.

Освен за определяне на положението и неговите изменения, едни и същи GNSS наблюдения могат да бъдат използвани за анализ на тропосферата и йоносферата.

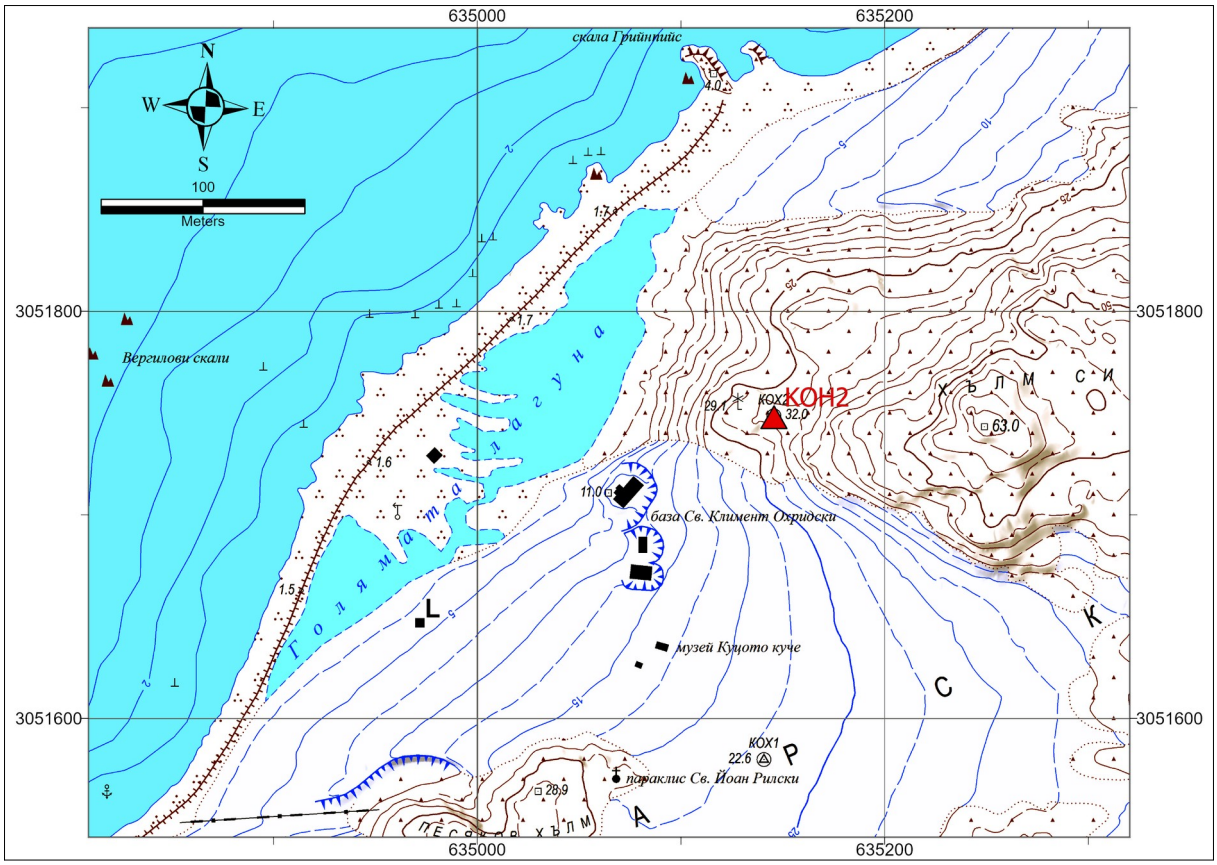
За целите на настоящата монография особен интерес представляват наблюденията от станция KOH2. Тяхната продължителност и времево разпределение позволяват да бъде изграден многогодишен ред на йоносферни параметри за периода 2019–2026 г. Въпреки че наблюдателното покритие не е еднакво за всички години и месеци, наличният материал обхваща различни фази на 25-ия слънчев цикъл и по този начин предоставя възможност за сравнителен анализ при съществено различаващи се нива на слънчева активност. Това обстоятелство е особено важно при интерпретацията на резултатите. При многогодишен анализ неравномерността на наблюденията може да доведе до различно статистическо тегло на отделните години. Поради тази причина в настоящото изследване времевото покритие на данните е анализирано изрично, а при част от статистическите оценки е приложено еднакво тегло на отделните години. По този начин се ограничава възможността резултатите да бъдат доминирани от периоди с по-голям брой налични наблюдения.

Наличието на GNSS станция в непосредствена близост до Българската антарктическа база създава възможност йоносферните изследвания да бъдат свързани и с други геофизични наблюдения от района. Това е предпоставка за бъдещо разширяване на анализа чрез използване на показатели за йоносферна сцинтилация, ROTI, локални метеорологични наблюдения и други параметри на слънчево-земното взаимодействие. В рамките на настоящото изследване обаче основният акцент е поставен върху определянето на TEC от GNSS наблюденията на KOH2, неговата валидация чрез различни външни продукти и анализа на измененията му през периода на развитие на 25-ия слънчев цикъл.

3.3. GNSS станция KOH2

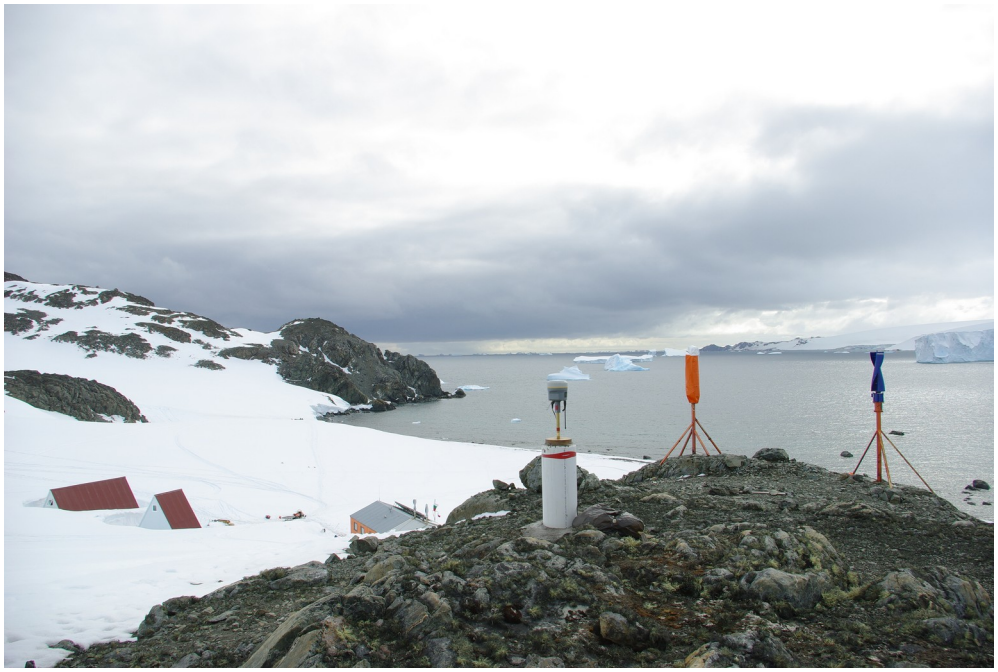
Основният източник на експериментални GNSS данни в настоящото изследване е станция **KOH2**, разположена в района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“ на о-в Ливингстън (Фигура 3.2). Станцията осигурява многогодишни GNSS наблюдения, които позволяват проследяване както на геодезически, така и на атмосферни и йоносферни параметри.

Геодезическата точка KOH2 е създадена през антарктическия сезон 2015/2016 г., в рамките на XXIV Българска антарктическа експедиция, като част от дейностите по проект ДФНИ И02/11 от 12.12.2014 г. на Фонд „Научни изследвания“ — „Създаване на информационна база за изследване на сеизмичността и структурата на о. Ливингстън и околностите чрез провеждане на комплексни проучвания в района на Българската антарктическа база“. Проектът е ръководен от доц. д-р Лилия Димитрова от Националния институт по геофизика, геодезия и география – БАН и обединява сеизмологични и геодезически изследвания в района на базата [40, 41]. В рамките на първия му антарктически етап е изградена постоянна GNSS точка и са проведени GNSS измервания за изследване на движенията на ледник Перуника. Теренната стабилизация на геодезическата точка KOH2 е извършена през 2015 г. от Васил Гурев, участник в проектния екип (Фигура 3.3). През следващите антарктически сезони KOH2 се използва за продължителни GNSS наблюдения, включително за 23-дневна непрекъсната кампания през януари–февруари 2017 г. (19). По-късен етап в развитието на инфраструктурата е оборудването на точката с GNSS приемник и антена Trimble през декември 2019 г., от когато започва използваната в настоящото изследване конфигурация на станцията.



Фигура 3.2. Местоположение на GNSS станцията KOH2 в района на Българската антарктическа база „Св. Климент Охридски“.

Картна основа: Агенция по геодезия, картография и кадастър (2016) [1]. Публикува се с писмено разрешение на АГКК, вх. № 48-56/08.09.2026 г.



Фигура 3.3. GNSS наблюдения от станция KOH2 на о-в Ливингстън с приемник Trimble R10 през м. януари 2015 г.

Снимка: Гергана Георгиева; публикува се с разрешение на автора.

За целите на настоящата работа наблюденията от KOH2 се използват основно за определяне на йоносферното пълно електронно съдържание по направленията между GNSS спътниците и наземния приемник. От двучестотните кодови и фазови наблюдения могат да бъдат формирани йоносферно чувствителни линейни комбинации, от които след съответната обработка се получават стойности на наклоненото пълно електронно съдържание (STEC), а впоследствие – на вертикалното пълно електронно съдържание (VTEC).

Географското положение на KOH2 е от особено значение за настоящото изследване. Станцията се намира във високите южни ширини, където поведението на йоносферата може да бъде значително повлияно от динамичните процеси в магнитосферата и от измененията на слънчевата и геомагнитната активност. Поради това продължителните GNSS наблюдения на KOH2 представляват подходящ източник за анализ както на дългопериодичните изменения на TEC, така и на неговата реакция при геомагнитни смущения.

При йоносферната интерпретация географските координати на KOH2 не изчерпват напълно пространствения контекст на станцията. Значение имат също геомагнитната ширина, магнитното местно време и положението на наблюдателния район спрямо авроралния овал и полярната шапка, които се изменят във времето и зависят от използвания модел на геомагнитното поле. В настоящото изследване пространственото съгласуване на TEC продуктите е извършено в географски координати; включването на геомагнитно координатно представяне е оставено като направление за последващ регионален анализ.

Основните характеристики и метаданни, използвани при обработката, са представени в Таблица 3.1. За осигуряване на еднозначност при многогодишната обработка заглавните части на RINEX файловете са унифицирани по отношение на идентификатора на станцията, номера на маркера, приблизителните геоцентрични координати и параметрите на антената. Това е особено важно при автоматизираната обработка на множество наблюдения, тъй като несъответствията в метаданните между отделни наблюдателни периоди могат да доведат до некоректно разпознаване на станцията или до различия в последващото моделиране.

Таблица 3.1. Основни характеристики на GNSS станция KOH2

Параметър	**Стойност**
Четирисимволен идентификатор на станцията	KOH2
RINEX 3 идентификатор	KOH200ATA
IGS DOMES идентификатор	66026M002
Геоцентрична координата X	1453335.2992 m
Геоцентрична координата Y	−2 554570.1548 m
Геоцентрична координата Z	−5641700.7402 m
Геодезическа географска ширина, φ	-62°38'24.29432"°
Геодезическа географска дължина, λ	-60°21'49.56739"°
Елипсоидна височина, h	52.996 m
Модел GNSS приемник	TRIMBLE ALLOY
Модел GNSS антена	TRM115000.00 (Zephyr Geodetic)
Сериен номер на антената	1151017937
Защитен купол (радом)	NONE
Височина на антената на основата	0.1500 m
Използвани GNSS съзвездия	GPS и GLONASS

За йоносферния анализ двучестотните наблюдения от KOH2 се използват за определяне на STEC, което за всеки валиден непрекъснат интервал се преобразува във

VTEC в съответната IPP чрез приетия геометричен модел. Получените VTEC оценки се използват в последващите съпоставки с външни йоносферни продукти.

Оригиналните програмни средства PyTECGg [126] и pyOASIS [96] са използвани като основа на две отделни процедури за обработка на GNSS наблюденията. За целите на настоящото изследване са разработени допълнителни Python процедури за подготовка на входните данни, автоматизирано изпълнение на обработката, организация на изходните продукти и последваща валидация. Цялата използвана публикационна реализация е архивирана като версия 1.0.1 на софтуерния пакет KOH2 GNSS Ionospheric TEC Processing and Validation Scripts [62]. Получените стойности впоследствие са съпоставени с глобални и регионални йоносферни продукти.

Особено внимание е отделено на разграничението между две форми на представяне на резултатите. Първата е VTEC, определено както в положението на отделните IPP, така и след преобразуване към еквивалентна стойност на VTEC (**VEq**). за местоположението на станция KOH2.



Фигура 3.4. Принцип на формиране на еквивалентното вертикално пълно електронно съдържание (VEq) за станция KOH2 (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

Това разграничение има важно методично значение. Сравнението на локалните GNSS оценки с глобалните карти на пълното електронно съдържание може да бъде извършено както в пространственото положение на отделните йоносферни прободни точки, така и след привеждане на данните към местоположението на станция KOH2. В настоящата работа са използвани и двата подхода в зависимост от конкретната цел на анализа.

По този начин KOH2 представлява основната връзка между първичните GNSS измервания и всички последващи етапи на изследването – определяне на TEC, сравнение с външни йоносферни продукти, изследване на дългопериодичните вариации през 25-ия слънчев цикъл и оценка на въздействието на геомагнитните смущения.

3.4. GNSS наблюдения

Основният експериментален материал в настоящото изследване се състои от многогодишни GNSS наблюдения, регистрирани на станция KOH2. Суровите данни са записвани с геодезически GNSS приемник Trimble Alloy в собствен двоичен формат на производителя Trimble - T02. Записът е организиран в отделни файлове с продължителност един час, което определя и първоначалната структура на наблюдателния архив. Използването на едночасови първични файлове е удобно от гледна точка на непрекъснатото регистриране и архивиране на наблюденията, но за последващия многогодишен анализ е необходимо файловете да бъдат приведени към единна структура и формат.

3.4.1. Сурови измервания и преобразуване във формат RINEX

За последващата обработка данните във формат T02 са преобразувани във формат RINEX 3.04 чрез модула Convert To RINEX на Trimble, интегриран в скрипта preprocessing/convert_t02_to_rinex.py [62]. По този начин специфичният за производителя двоичен формат на наблюденията е приведен към стандартен независим формат, подходящ за използване от различни GNSS и йоносферни програмни средства. При файловете във формат RINEX 3 е използван идентификаторът на станцията KOH200ATA, а имената на генерираните дневни файлове впоследствие са приведени към стандартната дълга RINEX 3 номенклатура. Пример за дневен наблюдателен файл е:

KOH200ATA_R_20193620000_01D_30S_MO.rnx

Отделните части на наименованието съдържат информация за станцията, началната епоха, времевата продължителност на файла, интервала на запис и типа на наблюденията.

3.4.2. Предварителна обработка чрез GFZRNX

След преобразуването на първичните T02 данни във формат RINEX 3.04 е извършена допълнителна предварителна обработка чрез програмата **GFZRNX** – специализиран команден софтуерен инструмент за обработка и управление на GNSS данни във формат RINEX, разработен в GFZ German Research Centre for Geosciences [87]. GFZRNX поддържа основните версии на RINEX и предоставя средства за проверка и корекция на файлове, преобразуване между различни версии, обединяване и разделяне на наблюдателни файлове, промяна на интервала на регистрация, избор на наблюдавани величини и спътникови системи, редактиране на заглавната информация, автоматизирано именуване, извличане на метаданни и др.

В настоящото изследване е използвана версия GFZRNX 2.2.0 за Windows. За автоматизираното ѝ прилагане върху многогодишния архив от станция KOH2 е разработен Python скриптът preprocessing/prepare_koh2_rinex.py, включен в публичната програмна реализация на изследването [62]. Неговата функция е да управлява последователното изпълнение на необходимите GFZRNX операции върху наличните наблюдателни файлове, организирани по години, месеци и дни. По този начин една и съща процедура се прилага към различните наблюдателни периоди, което ограничава възможността за несъответствия, породени от ръчна обработка. За унифициране на заглавната информация се използва конфигурационният файл preprocessing/KOH2.crux, публикуван заедно със скриптовете за предварителна обработка [62]. Чрез него се задават еднозначните станционни метаданни, използвани при обработката: идентификаторът на станцията, номерът на маркера, приблизителните геоцентрични координати и параметрите на GNSS антената. Съответните стойности са представени в Таблица 3.1.

След унифицирането на метаданните отделните едночасови наблюдателни файлове са обединени в денонощни RINEX файлове. При наличие на пълна денонощна серия са обединени 24 последователни часови файла. При липсващи часови интервали са използвани единствено реално наличните наблюдения, без интерполиране или генериране на синтетични епохи. По този начин пропуските в първичната регистрация са запазени и са взети предвид при последващия анализ на времевото покритие.

В зависимост от конкретния следващ етап от обработката дневните наблюдения са запазени както с оригиналната честота на запис, така и във варианти с нейното разреждане (субсемплиране). За основната многогодишна TEC обработка са използвани денонощни продукти с интервал 30 s, докато високочестотните наблюдения са запазени отделно за експерименталните сцинтилационни анализи, изискващи по-висока честота на регистрация.

Именуването и структурата на генерираните RINEX 3 файлове следват принципите на стандарта RINEX. В настоящото изследване основната първична конверсия е извършена към RINEX 3.04, чиято официална спецификация е публикувана от IGS/RTCM и определя структурата на наблюдателните файлове, кодовете на наблюденията за различните GNSS системи, заглавните записи и правилата за дълго именуване на файловете [57]. RINEX 3.04 е официално публикуван на 23 ноември 2018 г. Когато последващ програмен модул изисква различна версия на формата, преобразуването между RINEX 2 и RINEX 3 се изпълнява като отделна техническа операция. Това позволява първичният наблюдателен архив да остане стандартизиран в RINEX 3, докато входните данни за конкретния софтуер се генерират в необходимото за него представяне. По този начин предварителната обработка чрез GFZRNX има двойна функция. От една страна, тя осигурява техническа хомогенност на многогодишния GNSS архив, а от друга – създава възпроизводим вход за двете основни обработващи процедури за определяне на TEC, използвани в настоящото изследване – PyTECGg и pyOASIS. Подробната последователност на операциите и конкретните параметри на обработващата верига са разгледани в Глава 4.

3.4.3. Избор на допустими за анализ наблюдения

Периодът на изследването обхваща годините 2019 – 2026, т.е. значителна част от развитието на 25-ия слънчев цикъл. Началните години на анализирания интервал съответстват на условия на сравнително ниска слънчева активност, докато последващите години обхващат фазата на нарастване и периода на висока слънчева активност. Това позволява измененията на пълното електронно съдържание в йоносферата над станция KOH2 да бъдат разглеждани в многогодишен контекст.

Наличността на GNSS наблюденията не е равномерна през целия изследван период. Броят на наблюдателните дни се различава както между отделните години, така и между месеците в рамките на една и съща година. Това е характерна особеност на използвания експериментален набор и трябва да бъде отчетено при интерпретацията на резултатите.

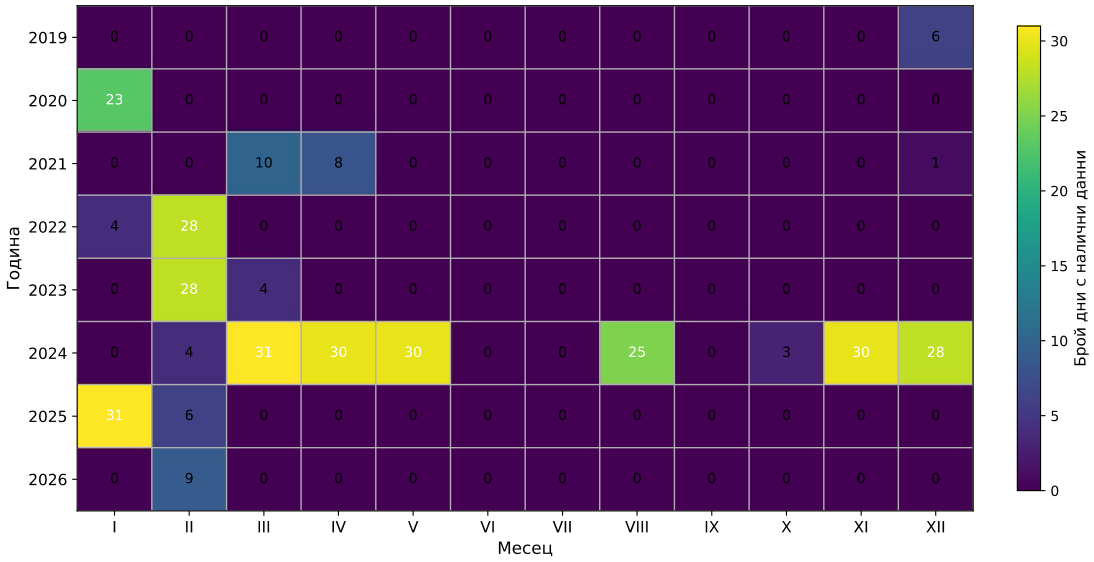
Таблица 3.2. Разпределение на наличните сурови наблюдения

Година	Сурови едночасови измервания (T02; 30 s)	Сурови едночасови измервания (T02; 1 s)	Сурови едночасови измервания (T02; 0.1 s)	Общо денонощни измервания (RINEX; 30 s)	Използвани денонощни измервания (RINEX; 30 s)
2019	-	205	-	6	4
2020	-	552	-	23	23
2021	330	-	-	19	18
2022	28	702	-	32	28
2023	-	762	-	32	32
2024	-	4272	-	181	176
2025	-	-	887	37	37
2026	-	-	193	9	8
Общо	358	5736	1080	339	326

Особено отчетливо се откроява 2024 г., за която са налични значително повече денонощия с налични данни в сравнение с останалите години. От общо 326 дни, включени в хармонизирания анализ, 176 принадлежат на 2024 г., т.е. повече от половината от всички използвани дни. Обратно, началната 2019 г. е представена само от четири дни, а за 2026 г. в използвания набор са налични осем дни. Това неравномерно разпределение има непосредствено значение за статистическата обработка. При обикновено обединяване на всички дневни наблюдения в един общ набор годините с по-голям брой данни получават по-голяма статистическа тежест. В настоящия случай това би довело до силно влияние на 2024 г. върху общите регресионни зависимости и корелационни оценки. Поради тази причина неравномерното времево покритие се отчита изрично в сравнителните и статистическите анализи, представени в Глави 5 и 6.

След прилагане на критерии за наличност и успешно обработване на данните, в многогодишния набор са включени общо 326 денонощия с налични данни. Разпределението им по години е представено в Таблица 3.2. Както се вижда, тази стойност не представлява общия брой налични RINEX файлове, а броя дни, които след подготовката и последващите проверки са приети за допустими за анализ, т.е. около 96.2% от наличните дневни RINEX наблюдения. Подробна информация за наличността и използваните набори от данни е включена в публикувания набор за възпроизводимост [63].

За визуална оценка на това разпределение е използвана двумерна диаграма (Фигура 3.5).



Фигура 3.5. Времево покритие на данните от станция KOH2 през периода 2019–2026 г.

За периодите без налични наблюдения не е извършвано интерполиране или запълване със синтетични стойности. Във всички времеви анализи са използвани единствено реално наличните и успешно обработени наблюдения. Този принцип е запазен и при изграждането на дневните и месечните времеви редове, представени в следващите глави.

3.5. Навигационни данни и прецизни GNSS продукти

Определянето на положението на наблюдаваните GNSS спътници за съответните епохи изисква информация за техните орбити. В използваната в настоящото изследване методология за обработка тази информация се осигурява по два различни начина. При обработката чрез **PyTECGg** се използват навигационни RINEX данни, съдържащи радиоефемериди, докато при обработката чрез **pyOASIS** се използват прецизни орбитални продукти във формат SP3.

Разликата произтича от архитектурата и изискванията на двата софтуерни пакета. В PyTECGg навигационните данни се използват за определяне на спътниковите ефемериди и последващо изчисляване на геометрията спътник–приемник. В pyOASIS орбитната информация се въвежда чрез прецизни SP3 продукти, които предварително се интерполират към необходимите епохи. Конкретното участие на тези продукти в отделните етапи на обработката е разгледано в Глава 4.

3.5.1. Навигационни RINEX данни

Навигационните RINEX файлове съдържат навигационните съобщения, излъчвани от GNSS спътниците, включително параметрите на радиоефемеридите, необходими за определяне на положението на спътниците към съответните епохи на наблюдение. Форматът RINEX осигурява стандартизирано представяне на навигационната информация за различните GNSS системи и позволява използването ѝ независимо от конкретния тип приемник [57].

В обработката чрез PyTECGg за всеки анализиран ден се използват дневни навигационни RINEX данни с радиоефемериди, означавани в използваните архиви и програмни процедури като BRDC. Данните се получават автоматизирано от GNSS Data Center на германската Федерална агенция по картография и геодезия (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie – BKG) [28].

Радиоефемеридите представляват параметри на орбитата и свързаната с нея навигационна информация, предавани от самите GNSS спътници. От тях положението

на съответния спътник може да бъде изчислено за дадена епоха в интервала на валидност на навигационното съобщение. При обработката се избира подходящият навигационен запис за момента на наблюдението и въз основа на него се определят необходимите спътникови координати.

В обработката чрез PyTECGg навигационните данни за съответния ден се прочитат и обработват по GNSS системи. От тях се подготвят ефемеридите на наличните спътници, след което се изчисляват техните координати към епохите на наблюдение. Получената геометрична информация се използва за определяне на взаимното положение между станция KOH2 и наблюдавания спътник, включително неговия азимут и височина над хоризонта, както и за определяне на положението на йоносферната прободна точка.

При многосистемна обработка следва да се отчита, че различните GNSS използват различни структури на навигационните съобщения и различни модели за представяне на радиоефемеридите. При традиционните GLONASS сигнали например навигационната информация се различава по структура от използваната при GPS, Galileo и BeiDou. Тези особености се отчитат от обработващия софтуер при определянето на положението на спътниците.

Навигационните RINEX данни не представляват самостоятелен източник на TEC. Тяхната роля в настоящото изследване е да осигурят необходимата орбитална и геометрична информация за пространственото отнасяне на GNSS наблюденията и за последващото определяне на геометричните величини, използвани при преобразуването между STEC и VTEC.

3.5.2. Прецизни орбитни продукти

При обработката чрез ryOASIS положението на GNSS спътниците се определя с помощта на прецизни орбитни продукти във формат SP3 (Standard Product 3). За разлика от радиоефемеридите, при които орбитата се изчислява от параметрите, съдържащи се в навигационното съобщение, SP3 файловете съдържат предварително определени координати на спътниците за последователни епохи. Форматът е разработен за обмен на високоточни орбитни продукти и поддържа данни за множество GNSS системи [53].

В настоящото изследване за обработката чрез ryOASIS се използват бързи прецизни орбитни продукти на GFZ от Multi-GNSS Experiment (MGEX). Използваните файлове следват наименованието:

GFZ0MGXRAP_YYYYDDD0000_01D_05M_ORB.SP3

където GFZ обозначава анализа на GFZ, MGX – многосистемен GNSS продукт, RAP – бързо решение, YYYYDDD – година и ден от годината, 01D – еднодневен интервал, 05M – петминутна стъпка на орбитните записи, а ORB – орбитен продукт. Точно този тип продукт е зададен в автоматизираната обработка на KOH2.

Продуктите се получават автоматизирано от архива Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) на NASA. За всеки ден обработващият скрипт определя съответната GPS седмица и ден от годината, конструира очакваното име на GFZ MGEX SP3 файла, изтегля компресирания продукт и го разархивира в директорията с орбитни данни за съответния ден. Достъпът до архива се осъществява чрез NASA Earthdata.

Тъй като координатите в изходния SP3 продукт са дадени през 5 min, а GNSS наблюденията са с по-висока честота на регистрация, орбитната информация трябва да бъде приведена към необходимите епохи. В ryOASIS това се извършва чрез модула SP3intp, който представлява първия етап от обработващата последователност. За съответния ден от изходния SP3 продукт се създава интерполиран орбитен файл, който впоследствие се използва от останалите модули на ryOASIS.

В реализирания работен процес последователността може да бъде представена като:

GFZ MGEX SP3 → SP3intp → интерполирани орбити → обработка на RINEX наблюденията

Полученият от SP3intp продукт се записва във вида:

ORBITS_YYYY_DDD.SP3

и се използва още при следващия етап RNXclean. По този начин прецизната орбитна информация се включва непосредствено в обработката на наблюденията преди определянето на йоносферните показатели и TEC.

Използването на прецизни орбитални продукти намалява влиянието на грешките в положението на спътниците върху определянето на геометрията спътник–приемник. Това е важно както за изчисляването на азимута и височината на спътника, така и за определянето на положението на IPP и последващото преобразуване между STEC и VTEC.

3.6. Външни данни и продукти, използвани в изследването

За оценка и интерпретация на резултатите от обработката на GNSS наблюденията на KOH2 са използвани няколко групи външни данни и модели. Те включват глобални йоносферни карти, независимо обработени GNSS TEC данни, емпиричен модел на йоносферата, показатели за слънчевата активност и геомагнитни индекси. Отделните източници имат различен физически смисъл, пространствена и времева разделителна способност и различна степен на зависимост от GNSS наблюденията.

Външните продукти се използват с различна цел. Глобалните йоносферни карти и данните от Madrigal позволяват съпоставяне на определените от KOH2 стойности с външни GNSS-базирани оценки. PyIRI предоставя емпиричен модел на фоновото състояние на йоносферата, докато F10.7, числото на слънчевите петна и геомагнитните индекси се използват за характеризиране на условията на слънчева и геомагнитна активност. Конкретните процедури за времево и пространствено съгласуване и статистическо сравнение са разгледани в Глава 5.

3.6.1. Глобални йоносферни карти – GIM

За външно сравнение на определените от станция KOH2 стойности на VTEC са използвани глобални йоносферни карти (Global Ionospheric Maps – GIM). Те представят пространственото разпределение на VTEC върху регулярна географска мрежа и се формират чрез обработка на наблюдения от глобални мрежи от GNSS станции.

В рамките на Международната GNSS служба (International GNSS Service - IGS) отделни асоциирани центрове за йоносферен анализ (Ionosphere Associate Analysis Centers – IAAC) генерират собствени GIM решения, използвайки различни алгоритми, параметризации и стратегии за обработка. На тяхна основа IGS формира комбиниран йоносферен продукт, предназначен да предостави устойчиво глобално описание на VTEC [56].

В настоящото изследване като основен външен GIM продукт е използван окончателният комбиниран продукт на IGS (IGS Final GIM). Окончателните продукти се генерират след приключване на съответния период на обработка и са предназначени за приложения, при които приоритет има качеството на решението, а не минималното закъснение на неговото публикуване [56].

GIM файловете съдържат стойности на VTEC за последователни времеви епохи и възли на географска мрежа. Поради това стойността, необходима за конкретно местоположение и момент, обикновено не съвпада непосредствено с един възел на картата. За сравнение с резултатите от KOH2 е необходимо пространствено и времево интерполиране на GIM стойностите. Конкретната интерполационна процедура, приложена в настоящото изследване, е разгледана в Глава 5.

Освен комбинирания IGS продукт са използвани и индивидуални GIM решения на няколко IAAC – CODE, ESA, JPL и UPC. Тяхното съпоставяне с резултатите от KOH2 позволява да бъде оценена устойчивостта на получените зависимости спрямо избора на конкретен глобален йоносферен продукт.

Тези индивидуални GIM решения не следва да се разглеждат като четири напълно независими валидации. Те използват в значителна степен обща глобална GNSS наблюдателна инфраструктура, но се различават по алгоритми, моделиране и стратегия за оценяване на йоносферното електронно съдържание. Поради това сравнението между тях в настоящото изследване се използва преди всичко като проверка на устойчивостта спрямо избора на GIM продукт и като оценка на между-продуктовите различия.

При интерпретацията трябва да се отчита и различният пространствен мащаб на двата типа оценки. GNSS обработката на KOH2 се основава на наблюдения по конкретни пътища спътник–приемник и на последващо преобразуване към VTEC, докато GIM представлява изгладено глобално поле, определено от множество станции и пространствен модел. Следователно пълно съвпадение между локалните и глобалните оценки не се очаква, особено при наличие на силни пространствени градиенти и краткопериодична изменчивост.

В настоящата глава GIM се разглеждат като източник на външни данни. Методиката за пространствено и времево съгласуване, използваните ограничения и статистическите показатели при сравнението са представени в Глава 5.

3.6.2. Madrigal GNSS TEC

Като допълнителен външен източник за сравнение са използвани данни за GNSS-базирано пълно електронно съдържание от системата Madrigal, която предоставя достъп до голям набор от геофизични и йоносферни наблюдения и производни продукти [78].

В настоящото изследване са използвани продукти за GNSS TEC, получени чрез обработка на наблюдения от мрежа от наземни GNSS станции. За разлика от глобалните йоносферни карти, които представляват пространствено изгладено поле върху регулярна мрежа, данните от Madrigal са свързани с конкретни наблюдателни геометрии и последващо пространствено представяне на TEC. Това ги прави полезен допълнителен източник при оценка на съгласуваността на резултатите от KOH2 с външна GNSS обработваща система, реализирана независимо от използваните за KOH2 процедури.

Използването на Madrigal в настоящото изследване има характер на външно сравнително GNSS решение, а не на абсолютна референция. Причината е, че продуктите също се получават от GNSS наблюдения и могат да включват станции от глобални или регионални мрежи, които частично да се припокриват с други използвани източници. Поради това степента на независимост зависи от конкретния набор от станции и от обработващата схема за съответния период.

За съпоставянето с KOH2 се използват стойности на TEC, които са най-близки по време и пространство до наблюденията на станцията. Тъй като наличните епохи и пространствени точки не съвпадат точно с тези на KOH2, е необходимо прилагане на критерии за допустимо времево и пространствено разстояние. Конкретните прагове и алгоритъмът за съгласуване са описани в Глава 5.

При съпоставката с Madrigal не се очаква пълно съвпадение между отделните стойности. Различия могат да възникват поради различна геометрия на наблюденията, различни станции, различни процедури за оценяване на инструменталните закъснения, различна времева и пространствена разделителна способност и различни алгоритми за преобразуване към VTEC.

В настоящото изследване Madrigal се използва като допълнителна външна GNSS-базирана проверка, която допълва сравнението с GIM. По този начин се оценява дали основните зависимости и вариации, получени от KOH2, се проявяват и в резултатите от друга обработваща система.

3.6.3. Моделни данни от PyIRI

За допълнително характеризиране на фоновото състояние на йоносферата е използван моделът International Reference Ionosphere (IRI) чрез неговата реализация на Python PyIRI. IRI представлява емпиричен международен референтен модел на земната йоносфера, изграден въз основа на обобщени наблюдения от различни източници. PyIRI предоставя програмна реализация на основните зависимости на IRI и позволява изчисляване на параметрите на йоносферата за зададени координати, дата, време, височина и условия на слънчева активност [45]. В настоящото изследване е използвана PyIRI версия 0.1.7 [46].

Моделът е изчисляван за географското местоположение на станция KOH2 за всички налични дни от разглеждания период. За всяко денонощие са получени стойности през един час, от 00:00 до 23:00 UTC. Използваната конфигурация и версията на PyIRI са записани и проверени при валидирането на обработката.

За представяне на F2 областта е използвана опцията URSI за коефициентите на f_oF2. Във вертикално направление електронната концентрация е изчислявана от 90 до 2000 km със стъпка 5 km. Полученият вертикален профил на електронната концентрация се интегрира по височина, като по този начин за всяка часова епоха се получава моделна стойност на VTEC. Тези параметри са зададени непосредствено в скрипта, използван при основната обработка.

Схематично моделната стойност може да бъде представена чрез интегриране на електронната концентрация:

$$VTEC_{PyIRI}(t) = \frac{1}{10^{16}} \int_{90\,km}^{2000\,km} N_e(h,t)\,dh, \quad (66)$$

където $N_e(h,t)$ е моделираната електронна концентрация като функция на височината и времето, а делението на 10^{16} преобразува получения интеграл в TECU.

Като показател за текущото ниво на слънчевата активност към PyIRI се подава дневната наблюдавана стойност на F10.7 от NASA OMNI. Използваният интерфейс на PyIRI приема една стойност на F10.7 за съответното денонощие, поради което тя се прилага към всички часови изчисления в рамките на деня. Основният скрипт за обработка записва източника на F10.7 в изходните данни.

Тази особеност има важно значение при последващата интерпретация. PyIRI не се използва като независима проверка на зависимостта между TEC и слънчевата активност, тъй като F10.7 представлява входна величина за самия модел. Следователно съгласуваността между моделния VTEC и F10.7 не може да бъде разглеждана като независимо наблюдателно доказателство за такава зависимост. В настоящото изследване PyIRI се използва като емпиричен климатологичен фон, с който се съпоставя поведението на GNSS-базираните оценки. Това разграничение е заложено и в използваната сравнителна обработка.

За всеки наличен ден се генерира часов ред от 24 моделни стойности, както и обобщени дневни, месечни и годишни характеристики. Обработката е извършена само за дните, за които има налични резултати от GNSS обработката на KOH2, което позволява по-късно моделните и наблюдателните стойности да бъдат съгласувани върху общ набор от епохи. Скриптът обработва наличните денонощия с налични данни за периода 2019–2026.

При последващия сравнителен анализ часовите стойности на PyIRI се използват за формиране на общ набор от епохи с PyTECGg, IGS Final GIM и Madrigal. Това съгласуване позволява различията между продуктите да бъдат оценявани за едни и същи моменти, без резултатът да се влияе от различна времева наличност на отделните набори от данни. Конкретните критерии за това съгласуване са представени в Глава 5.

3.6.4. Данни за слънчевата активност

За характеризиране на слънчевата активност в настоящото изследване са използвани два основни показателя – слънчевият радиопоток F10.7 и International Sunspot Number. Двата времеви реда предоставят взаимно допълваща се информация за развитието на слънчевата активност през разглеждания период, като физическият им смисъл е разгледан в §2.2.2.

Стойностите на F10.7 са получени от базата OMNI на NASA Space Physics Data Facility (SPDF) [85]. При анализа се използват наблюдаваните стойности на радиопотока при 10.7 cm, изразени в sfu. Данните от OMNI осигуряват единен времеви ред, съвместим с останалите използвани параметри на космическата среда и геомагнитната активност.

F10.7 се използва в изследването в две различни роли. От една страна, той служи като външен показател за слънчевата активност при анализа на измененията на GNSS-базирания TEC. От друга страна, дневната наблюдавана стойност на F10.7 се използва като входна величина при изчисленията с PyIRI, както е посочено в §3.6.3. Поради това резултатите от PyIRI не се използват като независима проверка на статистическата зависимост между F10.7 и TEC.

Като втори показател за дългопериодичното развитие на слънчевата активност е използван International Sunspot Number, публикуван от World Data Center – SILSO към Кралската обсерватория на Белгия [110]. В анализа се използват дневните стойности от версия 2.0 на международния ред на числото на слънчевите петна.

Използването на F10.7 и числото на слънчевите петна позволява развитието на слънчевата активност да бъде характеризирано чрез два различни наблюдателни показателя. Те показват сходен общ ход през слънчевия цикъл, но не представляват една и съща физическа величина и зависимостта между тях не е строго линейна. Поради това съвместното им разглеждане предоставя по-пълна характеристика на дългопериодичните изменения на слънчевата активност.

При последващата обработка времевите редове на F10.7 и числото на слънчевите петна се съгласуват с наличните дни от GNSS наблюденията на KOH2. Дневните стойности могат впоследствие да бъдат обобщавани по месеци и години за сравнение с дългопериодичните изменения на TEC. Конкретните процедури за осредняване, съгласуване на наличността и статистически анализ са представени в Глава 5.

3.6.5. Данни за геомагнитната активност

За характеризиране на геомагнитната обстановка през изследвания период са използвани индексите Kp, ap, Dst и SYM-H. Те описват различни аспекти и времеви мащаби на геомагнитната активност, поради което съвместното им използване позволява по-пълно характеризиране на магнитосферните смущения. Физическият смисъл и особеностите на отделните индекси са разгледани в §2.2.5 и §2.2.6.

Числовите стойности на Kp, ap и Dst, използвани при анализа, са получени от базата OMNI2 на NASA Space Physics Data Facility [85]. OMNI обединява параметри на междупланетната среда и геомагнитни показатели в стандартизирани времеви редове, което позволява тяхното непосредствено съгласуване с останалите използвани данни.

Kp и ap са налични с тричасова времева разделителна способност. За характеризиране на геомагнитната активност за отделните дни се използва максималната стойност на Kp за денонощието, както и средната стойност на наличните тричасови ap индекси:

$$\overline{a_p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} a_{p,i}, \tag{67}$$

където n е броят на наличните тричасови стойности за съответното денонощие. При пълна наличност $n = 8$.

Тази величина следва да се разграничава терминологично от официалния дневен индекс **Ap**. В настоящата обработка тя представлява дневна средна стойност, изчислена от наличните тричасови **ap** индекси, и именно така се означава при представянето на резултатите. В настоящото изследване тази величина се означава като Ap_{daily}.

За Dst се използват едночасовите стойности, налични в OMNI2. Като дневна характеристика на най-силното отрицателно магнитно отклонение се определя минималната стойност за съответното денонощие:

(68) $$Dst_{min} = min\left[Dst(t)\right]$$

Тази характеристика е подходяща за откроряване на периодите с по-силно развитие на глобалното магнитосферно смущение, без часовият ред да бъде предварително осредняван.

За анализ с по-висока времева разделителна способност е използван **SYM-H**. Числовите стойности са получени от High Resolution OMNI на NASA SPDF [85]. В използвания набор SYM-H е наличен през 5 min, което позволява по-точно времево съпоставяне с измененията на GNSS-базираните показатели в сравнение с едночасовия Dst. За дневните обобщения се определя минималната стойност:

(69) $$SYM-H_{min} = min\left[SYM-H(t)\right]$$

Използването на Kp, ap, Dst и SYM-H предоставя допълваща се информация. Kp и ap характеризират общото ниво на планетарната геомагнитна активност в тричасови интервали, докато Dst и SYM-H позволяват проследяване на развитието на глобалното магнитосферно смущение, свързано предимно с токовите системи във вътрешната магнитосфера. По-високата времева разделителна способност на SYM-H го прави особено подходящ за изследване на отделни краткотрайни събития.

Следва да се подчертае, че NASA OMNI е непосредственият източник на числовите редове, използвани в настоящото изследване. Самите геомагнитни индекси се определят и поддържат от съответните специализирани центрове, разгледани в теоретичната част. Това разграничение позволява да бъдат посочени едновременно физическият произход на индексите и конкретният източник, от който са получени данните за анализа.

При последващата обработка геомагнитните показатели се съгласуват с наличните дни и епохи от GNSS наблюденията на KOH2. Дневните характеристики се използват при дългопериодичния анализ, докато първоначалната времева разделителна способност на Dst и SYM-H се запазва при разглеждането на отделни периоди с повишена геомагнитна активност. Конкретните процедури за съпоставяне и статистически анализ са представени в Глава 5.

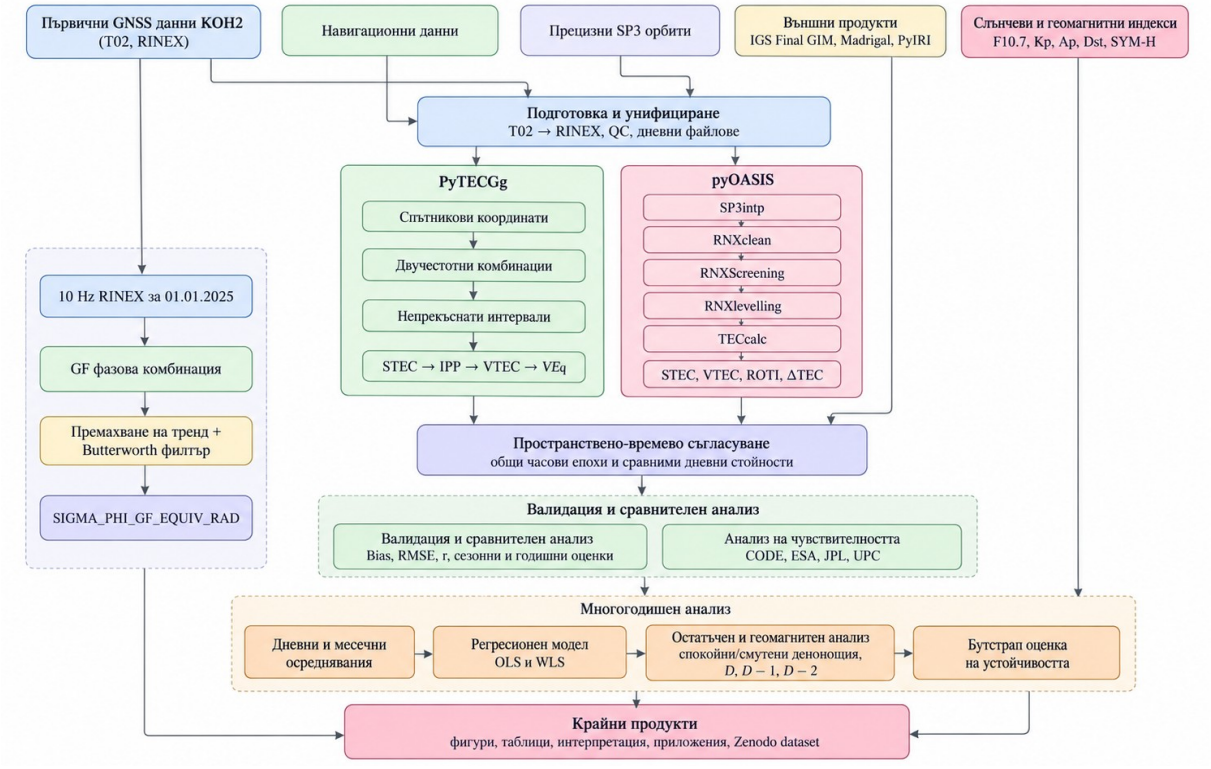
4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА TEC ОТ GNSS НАБЛЮДЕНИЯТА НА KOH2

4.1. Общ технологичен процес за определяне на TEC

Определянето на TEC от GNSS наблюденията на станция KOH2 се извършва чрез последователна обработка на кодовите и фазовите измервания на две носещи честоти. Използваният подход се основава на дисперсионните свойства на йоносферата и на формирането на честотно зависими комбинации, чрез които йоносферният принос може да бъде отделен от геометричните и други общи компоненти на наблюденията. Теоретичните принципи на този подход са разгледани в §2.4–§2.6.

Като входни данни се използват подготвените и проверени RINEX наблюдения на KOH2, описани в §3.4. Към тях, в зависимост от използвания софтуер, се добавят навигационни данни с радиоефемериди или прецизни орбитни продукти. Орбитната информация е необходима за определяне на положението на наблюдаваните спътници и на геометрията спътник–приемник към съответните епохи.

В настоящото изследване TEC е определено чрез два програмни подхода – pyOASIS и PyTECGg (Фигура 4.1). И двата използват двучестотни GNSS наблюдения и общата физическа зависимост между честотно обусловеното йоносферно влияние и STEC, но се различават по организацията на обработката, използваните междинни величини и начина на формиране на крайния резултат. Поради това резултатите от двата подхода могат да бъдат използвани и за взаимна проверка на устойчивостта на получените оценки.



Фигура 4.1. Общ алгоритъм на обработката и анализа на GNSS измерванията в станция KOH2.

Независимо от конкретната реализация общият процес включва няколко основни етапа. Първо се извършват проверки на качеството и непрекъснатостта на GNSS наблюденията, включително откриване на пропуски, циклични скокове и други несъответствия. След това се формират необходимите двучестотни кодови и фазови комбинации и се определя честотно зависимата йоносферна компонента. При използване на фазовите наблюдения се отчита наличието на фазови неопределености

и се извършва необходимото привеждане към кодовите наблюдения в рамките на отделните непрекъснати интервали на проследяване.

След определяне на йоносферната компонента тя се преобразува в STEC, характеризиращо пълното електронно съдържание по пътя на GNSS сигнала. Получените стойности са свързани с конкретната геометрия между спътника и приемника и поради това зависят от височината и азимута на наблюдавания спътник.

За получаване на съпоставима вертикална характеристика STEC се преобразува във VTEC чрез функцията за преобразуване, разгледана в §2.5.4. За целта се използва геометрията на наблюдението и приетият модел на йоносферата, включително положението на IPP. По този начин отделните наблюдения към различни спътници могат да бъдат приведени към обща вертикална форма.

В процеса на обработка се прилагат и критерии за качество, включително ограничения по височина на спътника, проверки за непрекъснатост на наблюденията и отстраняване на некоректни или недостатъчно надеждни стойности. Тези проверки са необходими за ограничаване на влиянието на многопътността, неблагоприятната геометрия, цикличните скокове и измервателния шум.

Освен основните стойности на STEC и VTEC, обработката позволява да бъдат получени и допълнителни показатели, характеризиращи времевата изменчивост на електронното съдържание. При pyOASIS такива са ROTI и ΔTEC, чиито физически смисъл е разгледан в §2.7. Те се използват като допълнителна информация за краткопериодичните изменения на йоносферата и не заместват основните оценки на TEC.

Крайните резултати се организират по спътник, епоха и денонощие, след което могат да бъдат обобщавани до часови, дневни, месечни и годишни характеристики в зависимост от целта на анализа. За сравнителните изследвания се използват само епохите и периодите, които удовлетворяват съответните критерии за наличие и качество на данните.

Следователно общият процес може условно да бъде представен като последователност:

RINEX наблюдения → контрол на качеството → двучестотна обработка → STEC → геометрично преобразуване → VTEC → контрол и обобщаване на резултатите

4.2. Обработка чрез pyOASIS

4.2.1. Роля на pyOASIS в изследването

pyOASIS е използван в настоящото изследване като един от двата основни програмни подхода за определяне на TEC от двучестотните GNSS наблюдения на станция KOH2. Софтуерът реализира последователна обработка на RINEX наблюденията, включваща контрол на качеството, работа с прецизни орбитни продукти, обработка на кодовите и фазовите измервания и определяне на йоносферни показатели [96].

Основната роля на pyOASIS е преобразуването на първичните GNSS наблюдения в количествени оценки на електронното съдържание по пътя на сигнала и в последващи характеристики на неговата времева изменчивост. При обработката се използват двучестотни кодови и фазови наблюдения, чиито свойства и връзката им с йоносферното влияние са разгледани в Глава 2.

Програмната структура на pyOASIS е модулна. Отделни етапи изпълняват подготовката на орбитната информация, проверката и подбора на наблюденията, откриването на несъответствия и прекъсвания, привеждането на фазовите към кодовите наблюдения и изчисляването на TEC и допълнителни йоносферни показатели. Това позволява междинните резултати от отделните етапи да бъдат проверявани преди преминаване към следващата стъпка.

В използваната за KOH2 последователност основните модули са:

SP3intp → RNXclean → RNXScreening → RNXlevelling → ROTIcalc → DTECcalc → SIDXcalc → TECcalc

Тази последователност отразява прехода от подготовката на прецизните орбити и контрола на RINEX наблюденията към формирането на йоносферните величини. Конкретното предназначение на отделните операции е разгледано в следващите подраздели, без да се повтарят теоретичните зависимости, представени в Глава 2.

За обработката на KOH2 стандартната процедура на ryOASIS е включена в автоматизиран Python процес, който организира входните и изходните файлове по дати, избира подходящите дневни RINEX наблюдения, осигурява необходимите прецизни SP3 продукти и последователно стартира отделните модули. По този начин еднаква схема на обработка се прилага към всички включени денонощия с налични данни, като същевременно се запазват междинните и крайните резултати за последваща проверка [62].

Основният резултат от гледна точка на настоящото изследване е определянето на **STEC** и **VTEC** за отделните наблюдавани спътници и епохи. Наред с тях ryOASIS предоставя и показатели за краткопериодичната изменчивост, сред които ROTI и ΔTEC. Тези допълнителни величини се използват като характеристика на динамиката на електронното съдържание, а не като заместител на основните оценки на TEC.

Използването на ryOASIS осигурява първата от двете независими по програмна реализация оценки на TEC от наблюденията на KOH2. Втората е получена чрез PyTECGg и е разгледана в §4.3. Съпоставянето на резултатите от двата подхода позволява да бъде оценена устойчивостта на определените стойности спрямо използвания алгоритъм и програмна реализация.

4.2.2. Подготовка на входните данни

Преди изпълнението на основните модули на ryOASIS за всяко денонощие с налични данни се подготвя необходимият комплект от входни данни. Подготовката е автоматизирана и включва избор и проверка на GNSS наблюденията, осигуряване на съвместим RINEX формат, организиране на работните файлове и получаване на необходимите прецизни орбитни продукти. Процедурата се извършва в следната последователност:

1. *Избор на наблюдателния RINEX файл*
   За съответния ден първо се проверява наличието на подходящ дневен RINEX файл с наблюденията на станция KOH2. Когато е наличен предварително подготвен дневен файл с интервал на регистрация 30 s, той се използва непосредствено като вход за стандартната обработка. При липса на такъв файл се използват наличните наблюдения с по-висока честота, от които предварително се формира необходимото дневно представяне. Подготовката и първоначалният контрол на наблюдателните файлове са разгледани в §3.4.
2. *Проверка и при необходимост преобразуване на RINEX формата*
   Избраният файл се проверява по отношение на версията на RINEX. Когато наблюденията са във формат RINEX 3, за съвместимост с използваната версия на ryOASIS се създава работно копие във формат RINEX 2 чрез GFZRNX. Преобразуването се извършва върху копие на файла, като първичните наблюдения в архива се запазват непроменени.
3. *Създаване на работна структура за съответния ден*
   За всяко денонощие се създават отделни директории за входните и изходните файлове на ryOASIS. В тях се разполагат работното копие на RINEX файла, орбитните данни и последващо генерираните междинни и крайни продукти. По този начин резултатите от обработката се отделят от първичния архив с наблюдения.

4. *Определяне на времевите идентификатори*
   От датата на наблюдението автоматично се определят годината, денят от годината, GPS седмицата и денят от GPS седмицата. Тези величини се използват за еднозначно идентифициране на необходимия прецизен орбитен продукт и за правилното именуване и организиране на работните файлове.

5. *Осигуряване на прецизния SP3 продукт*
   За съответната дата се проверява наличието на необходимия GFZ MGEX прецизен орбитен продукт във формат SP3. Ако файлът не е наличен локално, той се получава автоматично от използвания архив и се разархивира в работната директория. Характеристиките и източникът на тези продукти са разгледани в §3.5.2.

6. *Проверка на пълнотата на входните данни*
   Преди стартиране на ryOASIS се проверява наличието както на валиден RINEX файл с наблюденията на KOH2, така и на съответния SP3 продукт. Обработката за конкретния ден продължава само когато необходимите входни данни са успешно установени.

7. *Повторно използване на вече подготвени файлове*
   Автоматизираната процедура проверява дали необходимите преобразувани RINEX файлове, изтеглени продукти или вече създадени междинни файлове са налични от предходно изпълнение. Когато те съществуват и са валидни, се използват повторно, без ненужно преобразуване или повторно изтегляне. Това позволява обработката да бъде възобновявана и повторно изпълнявана по устойчив начин.

След приключването на тези етапи за всяко денонощие са осигурени двата основни входа за ryOASIS — съвместим RINEX файл с наблюденията на KOH2 и прецизен орбитен SP3 продукт. Подготвените данни се подават към следващия етап, при който орбитната информация се интерполира към необходимите моменти чрез модула SP3intp.

4.2.3. Обработка на орбитните продукти

След подготовката на входните данни първият основен етап на ryOASIS е обработката на прецизната орбитна информация. Тя се извършва чрез модула SP3intp, който подготвя координатите на GNSS спътниците за последващата обработка на наблюденията [96].

1. *Зареждане на прецизния орбитен SP3 продукт*
   За съответното денонощие се използва предварително осигуреният GFZ MGEX предварителен (*rapid*) продукт във формат SP3, описан в §3.5.2. В използваните файлове координатите на спътниците са представени през 5 min. Тази времева стъпка е по-голяма от интервала на регистрация на GNSS наблюденията и поради това орбитната информация трябва да бъде интерполирана към необходимите моменти.

2. *Интерполация чрез SP3intp*
   Модулът SP3intp получава като вход годината, деня от годината и директорията с прецизния SP3 продукт. Чрез вътрешната интерполационна процедура на ryOASIS се създава орбитен набор, подходящ за използване при последващата обработка на наблюденията. В автоматизираната реализация за KOH2 SP3intp представлява първия изпълняван модул на ryOASIS.

3. *Създаване на интерполирания орбитен файл*
   Резултатът от SP3intp се записва в отделната директория за орбитни продукти на ryOASIS. В реализираната обработка за KOH2 изходният файл има наименование:

ORBITS_YYYY_DDD.SP3

където YYYY е годината, а DDD – денят от годината. След изпълнението на модула автоматизираната процедура проверява дали този файл действително е създаден; при липсата му обработката за съответния ден се прекратява.

4. *Използване при обработката на RINEX наблюденията*
   Подготвеният орбитен файл се използва непосредствено от следващия модул – RNXclean. Така координатите на наблюдаваните спътници могат да бъдат съпоставени с епохите от RINEX файла и да се използват при контрола и последващата обработка на наблюденията. В реалната последователност за KOH2 изпълнението е:

   SP3 → SP3intp → ORBITS_YYYY_DDD.SP3 → RNXclean

Така извършената обработка осигурява пространствената информация, необходима за последващото определяне на геометрията между станция KOH2 и наблюдаваните GNSS спътници. Използването на прецизни орбитни продукти ограничава влиянието на грешките в положението на спътниците и осигурява единна основа за всички последващи операции в ruOASIS. Конкретната автоматизирана последователност и проверката на изходния орбитен продукт са реализирани в публикувания скрипт за обработка на KOH2 [62].

4.2.4. Обработка и определяне на TEC

След подготовката на прецизната орбитна информация обработката на RINEX наблюденията преминава през последователни операции за контрол на качеството, подбор на валидните наблюдения, съвместно използване на кодовите и фазовите измервания и окончателно определяне на TEC. Основните операции се изпълняват от модулите RNXclean, RNXScreening, RNXlevelling и TECcalc [96].

1. *Първоначална проверка и подготовка чрез RNXclean*
   Модулът RNXclean приема наблюдателния RINEX файл и подготвената орбитна информация. На този етап наблюденията се проверяват и организират за последващата йоносферна обработка. Отстраняват се или се маркират наблюдения, които не удовлетворяват необходимите условия за последващо използване, като се отчита и непрекъснатостта на проследяването на отделните спътници.

Резултатът представлява подготвен набор от кодови и фазови наблюдения, съгласуван с орбитната информация и подходящ за последващ контрол.

2. *Допълнителен контрол чрез RNXScreening*
   След първоначалната подготовка наблюденията преминават през RNXScreening. Целта на този етап е допълнително идентифициране на неподходящи или несъгласувани наблюдения и отделяне на валидните непрекъснати интервали на проследяване.

Този контрол е особено важен при фазовите наблюдения, тъй като прекъсванията и цикличните скокове променят фазовата неопределеност и не позволяват една и съща оценка на константното отместване да бъде използвана от двете страни на прекъсването. Физическото значение на тези явления е разгледано в §2.6.4.

3. *Привеждане на фазовите към кодовите наблюдения чрез RNXlevelling*
   След подбора на валидните наблюдения се изпълнява модулът RNXlevelling. Независимо от оригиналното наименование на модула, в настоящата работа операцията се означава като привеждане на фазовата към кодовата геометрично независима комбинация.

Кодовите наблюдения съдържат информация за константното отместване, но са сравнително шумни, докато фазовите наблюдения позволяват значително по-прецизно проследяване на измененията във времето. В рамките на всеки непрекъснат интервал на проследяване се оценява константното отместване между двете комбинации и фазовата последователност се привежда към кодовата.

Теоретичният принцип на тази операция е разгледан в §2.6.3. Тук е важно да се подчертае, че привеждането не представлява изглаждане на кодовите псевдоразстояния и не отстранява автоматично диференциалните инструментални закъснения. Инструменталните компоненти трябва да бъдат отчетени в рамките на последващото определяне на TEC.

4. *Формиране на йоносферната величина*
   След привеждането подготвената двучестотна фазова последователност съдържа високоточна информация за измененията на честотно зависимия йоносферен компонент. Геометричните и голяма част от останалите общи недисперсионни компоненти са елиминирани чрез използваната двучестотна комбинация

5. *Определяне на TEC чрез TECcalc*
   Окончателното изчисляване на TEC се извършва чрез модула TECcalc. Към този етап достигат вече проверените и приведени наблюдения, за които са налични необходимите орбитни и геометрични данни.

Резултатите се определят за отделните спътници и епохи. STEC характеризира интегралното електронно съдържание по пътя на сигнала между спътника и станция KOH2. Чрез геометрията на наблюдението и съответната функция за преобразуване се получават и вертикалните оценки на TEC. Теоретичната връзка между STEC, VTEC, IPP и функцията за преобразуване е представена в §2.5.

6. *Контрол на крайните TEC стойности*
   Получените стойности се подлагат на последваща проверка преди използването им в сравнителния и статистическия анализ. Наблюденията с неподходяща геометрия, прекъсната фазова последователност или други признаци за недостатъчно качество не се включват в окончателния набор.

Основната последователност за определяне на TEC чрез ruOASIS може да бъде представена като:

RINEX → RNXclean → RNXScreening → RNXlevelling → определяне на йоносферната компонента → TECcalc → STEC/VTEC

В действителната програмна последователност между RNXlevelling и TECcalc се изпълняват и модулите за определяне на допълнителни йоносферни показатели. Те не променят принципа на определяне на TEC и са разгледани отделно в §4.2.5. Конкретната автоматизация на тази последователност за данните на KOH2 е реализирана в публикувания софтуерен пакет [62].

4.2.5. DTEC, ROTI и допълнителни йоносферни показатели

Освен основните оценки на STEC и VTEC, ruOASIS изчислява и допълнителни показатели, предназначени да характеризират краткопериодичните изменения на електронното съдържание и качеството на наблюденията. В използваната обработка за KOH2 тези величини се получават чрез модулите ROTIcalc, DTECcalc и SIDXcalc [96].

1. *Определяне на ROTI чрез ROTIcalc*
   Модулът ROTIcalc използва последователните TEC оценки за определяне на скоростта на изменение на TEC и на нейната краткопериодична изменчивост. Теоретичната дефиниция на ROT и ROTI е разгледана в §2.7.1 и §2.7.2.

В използваната реализация на OASIS ROTI се изчислява като стандартно отклонение на ROT в кратък времеви прозорец. За разлика от класическата 5-минутна дефиниция на Pi et al., в OASIS се използва 1-минутен прозорец [95, 96]. Стойностите следва да се интерпретират според конкретната реализация и да не се сравняват непосредствено с ROTI, получен при различна времева стъпка или прозорец.

2. *Определяне на ΔTEC чрез DTECcalc*

   Модулът DTECcalc определя отклонението на TEC спрямо по-бавно изменящ се фон. В използваната реализация ΔTEC се формира като разлика между 15-минутна и 60-минутна плъзгаща средна на приведената GF комбинация:

(70) $$\Delta TEC(t) = \overline{TEC}_{15\,min}(t) - \overline{TEC}_{60\,min}(t)$$

   По-краткият прозорец проследява по-бързите изменения, а 60-минутната средна представлява по-плавна фонова компонента. Разликата между тях позволява да бъдат откроени вариации с междинен времеви мащаб. Физическият смисъл и ограниченията на ΔTEC са разгледани в §2.7.3.

3. *Допълнителен индекс чрез SIDXcalc*
   В последователността на pyOASIS се изпълнява и модулът SIDXcalc, който генерира допълнителен индекс, свързан с изменчивостта на йоносферните наблюдения. Тъй като този показател не е основен за анализа в настоящата работа, той се разглежда като допълнителен диагностичен продукт на обработката.

ROTI, ΔTEC и останалите производни величини не заменят STEC и VTEC, а ги допълват. Те характеризират различни аспекти на времевата изменчивост и могат да бъдат използвани за откриване на интервали с по-силни краткопериодични изменения.

При интерпретацията им трябва да се отчита влиянието на честотата на регистрация, времевия прозорец, качеството на фазовите наблюдения, цикличните скокове и геометрията. Повишена стойност на даден индекс сама по себе си не доказва конкретен физически процес.

В настоящата монография тези показатели се използват като допълнителни характеристики към основния анализ на TEC. Основният дългопериодичен и сравнителен анализ се основава на STEC/VTEC, докато ROTI и ΔTEC подпомагат оценката на краткопериодичната изменчивост и отделни смутени интервали. Така ROTIcalc, DTECcalc и SIDXcalc разширяват стандартната TEC обработка с допълнителна информация за динамиката на йоносферата, без да променят основната последователност на определяне на STEC и VTEC.

4.2.6. Изходни продукти и проверка

След изпълнението на последователните модули на pyOASIS за всяко денонощие се получава набор от междинни и крайни файлове, съдържащи резултатите от контрола на наблюденията, определените йоносферни величини и допълнителните показатели. Запазването на междинните продукти позволява проследяване на отделните етапи и улеснява установяването на евентуални проблеми при обработката.

1. *Междинни продукти от обработката*
   Отделните модули на pyOASIS създават работни файлове, които се използват като вход към следващите операции. Към тях се отнасят интерполираните орбитни данни, резултатите от проверката и подбора на RINEX наблюденията, както и приведените двучестотни кодови и фазови последователности. Тези файлове се съхраняват отделно от първичните RINEX наблюдения и позволяват да бъде проследено състоянието на данните след всеки основен етап.

2. *Крайни йоносферни продукти*
   Основният резултат от обработката са стойностите на TEC за отделните GNSS спътници и епохи. Получените данни съдържат необходимата информация за последващо формиране и анализ на STEC и VTEC, както и за съпоставяне на резултатите между отделните денонощия с налични данни.

Наред с TEC се запазват и производните величини, получени чрез ROTIcalc, DTECcalc и SIDXcalc. По този начин за всеки успешно обработен ден се формира комплексен набор от йоносферни показатели, от който впоследствие могат да бъдат избрани необходимите величини според конкретната задача.

3. *Проверка за успешно приключване на отделните етапи*
   Автоматизираната обработка включва проверки за наличието на очакваните изходни файлове след изпълнението на основните модули. Ако необходим междинен или краен продукт не бъде създаден, съответният ден се отбелязва като неуспешно обработен и не се включва автоматично в последващия анализ.

Този подход позволява техническа грешка в отделен ден да бъде разграничена от действителна липса или недостатъчно качество на GNSS наблюденията.

4. *Проверка на съдържанието на резултатите*
   Наличието на изходен файл само по себе си не е достатъчно условие за приемане на резултата. Проверява се дали файлът съдържа валидни наблюдения, дали времевият диапазон съответства на обработвания ден и дали са налични необходимите величини за последващия анализ.

Особено внимание се отделя на прекъсванията на наблюденията, броя на валидните спътникови последователности и наличието на необичайни стойности, които могат да са резултат от циклични скокове, проблеми в RINEX файла или недостатъчно надеждна геометрия.

5. *Проверка на автоматизираната реализация за KOH2*
   Автоматизираната процедура за KOH2 е проверена чрез съпоставяне на резултатите от програмно изпълнение с резултати, получени чрез контролна обработка на представителни денонощия с налични данни. Проверката обхваща както последователността на изпълнение на отделните модули, така и съдържанието на крайните TEC продукти.

При валидираните представителни случаи автоматизираната процедура възпроизвежда резултатите от контролната обработка, което позволява същата последователност да бъде приложена към многогодишния набор от наблюдения. Това не отменя необходимостта от контрол на качеството на отделните дни, тъй като наличността и качеството на първичните GNSS наблюдения се изменят през разглеждания период.

6. *Подготовка за последващ анализ*
   След успешното приключване на обработката крайните резултати се организират по дата, спътник и епоха. От тях впоследствие се формират необходимите часови, дневни и други обобщени величини. Самото времево обобщаване и съгласуването с външните йоносферни продукти не са част от основната обработка чрез ryOASIS, а се извършват на следващия етап на сравнителния и статистическия анализ, разгледан в Глава 5.

Проверката на изходните продукти завършва обработката чрез ryOASIS и осигурява контролиран набор от резултати за последващото сравнение с PyTECGg, GIM, Madrigal и останалите използвани външни данни.

4.3. Обработка чрез PyTECGg

4.3.1. Роля на PyTECGg

PyTECGg е вторият използван софтуерен подход за определяне на TEC от двучестотните GNSS наблюдения на KOH2. Софтуерът е разработен за обработка на GNSS данни с цел определяне и анализ на пълното електронно съдържание и включва функционалности за четене на RINEX наблюдения и навигационни данни, формиране на линейни комбинации, определяне на спътниковата геометрия, разделяне на наблюденията на непрекъснати интервали, определяне на STEC и VTEC и получаване на вертикална еквивалентна стойност на TEC [126].

PyTECGg се прилага към същия основен набор от наблюдения на KOH2, използван при pyOASIS. Поради общия входен набор двата подхода не представляват независими наблюдателни източници, но позволяват да се оцени чувствителността към различна програмна и алгоритмична реализация.

Обработката чрез PyTECGg използва подготвените дневни RINEX наблюдения на KOH2 с интервал на регистрация 30 s. За съответните дни се осигуряват навигационни RINEX данни с радиоефемериди, които се използват за определяне на координатите на наблюдаваните GNSS спътници. В реализираната автоматизирана процедура навигационните данни се получават от BKG, след което се обработват по GNSS системи и се използват за определяне на геометрията спътник–приемник.

Основните операции на PyTECGg могат да бъдат обобщени като последователност:

RINEX наблюдения → радиоефемериди → спътникови координати → двучестотни линейни комбинации → непрекъснати интервали на проследяване → определяне на STEC → IPP и VTEC → VEq

Първоначално от кодовите и фазовите наблюдения се формират необходимите двучестотни линейни комбинации. След това наблюденията се разделят на непрекъснати интервали на проследяване, за които се извършва необходимото кодово-фазово привеждане и се определя STEC. Реалната програмна реализация използва последователно функциите за изчисляване на линейните комбинации, отделяне на непрекъснатите интервали и определяне на TEC.

За всяко валидно наблюдение се определят координатите на спътника, азимутът и височината му над хоризонта и положението на IPP. При използваната за KOH2 конфигурация се приема височина на условния йоносферен слой **350 km**, а наблюденията под **30° височина на спътника** не се включват в крайния TEC набор. Тези параметри са запазени и в публикуваната версия на обработката.

След определянето на STEC се изчислява VTEC за съответната IPP чрез геометричното преобразуване, разгледано в §2.5. Допълнително PyTECGg определя величината **VEq (Vertical Equivalent TEC)**, която предоставя единна времева характеристика на вертикалното електронно съдържание за местоположението на станцията и се използва широко в последващите сравнения и дългопериодичния анализ. В резултатите за KOH2 се запазват както отделните VTEC стойности в IPP, така и VEq. Именно тези два типа PyTECGg резултати се използват по различен начин при сравнението с външните продукти.

За обработката на целия набор от KOH2 е разработена автоматизирана процедура process_koh2_pytecgg.py, която открива наличните дневни RINEX файлове, обединява наблюденията при наличие на повече от един сегмент, премахва дублираните записи, осигурява навигационните данни и изпълнява последователно необходимите операции на PyTECGg. Публикуваната реализация запазва научните параметри на използвания в изследването скрипт [62]. Представителната проверка за 01.01.2025 г. възпроизвежда крайните TEC и VEq продукти без числени различия спрямо използваната първоначална реализация.

Следователно ролята на PyTECGg в настоящото изследване е двояка: от една страна, той предоставя самостоятелно определени STEC, VTEC и VEq от наблюденията на KOH2, а от друга – създава възможност резултатите да бъдат съпоставени с получените чрез pyOASIS стойности и с външните GIM и Madrigal продукти. Подготовката и изборът на входните наблюдения за тази обработка са разгледани в следващия подраздел.

4.3.2. Избор и подготовка на входните данни

Преди същинското определяне на TEC чрез PyTECGg за всяко денонощие с налични данни се подготвят GNSS наблюденията на станция KOH2 и съответните навигационни данни с радиоефемериди. Подготовката е автоматизирана и има за цел да осигури единен дневен набор от наблюдения, съвместим с последващите операции на PyTECGg [62, 126]:

1. *Избор на дневните RINEX наблюдения*
   За всеки ден се търси наличният подготвен RINEX файл с наблюдения на KOH2. За основната обработка чрез PyTECGg се използват дневните наблюдения с интервал на регистрация 30 s, получени след предварителната подготовка, описана в §3.4. Така различията в първоначалната честота на регистрация на суровите данни не се пренасят непосредствено в последващия сравнителен анализ.

2. *Проверка на времевия обхват и принадлежността към съответния ден*
   От името и съдържанието на RINEX файла се определя датата на наблюдение и се проверява дали данните съответстват на обработвания ден. Това предотвратява включването на файлове с неправилно времево означение или на наблюдения, принадлежащи към друг период.

3. *Обединяване на отделни наблюдателни сегменти*
   Когато за един и същ ден са налични повече от един RINEX сегмент, наблюденията се прочитат и обединяват в един дневен набор. По този начин наличните части на денонощието могат да бъдат обработвани съвместно, без да се изисква всеки отделен файл да покрива пълните 24 часа.

След обединяването записите се подреждат хронологично и се извършва проверка за повтарящи се епохи. При наличие на дублирани записи те се отстраняват, така че за даден момент да не се въвеждат повторно едни и същи наблюдения.

4. *Проверка на необходимите наблюдавани величини*
   За определянето на TEC са необходими подходящи кодови и фазови наблюдения на най-малко две носещи честоти за един и същ спътник. Наличността на конкретните сигнали зависи от GNSS системата, спътника и съдържанието на съответния RINEX файл.

При последващата обработка се използват само комбинациите, за които са налични необходимите наблюдавани величини. Това е особено важно при многосистемни данни, тъй като типовете кодови и фазови наблюдения могат да се различават между GPS, GLONASS, Galileo и останалите системи.

5. *Използване на метаданните за станция KOH2*
   От RINEX заглавната част се използва информацията, необходима за правилното интерпретиране на наблюденията. Координатите на станция KOH2 осигуряват началната точка за определяне на геометрията спътник–приемник и за изчисляване на азимута, височината на спътника и положението на IPP.

Подготовката на RINEX файловете и уеднаквяването на метаданните са извършени предварително чрез процедурите, описани в §3.4, поради което на този етап не се извършва повторно редактиране на първичната информация.

6. *Осигуряване на навигационните RINEX данни*
   За съответната дата се осигуряват навигационни RINEX данни с радиоефемериди. В автоматизираната обработка те се получават от BKG, както е описано в §3.5.1.

Навигационните записи се използват за определяне на положението на наблюдаваните спътници към съответните епохи. При наличие на наблюдения от повече от една GNSS система данните се обработват съобразно структурата на навигационните съобщения на съответната система.

7. *Подготовка на данните за същинската обработка*
   След приключване на предходните проверки за съответния ден са налични два основни входа*:*

дневни RINEX наблюдения на KOH2 + навигационни RINEX данни с радиоефемериди

От тях PyTECGg формира необходимите структури от наблюдения и ефемериди за последващо определяне на спътниковите координати и двучестотните линейни комбинации.

Автоматизираната реализация проверява наличието на необходимите входни файлове и пропуска дните, за които не може да бъде формиран подходящ комплект от наблюдения и навигационни данни. Това позволява една и съща процедура да бъде прилагана последователно към многогодишния набор на KOH2.

4.3.3. Формиране на TEC наблюдения

След подготовката на наблюдателните и навигационните данни PyTECGg формира необходимите двучестотни комбинации и подготвя наблюденията за определяне на TEC. На този етап кодовите и фазовите измервания се разглеждат съвместно, като се използва честотната зависимост на йоносферното влияние, описана в §2.4 и §2.5 [126].

1. *Избор на подходящи двучестотни наблюдения*
   За всеки наблюдаван спътник се проверява наличието на съвместими кодови и фазови измервания на две носещи честоти. Конкретната комбинация зависи от GNSS системата и от наличните типове наблюдения в съответния RINEX файл.

При обработката се използват само епохите, за които необходимите величини са налични едновременно. По този начин се избягва формирането на двучестотна комбинация от несъгласувани или непълни наблюдения.

2. *Формиране на геометрично независимите комбинации*
   От избраните кодови и фазови наблюдения се формират геометрично независими комбинации. При тях общите компоненти, свързани с геометричното разстояние спътник–приемник, часовниците и голяма част от останалите недисперсионни влияния, се елиминират, докато честотно зависимият йоносферен компонент се запазва.

Математическите зависимости за кодовата и фазовата GF комбинация вече са въведени в §2.4.3 и тук не се повтарят. В контекста на PyTECGg тяхната роля е да преобразуват първичните GNSS наблюдения във величини, от които може да бъде извлечено електронното съдържание по пътя на сигнала.

3. *Съвместно използване на кодовата и фазовата информация*
   Кодовата и фазовата GF комбинация се използват съвместно чрез кодово-фазово привеждане. Теоретичният принцип е изложен в §2.6.3, а конкретната му реализация в PyTECGg е представена в §4.3.4.

PyTECGg използва взаимно допълващите се свойства на двата типа наблюдения, така че ниският шум на фазовите измервания да бъде съчетан с информацията, съдържаща се в кодовите наблюдения. Теоретичният принцип на това кодово-фазово привеждане е разгледан в §2.6.3.

4. *Разделяне на наблюденията на непрекъснати интервали*
   Обработката се извършва по отделни непрекъснати интервали на проследяване; критериите за прекъсвания и циклични скокове и конкретната им реализация в PyTECGg са представени в §4.3.4.

При установяване на прекъсване наблюденията от двете му страни не се третират като една обща фазова последователност. За новия непрекъснат интервал константното отместване трябва да бъде определено отново. По този начин се ограничава възможността промяна на фазовата неопределеност да бъде интерпретирана като действително изменение на йоносферата.

5. *Преобразуване към електронно съдържание*
   След формирането и обработката на двучестотните комбинации честотно зависимата величина се преобразува в TEC чрез зависимостта между йоносферното влияние, носещите честоти и електронното съдържание. Съответният коефициент се определя от конкретната двойка честоти, използвана за дадения GNSS сигнал.

При системи, при които носещите честоти са еднакви за всички спътници от съответния сигнал, един и същ честотен коефициент може да бъде използван за всички тях. При традиционните GLONASS FDMA сигнали обаче конкретните L1 и L2 честоти зависят от честотния канал на съответния спътник, което трябва да бъде отчетено при преобразуването.

Резултатът от този етап е подготвена TEC последователност за всеки валиден непрекъснат интервал на проследяване. Преди получаването на крайните STEC и VTEC стойности обаче трябва да бъдат отчетени инструменталните влияния и да бъде осигурена необходимата непрекъснатост на резултатите. Тези операции са разгледани в §4.3.4.

В общ вид последователността на този етап може да бъде представена като:

двучестотни кодови и фазови наблюдения → GF комбинации → непрекъснати интервали на проследяване → кодово-фазово привеждане → TEC

4.3.4. Формиране и обработка на непрекъснати интервали на проследяване

След формирането на двучестотните линейни комбинации PyTECGg извършва допълнителна обработка за отделяне на валидните непрекъснати интервали на проследяване, привеждане на фазовите към кодовите комбинации и последващо оценяване на остатъчните отмествания. Този етап е необходим, тъй като фазовите неопределености, цикличните скокове и инструменталните закъснения могат да доведат до систематични разлики между отделните последователности и да повлияят върху абсолютното ниво на TEC.

1. *Откриване на прекъсвания и циклични скокове*
   PyTECGg използва информацията от формираните линейни комбинации за идентифициране на загуба на проследяване, циклични скокове и резки несъответствия между последователните наблюдения. В резултат наблюденията се разделят на отделни непрекъснати интервали, за които фазовата неопределеност може да се разглежда като константна.

В използваната конфигурация на KOH2 функцията extract_arcs се изпълнява с минимална дължина на валидния интервал **30 наблюдения**, както и с използваните в

PyTECGg критерии threshold_abs = 5, threshold_std = 5 и threshold_jump = 10. Тези параметри са запазени еднакви в публикуваната автоматизирана обработка.

2. *Използване на допълнителни линейни комбинации за контрол*
   Освен кодовата и фазовата GF комбинация при обработката се формира и комбинацията Melbourne–Wübbena (MW). В използваната конфигурация трите величини gflc_phase, gflc_code и mw се изчисляват едновременно при режим за подбор на наблюденията quality.

MW комбинацията предоставя допълнителна информация за непрекъснатостта на фазовите наблюдения и подпомага отделянето на интервалите, в които двучестотните измервания могат надеждно да бъдат използвани при последващото определяне на TEC.

3. *Привеждане на фазовата към кодовата GF комбинация*
   За всеки валиден непрекъснат интервал PyTECGg извършва кодово-фазово привеждане. Проверката на използваната версия на програмния пакет показва, че първо се определя средната разлика между коригираната фазова и кодова GF комбинация за съответния интервал, след което тази средна стойност се използва за преместване на фазовата последователност към кодовото ниво.

По този начин фазовите измервания запазват по-ниския си шум, а константното им отместване се определя от кодовите наблюдения. Това съответства на общия принцип, разгледан в §2.6.3, но тук е посочена конкретната му реализация в PyTECGg.

Важно е, че операцията се извършва **поотделно за всеки валиден непрекъснат интервал**. При цикличен скок или загуба на проследяване се създава нов интервал и съответното константно отместване се определя отново.

4. *Остатъчни инструментални влияния*
   Кодово-фазовото привеждане не означава автоматично отстраняване на всички инструментални закъснения. Както е разгледано в §2.6.1, кодовата GF комбинация съдържа диференциални инструментални компоненти, които могат да се пренесат и в приведената фазова последователност.

Поради това след извличането и привеждането на валидните интервали PyTECGg изпълнява допълнителен етап на **TEC калибрация** чрез функцията calculate_tec. В използваната за KOH2 конфигурация максималната степен на полиномиалното представяне е **3**, а обработката се извършва на групи от **30 епохи**.

Изходните данни от тази процедура съдържат освен stec и vtec и величина bias, което показва, че остатъчното отместване се оценява като част от вътрешната калибрационна процедура на PyTECGg. В настоящата работа тази величина се разглежда като **оценен инструментален/калибрационен компонент на алгоритъма**, без да се отъждествява непосредствено с официален външен DCB продукт.

5. *Значение за последващото определяне на TEC*
   Комбинацията от контрол на непрекъснатостта, разделяне на наблюденията на валидни интервали, кодово-фазово привеждане и последваща калибрация има за цел да ограничи влиянието на фазовите неопределености, цикличните скокове и систематичните отмествания върху крайния TEC резултат.

В резултат до следващия етап достигат само наблюденията, за които са определени валидна непрекъсната последователност, необходимата геометрична информация и калибрирана TEC оценка. След това се извършва окончателното определяне на **STEC и VTEC в IPP**, разгледано в §4.3.5.

4.3.5. Определяне на STEC и VTEC в IPP

След формирането на валидните непрекъснати интервали, кодово-фазовото привеждане и калибрацията, PyTECGg определя електронното съдържание по пътя на GNSS сигнала и неговата вертикална еквивалентна стойност в йоносферната прободна точка. Теоретичните зависимости между STEC, VTEC, IPP и функцията за преобразуване са разгледани в §2.5 и тук не се повтарят.

1. *Определяне на STEC*
   За всяка валидна епоха и спътник от обработената двучестотна комбинация се получава стойност на STEC. Тя характеризира интегралното електронно съдържание по пътя на GNSS сигнала между спътника и станция KOH2 и поради това зависи от геометрията на конкретното наблюдение.

Получените STEC стойности се отнасят към отделните спътникови наблюдения и запазват тяхната времева разделителна способност. Те представляват основата за последващото геометрично преобразуване към VTEC.

2. *Определяне на геометрията спътник–приемник*
   За всяка епоха PyTECGg използва радиоефемеридите за изчисляване на положението на съответния GNSS спътник. От координатите на спътника и известното положение на KOH2 се определят азимутът и височината му над хоризонта.

Тези величини са необходими както за контрола на геометрията на наблюдението, така и за определяне на положението на IPP и за преобразуването от STEC към VTEC.

3. *Прилагане на ограничение по височина на спътника*
   В използваната за KOH2 конфигурация в крайните резултати се включват наблюдения само при височина на спътника не по-малка от 30°. По-ниските наблюдения се изключват поради по-силното влияние на многопътността, по-голямата чувствителност към пространствени градиенти и по-голямата зависимост от приетия модел за преобразуване между STEC и VTEC.

Използването на еднакъв критерий за всички обработени дни осигурява съпоставимост на получените резултати през целия изследван период.

4. *Определяне на IPP*
   За всяко валидно наблюдение се определя положението на IPP чрез модела на тънък сферичен йоносферен слой. В използваната конфигурация на PyTECGg е приета ефективна височина на слоя 350 km.

Положението на IPP зависи от координатите на KOH2, азимута и височината на съответния спътник. Отделните наблюдения към различни спътници и епохи се отнасят към различни точки в условния йоносферен слой.

5. *Преобразуване от STEC към VTEC*
   На основата на геометрията на наблюдението STEC се преобразува към VTEC чрез съответната функция за преобразуване. Така се отчита по-дългият път на сигнала през йоносферата при наблюдения, отдалечени от зенита.

Получената стойност представлява **VTEC в съответната IPP**, а не непосредствено над станция KOH2. Това разграничение е важно, тъй като при ниски и средни височини на спътника IPP може да бъде на значително хоризонтално разстояние от приемника.

В крайните резултати на PyTECGg към VTEC се запазва и информацията за геометрията на съответното наблюдение, включително положението на IPP. Това позволява стойностите да бъдат разглеждани не само като времеви, но и като

пространствено отнесени наблюдения на йоносферното електронно съдържание. Тази характеристика е съществена при сравнение с GIM и други пространствено представени йоносферни продукти, тъй като позволява да бъде отчетено действителното местоположение, към което се отнася всяка GNSS-базирана VTEC оценка.

Последователността на този етап е:

калибрирана двучестотна TEC оценка → STEC → спътникова геометрия → IPP → функция за преобразуване → VTEC в IPP

Получените VTEC стойности запазват пространствената зависимост на отделните GNSS наблюдения. За формиране на единна времева характеристика, отнесена към местоположението на станция KOH2, PyTECGg определя допълнително **VEq**, разгледано в §4.3.6.

4.3.6. Определяне на VEq

Освен VTEC, определено за отделните IPP, PyTECGg изчислява и **вертикално еквивалентно TEC (Vertical Equivalent – VEq)**. VEq представлява синтетична оценка на вертикалното електронно съдържание непосредствено над местоположението на GNSS станцията и осигурява единна времева характеристика, която не е свързана с положението на конкретна IPP [135]. Официалната документация на PyTECGg дефинира VEq именно като оценка на състоянието на йоносферата в зенита над станцията.

1. *Използване на пространствения модел на йоносферната*
   При калибрацията на TEC PyTECGg представя пространственото изменение на йоносферната компонента чрез полиномиален модел, центриран спрямо координатите на приемника. В използваната за KOH2 конфигурация максималната степен на полинома е 3, а оценяването се извършва на групи от 30 епохи. Тези параметри са същите като използваните при определянето на калибрираните STEC и VTEC стойности.

Тъй като моделът е центриран спрямо местоположението на приемника, отделните му членове описват пространствените изменения на йоносферното електронно съдържание около станцията.

2. *Определяне на стойността в зенита над KOH2*
   VEq се извежда от константния коефициент на полиномиалния йоносферен модел, получен при калибрацията. Когато моделът се оцени в точката, съответстваща на зенита над приемника, пространствените членове, зависещи от отместването спрямо станцията, не участват и остава локалната вертикална компонента. По този начин се получава оценка, отнесена непосредствено към местоположението на KOH2 [135].

Това е съществената разлика между VTEC и VEq. **VTEC** се отнася към конкретната IPP на дадено наблюдение и следователно положението му се изменя заедно с геометрията спътник–приемник. **VEq** е отнесено към зенита над станцията и представлява обща локална характеристика за съответната епоха.

3. *Използване на множество спътникови наблюдения*
   При определянето на VEq информацията от наблюденията към различни спътници участва в оценяването на общия пространствен модел. Отделните VTEC стойности могат да се различават поради различното положение на техните IPP и наличието на пространствени градиенти в йоносферата. VEq използва оценения модел, за да представи еквивалентната стойност в една и съща пространствена позиция – над станцията.

Следователно VEq **не представлява обикновена средна стойност на VTEC от наблюдаваните спътници**. То е резултат от оценяването на пространствения модел и последващото му отнасяне към зенита над приемника. Това разграничение е важно при интерпретацията на величината [135].

4. *Формиране на времева последователност*
   В резултат се получава една VEq стойност за съответната епоха, характеризираща вертикалното електронно съдържание над KOH2. Официалната документация на PyTECGg посочва VEq като единна времева характеристика за станцията, за разлика от множеството едновременни VTEC стойности, отнесени към различните IPP.

Това свойство прави VEq особено подходящо за изграждане на времеви редове и за анализ на дългопериодичните изменения на TEC, тъй като се намалява влиянието на непрекъснато променящото се пространствено положение на отделните IPP.

В настоящата работа VEq се използва като основната PyTECGg величина при сравнения, които изискват стойност, отнесена към местоположението на KOH2. Така например при сравнението с IGS Final GIM VEq се съпоставя с GIM стойността, интерполирана в координатите на станцията, докато отделните PyTECGg VTEC стойности се сравняват с GIM в съответните IPP. Точно това разграничение е заложено в използваната процедура за валидация.

Същият подход се използва и при общото времево съгласуване с PyIRI, IGS и Madrigal, където PyTECGg VEq представлява станционната времева характеристика на TEC.

По този начин PyTECGg предоставя два взаимно допълващи се типа резултати: **VTEC в отделните IPP**, което запазва пространствената информация на наблюденията, и **VEq над KOH2**, което предоставя единна времева характеристика за местоположението на станцията. Изборът между тях при последващите сравнения зависи от пространственото представяне на съответния външен продукт.

4.3.7. Изходни продукти и проверка

След приключването на обработката чрез PyTECGg за всяко денонощие се получава набор от крайни резултати, съдържащ стойности на STEC, VTEC, VEq и съпътстваща информация за геометрията и качеството на наблюденията. Тези продукти се използват както за контрол на самата обработка, така и като вход към последващите сравнителни и статистически анализи.

1. *Продукти за отделните спътникови наблюдения*
   За всяка валидна епоха и наблюдаван спътник се запазват определените стойности на STEC и VTEC, както и необходимата геометрична информация. Към нея се отнасят азимутът и височината на спътника и координатите на съответната IPP. Тези резултати запазват пространствената зависимост на GNSS наблюденията и позволяват всяка VTEC стойност да бъде отнесена към действителното положение на нейната IPP. Това е особено важно при последващите сравнения с пространствено представени външни продукти.
2. *Времева последователност на VEq*
   Отделно се съхранява VEq, което представя вертикалното електронно съдържание над местоположението на KOH2. За разлика от VTEC в отделните IPP, VEq предоставя единна стойност за съответната епоха и поради това е удобно за изграждане на непрекъснати времеви редове. В настоящото изследване VEq се използва при анализи, при които е необходима локална времева характеристика на TEC за станцията, включително при дългопериодичното съпоставяне с външни йоносферни и слънчеви данни.
3. *Запазване на калибрационната информация*
   Резултатите от PyTECGg съдържат и оценената при TEC калибрацията величина

bias. Тя представлява вътрешен калибрационен параметър, свързан с остатъчните инструментални отмествания, включително с влиянието на диференциалните кодови закъснения, без да представлява непосредствено външен DCB продукт.

4. *Проверка на валидността на резултатите*
   След приключване на обработката се проверява дали за съответния ден са създадени очакваните крайни файлове и дали те съдържат валидни TEC стойности. Проверяват се времевият обхват, броят на наличните епохи и спътници, наличието на VTEC и VEq и отсъствието на очевидно некоректни стойности.

5. *Проверка на автоматизираната обработка*
   Автоматизираната реализация за KOH2 е проверена чрез съпоставяне с резултати от представителна контролна обработка. При използвания тестов случай за 01.01.2025 г. получените крайни TEC и VEq продукти съвпадат числено с резултатите от първоначалната реализация, което потвърждава, че автоматизацията не изменя използвания алгоритъм [62].

Тази проверка се отнася до възпроизводимостта на програмната процедура. Качеството на резултатите за отделните дни продължава да зависи от наличността и качеството на първичните GNSS наблюдения.

6. *Подготовка за последващия анализ*
   След проверката на резултатите крайните продукти се организират по дата, епоха и спътник. VTEC в IPP се запазва за анализи, при които е необходима пространствената информация на отделните наблюдения, докато VEq се използва като обща времева характеристика за KOH2.

Последващото времево съгласуване с IGS GIM, Madrigal и PyIRI, както и формирането на часови, дневни, месечни и годишни характеристики, се извършват отделно и са разгледани в Глава 5.

По този начин обработката чрез PyTECGg завършва с два основни типа йоносферни резултати — **пространствено отнесени VTEC стойности в IPP** и **VEq като времева характеристика над KOH2**. Тяхното съвместно използване позволява резултатите от станцията да бъдат сравнявани с външни продукти както в пространствен, така и във времеви аспект.

4.4. Софтуерна среда

Обработката, проверката и анализът на данните в настоящото изследване са реализирани в програмна среда, основана преимуществено на **Python** и специализирани библиотеки за числени изчисления, обработка на таблични и многомерни данни, научна визуализация и достъп до външни информационни източници. Изборът на такава среда позволява отделните етапи – от предварителната подготовка на GNSS наблюденията до сравнителния и статистическия анализ – да бъдат обединени в автоматизирана и възпроизводима последователност.

Основните програмни компоненти включват **NumPy**, **pandas**, **SciPy** и **Matplotlib**, използвани съответно за числени операции, структуриране и обработка на данните, научни и статистически изчисления и графично представяне на резултатите. За работа със специфични формати и външни източници се използват допълнително **h5py** и **MadrigalWeb**, а моделните изчисления на йоносферните параметри се извършват чрез **PyIRI**, описан в §3.6.3. Специализираните GNSS обработки чрез pyOASIS и PyTECGg са интегрирани в разработени за настоящото изследване Python процедури, чрез които се автоматизират обработката на многогодишния набор от наблюдения на KOH2 и подготовката на резултатите за последващ анализ.

Към тази среда се използват и външни специализирани инструменти, които изпълняват конкретни операции извън основните Python библиотеки. Сред тях са

Trimble Convert To RINEX за преобразуване на първичните T02 данни и **GFZRNX** за контрол, преобразуване и подготовка на RINEX файловете. Достъпът до навигационни, орбитни, йоносферни, слънчеви и геомагнитни данни се осъществява чрез съответните външни информационни системи, описани в Глава 3.

Софтуерната организация е избрана така, че основните операции да могат да бъдат изпълнявани повторяемо за различни дни и години при запазване на едни и същи параметри на обработката. Публикуваната версия на разработените скриптове и конфигурационни файлове осигурява възможност за проследяване на използваните алгоритми и възпроизвеждане на основните етапи на обработката [62].

Python → обработка на данни / научни изчисления / визуализация / външни данни → NumPy, pandas, SciPy, Matplotlib, h5py, MadrigalWeb, PyIRI

4.4.1. Python

Python е основната програмна среда, използвана за автоматизиране на обработката и анализа на данните в настоящото изследване. Чрез разработените Python процедури се осъществяват откриването и организирането на входните файлове, стартирането на отделните етапи на GNSS обработката, четенето и преобразуването на получените продукти, пространствено-времевото съгласуване на различните източници и формирането на крайните набори от данни за статистически анализ и визуализация.

Използването на Python позволява обработката да бъде организирана в отделни програмни модули според предназначението им. По този начин предварителната подготовка на RINEX данните, обработките чрез pyOASIS и PyTECGg, извличането на IGS GIM и Madrigal данни, изчисленията чрез PyIRI и последващите сравнителни анализи могат да бъдат изпълнявани като отделни, но взаимно свързани процедури.

Особено значение за настоящото изследване има възможността чрез Python да се автоматизира обработката на многогодишен набор от наблюдения. Вместо отделните дни да бъдат обработвани ръчно, програмните процедури обхождат наличната структура от данни, проверяват наличността на необходимите входни файлове, прилагат предварително зададените параметри и организират получените резултати по единен начин. Това намалява вероятността от различно прилагане на критериите между отделните периоди и улеснява повторното изпълнение на изчисленията.

В рамките на Python се използват специализирани библиотеки за различните типове операции. Тяхната конкретна роля в обработката е представена в следващите подраздели.

4.4.2. NumPy

NumPy се използва като основна библиотека за числени операции и работа с масиви в разработените Python процедури. Нейните структури от данни и функции осигуряват ефективна обработка на големи масиви от GNSS, йоносферни, слънчеви и геомагнитни наблюдения и се използват в редица междинни и крайни изчислителни етапи [50].

Основното приложение на NumPy в настоящото изследване е свързано с обработката на числови последователности, изпълнението на векторизирани математически операции и формирането на статистически характеристики. Библиотеката се използва при преобразуване на координати и физични величини, изчисляване на разлики между времево съгласувани стойности, обработка на липсващи данни и подготовка на масиви за последващ статистически анализ.

Особено важно е използването на NumPy при операциите върху TEC данните. След привеждането на различните източници към общи времеви моменти числовите масиви се използват за определяне на отклоненията между GNSS-базираните решения и референтните или сравнителните продукти. Чрез съответните функции се изчисляват

средни стойности, медиани, стандартни отклонения, процентили и други обобщаващи характеристики, използвани при оценяването на резултатите.

NumPy се използва и като основа за редица други библиотеки в програмната среда. Структурите ndarray осигуряват обмена на числови данни между отделните етапи на обработката и позволяват резултатите да бъдат предавани към **pandas**, **SciPy** и **Matplotlib** без необходимост от допълнително преобразуване на всяка отделна стойност.

При обработката на многогодишните данни това има практическо значение, тъй като позволява еднотипните операции да бъдат изпълнявани върху цели масиви от наблюдения вместо чрез последователна обработка на отделните записи. Така се постига по-ефективна реализация на изчисленията и се улеснява прилагането на едни и същи числени процедури към всички анализирани периоди.

4.4.3. pandas

pandas се използва като основна библиотека за организиране, преобразуване и анализ на табличните данни, формирани на различните етапи от обработката. Структурите DataFrame и Series позволяват наблюденията от различните източници да бъдат представени в единен табличен вид и улесняват операциите с времеви индекси, липсващи стойности и многомерни характеристики [74].

Основното приложение на pandas в настоящото изследване е свързано с обработката на резултатите от pyOASIS, PyTECGg, IGS GIM, Madrigal и PyIRI, както и на използваните слънчеви и геомагнитни данни. След прочитането на съответните файлове данните се преобразуват към унифицирана структура, съдържаща времеви момент и необходимите количествени показатели. Това позволява информацията от различни източници да бъде обработвана чрез общи програмни процедури.

Особено важна е работата с **дата** и **време**. Чрез pandas времевите означения от отделните набори се преобразуват към съвместим формат, сортират се хронологично и се използват за съгласуване на наблюденията. Библиотеката подпомага избора на общи епохи, групирането на стойностите по час, ден, месец или година и формирането на обобщени времеви характеристики.

При сравнителния анализ pandas се използва за свързване на таблици от различни източници по времеви и други идентифициращи полета. По този начин могат да бъдат формирани набори, в които за една и съща епоха присъстват TEC стойностите от няколко метода или продукта. Последващите разлики и статистически показатели се изчисляват върху тези съгласувани записи.

Библиотеката се използва и за филтриране според зададени критерии, премахване или маркиране на липсващи и невалидни стойности, отстраняване на дублирани записи и избор на конкретни периоди от многогодишния набор. Тези операции са важни при формирането на общите сравнителни извадки, тъй като отделните външни продукти не винаги имат еднаква времева наличност.

При анализа на дългопериодичните изменения pandas се използва за агрегиране на наблюденията и получаване на часови, дневни и месечни характеристики. Така големият брой отделни GNSS наблюдения се преобразува в структури, подходящи за статистически анализ, сравнение със слънчевата и геомагнитната активност и графично представяне.

4.4.4. SciPy

SciPy се използва за научни и статистически изчисления, които надграждат базовите числени операции на NumPy. В настоящото изследване библиотеката се прилага основно при статистическия анализ, интерполацията и обработката на времеви последователности, както и при отделни процедури за филтриране на данните [128].

Едно от основните приложения на SciPy е свързано с **интерполационните операции**. При пространствено-времевото съгласуване на външни продукти към GNSS резултатите е необходимо стойностите да бъдат определяни за конкретни моменти или

позиции, които не винаги съвпадат с възлите на изходната мрежа или с времевите епохи на съответния продукт. В такива случаи се използват подходящи интерполационни функции, съобразени с конкретната задача.

SciPy участва и в **статистическата обработка** на съгласуваните набори от данни. Чрез функциите на модула scipy.stats могат да бъдат изчислявани корелационни коефициенти, вероятностни характеристики и други статистически показатели, използвани при сравнителния анализ между различните TEC решения и външните източници.

В отделни етапи библиотеката се използва и за **филтриране на времеви последователности**. Това приложение е особено важно при експерименталната високочестотна обработка на GNSS фазовите наблюдения, където чрез цифрови филтри се отделят краткопериодичните вариации от по-бавно изменящите се компоненти на сигнала. Тези процедури се използват само в рамките на съответния експериментален анализ и не участват в основното определяне на TEC чрез pyOASIS и PyTECGg.

SciPy осигурява и редица помощни математически функции, използвани при оценяване на статистически зависимости, числено преобразуване и анализ на резултатите. Съвместната употреба на NumPy и SciPy позволява основните числени и статистически операции да бъдат изпълнявани в една и съща програмна среда и да бъдат прилагани последователно към различните набори от данни.

4.4.5. Matplotlib

Matplotlib се използва като основна библиотека за графично представяне на резултатите от обработката и сравнителния анализ. Чрез нея са създадени времевите графики, сравнителните диаграми, разпределенията и останалите научни визуализации, използвани при интерпретацията на GNSS, йоносферните, слънчевите и геомагнитните данни [55].

Основното приложение на Matplotlib в настоящото изследване е свързано с визуализацията на **времевите изменения на TEC**. Библиотеката се използва за представяне на резултатите от pyOASIS и PyTECGg, както и за тяхното съпоставяне с IGS GIM, Madrigal и PyIRI. Това позволява едновременно да се проследяват общите тенденции и краткопериодичните отклонения между различните източници.

Matplotlib се използва и при визуализацията на **статистическите характеристики на сравненията**. В зависимост от конкретния анализ се представят разлики между отделните TEC решения, разпределения на остатъците, зависимости между сравняваните величини и обобщени показатели за определени времеви периоди. Графичното представяне подпомага идентифицирането на систематични отмествания, периоди с по-голямо разсейване и случаи с нетипично поведение.

Съществено приложение има и при анализа на **дългопериодичните изменения през 25-ия слънчев цикъл**. Чрез Matplotlib се изграждат графики на месечните характеристики на TEC и използваните показатели за слънчева и геомагнитна активност. Това позволява визуално да бъдат проследени сезонните изменения, различията между отделните години и изменението на йоносферното електронно съдържание при различни нива на слънчева активност.

При необходимост в една и съща графична среда се комбинират данни с различни единици и времеви мащаби. Оформлението на осите, означенията, легендите и пояснителните елементи се задава програмно, което осигурява еднотипно представяне на резултатите в различните части на анализа и улеснява повторното генериране на фигурите при промяна на входните данни.

Използването на Matplotlib като част от автоматизираните Python процедури позволява графиките да бъдат формирани непосредствено от крайните обработени таблици, без междинно ръчно прехвърляне на стойности. По този начин се намалява рискът от несъответствие между числовите резултати и тяхното графично представяне и се подобрява възпроизводимостта на анализа.

4.4.6. h5py и MadrigalWeb

Библиотеките **h5py** и **MadrigalWeb** се използват при получаването и обработката на външни йоносферни данни от системата **CEDAR Madrigal**. Тяхната роля е свързана преди всичко с автоматизирания достъп до наличните GNSS TEC продукти и с прочитането на файловете, в които са съхранени резултатите от наблюденията [78].

h5py осигурява работа с файлове във формат **HDF5 (Hierarchical Data Format)**. Този формат позволява големи и структурирани научни набори от данни да бъдат съхранявани в йерархична организация от групи, масиви и метаданни. В настоящото изследване h5py се използва за програмно прочитане на изтеглените Madrigal продукти и извличане на необходимите параметри за последващата обработка.

При прочитането се извличат времевата информация, географските координати и наличните величини, свързани с вертикалното електронно съдържание. След това необходимите записи се преобразуват към таблична структура и се подготвят за пространствено и времево съгласуване с резултатите за KOH2.

MadrigalWeb предоставя програмния интерфейс за взаимодействие със системата Madrigal. Чрез него могат автоматично да бъдат откривани наличните експерименти и файлове за зададен времеви период и да бъдат получавани необходимите данни без ръчно изтегляне през уеб интерфейса.

В разработената обработка MadrigalWeb се използва за последователно търсене на наличните GNSS TEC продукти за съответните дати, избор на подходящите файлове и тяхното изтегляне за последваща локална обработка. По този начин работата с многогодишния набор може да бъде изпълнявана автоматизирано и по едни и същи критерии за всички анализирани периоди.

След получаването на данните с помощта на MadrigalWeb, h5py се използва за достъп до съдържанието на HDF5 файловете. Общата последователност може да бъде представена като:

Madrigal → MadrigalWeb → HDF5 файл → h5py → извличане на необходимите записи → пространствено-времево съгласуване

При последващия сравнителен анализ от Madrigal се използват само записи, удовлетворяващи зададените пространствени и времеви критерии спрямо KOH2. Самото съгласуване и критериите за формиране на сравнителната извадка се разглеждат отделно в методиката за валидация, тъй като не представляват функция на h5py или MadrigalWeb.

Важно е също, че Madrigal GNSS TEC не се разглежда като напълно независим физичен метод за определяне на TEC. Продуктите са получени от GNSS наблюдения, но чрез външна инфраструктура и обработка, различна от използваните за KOH2 pyOASIS и PyTECGg. Степента на независимост при конкретното сравнение зависи и от това кои GNSS станции участват във формирането на съответния Madrigal продукт.

4.4.7. Допълнителни външни инструменти

Основната програмна среда на изследването се допълва от специализирани външни инструменти за работа с GNSS данни. Преобразуването на първичните T02 файлове и предварителната обработка на RINEX наблюденията чрез **Trimble Convert To RINEX** и **GFZRNX** са разгледани подробно в §3.4 и тук не се описват повторно.

Разработените Python процедури извикват автоматизирано необходимите външни инструменти, така че подготовката на данните се изпълнява като част от общата обработваща последователност, а не ръчно за всяко денонощие. Аналогично, специализираните програмни компоненти на pyOASIS и PyTECGg се използват в рамките на съответните обработки, описани в §4.2 и §4.3.

Многогодишната обработка е автоматизирана чрез разработените Python процедури. Чрез тях се извършва последователно откриване на входните файлове,

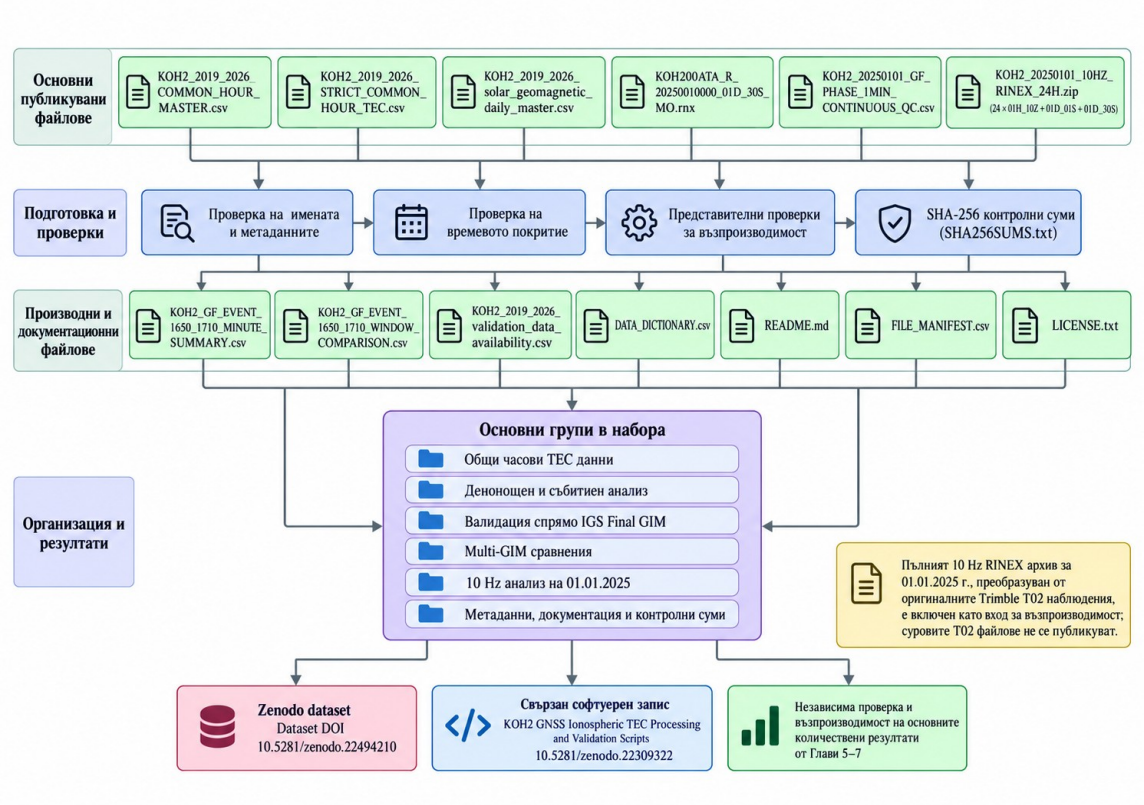
проверка на тяхната наличност, изпълнение на необходимите операции, записване на междинните и крайните резултати и регистриране на основните параметри на обработката. Това позволява едни и същи критерии да бъдат прилагани към всички анализирани периоди.

4.4.8. Възпроизводимост на обработката и публикувани данни

Разработеният програмен код, конфигурационните файлове и документацията се поддържат чрез система за контрол на версиите. Конкретната версия, използвана при изследването, е архивирана и публикувана самостоятелно, което осигурява еднозначна връзка между програмната реализация и описаната методика [62].

Публикуваната версия съдържа процедурите за предварителна подготовка на RINEX данните, автоматизираните обработки чрез pyOASIS и PyTECGg, както и програмите за последваща обработка, съгласуване и анализ на резултатите. За представителни контролни случаи е проверено, че публикуваните процедури възпроизвеждат резултатите от използваната при изследването обработка.

Освен програмния код е публикуван и специализиран набор от данни за възпроизводимост **KOH2 GNSS Ionospheric TEC Analysis and Reproducibility Dataset (2019–2026), Version 1.0.0** [63]. Той съдържа използваните при сравнителния и статистическия анализ данни и резултатни таблици, както и ограничена извадка от RINEX наблюдения за представителното денонощие 01.01.2025 г. Оригиналните сурови GNSS наблюдения се съхраняват във формат Trimble T02; включените в набора RINEX файлове са получени чрез преобразуване на тези сурови данни и са предоставени единствено за целите на научната проверка и възпроизводимостта (Фигура 4.2).



Фигура 4.2. Основни компоненти, контролни проверки и организация на публикувания набор за възпроизводимост в Zenodo.

Публикуваните софтуер [62] и набор от данни [63] са взаимно свързани в Zenodo, което позволява програмната реализация, входните данни за представителните

проверки и основните производни резултати да бъдат проследени независимо от изложението в монографията.

5. МЕТОДИКА И РЕЗУЛТАТИ ОТ ВАЛИДАЦИЯТА И СРАВНИТЕЛНИЯ АНАЛИЗ

След определянето на TEC от наблюденията на станция KOH2 чрез двете обработки, описани в Глава 4, е необходимо да бъде оценена съгласуваността на получените резултати с външни йоносферни продукти и да бъдат създадени съпоставими времеви редове за последващия анализ. Поради различния произход, пространствено представяне и времева разделителна способност на използваните данни тази оценка не може да бъде извършена чрез непосредствено сравнение на първоначалните стойности. Необходимо е предварително пространствено и времево съгласуване и прилагане на еднакви статистически критерии.

В настоящата глава се използва многостепенен подход, който включва съпоставка с IGS Final GIM, външни GNSS TEC данни от Madrigal, климатологично сравнение с PyIRI и анализ на устойчивостта спрямо няколко глобални йоносферни продукта. Допълнително се формират общи времеви извадки, чрез които влиянието на различната наличност на отделните източници се ограничава преди изчисляването на статистическите показатели. В настоящата глава терминът „валидация“ се използва в ограничен смисъл на външна сравнителна оценка спрямо референтен продукт и не предполага нито абсолютна истинност на референтните стойности, нито пълна наблюдателна независимост на сравняваните източници.

5.1. Обща архитектура на валидацията[4] и сравнителния анализ

Методиката за оценка е изградена около резултатите, получени от GNSS наблюденията на KOH2. Основните локални решения са определените чрез **pyOASIS** и **PyTECGg** стойности на TEC. Тъй като двата метода използват наблюдения от един и същ GNSS приемник, тяхната взаимна съпоставка позволява да се оцени влиянието на различната програмна и алгоритмична реализация, но не представлява независима външна валидация. В Глава 4 двата подхода са описани като отделни обработки, а крайните им продукти са подготвени за последващо пространствено и времево сравнение.

За да се избегне смесването на различни по смисъл оценки, в настоящото изследване се разграничават няколко нива на сравнение (Фигура 5.1).

1. *Съпоставка между локалните GNSS решения*
   Резултатите от pyOASIS и PyTECGg се сравняват помежду си при съвпадащи наблюдателни периоди. Тази съпоставка показва доколко определеното TEC е устойчиво спрямо различията в алгоритмите за обработка на едни и същи първични GNSS наблюдения. Поради общия източник на измервания това сравнение се разглежда като вътрешна методична проверка, а не като независима валидация.
2. *Основна външна съпоставка с IGS Final GIM*
   Като основен външен глобален йоносферен продукт се използват окончателните глобални йоносферни карти на IGS – IGS Final GIM [56]. Те предоставят независимо генериран глобален модел на VTEC върху регулярна пространствено-времева мрежа.

Съпоставката се извършва по два начина. При първия GIM стойностите се определят за положението на отделните IPP на GNSS наблюденията и се сравняват с VTEC, определено от KOH2 в същите точки. При втория подход GIM се интерполира за географското положение на KOH2 и се сравнява със станционно представените TEC характеристики. Така се разграничават пространственото сравнение в IPP и локалното сравнение в местоположението на станцията.

[4] В настоящата глава терминът „валидация“ се използва в ограничен смисъл на външна сравнителна оценка спрямо референтен продукт и не предполага нито абсолютна истинност на референтните стойности, нито пълна наблюдателна независимост на сравняваните източници.

3. *Външна GNSS-базирана съпоставка с Madrigal*
   Допълнителна оценка се извършва чрез GNSS TEC продуктите от CEDAR Madrigal Database [78]. За разлика от GIM, тези данни позволяват използването на регионални GNSS-базирани оценки в пространствената околност на KOH2.

Madrigal представлява външна обработваща инфраструктура, но използваните продукти също са получени от GNSS наблюдения. Поради това тяхната независимост спрямо KOH2 не се приема предварително, а се проверява за конкретните анализирани случаи чрез установяване дали KOH2 е участвала сред входните станции на съответния Madrigal продукт.

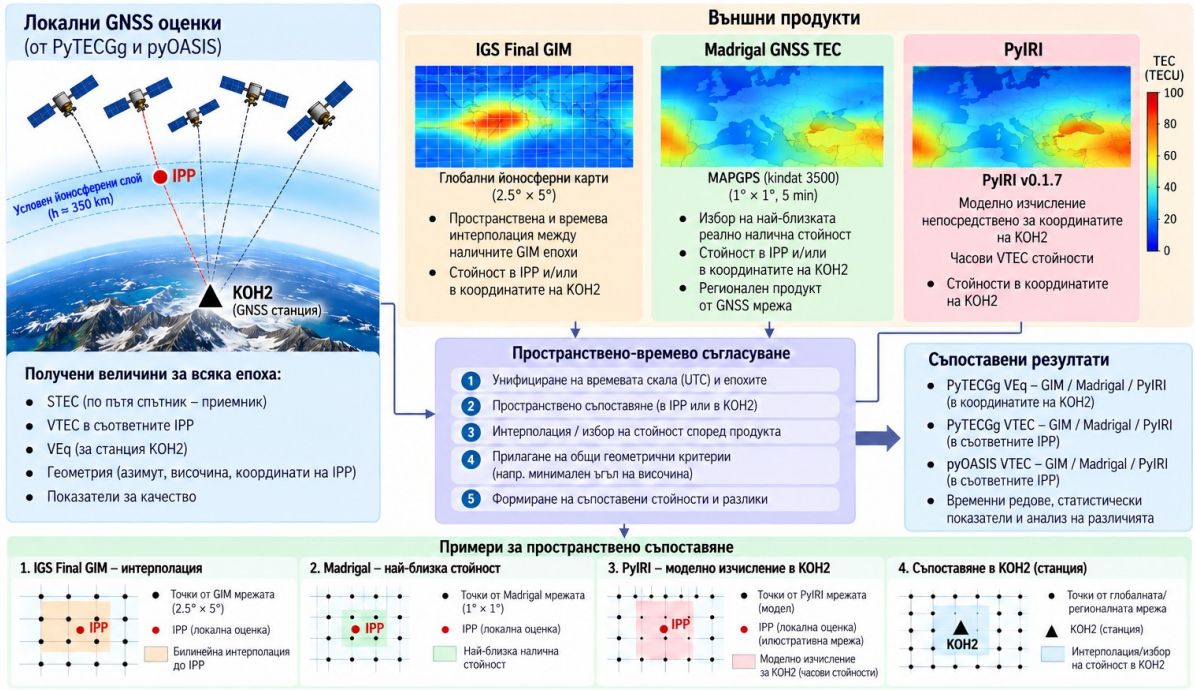
4. *Климатологична съпоставка с PyIRI*
   Моделните стойности, получени чрез PyIRI, се използват като допълнителна характеристика на очакваното състояние на йоносферата. Както е разгледано в §3.6.3, PyIRI е емпиричен климатологичен модел и не представлява наблюдателно независимо измерване на TEC.

Поради това сравнението с PyIRI не се интерпретира като валидация на GNSS резултатите. Неговата цел е да покаже до каква степен наблюдаваното над KOH2 поведение съответства на моделната климатология и кога се проявяват по-съществени отклонения от нея.

5. *Проверка на устойчивостта чрез няколко GIM продукта*
   За да се оцени доколко заключенията от сравнението с глобалните карти зависят от избора на конкретен GIM продукт, се използват решения на няколко асоциирани центъра за йоносферен анализ – CODE, ESA, JPL и UPC [56].

Тези продукти не се разглеждат като четири напълно независими валидации, тъй като използват сходен клас GNSS наблюдения и глобални методи за моделиране на йоносферата. Тяхното съвместно използване представлява анализ на устойчивостта спрямо избора на GIM продукт. За да бъде сравнението между центровете коректно, се използват само периодите, за които съответните продукти са едновременно налични.

6. *Обща пространствено-времева основа и статистическа оценка*
   Последният елемент на методиката е привеждането на различните източници към съпоставима пространствена и времева основа. За тази цел се използват пространствена и времева интерполация, подбор на най-близки по време наблюдения и формиране на общи часови и дневни извадки в зависимост от конкретното сравнение.



Фигура 5.1. Пространствено и времево съгласуване на локалните TEC оценки от KOH2 с IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

Особено значение има хармонизацията по общи часове, при която статистическите характеристики се определят само за времеви моменти, представени едновременно в сравняваните източници. По този начин се ограничава възможността различната времева наличност да се прояви като привидна разлика между продуктите. След съгласуването се изчисляват систематичното отместване, RMSE и корелационните показатели, използвани в съответните сравнителни анализи, разгледани в §5.8.

Архитектурата на сравнителния анализ може да бъде обобщена като:

KOH2 GNSS наблюдения → pyOASIS / PyTECGg → пространствено-времево съгласуване → IGS Final GIM / Madrigal / PyIRI / Multi-GIM → общи сравнителни извадки → статистическа оценка.

Тази схема позволява отделните сравнения да бъдат интерпретирани според действителния характер на използвания външен източник. IGS Final GIM осигурява основната външна глобална съпоставка; Madrigal предоставя допълнително външно GNSS-базирано сравнение при проверена степен на независимост; PyIRI служи като климатологичен фон; а CODE, ESA, JPL и UPC се използват за оценка на устойчивостта спрямо избора на глобален йоносферен продукт.

5.2. Пространствено-времево съгласуване

Използваните в настоящото изследване TEC решения се различават по пространствено представяне и времева разделителна способност. Резултатите от GNSS наблюденията на KOH2 могат да бъдат отнесени към отделните IPP или към местоположението на станцията, глобалните йоносферни карти са представени върху регулярна пространствено-времева мрежа, Madrigal предоставя дискретни пространствени и времеви оценки, а PyIRI е изчислен за KOH2 на точни часови епохи. Поради това непосредственото сравнение на наличните стойности без предварително

съгласуване би въвело различия, свързани не само с отделните методи, но и с различното място и време, към които се отнасят данните.

Целта на пространствено-времевото съгласуване е за всяко конкретно сравнение да бъдат формирани двойки или групи от стойности, отнасящи се до една и съща или достатъчно близка пространствена позиция и времева епоха. Използваният подход зависи от структурата на съответния външен продукт.

1. *Унифициране на времевото представяне*
   Всички времеви означения се преобразуват към UTC и се представят в единен машинно интерпретируем формат. Това позволява непосредствено сравнение на епохите независимо от начина, по който времето е записано в първичните файлове.

При формирането на сравнителните набори не се предполага, че различните продукти имат еднаква времева разделителна способност. За всеки от тях се използва конкретна процедура – интерполация, избор на най-близката допустима епоха или ограничаване до общи часови моменти.

2. *Определяне на пространствената референция на сравнението*
   Пространственото съгласуване се извършва по два основни начина в зависимост от вида на GNSS резултата. При анализ на отделните спътникови наблюдения сравнението се извършва в положението на съответната IPP. При анализ на станционни времеви характеристики външният продукт се отнася към географското положение на KOH2.

Това разграничение е необходимо, тъй като VTEC в дадена IPP и TEC характеристика, отнесена към местоположението на станцията, не представляват една и съща пространствена величина. Следователно двете форми на сравнение се анализират отделно.

3. *Съгласуване с глобалните йоносферни карти*
   При сравнението с IGS Final GIM стойността на глобалната карта се определя непосредствено за координатите и епохата на сравняваното GNSS наблюдение. За тази цел в използваната процедура се прилага билинейна пространствена интерполация между съседните възли на IONEX мрежата и линейна интерполация във времето между съседните карти.

Този подход позволява GIM да бъде оценен както в конкретните IPP на PyTECGg и pyOASIS, така и в местоположението на KOH2. Така сравнението не се извършва с най-близкия възел на глобалната мрежа, а със стойност, приведена към конкретната пространствено-времева позиция на наблюдението. Използваната процедура за IGS прилага същия подход за целия анализиран период.

4. *Съгласуване с Madrigal*
   За данните от Madrigal е използван различен подход. Вместо пространствено-времева интерполация се избира най-близката налична времева епоха, ако разликата спрямо момента на сравнение не превишава 180 s. В избраната карта се определя най-близката налична пространствена клетка, която се приема само ако се намира на разстояние не повече от 80 km от целевото положение.

По този начин стойности на Madrigal, които са прекалено отдалечени във времето или пространството, не участват в сравнението. Конкретните особености на този подбор са разгледани подробно в §5.4.

5. *Съгласуване на станционните времеви редове по общи часове*
   За съвместния анализ на PyTECGg, IGS Final GIM, Madrigal и PyIRI е изградена отделна хармонизирана времева извадка. Като основа се използват точните часови епохи на PyIRI. Към всяка от тях се съпоставя най-близката PyTECGg VEq

стойност при максимално времево отклонение 60 s. IGS Final GIM се интерполира непосредствено за съответната часова епоха и координатите на KOH2, а за Madrigal се запазват критериите до 180 s и 80 km.

Така четирите серии могат да бъдат поставени върху една и съща часова времева основа. За строгите междупродуктови сравнения впоследствие се използват само часовете, за които едновременно са налични всички разглеждани TEC стойности.

6. *Работа с липсващи наблюдения*
   Липсващите наблюдателни периоди не се запълват чрез интерполация между различни дни или чрез създаване на синтетични TEC стойности. Когато за дадена епоха не е изпълнен времевият или пространственият критерий на съответния продукт, стойността се приема за липсваща и не участва в конкретното сравнение.

Този принцип е особено важен за многогодишния набор на KOH2, при който наблюдателното покритие е неравномерно. Както е показано в §3.4.3, от наличните дневни RINEX наблюдения след подготовката и проверките са включени 326 денонощия с налични данни, разпределени неравномерно между отделните години.

7. *Разграничаване на съгласуването от последващото осредняване*
   Пространствено-времевото съгласуване определя кои стойности могат коректно да бъдат сравнявани помежду си. То предхожда последващото дневно, месечно или годишно обобщаване. Това разграничение е важно, тъй като първоначалното осредняване на всеки продукт върху различен набор от епохи би могло да създаде разлики, обусловени от различното времево покритие, а не от действителните различия между TEC решенията.

Поради тази причина при дългопериодичните сравнения първо се формира общата времева извадка, след което се изчисляват дневните характеристики, а от тях – месечните стойности. При използваната строга общочасова извадка всяко денонощие с налични данни получава еднакво тегло при последващото месечно осредняване.

В обобщение, в настоящото изследване не се използва един универсален механизъм за всички външни данни. GIM се интерполира към конкретното място и време; Madrigal се съгласува чрез допустима пространствено-времева близост; а многопродуктовият анализ използва общи часови епохи. По този начин се ограничава приносът на различната пространствена и времева дискретизация към остатъците между сравняваните TEC решения.

5.3. Съпоставка с IGS Final GIM

Окончателният комбиниран глобален йоносферен продукт на IGS – IGS Final GIM – е използван като основен външен продукт за оценка на определените от GNSS наблюденията на KOH2 стойности на VTEC. Характеристиките и произходът на GIM продуктите са разгледани в §3.6.1. Тъй като GIM представя VTEC върху дискретна пространствено-времева мрежа, за непосредствена съпоставка с резултатите от KOH2 е необходимо стойностите на картата да бъдат определени за координатите и момента на всяко конкретно наблюдение.

В разработената процедура се извършват три основни типа сравнение: PyTECGg VTEC спрямо IGS в съответните IPP, pyOASIS VTEC спрямо IGS в съответните IPP и PyTECGg VEq спрямо IGS в местоположението на KOH2. И при трите случая се използва един и същ алгоритъм за пространствено-времево интерполиране на IONEX данните.

За сравненията с отделните спътникови наблюдения се запазва използваното в обработките ограничение за височина на спътника **E ≥ 30°**. По този начин в оценката не се въвеждат допълнително наблюдения с неблагоприятна геометрия, които вече са изключени при формирането на крайните TEC продукти.

5.3.1. Пространствена и времева интерполация на GIM

Стойностите в IONEX файловете са зададени за определени географски ширини и дължини и за дискретни времеви епохи. Координатите на IPP на GNSS наблюденията и местоположението на KOH2 в общия случай не съвпадат точно с възлите на тази мрежа, а моментите на GNSS наблюденията не съвпадат непременно с епохите на отделните GIM карти. Поради това за всяка сравнявана стойност VTEC от IGS се определя чрез последователна билинейна пространствена интерполация и линейна интерполация във времето. Именно този алгоритъм е реализиран в използваната процедура validate_tec_igs_2019_2026.py

1. *Избор на съседните GIM епохи*
   За момента t на съответното GNSS наблюдение се определят двете последователни GIM карти с епохи t_0 и t_1, между които се намира наблюдението. Интерполация се извършва само когато моментът попада във времевия обхват на наличните карти; стойности извън този обхват не се екстраполират.

2. *Билинейна пространствена интерполация*
   За всяка от двете GIM епохи се определят четирите възела на географската мрежа, които обграждат търсената позиция (φ, λ). Стойността на VTEC се получава като претеглена комбинация на стойностите в тези възли според относителното положение на точката между съседните ширини и дължини.

   В общ вид билинейната интерполация може да бъде представена като:

(71) $$V(\varphi,\lambda)=(1-u)(1-v)V_{00}+u(1-v)V_{10}+(1-u)vV_{01}+uvV_{11},$$

където u и v са нормализираните относителни положения на търсената точка между съседните възли по дължина и ширина, а $V_{00}, V_{10}, V_{01}, V_{11}$ са съответните GIM стойности.

Използваната програмна реализация нормализира географската дължина спрямо диапазона на IONEX мрежата и проверява дали търсената позиция попада в пространствения ѝ обхват.

3. *Получаване на две пространствено интерполирани стойности*
   Пространствената интерполация се извършва отделно в картите за t_0 и t_1. Така за едно и също географско положение се получават две стойности – V_0 и V_1, характеризиращи GIM преди и след момента на GNSS наблюдението.

4. *Линейна интерполация във времето*
   След това VTEC за действителния момент t се определя чрез линейна интерполация между двете пространствено интерполирани стойности:

(72) $$V(t)=V_0+\frac{t-t_0}{t_1-t_0}(V_1-V_0)$$

По този начин IGS стойността се отнася едновременно към същата географска позиция и същия времеви момент, към които се отнася сравняваният резултат от KOH2. Реалната програмна процедура изпълнява първо билинейната интерполация в двете ограждащи карти, а след това линейното им времево комбиниране.

5. *Работа с липсващи стойности*

   При наличие на невалидни стойности в отделни възли програмната реализация използва само наличните валидни стойности с пренормализиране на теглата. Ако за съответната позиция не може да бъде получена валидна пространствена

оценка, крайният резултат се приема за липсващ и не участва в статистическото сравнение.

Получената чрез тази процедура величина представлява интерполирано IGS Final GIM VTEC за конкретната позиция и епоха. Един и същ алгоритъм се използва независимо дали пространствената позиция е IPP на отделно GNSS наблюдение или координатите на станция KOH2. Това осигурява обща референтна основа за двата типа сравнение, разгледани в §5.3.2 и §5.3.3.

5.3.2. Съпоставка в йоносферните прободни точки

Първият тип съпоставка с IGS Final GIM се извършва непосредствено в пространственото положение на йоносферните прободни точки (IPP), определени от локалните GNSS обработки. Целта е VTEC, получено от наблюденията на KOH2 към конкретен спътник и епоха, да бъде сравнено с глобалния йоносферен продукт за възможно най-близка пространствено-времева референция. В използваната процедура такова сравнение се извършва както за PyTECGg VTEC, така и за pyOASIS VTEC.

Този подход е методично по-коректен от сравнение на всички спътникови VTEC стойности с GIM, определено само в координатите на станцията, тъй като отделните GNSS наблюдения се отнасят към различни положения върху условния йоносферен слой.

1. *Избор на валидните GNSS наблюдения*
   В сравнението се включват само наблюденията, преминали контрола на качеството в съответната обработка и удовлетворяващи приетото ограничение за височина на спътника $E \geq 30^{\circ}$. Същият праг е използван в процедурата за валидация спрямо IGS Final GIM.

Използването на този критерий ограничава влиянието на наблюденията при ниски височини, за които нарастват чувствителността към многопътност, пространствените градиенти на йоносферата и грешките, свързани с приближението на тънкия йоносферен слой.

2. *Използване на действителната IPP на всяко наблюдение*
   За всяка валидна епоха се използват географските координати на IPP, определени от съответната обработка. Следователно при PyTECGg GIM се оценява в PyTECGg IPP, а при pyOASIS – в pyOASIS IPP.

Това разграничение е важно, тъй като двете обработки могат да реализират по различен начин отделни елементи на геометричната обработка. Затова за всяко локално TEC решение се използва пространствената позиция, действително принадлежаща към неговия собствен резултат, а не обща предварително зададена точка.

3. *Определяне на IGS VTEC за съответната IPP*
   За координатите на всяка IPP и момента на GNSS наблюдението се определя стойност на IGS Final GIM чрез процедурата, описана в §5.3.1 – билинейна интерполация по географска ширина и дължина и линейна интерполация във времето между съседните GIM карти.

Така за всяко локално наблюдение се формира съпоставима двойка:

(73) $$VTEC_{GNSS}\left(\varphi_{IPP}, \lambda_{IPP}, t\right) \leftrightarrow VTEC_{IGS}\left(\varphi_{IPP}, \lambda_{IPP}, t\right)$$

4. *Определяне на остатъците*
   За всяка съпоставена двойка се определя остатъкът между локалното GNSS решение и интерполираната стойност на IGS.

(74) $$\Delta VTEC = VTEC_{GNSS} - VTEC_{IGS}$$

Положителен остатък следователно означава, че локално определеното VTEC е по-високо от съответната IGS стойност, а отрицателен – че е по-ниско. Тази конвенция е еднаква за PyTECGg и pyOASIS и се запазва при последващите статистически оценки.

5. *Отделно оценяване на PyTECGg и pyOASIS*
   За всяка от двете обработки се формира собствен набор от съпоставени наблюдения:

   PyTECGg VTEC → PyTECGg IPP → интерполиран IGS VTEC → остатък
   и
   pyOASIS VTEC → pyOASIS IPP → интерполиран IGS VTEC → остатък

Двата набора се анализират отделно, тъй като броят на валидните наблюдения, времевото им разпределение и конкретните IPP могат да се различават между обработките. Това предотвратява погрешното интерпретиране на различен брой наблюдения като непосредствена разлика в точността на двата метода.

В публикуваната процедура този тип сравнение е реализиран за целия многогодишен набор. Съответствието между публикуваната програмна реализация и процедурата, използвана при изследването, е проверено върху представителната дата **01.01.2025 г.**, като получените крайни дневни сравнителни резултати съвпадат числено. Проверката потвърждава възпроизводимостта на процедурата за избрания контролен случай, без да предполага идентична проверка на резултатите за всеки отделен ден от периода 2019–2026 г.

След формирането на всички съпоставени двойки върху тях се изчисляват статистическите показатели, описани в §5.8. По този начин съпоставката в IPP оценява съгласуваността между локално определеното VTEC и IGS Final GIM в същата пространствена позиция и за същия момент, като минимизира влиянието на пространственото несъответствие между GNSS наблюдението и глобалната карта.

5.3.3. Съпоставка в местоположението на KOH2

Вторият тип съпоставка с IGS Final GIM се извършва непосредствено в географското положение на станция KOH2. За тази цел се използва VEq, определено чрез PyTECGg, тъй като тази величина представлява единна времева характеристика на вертикалното електронно съдържание, отнесена към местоположението на станцията, а не към отделните йоносферни прободни точки. Това разграничение вече е въведено в §4.3.6 и е заложено и в използваната процедура за съпоставка с IGS.

1. *Използване на PyTECGg VEq*
   За всяка налична епоха се използва стойността на VEq от PyTECGg. За разлика от VTEC на отделните спътникови наблюдения, VEq не се свързва с постоянно изменящо се положение на IPP, а представлява оценка, отнесена към зенита над KOH2. Поради това тази величина е подходяща за изграждане на станционен времеви ред и за непосредствено сравнение с външен продукт, интерполиран в същото географско положение.

Този тип сравнение се използва и като основа за последващото общочасово съгласуване с IGS Final GIM, Madrigal и PyIRI.

2. *Интерполиране на IGS Final GIM в координатите на KOH2*
   За времевия момент на всяка VEq стойност се определя IGS Final GIM VTEC в географските координати на KOH2. Използва се същата процедура, описана в §5.3.1 – билинейна пространствена интерполация между съседните възли на IONEX мрежата и линейна интерполация между съседните времеви карти.

За разлика от сравнението в §5.3.2, тук пространствените координати остават постоянни за целия времеви ред. Променя се единствено времето, за което се определя интерполираната GIM стойност.

По този начин за всяка валидна епоха се формира двойка:

(75) $$VE\,q_{PyTECGg}(t) \leftrightarrow VTE\,C_{IGS}(\varphi_{KOH2}, \lambda_{KOH2}, t)$$

3. *Формиране на съпоставени наблюдения*
   В сравнителния набор се включват само епохите, за които едновременно са налични валидна PyTECGg VEq стойност и интерполирана IGS Final GIM стойност. Не се създават синтетични VEq стойности и не се запълват липсващи периоди чрез интерполация между отделни GNSS наблюдения.

Така всяка двойка характеризира състоянието на вертикалното електронно съдържание за едно и също място и един и същ момент, но определено чрез два различни подхода.

4. *Определяне на остатъците*
   За съпоставените стойности се използва същата знакова конвенция като при сравнението в IPP:

   PyTECGg – IGS

Следователно положителният остатък означава по-висока стойност на PyTECGg VEq спрямо IGS Final GIM, а отрицателният – по-ниска.

5. *Методично значение на сравнението*
   Съпоставката на VEq с IGS в KOH2 има различна роля от сравнението в IPP. При IPP се проверява съгласуваността на голям брой отделни спътникови VTEC оценки в различни пространствени позиции. При VEq сравнението се извършва за единна пространствена позиция и поради това е по-подходящо за анализ на времевото развитие на TEC над станцията.

Това има особено значение при последващия многогодишен анализ, тъй като позволява да бъде изграден единен времеви ред, който може да се съпоставя не само с IGS Final GIM, но и с Madrigal, PyIRI и показателите за слънчева и геомагнитна активност. Именно PyTECGg VEq е използвано като станционната TEC характеристика в общочасовия набор за периода 2019–2026 г.

6. *Проверка на възпроизводимостта на процедурата*
   Публикуваната процедура за IGS сравнение е проверена върху представителната дата 01.01.2025 г. За сравнението PyTECGg VEq – IGS в KOH2 са формирани 2881 съпоставени стойности. Получените крайни файлове са идентични по съдържание с тези от първоначалната обработка.

Тази проверка потвърждава възпроизводимостта на алгоритъма за представителния тестов ден, но не обхваща проверка за пълна идентичност на резултатите за всички денонощия с налични данни през периода 2019–2026 г.

Съпоставката в местоположението на KOH2 по този начин допълва сравнението в IPP. IPP подходът запазва пространствената информация на отделните GNSS наблюдения, докато VEq подходът осигурява единна станционна времева характеристика. Двата вида сравнение ще бъдат разглеждани отделно и при представянето на резултатите.

5.3.4. Резултати от съпоставката с IGS Final GIM

Съпоставката с IGS Final GIM е извършена за наличните денонощия с налични данни от периода 2019–2026 г. За всички включени дни са използвани окончателните

IGS йоносферни продукти, без смесване на предварителни (*rapid*) и окончателни (*final*) глобални VTEC карти. При сравненията в йоносферните прободни точки са включени само наблюдения при ъгъл на височина на спътника $E \geq 30^{\circ}$. Остатъците са определени като разлика метод – IGS, поради което положителната стойност означава по-висока оценка на TEC от съответния локален метод, а отрицателната – по-ниска спрямо IGS Final GIM.

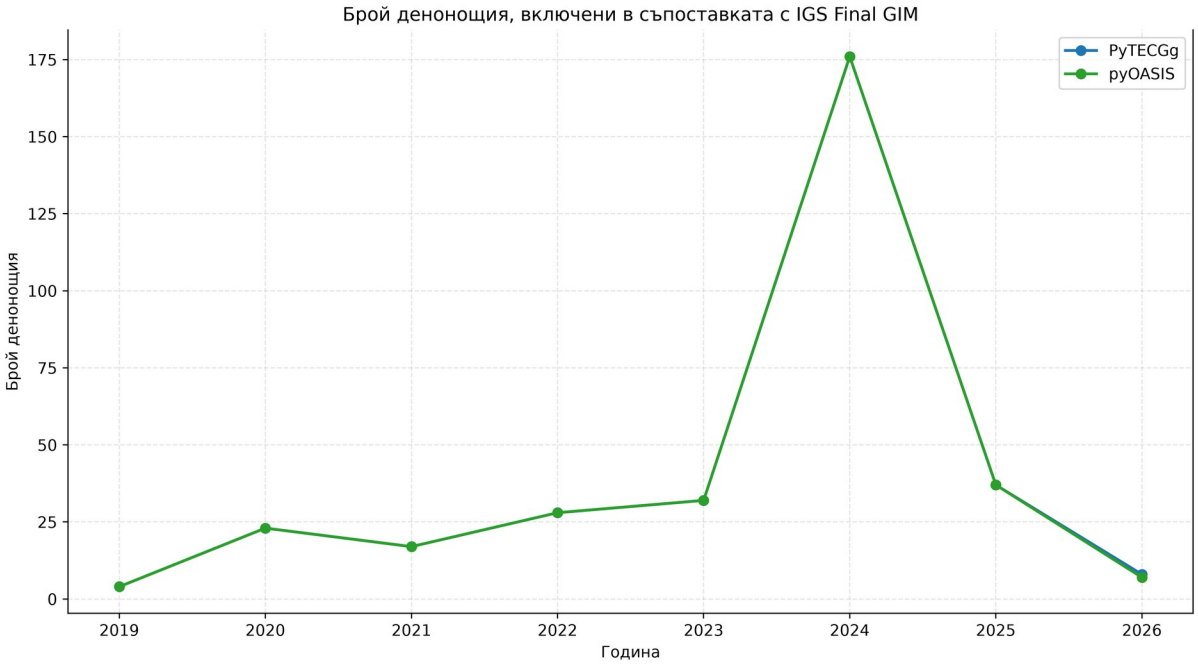
Съпоставката обхваща три типа резултати: PyTECGg VEq в местоположението на KOH2, PyTECGg VTEC в съответните IPP и pyOASIS VTEC в IPP. Броят на наличните дни е силно неравномерен между отделните години, като най-пълно е покритието през 2024 г. Това обстоятелство е отчетено както при интерпретацията на годишните резултати, така и чрез допълнително обобщение с еднаква статистическа тежест на отделните денонощия с налични данни.

1. *Наличност на данните по години*

Неравномерното времево покритие е особено важно при интерпретацията на обобщените показатели в Таблица 5.1 (Фигура 5.2). Данните от 2024 г. например представляват значително по-голям дял от общата многогодишна извадка в сравнение с 2019 или 2026 г. Поради това годишните характеристики се разглеждат поотделно, а при последващото многогодишно обобщение се използва и подход, при който всяко денонощие с измервания получава еднаква тежест.

Таблица 5.1. Брой денонощия, включени в съпоставката с IGS Final GIM

Година	PyTECGg, дни	pyOASIS, дни
2019	4	4
2020	23	23
2021	17	17
2022	28	28
2023	32	32
2024	176	176
2025	37	37
2026	8	7
Общо	**325**	**324**



Фигура 5.2. Брой денонощия, включени в съпоставката с IGS Final GIM.

2. Годишно развитие на систематичното отместване

Таблица 5.2. Средно годишно систематично отместване спрямо IGS Final GIM

Година	PyTECGg VEq – IGS, TECU	PyTECGg VTEC – IGS, TECU	pyOASIS VTEC – IGS, TECU
2019	+0.73	+1.27	+3.01
2020	+0.83	+1.35	+2.85
2021	+0.08	+0.33	+0.74
2022	−1.23	−0.97	+1.06
2023	−3.67	−3.40	−0.60
2024	−3.81	−3.54	−1.48
2025	−2.99	−2.83	−0.52
2026	−3.61	−3.27	−0.002

Резултатите в колоните са определени по формулата:

(76) $$\Delta_{VTEC} = VTEC_{метод} - VTEC_{IGS}$$

и съответно

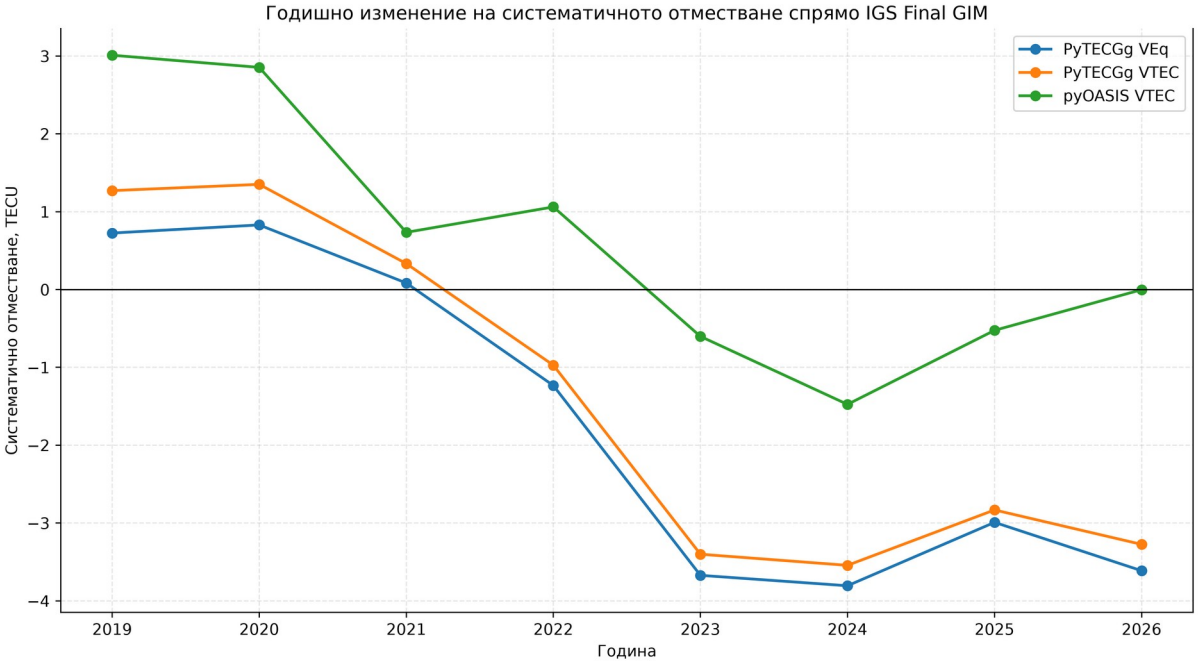
(77) $$\overline{\Delta} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \Delta_{VTEC_i}$$

Систематичното отместване ($\overline{\Delta}$) представлява средната стойност на всички разлики Δ_i. Резултатите в Таблица 5.2 (Фигура 5.3) показват ясно изменение на систематичното отместване между отделните години. Така например стойност **−3.81 TECU** означава, че за съответната година методът дава средно с 3.81 TECU по-ниски стойности от IGS. При двете представяния на PyTECGg то е положително през 2019–2021 г., променя знака си през 2022 г. и остава отрицателно през 2023–2026 г. Най-голямо отрицателно средно отместване се наблюдава през 2024 г. – **−3.81 TECU** за VEq и **−3.54 TECU** за VTEC в IPP (Фигура 5.3).

Близкият годишен ход на PyTECGg VEq и PyTECGg VTEC показва, че установеното изменение не се дължи единствено на начина, по който TEC е представено за местоположението на KOH2 чрез VEq. Разликата между двата типа оценки е сравнително малка спрямо общото изменение на отместването между отделните години.

При pyOASIS поведението е различно. В началото на периода се наблюдава отчетливо положително отместване спрямо IGS, достигащо около **3 TECU**, което постепенно намалява. От 2023 г. стойностите стават слабо отрицателни, като абсолютното средно отместване остава по-малко от това при PyTECGg през 2023–2026 г. Особено показателен е резултатът за наличните дни от 2026 г., при които средното отместване на pyOASIS е практически нулево.

Наблюдаваното изменение показва, че разликите между локалните TEC решения и IGS не могат да бъдат представени чрез едно постоянно коригиращо отместване за целия изследван период. Поради това в настоящото изследване не се прилага емпирична постоянна корекция към някой от локалните TEC продукти.



Фигура 5.3. Годишно изменение на систематичното отместване на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо IGS Final GIM за периода 2019–2026 г.

3. Средноквадратична грешка

Поради това като втори основен показател е използвана средноквадратичната грешка (RMSE)[5], която характеризира общата големина на разликите между резултатите от съответния метод и IGS Final GIM.

(78) $$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta VTEC_i\right)^2}$$

Таблица 5.3. Годишни стойности на RMSE спрямо IGS Final GIM

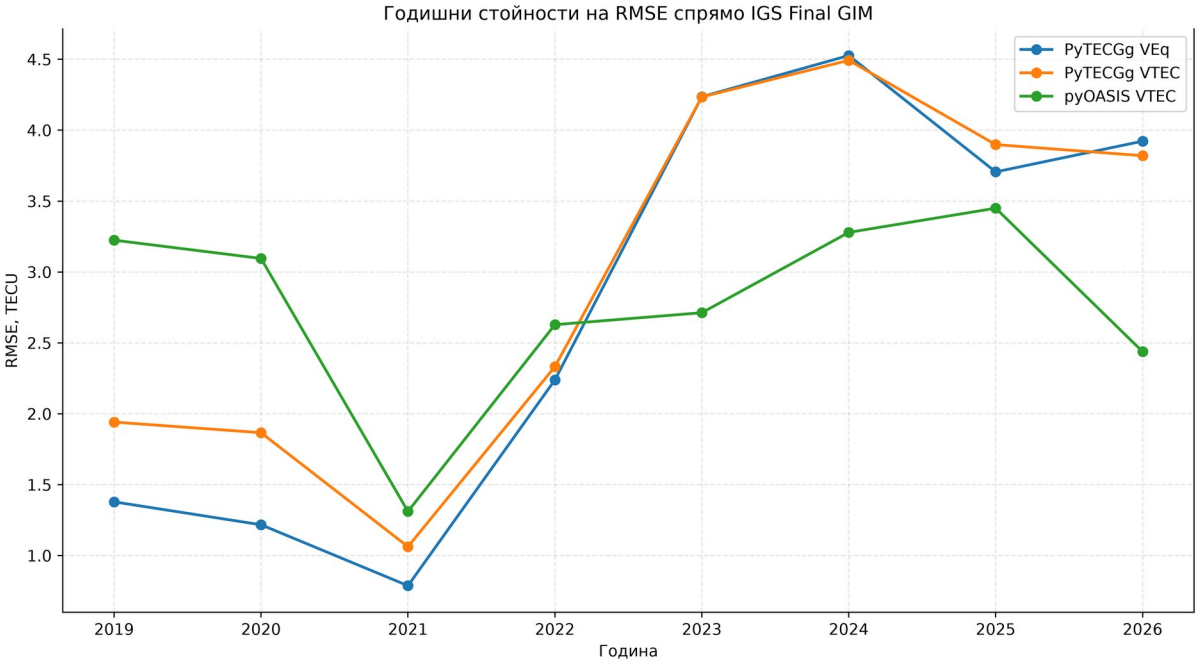
Година	PyTECGg VEq – IGS, TECU	PyTECGg VTEC – IGS, TECU	pyOASIS VTEC – IGS, TECU
2019	1.38	1.94	3.22
2020	1.22	1.87	3.10
2021	0.79	1.06	1.31
2022	2.24	2.33	2.63
2023	4.24	4.23	2.71
2024	4.53	4.49	3.28
2025	3.71	3.90	3.45
2026	3.92	3.82	2.44

Най-малки средноквадратични разлики и при трите сравнения са получени през 2021 г. – **0.79 TECU** за PyTECGg VEq, **1.06 TECU** за PyTECGg VTEC и **1.31 TECU** за

[5] В традиционната геодезическа литература средноквадратичната грешка често се означава с m. В настоящата работа се използва международното означение RMSE (Root Mean Square Error), като двете означения се приемат за еквивалентни в рамките на използваната дефиниция. При сравнение на две величини, нито една от които не представлява безусловно истинска стойност, терминологично може да се използва и „средноквадратично отклонение“ (RMSD, Root Mean Square Deviation). В настоящия анализ IGS Final GIM се приема за референтен продукт за целите на валидацията, поради което е запазено означението RMSE. Това не означава, че IGS Final GIM се разглежда като абсолютно точна оценка на VTEC.

pyOASIS VTEC. След 2021 г. RMSE нараства, като при PyTECGg достига максимални годишни стойности през 2024 г. – съответно **4.53 TECU** и **4.49 TECU**.

При pyOASIS увеличението през по-късните години е по-слабо изразено, като RMSE остава между приблизително 2.4 и 3.5 TECU през 2022–2026 г. Това показва, че по-малкото средно отместване на pyOASIS през част от периода е съпроводено и с по-нисък RMSE спрямо PyTECGg през 2023–2024 г., но не премахва значителното разсейване на отделните остатъци.



Фигура 5.4. Годишни стойности на систематичното отместване и средноквадратичната грешка при съпоставката на PyTECGg и pyOASIS с IGS Final GIM за периода 2019–2026 г.

За нагледност са поместени и резултати от обработката по отделни месеци.

Таблица 5.4. Месечно изменение на RMSE на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо IGS Final GIM за периода 2019–2026 г.

Година	Месец	PyTECGg VEq – IGS, TECU	PyTECGg VTEC – IGS, TECU	pyOASIS VTEC – IGS, TECU
2019	12	1.379	1.942	3.224
2020	1	1.218	1.867	3.096
2021	3	0.673	0.912	1.182
2021	4	1.010	1.363	1.454
2021	12	–	–	4.831
2022	1	1.759	1.946	2.186
2022	2	2.292	2.376	2.679
2023	2	4.082	4.103	2.712
2023	3	5.258	5.121	2.721
2024	2	5.269	4.915	2.690
2024	3	5.115	4.941	3.083
2024	4	5.765	5.534	3.493
2024	5	4.136	4.098	3.340
2024	8	4.526	4.588	3.145
2024	10	4.359	4.798	3.280
2024	11	3.905	4.041	3.250
2024	12	3.001	3.209	3.382

2025	1	3.735	3.935	3.595
2025	2	3.550	3.699	2.539
2026	2	3.923	3.820	2.438

Забележка: *тирето означава липса на съответен PyTECGg резултат. Стойността за pyOASIS през декември 2021 г. се основава само на* ***едно денонощие*** *и следва да се интерпретира предпазливо.*

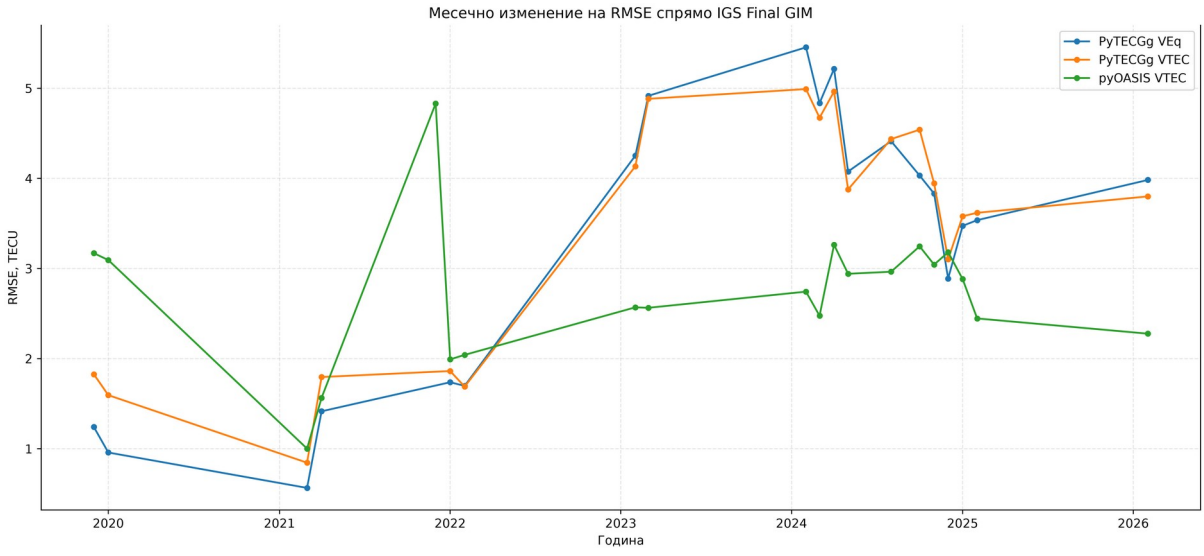
За изчислението на месечната средноквадратична грешка са използвани резултатите от отделните денонощни обработки, като за всеки месец:

$$RMS\,E_{month} = \sqrt{\frac{\sum_i n_i\, RMS\,E_i^2}{\sum_i n_i}} \tag{79}$$

където n_i е броят на съпоставените стойности през съответното денонощие. Така всеки отделен остатък фактически има еднаква тежест.

Месечните стойности потвърждават установеното при годишното обобщение изменение на съгласуваността спрямо IGS Final GIM. Най-ниски стойности на RMSE за PyTECGg се наблюдават през март 2021 г., когато те са 0.67 TECU за VEq и 0.91 TECU за VTEC в IPP. Значително увеличение се установява през 2023–2024 г., като най-високите месечни стойности за PyTECGg са през април 2024 г. – 5.77 TECU за VEq и 5.53 TECU за VTEC.

При pyOASIS измененията са по-слабо изразени през 2023–2026 г. и за повечето налични месеци RMSE остава приблизително между 2.4 и 3.6 TECU. Това потвърждава наблюдението от годишните резултати, че през част от периода pyOASIS показва по-малки средноквадратични грешки спрямо IGS в сравнение с PyTECGg. Същевременно месечните стойности трябва да се разглеждат заедно с броя на денонощията с налични данни, тъй като той е силно различен между отделните месеци.



Фигура 5.5. Месечно изменение на RMSE на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо IGS Final GIM за периода 2019–2026 г.

4. Корелация с IGS Final GIM

Освен големината на разликите между локалните TEC решения и IGS Final GIM е оценена и степента, в която те възпроизвеждат сходна времева изменчивост. За тази

цел е използван коефициентът на линейна корелация на Пирсън r, определен по формулата:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(VTEC_{method,i} - \overline{VTEC}_{method}\right)\left(VTEC_{IGS,i} - \overline{VTEC}_{IGS}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(VTEC_{method,i} - \overline{VTEC}_{method}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(VTEC_{IGS,i} - \overline{VTEC}_{IGS}\right)^2}}, \quad (80)$$

Където $\overline{VTEC}_{method,i}$ и $\overline{VTEC}_{IGS,i}$ са съпоставените стойности за i-тото наблюдение, $VTEC_{method}$ и $VTEC_{IGS}$ са техните средни стойности, а n е броят на съпоставените наблюдения.

Коефициентът r приема стойности в интервала от −1 до +1. Стойности, близки до +1, показват силна положителна линейна зависимост, докато стойности, близки до 0, показват слаба линейна зависимост. В настоящия анализ коефициентът се използва като характеристика на **сходството във времевото изменение** на сравняваните TEC решения, а не като показател за равенство на абсолютните им стойности.

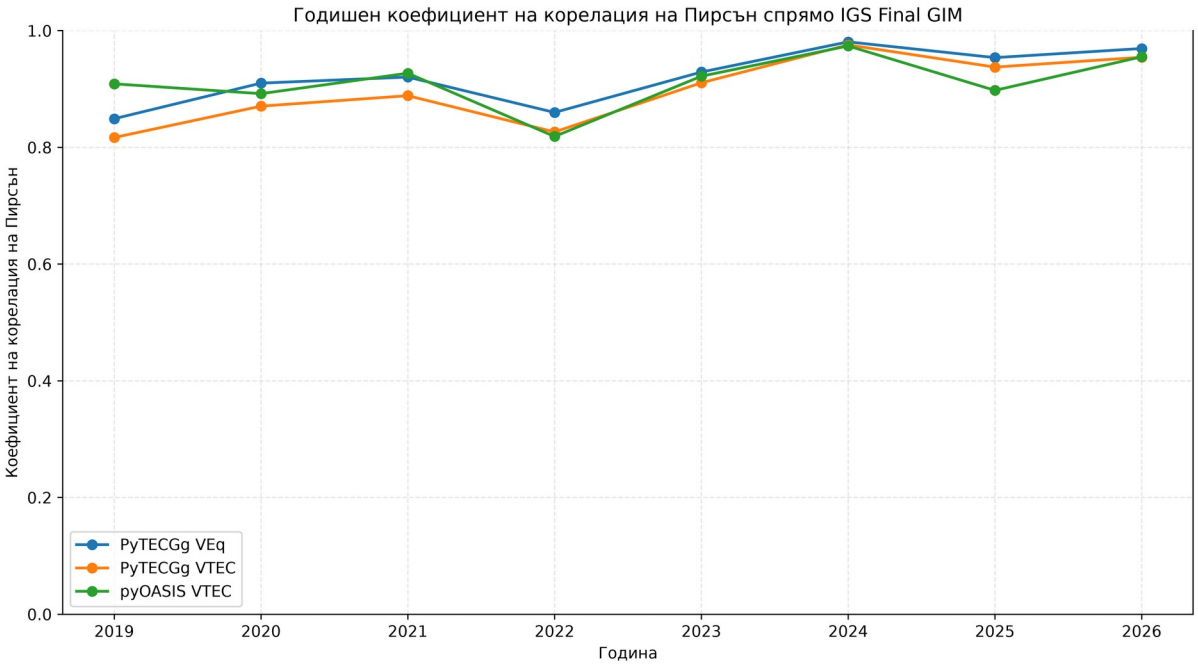
Таблица 5.5. Годишен коефициент на корелация на Пирсън спрямо IGS Final GIM

Година	PyTECGg VEq – IGS	PyTECGg VTEC – IGS	pyOASIS VTEC – IGS
2019	0.849	0.817	0.909
2020	0.910	0.871	0.892
2021	0.921	0.889	0.927
2022	0.860	0.827	0.819
2023	0.929	0.911	0.922
2024	0.981	0.976	0.974
2025	0.954	0.938	0.898
2026	0.969	0.955	0.955

При всички сравнения се наблюдава (Таблица 5.5, Фигура 2.1) висока положителна корелация с IGS Final GIM. За PyTECGg VEq коефициентът на Пирсън варира между **0.849 и 0.981**, за PyTECGg VTEC – между **0.817 и 0.976**, а за pyOASIS VTEC – между **0.819 и 0.974**.

Особено висока степен на съгласуване се установява през 2024 г., когато r достига съответно **0.981**, **0.976** и **0.974** за трите сравнения. Това показва, че локалните GNSS решения възпроизвеждат в значителна степен времевата изменчивост, представена от IGS Final GIM, включително през години, в които между продуктите се наблюдава съществено систематично отместване.

Това разграничение е важно, тъй като **високата корелация характеризира сходството в изменението на стойностите, но не означава непременно добро съвпадение на абсолютните им стойности**. Следователно високият коефициент на корелация през 2023–2025 г. не противоречи на едновременно наблюдаваното отрицателно систематично отместване и по-високите стойности на RMSE.



Фигура 5.6. Годишен коефициент на корелация на Пирсън между локалните TEC решения и IGS Final GIM за периода 2019–2026 г.

5. Проверка на влиянието на неравномерната наличност на данните

Броят на съпоставените наблюдения се различава както между отделните денонощия, така и между годините. При директното обединяване на всички съпоставени стойности денонощията с по-голям брой валидни спътникови наблюдения имат по-голямо влияние върху крайния годишен статистически показател.

Поради това е извършено допълнително обобщение, при което **всяко денонощие има еднаква статистическа тежест**. Първо се определя систематичното отместване за всяко отделно денонощие, след което годишната стойност се изчислява като средно аритметично на получените денонощни стойности:

$$\overline{\Delta}_{year} = \frac{1}{N_d} \sum_{d=1}^{N_d} \overline{\Delta}_d \tag{81}$$

където N_d е броят на денонощията с налични данни през съответната година, а $\overline{\Delta}_d$ е систематичното отместване, изчислено за d-тото денонощие.

По този начин всяко денонощие участва с еднаква статистическа тежест в годишното обобщение независимо от броя на съпоставените GNSS наблюдения в него.

Таблица 5.6. Средно систематично отместване при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни

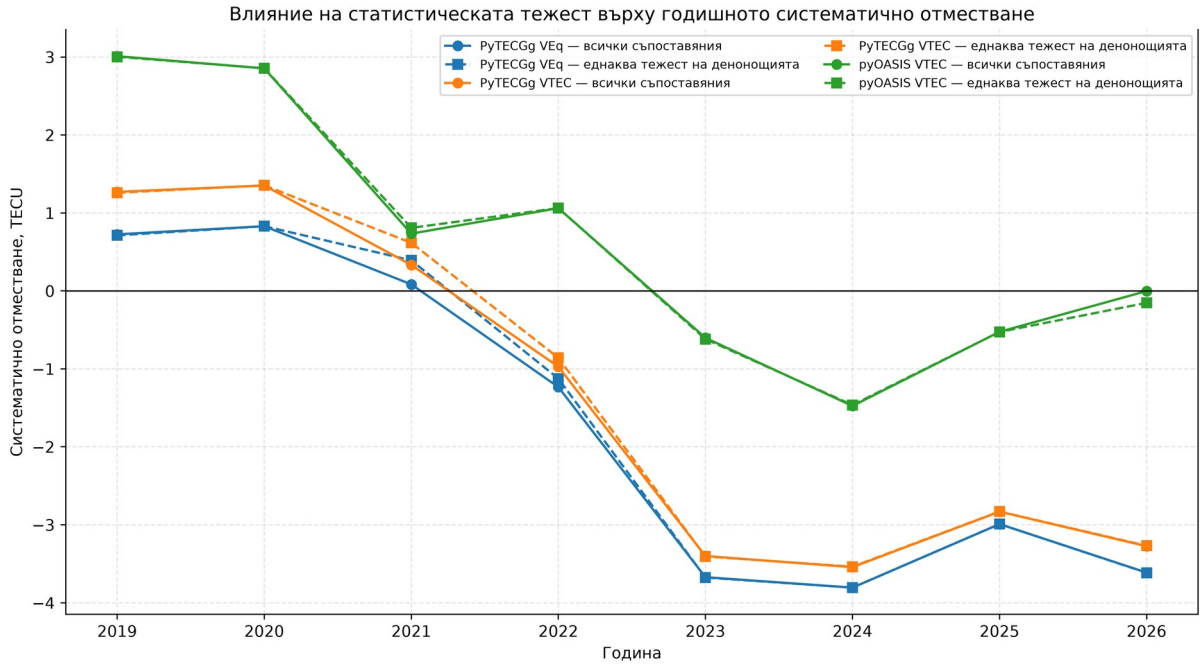
Година	PyTECGg VEq – IGS, TECU	PyTECGg VTEC – IGS, TECU	pyOASIS VTEC – IGS, TECU
2019	+0.71	+1.26	+3.00
2020	+0.83	+1.35	+2.86
2021	+0.39	+0.62	+0.81
2022	−1.12	−0.86	+1.06
2023	−3.68	−3.41	−0.62
2024	−3.81	−3.54	−1.46
2025	−2.99	−2.83	−0.53
2026	−3.62	−3.27	−0.15

За допълнителна оценка на влиянието на начина на статистическо агрегиране са съпоставени годишните характеристики, получени при използване на всички съпоставени стойности и при предварително обобщение по денонощия. Сравнението е извършено за основния локален показател PyTECGg VEq спрямо IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC.

Съпоставянето на тези стойности с резултатите, получени при обединяване на всички отделни наблюдения, показва, че основните закономерности се запазват. Особено близки са резултатите през 2023–2025 г., включително през 2024 г., за която е наличен най-голям брой денонощия с налични данни. Следователно установеното отрицателно систематично отместване през тази част от периода не е следствие единствено от различния брой съпоставени наблюдения през отделните денонощия.

По-осезаема разлика се наблюдава през 2021 г. При PyTECGg VEq систематичното отместване, изчислено от всички съпоставени стойности, е **+0.08 TECU**, докато средната стойност на систематичните отмествания за отделните денонощия с налични данни при еднаква статистическа тежест е **+0.39 TECU**. И при двата начина на обобщение обаче разликата спрямо IGS остава сравнително малка и не променя общата интерпретация за тази година.

Следователно прилагането на еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни потвърждава, че установеното изменение на систематичното отместване между отделните години е устойчиво спрямо различията в количеството налични наблюдения.



Фигура 5.7. Съпоставка на годишното систематично отместване при използване на всички отделни наблюдения и при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни

6. *Обобщение на съпоставката с IGS Final GIM*

Получените резултати показват, че PyTECGg и pyOASIS възпроизвеждат устойчиво основната времева изменчивост на IGS Final GIM, за което свидетелстват високите годишни коефициенти на корелация (Таблица 5.5). Наред с това се установяват систематични различия в абсолютното ниво на VTEC, които се изменят между отделните години и се проявяват по различен начин при двата метода.

При PyTECGg се наблюдава ясно преминаване от положително към отрицателно систематично отместване спрямо IGS, докато при pyOASIS първоначалното

положително отместване постепенно намалява и през 2023–2026 г. остава по-близо до нулевата стойност. Сходният годишен ход на PyTECGg VEq и PyTECGg VTEC показва, че това изменение не се дължи единствено на начина, по който TEC е представено за местоположението на KOH2 чрез VEq.

Систематичното отместване и средноквадратичната грешка следва да се разглеждат съвместно. Малко систематично отместване не означава непременно малки разлики между отделните наблюдения, тъй като положителните и отрицателните разлики могат взаимно да се компенсират при осредняването. RMSE, от своя страна, отчита големината на тези разлики независимо от техния знак. Високият коефициент на корелация също не предполага задължително близост на абсолютните стойности, а показва доколко двата набора се изменят съгласувано във времето.

IGS Final GIM се използва в настоящия анализ като референтен продукт за целите на валидацията, но не се разглежда като абсолютно точна оценка на VTEC. Поради различията в използваните наблюдения, методите за обработка и пространствено-времевото представяне на резултатите установените разлики не могат автоматично да бъдат приписани изцяло като грешка на локалните GNSS решения. Получените статистически показатели се интерпретират преди всичко като оценка на **външната съгласуваност на резултатите от PyTECGg и pyOASIS спрямо IGS Final GIM.**

Установеното изменение на систематичното отместване между отделните години представлява самостоятелен резултат, който впоследствие може да бъде разгледан във връзка с изменението на TEC и условията през 25-ия слънчев цикъл. В рамките на настоящата валидация обаче не се прави пряко причинно обвързване на тези различия със слънчевата или геомагнитната активност.

5.4. Съпоставка с Madrigal

Като втори външен наблюдателно базиран източник за оценка на получените TEC резултати са използвани данни от системата **CEDAR Madrigal** [78]. В настоящото изследване се използва глобалният GNSS TEC продукт **MAPGPS**, получен от наблюдения на мрежа от наземни GNSS приемници. Продуктът се идентифицира в Madrigal чрез **instrument 8000 – World-wide GNSS Receiver Network** и **kindat 3500 – TEC binned 1 degree by 1 degree by 5 min**, т.е. с номинално пространствено-времево представяне $1^\circ \times 1^\circ \times 5$ min.

Madrigal има различна роля от IGS Final GIM. Той също е получен от GNSS наблюдения, но чрез външна наблюдателна мрежа и независима от използваните за KOH2 програмна обработка. Поради това продуктът представлява ценен външен източник за сравнителна оценка, но не следва автоматично да се определя като напълно независима физична валидация. Степента на независимост зависи, наред с останалото, от това дали наблюденията от KOH2 участват във формирането на конкретния Madrigal продукт. Това обстоятелство е проверено отделно в §5.4.4.

Съпоставката се извършва за същите три типа локални резултати, използвани и при сравнението с IGS Final GIM: **PyTECGg VEq в местоположението на KOH2**, **PyTECGg VTEC в IPP** и **pyOASIS VTEC в IPP**. За сравненията в IPP се запазва минимален ъгъл на височина $E \geq 30^\circ$. Разликата се определя чрез зависимостта:

$$\Delta VTEC_i = VTEC_{method,i} - VTEC_{Madrigal,i} \quad (82)$$

Поради особеностите на MAPGPS тук не се прилага билинейна пространствена и линейна времева интерполация, използвана при IGS Final GIM. Вместо това се извършва избор на **най-близката допустима реално налична стойност** на Madrigal във времето и пространството.

5.4.1. Избор на регионални MAPGPS данни

За съпоставката е използван продуктът MAPGPS от глобалната GNSS мрежа в Madrigal (**instrument 8000 – World-wide GNSS Receiver Network**). В системата Madrigal отделните видове данни се идентифицират чрез код *kindat* (*kind of data*). Използваният в настоящото изследване продукт е **kindat 3500 – „TEC binned 1 degree by 1 degree by 5 min“**, съдържащ GNSS-базирани TEC стойности с номинално пространствено представяне $1^{\circ} \times 1^{\circ}$и времеви интервал 5 min. Достъпът и автоматизираното изтегляне се извършват чрез MadrigalWeb, а съдържанието на получените HDF5 файлове се прочита локално чрез h5py. Тази организация позволява еднаква процедура да бъде приложена автоматизирано за целия многогодишен набор.

Тъй като пълните глобални MAPGPS файлове съдържат значително количество данни, за всяко денонощие се определя необходимата географска област около реалното пространствено разположение на използваните IPP и местоположението на KOH2. Към действителния обхват се добавя допълнителен географски запас от 2°, който служи само за ограничаване на обема на извличаните данни и **не представлява допустимото разстояние при самото сравнение**. Крайният критерий за приемане на Madrigal стойност се прилага отделно в §5.4.3.

От всеки файл се извличат времето на картата, географските координати и съответната стойност на VTEC. Географските дължини се привеждат към единно представяне, за да се осигури коректно определяне на пространствените разстояния.

За разлика от IGS Final GIM, MAPGPS не се разглежда като непрекъснато аналитично поле, в което липсващите стойности могат да бъдат попълвани чрез интерполация. Използват се само действително наличните възли на продукта. Този подход е особено важен за района на Антарктида, където пространствената наличност на GNSS-базираните MAPGPS оценки може да бъде неравномерна.

5.4.2. Времево съгласуване

Номиналният времеви интервал на MAPGPS е **5 min**, докато локалните резултати от PyTECGg и pyOASIS са с по-висока времева разделителна способност. Поради това за всяка локална TEC стойност първо се определя най-близката налична Madrigal епоха.

Времевата разлика може да бъде записана като:

$$\Delta t_i = \left| t_{method,i} - t_{Madrigal,i} \right| \tag{83}$$

Съпоставка се приема само когато:

$$\Delta t_i \leq 180\,s \tag{84}$$

По този начин максималното допустимо времево разминаване е **3 min**. Стойности, за които не е налична Madrigal епоха в този интервал, не участват в сравнителната извадка.

Използването на най-близка епоха вместо времева интерполация има за цел да запази действителните стойности на MAPGPS и да избегне създаването на синтетични оценки в интервали с непълна наличност.

5.4.3. Пространствен критерий

След избора на допустима Madrigal епоха се търси най-близката **действително налична** пространствена стойност спрямо целевото положение.

При PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC целевото положение е съответната йоносферна прободна точка. При PyTECGg VEq целевото положение е местоположението на KOH2.

Разстоянието между целевата позиция и Madrigal възела се определя като хоризонтално географско разстояние, а стойността се приема само при $d \leq 80$ km, където d е разстоянието между целевата позиция и най-близкия наличен MAPGPS възел.

Следователно една локална TEC стойност участва в анализа само когато **едновременно** са изпълнени двата критерия: $\Delta t \leq 180$ s, $d \leq 80$ km.

Ако липсва пространствено достатъчно близка стойност, съответното наблюдение се изключва. Не се извършва екстраполация или интерполация през липсващи клетки.

Тази процедура води до по-малък брой съпоставени стойности в сравнение с IGS Final GIM, но осигурява по-строго използване само на действително налични Madrigal оценки. Разработената обработка регистрира и дела на успешно съпоставените наблюдения за всяко денонощие, което позволява отделно да бъде оценено влиянието на ограничената пространствена наличност в Антарктика.

5.4.4. Проверка за независимост спрямо KOH2

Тъй като MAPGPS се формира от наблюдения на глобална мрежа от GNSS приемници, наличието на KOH2 сред входните станции би означавало, че сравняваните величини не са напълно независими. Поради това в разработената процедура се проверява, когато е наличен, допълнителният Madrigal продукт **kindat 3506**, съдържащ списъка на приемниците, използвани при формирането на продукта за съответното наблюдателно денонощие.

За 323 общи денонощия с налични данни, за които е налична информация за участващите GNSS станции при формирането на Madrigal продукта, **KOH2 не е идентифицирана като участваща станция**. Това значително засилва основанията Madrigal да бъде използван като външен GNSS-базиран сравнителен продукт за настоящото изследване. Въпреки това той не се разглежда като напълно независима физична референция, тъй като самият MAPGPS продукт също се формира от GNSS наблюдения.

Този резултат показва, че за конкретното представително денонощие сравнението с Madrigal не включва пряко повторно използване на наблюденията от KOH2. Това обаче **не следва да се обобщава автоматично за всички денонощия от периода 2019–2026 г.**, освен когато съответният списък на входните приемници е проверен. Поради това в настоящото изследване Madrigal се характеризира като **външен GNSS-базиран сравнителен продукт**, а не като безусловно независима валидация.

Като допълнителна проверка на възпроизводимостта на програмната реализация за 01.01.2025 г. са получени **1130** съпоставени стойности за PyTECGg VEq, **8786** за PyTECGg VTEC и **11 081** за pyOASIS VTEC. Публикуваната програмна реализация възпроизвежда числено резултатите за представителния контролен случай.

5.4.5. Резултати от съпоставката с Madrigal GNSS TEC

Съпоставката с Madrigal е извършена за общите денонощия с налични данни през периода 2019–2026 г. Анализирани са трите типа локални резултати, използвани и при сравнението с IGS Final GIM: PyTECGg VEq в местоположението на KOH2, PyTECGg VTEC в IPP и pyOASIS VTEC в IPP. Разликите са определени като **метод – Madrigal**, поради което положителните стойности означават по-висока оценка на TEC от локалния метод.

1. *Наличност на данните по години*

Таблица 5.7. Брой денонощия с измервания, включени в съпоставката с Madrigal GNSS TEC

Година	PyTECGg, денонощия	pyOASIS, денонощия
2019	4	4

2020	23	23
2021	17	17
2022	28	28
2023	32	32
2024	175	175
2025	37	37
2026	8	7
Общо	**324**	**323**

Най-голям брой общи денонощия с налични данни отново е наличен през 2024 г. От общо 326 денонощия, за които е извършен опит за достъп до Madrigal, успешно са получени данни за 325; един случай през 2024 г. не е обработен поради проблем при достъпа до съответния Madrigal файл.

След пространственото и времевото съгласуване са получени общо приблизително **0.75 млн.** съпоставени стойности за PyTECGg VEq, **4.54 млн.** за PyTECGg VTEC и **5.98 млн.** за pyOASIS VTEC. По-малкият брой при VEq се дължи на различния характер и времева дискретизация на този резултат спрямо спътниково зависимите VTEC стойности.

2. Годишно развитие на систематичното отместване

Таблица 5.8. Средно годишно систематично отместване спрямо Madrigal GNSS TEC

Година	**PyTECGg VEq – Madrigal, TECU**	**PyTECGg VTEC – Madrigal, TECU**	**pyOASIS VTEC – Madrigal, TECU**
2019	−0.13	+0.43	+2.37
2020	+0.06	+0.55	+2.21
2021	+0.54	+0.83	+1.31
2022	+0.40	+0.78	+3.05
2023	+1.35	+1.45	+4.49
2024	+1.54	+1.52	+3.77
2025	+3.84	+3.83	+6.10
2026	+0.69	+0.71	+4.29

При PyTECGg систематичното отместване спрямо Madrigal е сравнително малко през 2019–2022 г. и нараства през следващите години. Най-голямата стойност е получена през 2025 г., когато отместването достига около **+3.84 TECU** както за VEq, така и за VTEC в IPP.

Особено важно е близкото поведение на PyTECGg VEq и PyTECGg VTEC. Разликата между техните годишни систематични отмествания обикновено е малка, което отново показва, че наблюдаваният годишен ход не се определя единствено от начина, по който TEC е представено за местоположението на KOH2 чрез VEq.

При pyOASIS систематичното отместване е положително през целия период и в повечето години е по-голямо от това при PyTECGg. Максимумът също е през 2025 г. – **+6.10 TECU**. Следователно спрямо Madrigal pyOASIS систематично оценява VTEC по-високо през анализирания период.



Фигура 5.8. Годишно изменение на систематичното отместване на PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г.

3. Средноквадратична грешка

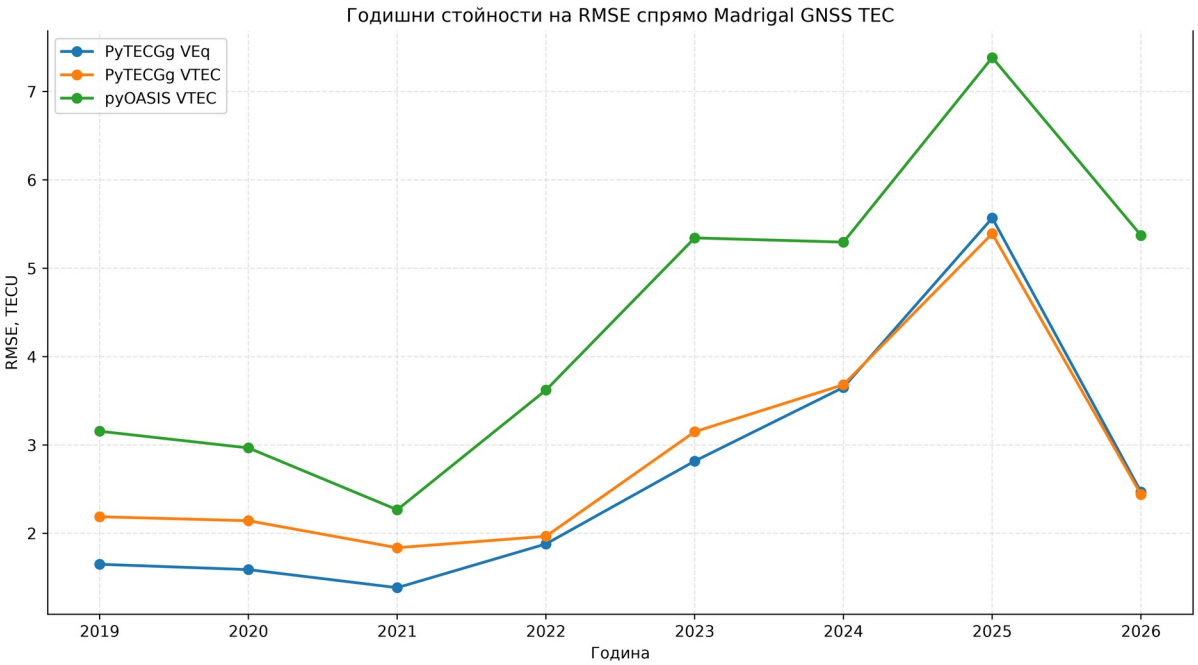
Таблица 5.9. Годишни стойности на RMSE спрямо Madrigal GNSS TEC

Година	**PyTECGg VEq – Madrigal, TECU**	**PyTECGg VTEC – Madrigal, TECU**	**pyOASIS VTEC – Madrigal, TECU**
2019	1.65	2.19	3.16
2020	1.59	2.14	2.97
2021	1.39	1.84	2.27
2022	1.88	1.97	3.62
2023	2.82	3.15	5.34
2024	3.65	3.68	5.30
2025	5.57	5.39	7.39
2026	2.47	2.44	5.37

Най-ниските стойности на RMSE за PyTECGg са получени през 2021 г. – **1.39 TECU** за VEq и **1.84 TECU** за VTEC. След това се наблюдава нарастване, достигащо максимални стойности през 2025 г. – съответно **5.57 и 5.39 TECU**.

При pyOASIS RMSE е по-висока през всички години и достига **7.39 TECU през 2025 г.** Това е в съответствие с по-голямото положително систематично отместване спрямо Madrigal през същия период.

Както при съпоставката с IGS Final GIM, систематичното отместване и RMSE се интерпретират съвместно.



Фигура 5.9. Годишни стойности на RMSE при съпоставката на PyTECGg и pyOASIS с Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г.

4. Корелация с Madrigal GNSS TEC

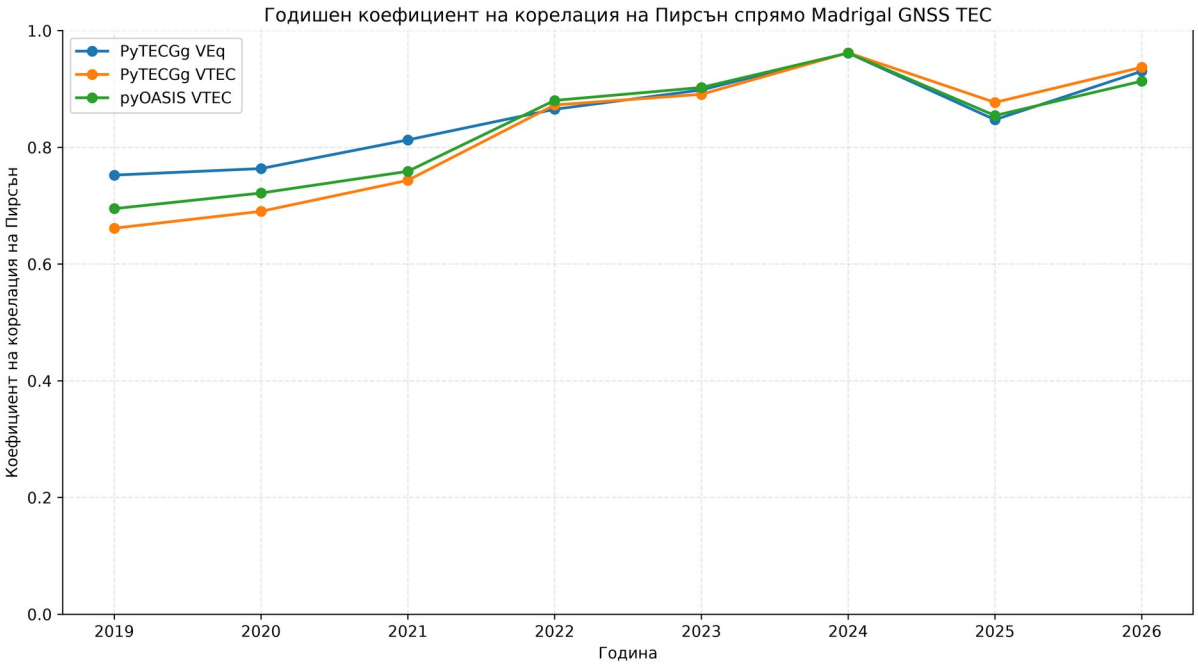
Таблица 5.10. Годишен коефициент на корелация на Пирсън между локалните TEC решения и Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г.

Година	PyTECGg VEq – Madrigal	PyTECGg VTEC – Madrigal	pyOASIS VTEC – Madrigal
2019	0.753	0.662	0.695
2020	0.764	0.690	0.722
2021	0.813	0.744	0.759
2022	0.865	0.873	0.880
2023	0.898	0.891	0.903
2024	0.962	0.962	0.962
2025	0.847	0.877	0.855
2026	0.931	0.937	0.914

Корелацията с Madrigal е положителна за всички години, но в началото на периода е по-ниска от наблюдаваната при IGS Final GIM. От 2022 г. нататък стойностите нарастват, а през 2024 г. достигат приблизително **0.962 и при трите сравнения**.

Особено близките коефициенти за трите локални решения през 2023–2024 г. показват сходно възпроизвеждане на времевата изменчивост на Madrigal независимо от различията в абсолютното ниво на TEC.

По-ниските стойности през 2019–2021 г. следва да се интерпретират и с оглед на значително по-малкия брой денонощия с налични данни, особено през 2019 г.



Фигура 5.10. Годишен коефициент на корелация на Пирсън между локалните TEC решения и Madrigal GNSS TEC за периода 2019–2026 г.

5. *Проверка при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни*

Както при сравнението с IGS Final GIM, резултатите са обобщени и при еднаква статистическа тежест на отделните денонощия с налични данни.

Таблица 5.11. Средно систематично отместване спрямо Madrigal при еднаква статистическа тежест на денонощията с налични данни

Година	PyTECGg VEq, TECU	PyTECGg VTEC, TECU	pyOASIS VTEC, TECU
2019	−0.13	+0.44	+2.36
2020	+0.06	+0.56	+2.21
2021	+0.82	+1.15	+1.32
2022	+0.52	+0.90	+3.06
2023	+1.36	+1.47	+4.49
2024	+1.55	+1.61	+3.87
2025	+3.85	+3.83	+6.08
2026	+0.72	+0.71	+3.98

Резултатите при еднаква статистическа тежест на денонощията като цяло потвърждават основната картина от анализа на всички отделни наблюдения. Разликите са сравнително малки за повечето години. По-осезаемо изменение се наблюдава например през 2021 г. при PyTECGg, но знакът и общият характер на систематичното отместване не се променят.

Това показва, че основното годишно изменение на разликите спрямо Madrigal не е следствие единствено от неравномерния брой съпоставени наблюдения през отделните денонощия.

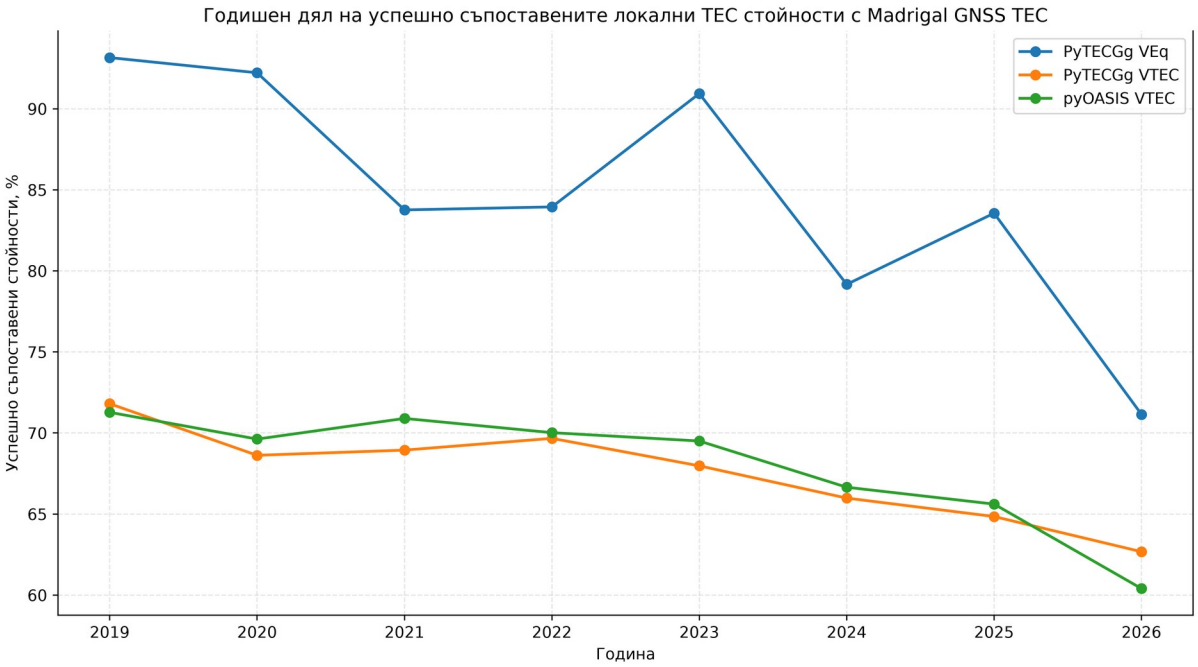
6. *Степен на успешно съпоставяне*

Madrigal има по-ограничена пространствена наличност от IGS Final GIM и поради това не всяка локална TEC стойност може да бъде съпоставена при наложените критерии $\Delta t \leq 180$s и $d \leq 80$km.

При PyTECGg VEq делът на успешно съпоставените стойности е най-висок и варира приблизително от **71% до 93%** между отделните години. При сравненията в IPP той е по-нисък – приблизително **63–72%** за PyTECGg VTEC и **60–71%** за pyOASIS VTEC.

Тази разлика е очаквана, тъй като VEq се сравнява в постоянната позиция на KOH2, докато IPP се изменят пространствено в зависимост от наблюдавания спътник и геометрията на наблюдението. Част от прободните точки попадат извън областите, за които в съответната Madrigal епоха е налична стойност в рамките на допустимите 80 km.

Медианата на разстоянието до избраната Madrigal стойност е приблизително **44 km** при сравнението на VEq в местоположението на KOH2 и около **41–46 km** при сравненията на VTEC в йоносферните прободни точки, т.е. значително под приетата максимална граница от **80 km**.



Фигура 5.11. Годишен дял на успешно съпоставените локални TEC стойности с Madrigal GNSS TEC.

7. Обобщение на съпоставката с Madrigal GNSS TEC

Резултатите показват устойчива положителна корелация между локалните TEC решения и Madrigal, като степента на съгласуване на времевото изменение нараства през по-голямата част от периода и е особено висока през 2023–2024 г. Наред с това се установяват систематични различия в абсолютното ниво на TEC.

PyTECGg VEq и PyTECGg VTEC показват много сходно годишно поведение както по отношение на систематичното отместване, така и на RMSE. При pyOASIS разликите спрямо Madrigal са по-големи и систематично положителни през целия анализиран период.

За разлика от IGS Final GIM, сравнението с Madrigal е ограничено от действителната пространствена наличност на MAPGPS. Поради това част от локалните TEC стойности не участват в сравнението, когато липсва достатъчно близка във времето и пространството Madrigal оценка. Този подбор е преднамерен и предотвратява въвеждането на допълнително интерполирани стойности в области с липсващи данни.

5.5. Климатологична съпоставка с PyIRI

За допълнителна оценка на получените TEC резултати е извършена съпоставка с климатологични стойности на VTEC, изчислени чрез **PyIRI** – Python реализация на

International Reference Ionosphere. За разлика от IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC, PyIRI не представлява независимо наблюдателно решение за конкретния момент, а емпиричен модел на характерното състояние на йоносферата при зададени географски, времеви и слънчеви условия. Поради това резултатите от тази съпоставка се използват като **климатологичен контекст**, а не като независима валидация на локално определения TEC.

Това разграничение е особено важно, тъй като използваната конфигурация на PyIRI включва като входна величина наблюдавания слънчев радиоиндекс **F10.7**. Следователно съгласуваност между PyIRI и GNSS-базираните TEC стойности при изменение на слънчевата активност не може да се интерпретира като независима проверка на зависимостта между TEC и F10.7.

5.5.1. Методика на съпоставката с PyIRI

Моделните изчисления са извършени с **PyIRI версия 0.1.7** за фиксираното географско местоположение на KOH2. За всяко налично наблюдателно денонощие моделът е изчисляван през **1 h**, за епохи от 00:00 до 23:00 UTC. Използвана е опцията **URSI** за коефициентите на областта F2.

Електронната концентрация е изчислявана във вертикален профил от **90 до 2000 km** със стъпка **5 km**, след което профилът е интегриран по височина за получаване на моделна VTEC стойност за съответната часова епоха Тази процедура и използваните параметри са зададени непосредствено в скрипта, използван при основната обработка на данните (66).

За всяко наблюдателно денонощие като вход към модела е използвана наблюдаваната стойност на **F10.7 от NASA OMNI**. PyIRI приема една стойност на F10.7 при изчисляването на съответното денонощие, поради което тя се използва еднакво за всички 24 часови моделни епохи. Източникът на стойността се записва и в изходните данни.

Полученият набор представлява по този начин **часов климатологичен времеви ред на VTEC в местоположението на KOH2**, съответстващ на общите денонощия с налични данни от периода 2019–2026 г.

5.5.2. Пространствено и времево съгласуване

При PyIRI не е необходимо пространствено интерполиране, тъй като моделните стойности са изчислени непосредствено за географското местоположение на KOH2. Поради това основното условие за коректна съпоставка е използването на **еднакви часови епохи**.

За основна времева основа са използвани часовите епохи на PyIRI. Към всяка от тях се съпоставят останалите времеви редове в местоположението на KOH2:

- **PyIRI**
  Моделната VTEC стойност е налична точно на съответната часова епоха.
- **PyTECGg VEq**
  Избира се най-близката VEq стойност до съответната часова епоха, като максималното допустимо времево отклонение е:

(85) $$\Delta t_{PyTECGg} \leq 60\,s$$

- **IGS Final GIM**
  VTEC се определя непосредствено за географските координати на KOH2 и точната часова епоха чрез описаната в §5.3.1 пространствено-времева интерполация.
- **Madrigal GNSS TEC**
  Избира се най-близката налична стойност при вече въведените критерии:

$$\Delta t_{Madrigal} \leq 180\,s\,, d \leq 80\,km$$

Тази процедура формира общ часов набор, съдържащ **PyIRI, PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC на едни и същи епохи**. Именно този набор представлява връзката между климатологичната съпоставка и последващия анализ на изменението на TEC през 25-ия слънчев цикъл.

За всяка отделна двойка може да бъде определена разлика спрямо PyIRI:

$$\Delta VTEC_i = VTEC_{comparison,i} - VTEC_{PyIRI,i}, \quad (86)$$

където $VTEC_{comparison,i}$ е съответната стойност от PyTECGg VEq, IGS Final GIM или Madrigal, а $VTEC_{PyIRI,i}$ е климатологичната моделна стойност на същата часова епоха. Именно тази знакова конвенция е използвана в програмната процедура.

При директното многопродуктово сравнение се използват само епохите, за които са налични стойности и от четирите източника. Не се извършва синтетично запълване на липсващи PyTECGg, Madrigal или PyIRI стойности. Така всички сравнявани величини се отнасят към една и съща времева извадка.

За представителното наблюдателно денонощие **01.01.2025 г.** PyIRI и IGS Final GIM предоставят по 24 часови стойности, PyTECGg също може да бъде съпоставен за всичките 24 часа, докато Madrigal удовлетворява зададените пространствено-времеви критерии за **11 часа**. Следователно строгият общ набор за четирите продукта съдържа 11 едновременни часови епохи. Публикуваната програмна реализация възпроизвежда числено резултатите от използваната при изследването процедура за този представителен случай.

Тази проверка потвърждава възпроизводимостта на процедурата за избраното наблюдателно денонощие, но не обхваща проверка за пълна идентичност на резултатите за всички общи денонощия с налични данни през периода 2019–2026 г.

5.5.3. Резултати от климатологичната съпоставка с PyIRI

За количествената съпоставка е използвана строгата обща времева извадка, включваща само часовите епохи, за които едновременно са налични стойности от **PyIRI, PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC**. По този начин всяка от трите съпоставки с PyIRI се извършва върху идентичен набор от часови епохи и различията между резултатите не могат да бъдат следствие от различна времева наличност на отделните продукти.

Общо са формирани **6983 общи часови епохи**, разпределени в **325 общи денонощия с налични данни**. От общо 326 денонощия, включени в първоначалната обработка, едно денонощие – 30.12.2021 г. – не участва в строгата обща извадка поради липса на PyTECGg VEq стойности.

1. Наличност на общите часови епохи

Таблица 5.12. Наличност на общите часови епохи за климатологичната съпоставка с PyIRI

Година	Денонощия с измервания	Общи часови епохи
2019	4	94
2020	23	536
2021	17	295
2022	28	623
2023	32	739
2024	176	3755
2025	37	797
2026	8	144
Общо	**325**	**6983**

Наличността е силно неравномерна както по години, така и по сезони. Наблюденията през 2019 г. са само от декември, през 2020 г. – от януари, през 2021 г. –

от март и април, през 2022 г. – от януари и февруари, през 2023 г. – от февруари и март, а през 2025 г. – от януари и февруари. Най-широко сезонно представяне има 2024 г., когато са налични наблюдения през осем различни месеца.

Това ограничение е особено важно при съпоставката с климатологичен модел като PyIRI. Поради изразената сезонна изменчивост на йоносферата стойностите, обобщени по години, **не трябва да се интерпретират като средногодишни характеристики за съответната календарна година**, а само като характеристики на наличните наблюдателни периоди.

2. Средни разлики спрямо PyIRI

За да се избегне по-голямата статистическа тежест на денонощията с повече общи часови епохи, първо са определени средните разлики за всяко наблюдателно денонощие, след което е изчислена средната им стойност за съответната година. Разликите са определени като:

(87) $$\Delta VTEC_i = VTEC_{comparison,i} - VTEC_{PyIRI,i}$$

Положителната стойност следователно означава, че съответното наблюдателно или референтно TEC решение е по-високо от климатологичната оценка на PyIRI.

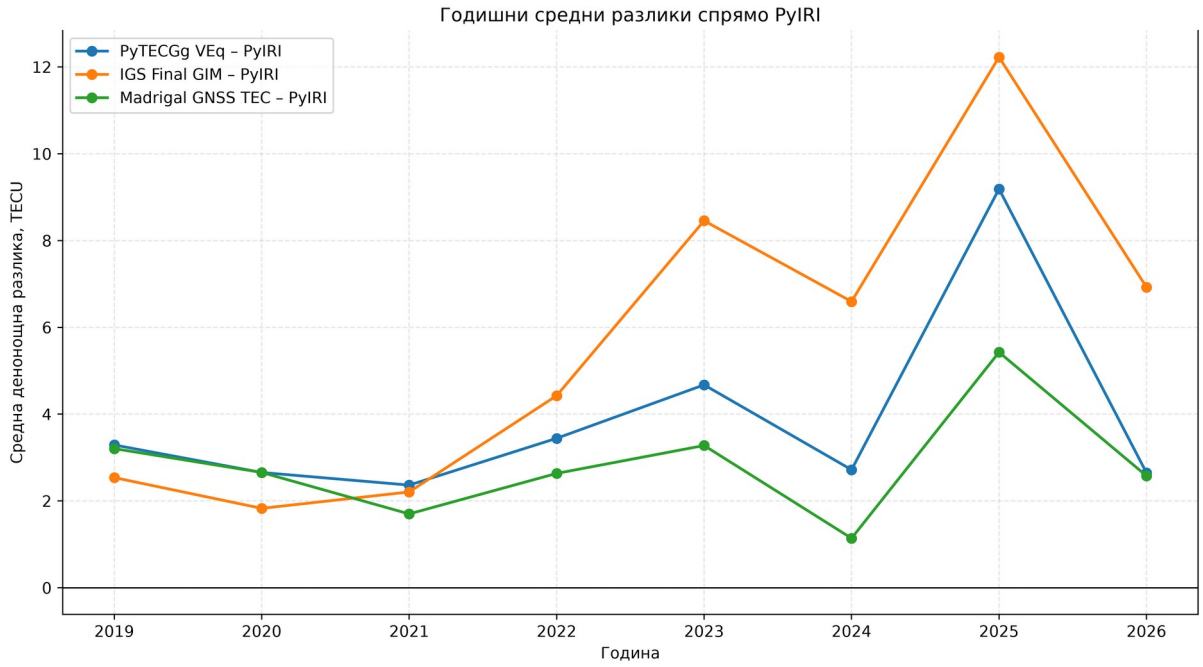
Таблица 5.13. Средна разлика спрямо PyIRI при еднаква статистическа тежест на общите денонощия с налични данни

Година	PyTECGg VEq – PyIRI, TECU	IGS Final GIM – PyIRI, TECU	Madrigal – PyIRI, TECU
2019	+3.30	+2.57	+3.22
2020	+2.68	+1.87	+2.66
2021	+2.36	+2.00	+1.46
2022	+3.34	+4.50	+2.80
2023	+4.69	+8.44	+3.26
2024	+2.74	+6.62	+1.14
2025	+9.18	+12.25	+5.43
2026	+2.70	+6.42	+1.96

За всички разглеждани години трите външни TEC решения са средно по-високи от стойностите на PyIRI. През 2019–2021 г. разликите са сравнително малки и в повечето случаи са в границите около 1.5–3.3 TECU. След 2022 г. се наблюдава по-голямо раздалечаване, което е най-силно изразено за IGS Final GIM.

Най-големи средни разлики се получават за денонощията с налични данни през 2025 г. – **+9.18 TECU** за PyTECGg VEq, **+12.25 TECU** за IGS Final GIM и **+5.43 TECU** за Madrigal. Тези стойности обаче не следва да се разглеждат като характеристика на цялата 2025 г., тъй като използваните наблюдения са концентрирани през януари и февруари.

Резултатите показват, че PyIRI описва общото климатологично ниво на TEC, но не възпроизвежда напълно абсолютните стойности, получени от наблюдателно базираните решения. Различията са очаквани предвид емпиричния характер на модела и факта, че той представя характерното състояние на йоносферата при зададените входни условия, а не конкретното моментно състояние.



Фигура 5.12. Годишни средни разлики на PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC спрямо PyIRI за денонощията с налични данни през периода 2019–2026 г.

3. Средноквадратична грешка

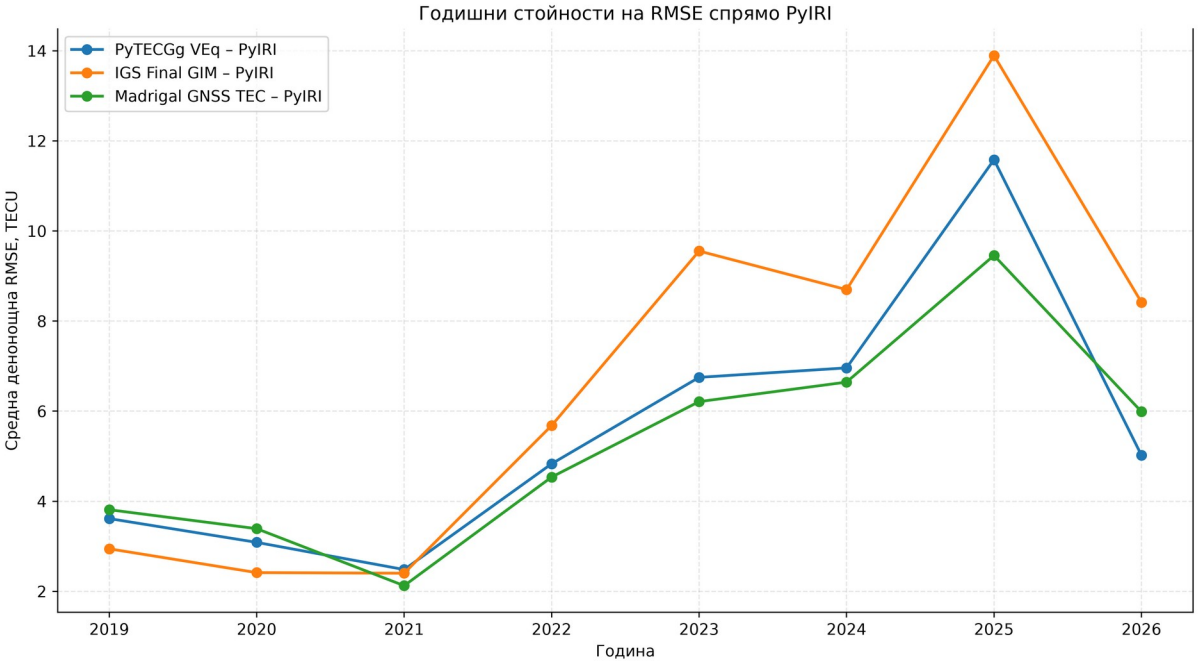
Като допълнителна характеристика на големината на разликите е изчислена средноквадратичната грешка (RMSE). За всяко наблюдателно денонощие тя се определя по вече въведената формула, след което годишните стойности по-долу са получени като средно аритметично на денонощните RMSE, т.е. всяко денонощие участва с еднаква статистическа тежест.

Таблица 5.14. Средна денонощна RMSE спрямо PyIRI

Година	PyTECGg VEq – PyIRI, TECU	IGS Final GIM – PyIRI, TECU	Madrigal – PyIRI, TECU
2019	3.63	2.97	3.83
2020	3.11	2.44	3.39
2021	2.48	2.13	1.79
2022	4.73	5.73	4.68
2023	6.74	9.54	6.21
2024	6.98	8.71	6.65
2025	11.62	13.94	9.46
2026	5.02	7.90	5.80

Най-малки разлики спрямо PyIRI се наблюдават през наличните периоди от 2021 г., когато средната денонощна RMSE е **2.48 TECU** за PyTECGg VEq, **2.13 TECU** за IGS Final GIM и **1.79 TECU** за Madrigal. След 2022 г. стойностите нарастват, като максимумите отново са получени за наблюденията през 2025 г.

По-високите стойности на RMSE спрямо PyIRI в сравнение с получените при съпоставките между наблюдателно базираните TEC продукти са в съответствие с различната функция на модела. PyIRI не е предназначен да възпроизвежда всяка краткопериодична промяна на реалното йоносферно състояние и поради това тези стойности **не се интерпретират като грешка на модела в смисъла на независима валидация**.



Фигура 5.13. Годишни стойности на RMSE на PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC спрямо PyIRI за денонощията с налични данни

4. Съгласуваност на времевото изменение

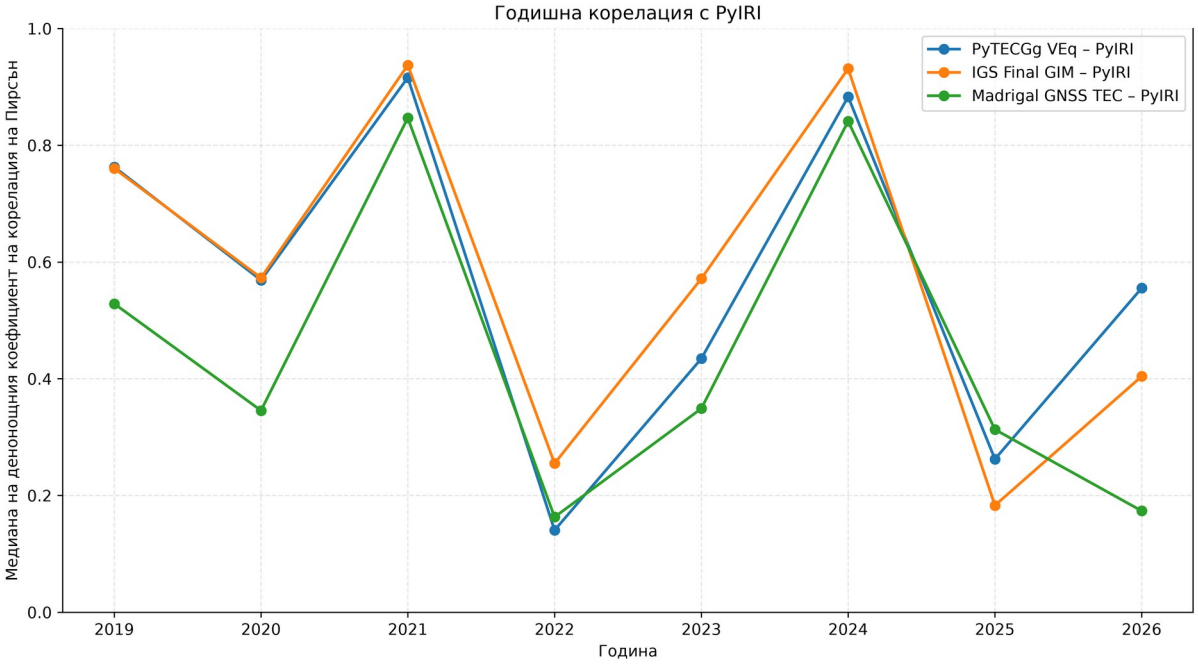
За оценка на сходството на изменението през отделните денонощия е използван коефициентът на корелация на Пирсън. В Таблица 5.15 са представени медианите на денонощните коефициенти за съответната година.

Таблица 5.15. Медиана на денонощния коефициент на корелация на Пирсън спрямо PyIRI

Година	PyTECGg VEq – PyIRI	IGS Final GIM – PyIRI	Madrigal – PyIRI
2019	0.763	0.762	0.529
2020	0.572	0.564	0.346
2021	0.914	0.934	0.868
2022	0.190	0.242	0.163
2023	0.420	0.572	0.349
2024	0.882	0.932	0.841
2025	0.281	0.172	0.313
2026	0.624	0.613	0.404

За разлика от съпоставките с IGS Final GIM и Madrigal, при PyIRI степента на корелация се изменя значително между отделните наблюдателни периоди. Висока съгласуваност на денонощния ход се наблюдава например през наличните периоди от 2021 и 2024 г., докато през 2022 и 2025 г. корелацията е значително по-ниска.

Това поведение показва, че климатологичният модел не възпроизвежда с еднаква точност формата и амплитудата на действителното денонощно изменение на TEC при всички наблюдавани условия. То е в съответствие с ролята на PyIRI като емпиричен климатологичен модел, а не като моментно наблюдателно решение.



Фигура 5.14. Годишна медиана на денонощния коефициент на корелация на Пирсън между PyIRI и PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC

5. Обобщение на климатологичната съпоставка

Съпоставката показва, че PyIRI предоставя полезен климатологичен фон за интерпретация на получените GNSS-базирани TEC стойности, но между моделните и наблюдателно базираните решения се наблюдават както различия в абсолютното ниво, така и различна степен на съгласуваност на денонощния ход.

В по-голямата част от разглежданите периоди PyIRI дава по-ниски VTEC стойности от PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal. Големината на разликите обаче се изменя значително между отделните наблюдателни периоди. Поради неравномерното сезонно разпределение на данните тези изменения не могат да бъдат интерпретирани единствено като изменение между календарните години.

Особено важно е, че **F10.7 участва като входен параметър при формирането на PyIRI резултатите**. Поради това зависимостта между моделния VTEC и слънчевата активност не представлява независима проверка на наблюдаваната връзка между GNSS TEC и F10.7. В настоящото изследване PyIRI се използва единствено като **климатологичен сравнителен фон**, докато анализът на реалното изменение на TEC през 25-ия слънчев цикъл се основава на наблюдателно получените TEC решения.

5.6. Оценка на устойчивостта спрямо различни глобални йоносферни карти

Съпоставката с IGS Final GIM в §5.3 предоставя основната външна оценка на получените TEC решения. Самият IGS Final GIM обаче представлява **комбиниран продукт**, формиран въз основа на глобални йоносферни карти, изготвяни от отделни асоциирани центрове за йоносферен анализ на IGS. Тези центрове определят VTEC независимо и използват различни подходи при обработката и моделирането, след което техните решения участват във формирането на комбинирания IGS продукт.

Поради това е извършена допълнителна съпоставка на резултатите от KOH2 с индивидуалните GIM продукти на **CODE, ESA/ESOC, JPL и UPC**. Целта не е тези продукти да бъдат разглеждани като четири независими валидации. Те са GNSS-базирани глобални йоносферни решения от една и съща обща продуктова категория и част от инфраструктурата на IGS. Анализът се използва за установяване доколко

получените оценки и направените изводи са **устойчиви спрямо избора на конкретна глобална йоносферна карта**. Тази роля на четирите продукта е заложена и в разработената процедура за сравнителен анализ.

За всеки от четирите GIM продукта са приложени същите основни принципи за пространствено-времево съгласуване, използвани при сравнението с IGS Final GIM. Стойностите на глобалната карта се определят за съответната позиция и епоха чрез описаната в §5.3.1 интерполационна процедура. При сравненията в йоносферните прободни точки се запазва ограничението $E \geq 30^{\circ}$. Разликата за всяка съпоставена стойност се определя като:

(88) $$\Delta VTEC_i = VTEC_{method,i} - VTEC_{GIM,i},$$

където $VTEC_{GIM,i}$ е стойността от съответния индивидуален GIM продукт – CODE, ESA, JPL или UPC. Следователно положителната стойност означава, че локалното TEC решение е по-високо от съответната глобална карта, а отрицателната – че е по-ниско.

Използването на еднаква знакова конвенция и еднакви статистически показатели позволява резултатите от четирите съпоставки да бъдат разглеждани непосредствено един спрямо друг.

5.6.1. CODE

Глобалните йоносферни карти на **CODE (Center for Orbit Determination in Europe)** представляват едно от индивидуалните решения, предоставяни в рамките на IGS. CODE е сред асоциираните центрове за йоносферен анализ, които независимо изготвят предварителни и окончателни глобални VTEC карти.

В настоящото изследване CODE се използва като първи индивидуален GIM продукт при оценката на чувствителността на резултатите към избора на външна глобална карта. За всеки наличен период стойностите на PyTECGg и pyOASIS се съпоставят с CODE в същите пространствени положения, използвани при основната IGS проверка.

Това позволява да се оцени дали установеното спрямо комбинирания IGS продукт систематично отместване се запазва по знак и големина при използването на самостоятелно решение на отделен анализен център.

5.6.2. ESA

Като втори индивидуален продукт са използвани глобалните йоносферни карти на **ESA/ESOC**. ESA/ESOC е също асоцииран център за йоносферен анализ на IGS и предоставя собствено решение за глобалното разпределение на VTEC.

Съпоставката с ESA се извършва по идентичен начин с тази за CODE. Не се въвеждат различни пространствени или статистически критерии, което е необходимо, за да могат наблюдаваните различия да бъдат свързани с избора на GIM продукт, а не с промяна на самата процедура за съпоставка.

5.6.3. JPL

Третият използван продукт е GIM на **Jet Propulsion Laboratory (JPL)**. JPL предоставя собствени предварителни и окончателни йоносферни карти към IGS, които участват в системата от индивидуални решения на асоциираните центрове. JPL посочва, че неговите продукти се получават от GNSS наблюдения и се предоставят като глобални VTEC карти за последващо включване в комбинираните IGS йоносферни продукти.

И тук се използват същите локални TEC резултати и същата методика за пространствено-времево съгласуване. По този начин разликите спрямо JPL могат да бъдат сравнени пряко с тези, получени спрямо CODE, ESA и UPC.

5.6.4. UPC

Четвъртият индивидуален GIM продукт е предоставян от **Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)**. UPC е дългогодишен асоцииран център за йоносферен анализ в рамките на IGS и участва в изготвянето на индивидуални глобални йоносферни карти.

Продуктът на UPC се използва при същите условия и с идентични критерии за съпоставка като останалите три GIM решения. Включването му разширява диапазона от независимо изчислени глобални карти, спрямо които може да бъде оценена чувствителността на локалните резултати.

5.6.5. Съпоставка при общи денонощия с налични данни

Наличността на отделните GIM продукти не е напълно еднаква за всички общи денонощия с налични данни. Ако за всеки продукт се използва целият наличен набор независимо от останалите, получените годишни статистики биха могли да се различават не само поради характеристиките на самите GIM решения, но и поради различния състав на сравняваните наблюдателни периоди.

За ограничаване на това влияние е формирана **строга обща извадка от денонощия с налични данни**, включваща само денонощията, за които едновременно са налични всички четири продукта – CODE, ESA, JPL и UPC – и съответният локален TEC резултат. Разработената процедура генерира отделно обобщение именно за тази обща извадка.

За всяко локално решение – PyTECGg VEq, PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC – по този начин четирите GIM продукта се сравняват върху **един и същ набор от денонощия с налични данни и едни и същи локални наблюдения**. За една дата процедурата формира до 12 комбинации:

3 TEC решения×4 GIM продукта=12 съпоставки

При годишното обобщение всяко общо наблюдателно денонощие има еднаква статистическа тежест. Ако $\Delta_{year,g}$ е систематичното отместване за денонощието d спрямо GIM продукта g, средната годишна стойност се определя като:

$$\overline{\Delta}_{year,g} = \frac{1}{N_c} \sum_{d=1}^{N_c} \overline{\Delta}_{d,g}, \quad (89)$$

където N_c е броят на общите денонощия с налични данни през съответната година.

Този подход е особено важен за правилната интерпретация на резултатите. Ако например систематичното отместване на PyTECGg спрямо различните GIM продукти се различава значително при **един и същ набор от наблюдения**, това показва, че абсолютната оценка зависи съществено от избора на глобална референтна карта. Ако обаче относителното положение между PyTECGg и pyOASIS се запазва независимо от използвания GIM, това представлява аргумент, че разликата между двата локални метода не се определя единствено от избора на външния GIM продукт.

Именно върху тази строга обща извадка се основават резултатите в следващия раздел.

5.6.6. Резултати от оценката на устойчивостта спрямо различни глобални йоносферни карти

Съпоставката с индивидуалните глобални йоносферни карти на CODE, ESA, JPL и UPC показва, че абсолютните стойности на статистическите показатели зависят осезаемо от избрания GIM продукт. Наред с това обаче се установява значително по-устойчиво поведение на **разликата между резултатите от PyTECGg и pyOASIS**, когато

двата метода се сравняват спрямо една и съща глобална карта. Именно това разграничение е основната цел на настоящата проверка.

При анализа са използвани само денонощията, за които съответните четири GIM продукта са едновременно налични. През 2022 г. строгата обща извадка съдържа 28 денонощия с данни, през 2023 г. – 32, през 2024 г. – 176, а през 2025 г. – 37. За ruTECGg през 2026 г. са налични 8 денонощия, докато за ruOASIS – 7. През 2021 г. е налично само едно общо денонощие за ruOASIS, поради което резултатът за тази година не е достатъчно представителен за оценка на устойчивостта между отделните GIM продукти.

1. *Зависимост на систематичното отместване от избрания GIM продукт*

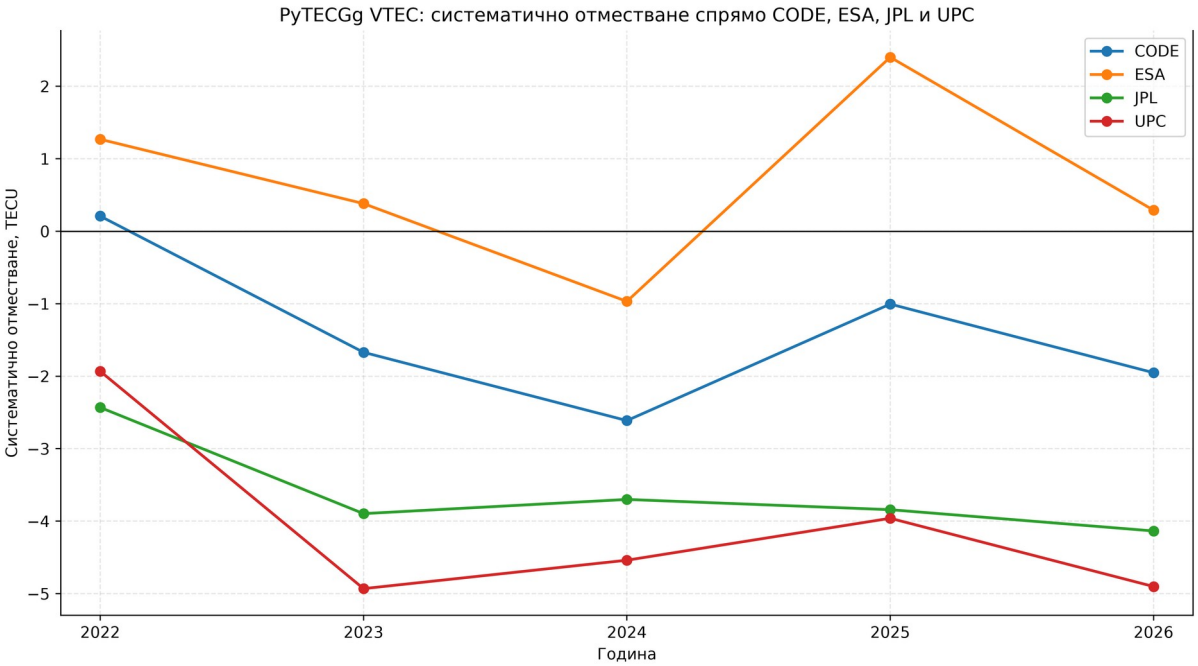
В Таблица 5.16 са представени стойностите на систематичното отместване на ruTECGg VTEC спрямо четирите индивидуални глобални йоносферни карти. Положителните стойности означават по-висок VTEC от съответния GIM продукт, а отрицателните – по-нисък.

Таблица 5.16. Средно систематично отместване на ruTECGg VTEC спрямо индивидуалните GIM продукти при общи денонощия с налични данни

Година	CODE, TECU	ESA, TECU	JPL, TECU	UPC, TECU
2022	+0.21	+1.27	−2.43	−1.93
2023	−1.67	+0.38	−3.90	−4.93
2024	−2.61	−0.97	−3.70	−4.54
2025	−1.00	+2.40	−3.84	−3.96
2026	−1.95	+0.29	−4.14	−4.90

Разликите между отделните GIM продукти са съществени. Например през 2025 г. систематичното отместване на ruTECGg VTEC е **+2.40 TECU спрямо ESA**, но **−3.84 TECU спрямо JPL** и **−3.96 TECU спрямо UPC**. Следователно само промяната на използваната глобална йоносферна карта може да доведе не само до значителна промяна в големината на систематичното отместване, но и до промяна на неговия знак.

Това поведение показва, че абсолютното систематично отместване на локалния VTEC не трябва да се разглежда независимо от конкретния GIM продукт, спрямо който е изчислено. В този смисъл една отделна глобална карта не предоставя достатъчно основание за еднозначно определяне на абсолютното отместване на локалното TEC решение.



Фигура 5.15. Годишно систематично отместване на PyTECGg VTEC спрямо глобалните йоносферни карти CODE, ESA, JPL и UPC.

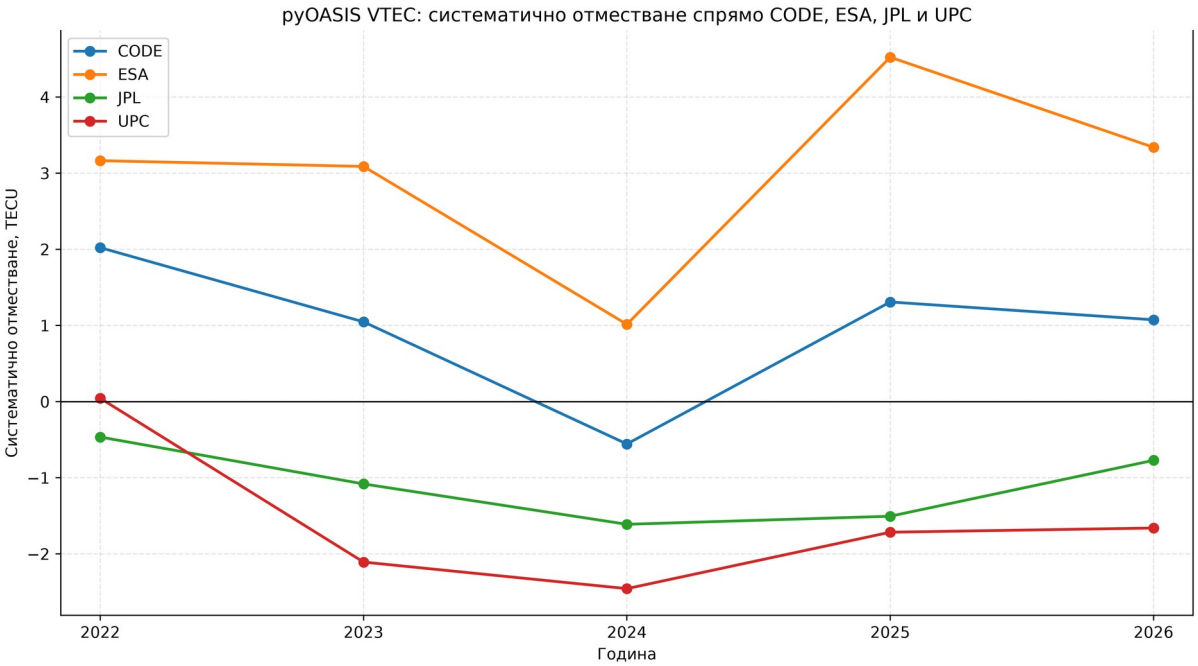
Аналогична зависимост се установява и при резултатите от pyOASIS.

Таблица 5.17. Средно систематично отместване на pyOASIS VTEC спрямо индивидуалните GIM продукти при общи денонощия с налични данни

Година	CODE, TECU	ESA, TECU	JPL, TECU	UPC, TECU
2022	+2.02	+3.16	−0.47	+0.04
2023	+1.05	+3.09	−1.08	−2.11
2024	−0.56	+1.01	−1.61	−2.46
2025	+1.31	+4.52	−1.51	−1.72
2026	+1.07	+3.34	−0.77	−1.66

И при pyOASIS ESA обикновено води до по-положително систематично отместване, докато JPL и UPC дават по-ниски или отрицателни стойности. През 2025 г. например систематичното отместване се изменя от **+4.52 TECU спрямо ESA** до **−1.72 TECU спрямо UPC**.

Сходният характер на тези различия при PyTECGg и pyOASIS показва, че значителна част от изменението на абсолютното отместване е свързана с различията между самите глобални йоносферни карти, а не единствено с локалния метод за определяне на TEC.



Фигура 5.16. Годишно систематично отместване на pyOASIS VTEC спрямо глобалните йоносферни карти CODE, ESA, JPL и UPC.

2. Устойчивост на разликата между PyTECGg и pyOASIS

За да се отдели влиянието на избрания GIM от различията между двата локални метода е определена разликата между техните систематични отмествания спрямо един и същ GIM продукт:

(90) $$\Delta Bias_g = Bias_{PyTECGg,g} - Bias_{pyOASIS,g}$$

При еднакви сравнявани денонощия тази величина показва относителното положение между PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC, като общата референтна карта в значителна степен се елиминира от сравнението.

Таблица 5.18. Разлика между систематичните отмествания на PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC спрямо отделните GIM продукти

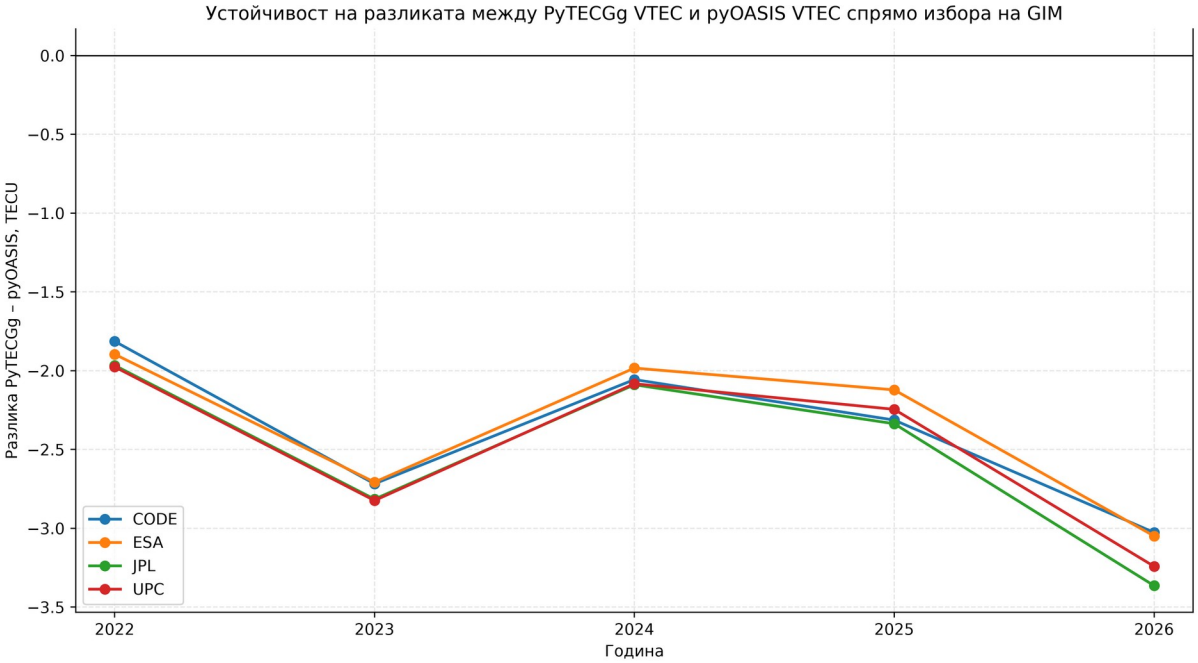
Година	CODE, TECU	ESA, TECU	JPL, TECU	UPC, TECU
2022	−1.81	−1.90	−1.97	−1.98
2023	−2.72	−2.71	−2.82	−2.82
2024	−2.06	−1.98	−2.09	−2.08
2025	−2.31	−2.12	−2.34	−2.25
2026*	−3.03	−3.05	−3.36	−3.24

** За 2026 г. PyTECGg и pyOASIS не разполагат с напълно еднакъв брой общи денонощия, поради което стойностите следва да се разглеждат предпазливо.*

Тук се наблюдава съществено различна картина. Докато абсолютното систематично отместване спрямо отделните GIM продукти може да се различава с няколко TECU и дори да променя знака си, **разликата между PyTECGg и pyOASIS остава много близка независимо от използваната глобална карта**.

През 2022 г. например разликата варира само между **−1.81 и −1.98 TECU**, т.е. в диапазон около 0.16 TECU. През 2023 г. тя е между **−2.71 и −2.82 TECU**, а през 2024 г. – между **−1.98 и −2.09 TECU**. През 2025 г. диапазонът остава сравнително тесен – приблизително **−2.12 до −2.34 TECU**.

Следователно, макар абсолютното положение на двата метода спрямо глобалните карти да зависи силно от избрания GIM продукт, **относителната разлика между PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC е значително по-слабо чувствителна към този избор**. Това поведение е заложено и като отделна диагностична проверка в разработената процедура, която изчислява разликата между систематичните отмествания на двата метода за всеки GIM продукт.



Фигура 5.17. Разлика между систематичните отмествания на PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC при използване на CODE, ESA, JPL и UPC.

*Забележка: Фигура 5.17 включва данни само от **2022–2025 г.**, защото през тези години двата метода са върху еднакъв брой общи денонощия с налични данни. 2026 г. не е включена, тъй като PyTECGg има 8, а pyOASIS 7 общи денонощия, което би направило директното сравнение по-малко чисто.*

3. *Средноквадратична грешка и корелация*

Различия между глобалните карти се наблюдават и при средноквадратичната грешка. Например през 2024 г. RMSE за PyTECGg VTEC е **3.65 TECU спрямо CODE**, **4.07 TECU спрямо ESA**, **4.66 TECU спрямо JPL** и **5.60 TECU спрямо UPC**. За pyOASIS съответните стойности са **3.14, 4.58, 3.42 и 4.20 TECU**.

Независимо от различията в абсолютното ниво, корелацията между локалните решения и индивидуалните GIM продукти в много от случаите остава висока. През 2024 г. коефициентът на Пирсън за PyTECGg VTEC е в границите приблизително **0.924–0.968**, а за pyOASIS VTEC – **0.915–0.969**. Това отново показва, че различията в абсолютното ниво не означават непременно различен характер на времевото изменение.

4. *Обобщение*

Съпоставката с CODE, ESA, JPL и UPC показва, че **абсолютната оценка на систематичното отместване спрямо глобална йоносферна карта е чувствителна към избора на конкретния GIM продукт**. В някои случаи различните карти водят дори до противоположен знак на полученото отместване.

За разлика от това относителното положение между PyTECGg VTEC и pyOASIS VTEC се запазва в значително по-тесни граници при използване на четирите GIM продукта. За общите денонощия през 2022–2025 г. PyTECGg VTEC е средно с

приблизително **1.8–2.8 TECU по-нисък от pyOASIS VTEC**, като конкретният избор между CODE, ESA, JPL и UPC оказва сравнително малко влияние върху тази разлика.

Този резултат е важен за интерпретацията на предходните проверки. Той показва, че част от абсолютните различия спрямо IGS или отделен GIM могат да бъдат свързани с характеристиките на самия референтен продукт, докато установената разлика между двата локални метода е значително по-устойчива спрямо избора на глобална йоносферна карта.

Следователно анализът с четирите индивидуални GIM продукта **не представлява четири отделни независими валидации**, а проверка на устойчивостта на получените изводи спрямо избора на глобален референтен продукт. Резултатите потвърждават, че основните различия между PyTECGg и pyOASIS не могат да бъдат обяснени единствено с избора на конкретен GIM продукт.

5.7. Формиране на единна времево съгласувана извадка за многогодишния анализ

След приключване на отделните валидационни и сравнителни проверки е необходимо резултатите от различните източници да бъдат приведени към обща времева основа. Това е особено важно при многогодишния анализ, тъй като PyTECGg, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI имат различна времева дискретност и различна наличност на данните. Директното сравнение на статистики, получени от различен брой епохи или от различни части на денонощието, би могло да въведе допълнителни различия, които не са свързани с физическото изменение на йоносферата.

Поради това е формирана **единна времево съгласувана извадка**, в която основната времева стъпка е един час (*common hour*). За всяка часова епоха се проверява наличността на съответните TEC оценки и при необходимост се прилагат вече описаните в предходните раздели критерии за времево и пространствено съгласуване. PyIRI предоставя стойност точно за съответния цял час, PyTECGg VEq се избира в рамките на максимално времево отклонение 60 s, стойността от IGS Final GIM се интерполира за местоположението на KOH2 и съответната часова епоха, а при Madrigal се използва най-близката действително налична стойност при времево отклонение до 180 s и пространствено разстояние до 80 km.

По този начин за всяка часова епоха се получава набор от стойности, отнесени към една и съща времева основа. Не се извършва допълнителна интерполация на липсващи локални или Madrigal стойности с цел изкуствено запълване на времевите редове. Ако даден продукт не отговаря на съответния критерий за наличност, часовата епоха се отбелязва като непълна за съпоставките, изискващи този продукт.

1. *Строга обща часова извадка*

За анализите, при които се извършва непосредствено сравнение между PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI, е използвана и по-ограничена **строга обща часова извадка**. В нея се включват само епохите, за които едновременно са налични валидни стойности от четирите източника.

За периода 2019–2026 г. по този критерий са получени общо **6983 часови епохи**, разпределени в **325 денонощия с налични данни (**Таблица 5.19). Първоначалният набор съдържа 326 денонощия, но за едно от тях – 30 декември 2021 г. – не е формирана нито една часова епоха с едновременна наличност на всички четири продукта.

Таблица 5.19. Наличност на строгата обща часова извадка през периода 2019–2026 г.

Година	Денонощия с общи данни	Общи часови епохи
2019	4	94
2020	23	536
2021	17	295
2022	28	623

2023	32	739
2024	176	3755
2025	37	797
2026	8	144
Общо	**325**	**6983**

Средният брой общи часови епохи за едно денонощие е приблизително **21.5**, а медианата е **22 часа**. Това показва, че в преобладаващата част от включените денонощия е постигнато почти пълно часово покритие, макар че при отделни случаи наличността е значително по-малка.

2. Съобразяване с неравномерното времево покритие

При интерпретацията на многогодишните резултати трябва да се отчита, че наличността на данните не е равномерно разпределена между отделните години и сезони. Особено голям дял от общата извадка се пада на 2024 г., докато 2019, 2021 и 2026 г. са представени от сравнително ограничен брой денонощия.

Налице е и изразена сезонна неравномерност. Данните за 2019 г. са от декември, за 2020 г. – основно от януари, за 2021 г. – от март и април, за 2022 г. – от януари и февруари, а за 2025 г. – от януари и февруари. Най-широко сезонно покритие е налично през 2024 г., когато данните обхващат няколко различни части на годината.

Поради тази причина годишните статистики в следващия многогодишен анализ **не трябва да се интерпретират като пълни средногодишни климатологични характеристики за съответната календарна година**. Те описват условията през наличните периоди на наблюдение. Това ограничение е особено важно при разграничаването на изменението, свързано със слънчевия цикъл, от възможното влияние на сезонното разпределение на данните.

За намаляване на влиянието на неравномерния брой часови епохи при годишното обобщение, когато е приложимо, първо се формират статистики за отделните денонощия, след което те се обединяват така, че всяко денонощие да участва с еднаква статистическа тежест. По този начин денонощията с почти пълни 24-часови данни не получават непропорционално по-голямо влияние спрямо денонощията с по-малък брой валидни епохи.

3. Роля на хармонизираната извадка в последващия анализ

Формираната времево съгласувана извадка осигурява обща основа за сравнение на различните TEC продукти и за проследяване на многогодишните изменения над KOH2. Тя позволява статистическите зависимости да бъдат оценявани върху действително съвпадащи времеви периоди, без различната наличност на отделните продукти да се смесва с физическото изменение на йоносферното електронно съдържание.

Тази извадка служи и като преход между валидационната част на изследването и последващия анализ на измененията на TEC през 25-ия слънчев цикъл. В следващата глава акцентът се измества от оценката на съгласуваността между отделните методи към времевото развитие на TEC над о-в Ливингстън и връзката му с измененията на слънчевата активност.

5.8. Обобщение

В настоящата глава е извършена последователна оценка на надеждността, съпоставимостта и устойчивостта на получените TEC решения за станция KOH2. Анализът обхваща както сравнения с външни глобални и регионални GNSS-базирани продукти, така и съпоставка с емпиричен йоносферен модел. Основната цел е да се установи доколко резултатите от използваните локални методи запазват своите характеристики при различни референтни източници и при различни пространствено-времеви условия на сравнение.

Съпоставката с **IGS Final GIM** показа добро съответствие във времевото изменение на VTEC, но и наличие на систематични разлики, чиято големина се изменя между отделните години. Резултатите потвърждават, че IGS Final GIM може да се използва като подходящ референтен продукт за оценка на локалните решения, без това да означава, че глобалната карта се приема за абсолютно точна оценка на йоносферното електронно съдържание.

Допълнителната проверка с **Madrigal GNSS TEC** даде сходна обща картина, но при независимо формиран регионален набор от GNSS оценки и без интерполация на самите Madrigal стойности. Анализът на използваните входни станции показа, че KOH2 не е идентифицирана като входна станция за разглежданите налични случаи, което увеличава практическата независимост на съпоставката. Независимо от това Madrigal остава GNSS-базиран продукт и поради тази причина резултатите се разглеждат като външно сравнение, а не като независима физична референция.

Съпоставката с **PyIRI** има различна роля. Тя не представлява валидация чрез независимо наблюдение, а сравнение с емпирично климатологично представяне на йоносферата. Получените резултати показват, че PyIRI в много от разглежданите периоди дава по-ниски VTEC стойности спрямо GNSS-базираните продукти, като големината на разликите се изменя съществено във времето. Интерпретацията на тези различия е ограничена и от неравномерното сезонно покритие на наличните данни, както и от факта, че F10.7 участва като входен параметър на модела.

Проверката с индивидуалните глобални йоносферни карти на **CODE, ESA, JPL и UPC** показа, че абсолютното систематично отместване на локалните TEC решения е чувствително към избора на конкретен GIM продукт. В отделни случаи промяната на използваната глобална карта води дори до промяна на знака на систематичното отместване. За разлика от това относителната разлика между PyTECGg и pyOASIS се запазва в значително по-тесни граници при използване на различните GIM продукти. Това показва, че установеното различие между двата локални метода не е следствие единствено от избора на конкретна глобална йоносферна карта.

За осигуряване на съпоставимост между различните източници е формирана и единна времево съгласувана извадка. Тя позволява анализът да се извършва върху действително съвпадащи часови епохи и ограничава влиянието на различната наличност на отделните продукти. Същевременно неравномерното разпределение на данните между отделните години и сезони остава важно ограничение и трябва да бъде отчитано при последващата интерпретация на многогодишните изменения.

Като цяло извършените проверки показват, че получените TEC решения възпроизвеждат устойчиво основните времеви изменения на йоносферното електронно съдържание, докато абсолютните разлики спрямо отделните външни продукти зависят от конкретния референтен източник и периода на наблюдение. Това разграничение между **устойчивост на времевото изменение** и **чувствителност на абсолютното ниво** е съществено за правилното тълкуване на резултатите.

6. МНОГОГОДИШНИ ИЗМЕНЕНИЯ НА TEC ПРЕЗ 25-ИЯ СЛЪНЧЕВ ЦИКЪЛ

След извършената в предходната глава оценка на надеждността и устойчивостта на използваните TEC решения анализът в тази глава акцентира върху многогодишното изменение на йоносферното електронно съдържание над станция KOH2. Основната цел е да се проследи изменението на TEC през наличния период 2019–2026 г. и да се оцени неговата връзка със слънчевата активност през 25-ия слънчев цикъл.

За тази цел се използват резултатите от обработката на GNSS наблюденията на KOH2, представени чрез VEq и VTEC, както и съответните показатели за слънчевата активност. Основният параметър за характеризиране на слънчевото радиовъздействие е F10.7. Международният брой на слънчевите петна (International Sunspot Number) от SILSO е използван като допълнителен независим показател при корелационните проверки на дългопериодичната слънчева активност, но не е включван едновременно с F10.7 в основния регресионен модел. Допълнително са използвани показателите Kp, Ap_{daily}, Dst и SYM-H за оценка на връзката между геомагнитната активност и отклоненията от общото многогодишно поведение на TEC, както и за изследване на измененията в съгласуваността между отделните TEC продукти при геомагнитно смутени условия.

За разлика от валидационните сравнения в Глава 5, където основният акцент е върху разликите между отделните TEC продукти, тук водещо значение има времевото изменение на самото йоносферно електронно съдържание. Анализът включва денонощно и месечно обобщаване на наличните наблюдения, сравнение между отделните години, оценка на зависимостта от F10.7 и изследване на възможни времеви закъснения между измененията на слънчевата активност и реакцията на йоносферата.

Съществено ограничение при интерпретацията е неравномерното разпределение на наличните GNSS наблюдения. Отделните години не са представени с еднакъв брой денонощия и не обхващат еднакви сезони. Поради това стойностите, получени за дадена година, не се разглеждат автоматично като климатологична средна стойност за цялата календарна година. Когато се сравняват различни години, се отчита както различният брой денонощия с данни, така и сезонното им разпределение.

За ограничаване на влиянието на неравномерната плътност на наблюденията при многогодишните обобщения се използва подход, при който първо се определят статистики за отделните денонощия, а след това те се обединяват с еднаква статистическа тежест. По този начин денонощията с по-голям брой валидни наблюдения не доминират непропорционално върху резултата.

6.1. Изходни данни и показатели за многогодишния анализ

Основният набор за анализа включва TEC стойностите, получени от GNSS наблюденията на KOH2 през периода 2019–2026 г. За проследяване на многогодишното изменение се използват преди всичко резултатите от PyTECGg, тъй като те осигуряват единна последователност от оценки за местоположението на станцията и позволяват непосредствено сравнение със слънчевите индекси. Като основно локално TEC решение за многогодишния анализ е избран PyTECGg VEq. Изборът не е обусловен от предположение за по-висока точност на PyTECGg спрямо pyOASIS, а от различния начин, по който двата метода представят резултатите. PyTECGg предоставя единна VEq стойност, отнесена към местоположението на KOH2, което позволява формирането на пространствено еднороден времеви ред и непосредственото му съпоставяне с показателите за слънчева и геомагнитна активност. За разлика от това основният резултат от pyOASIS представлява VTEC, определен по отделните спътникови направления и отнесен към съответните йоносферни прободни точки. Следователно непосредственото осредняване на тези стойности за многогодишен анализ би съчетало действителното времево изменение на йоносферата с измененията в пространственото разпределение на прободните точки, броя на наблюдаваните спътници и геометрията на наблюденията. Поради тази причина pyOASIS е използван основно като независима

локална обработка при валидационните и сравнителните проверки в Глава 5, докато PyTECGg VEq е избран за основния анализ на многогодишното изменение над местоположението на KOH2.

При анализа могат да бъдат разграничени две нива на времево обобщаване:

- **Денонощно ниво.** За всяко денонощие с достатъчно налични данни се определя представителна TEC стойност. Тези стойности запазват значителна част от краткопериодичната изменчивост и позволяват да се проследят както постепенните изменения, така и отделни периоди с необичайно високи или ниски стойности.
- **Месечно ниво.** Денонощните резултати се обединяват по месеци, което намалява влиянието на краткотрайните вариации и позволява по-ясно да се проследи общата тенденция през слънчевия цикъл. Месечните стойности са особено подходящи при съпоставянето с месечно осреднените показатели за слънчевата активност.

Като основен показател за слънчевата активност се използва потокът на слънчевото радиоизлъчване при дължина на вълната 10.7 cm – **F10.7**, изразен в solar flux units (sfu). Този индекс е широко използван като показател за изменението на слънчевото екстремно ултравиолетово излъчване и съответно за изменението на йонизацията в горната атмосфера. В настоящото изследване F10.7 се използва като независима времева променлива при оценката на статистическата зависимост между слънчевата активност и наблюдавания TEC.

За всяко налично денонощие към TEC стойността се съпоставя съответната стойност на F10.7. При месечните анализи се използват обобщени стойности за съответния месец, така че TEC и слънчевият индекс да бъдат представени на еднаква времева основа.

6.2. Годишни изменения на VTEC през периода 2019–2026 г.

За първоначална оценка на многогодишното изменение на йоносферното електронно съдържание са определени средни стойности за всяка година, като първо се формира средна стойност за всяко денонощие, а след това наличните денонощия участват с еднаква статистическа тежест в годишното обобщение. По този начин се ограничава влиянието на различния брой часови наблюдения в отделните денонощия.

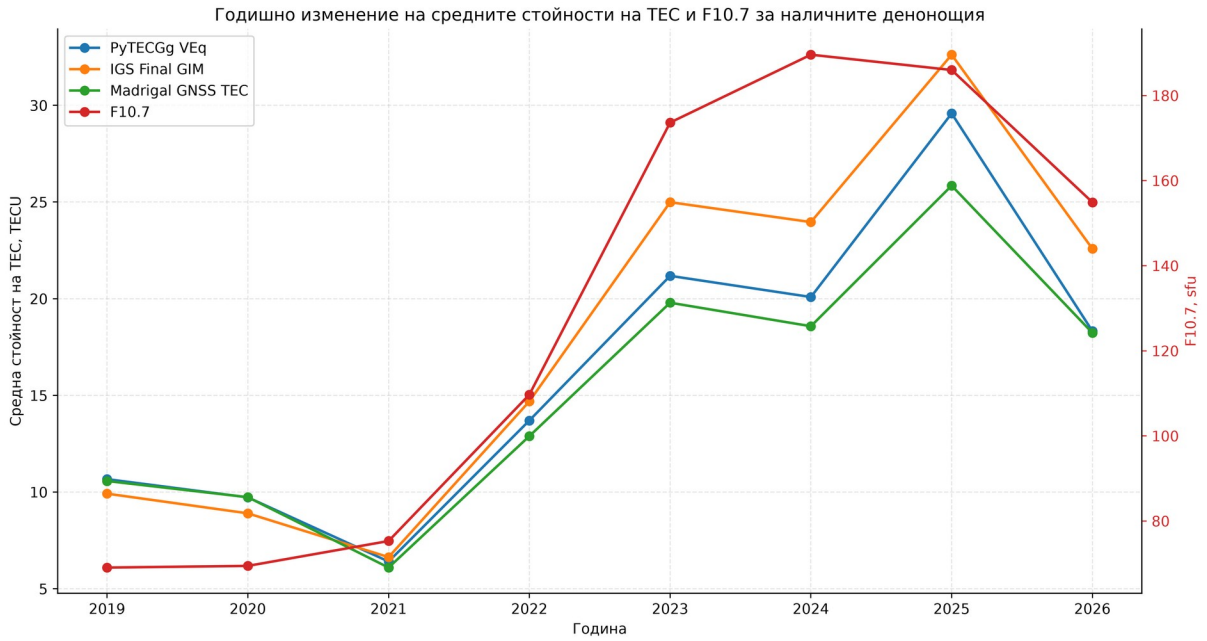
В Таблица 6.1 са представени годишните стойности на PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI, заедно със средния F10.7 за съответните налични периоди. Стойностите не представляват пълни средногодишни климатологични характеристики, тъй като наблюдателното покритие между отделните години е силно неравномерно.

Таблица 6.1. Средни стойности на TEC и F10.7 за наличните денонощия през периода 2019–2026 г.

Година	Денонощия с данни	F10.7, sfu	PyTECGg VEq, TECU	IGS Final GIM, TECU	Madrigal, TECU	PyIRI, TECU
2019	4	69.1	10.67	9.92	10.57	7.38
2020	23	69.4	9.73	8.90	9.73	7.07
2021	18	75.3	6.41	6.64	6.09	4.43
2022	28	109.7	13.70	14.69	12.89	10.26
2023	32	173.6	21.18	24.99	19.79	16.53
2024	176	189.6	20.09	23.96	18.58	17.37
2025	37	186.0	29.58	32.62	25.85	20.39
2026	8	154.9	18.32	22.58	18.23	15.65

Между 2019 и 2020 г. стойностите на F10.7 са около 69 sfu и съответстват на ниската активност в началото на 25-ия слънчев цикъл. През 2021 г. средният F10.7 нараства сравнително слабо до 75.3 sfu, а от 2022 г. започва ясно изразено увеличение – до 109.7 sfu през 2022 г. и 173.6 sfu през 2023 г. За наличните наблюдения най-високата

средна стойност на F10.7 е получена през 2024 г. – 189.6 sfu, след което остава близка по големина през 2025 г. и намалява до 154.9 sfu през наличните денонощия на 2026 г. (Фигура 6.1).



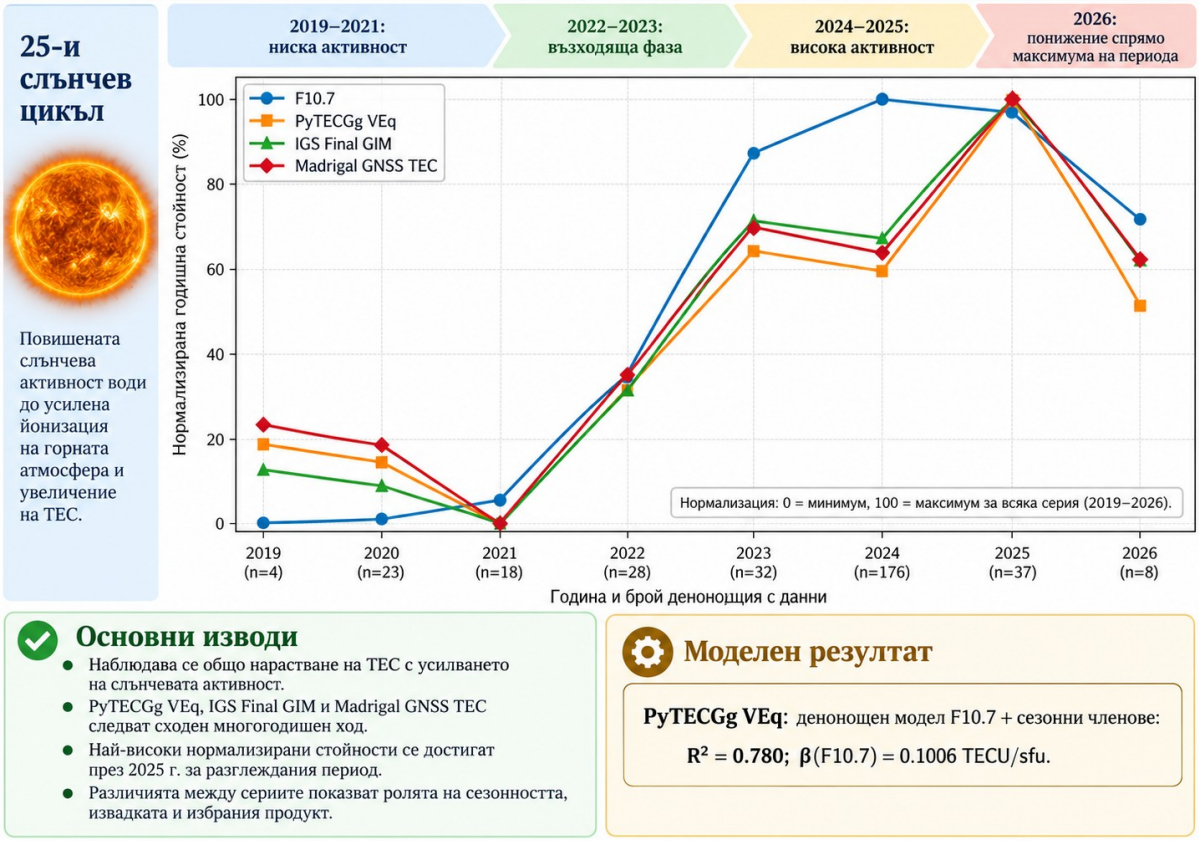
Фигура 6.1. Годишни средни стойности на PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и F10.7 за наличните 24-часови наблюдения през 2019–2026 г.

Изменението на GNSS-базираните TEC оценки в общи линии следва нарастването на слънчевата активност. При PyTECGg VEq средната стойност се увеличава от около 10 TECU в началото на периода до 21.18 TECU през 2023 г. и достига 29.58 TECU през наличните денонощия на 2025 г. Подобен многогодишен ход се наблюдава при IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC, чиито средни стойности през 2025 г. са съответно 32.62 и 25.85 TECU.

Годишното изменение обаче не е монотонно. През 2024 г. PyTECGg VEq намалява до 20.09 TECU спрямо 21.18 TECU през 2023 г., въпреки че средният F10.7 нараства до максималната за разглеждания набор стойност. През 2025 г. VEq се увеличава значително, макар средният F10.7 да е малко по-нисък от този през 2024 г. Аналогично поведение се наблюдава при IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI, което показва, че особеността не е свързана с конкретния метод за определяне на TEC.

При интерпретацията на тези разлики трябва да се отчита неравномерното сезонно и времево покритие на наблюденията. През 2024 г. са налични 176 денонощия, обхващащи значително по-широка част от годината, докато наблюденията през 2025 г. са концентрирани основно през януари и февруари. Подобен ефект се проявява и през 2021 г., когато при сравнително близък до 2019–2020 г. F10.7 е получен минимум на TEC при всички разглеждани продукти. Следователно годишните стойности характеризират конкретно наличните периоди и съдържат едновременно влиянието на слънчевата активност, сезонната изменчивост и разпределението на наблюденията през годината.

Независимо от тези различия между отделните години, в по-дълъг времеви мащаб е ясно изразен преходът от ниската слънчева активност през 2019–2021 г. към по-високата активност през 2022–2025 г., съпроводен от общо нарастване на TEC. За да се сравни непосредствено формата на многогодишното изменение на величини с различни физични единици и диапазони, отделните серии са нормализирани независимо между минималната и максималната им стойност за периода 2019–2026 г. (Фигура 6.2).



Фигура 6.2. Съпоставимост на многогодишното изменение на PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC с изменението на слънчевия радиопоток F10.7 през периода 2019–2026 г. (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

Фигура 6.2 подчертава сходството в общия многогодишен ход на F10.7 и наблюдателно базираните TEC продукти през възходящата фаза на 25-ия слънчев цикъл. Разминаването през 2024 г. не е породено от нормализацията, тъй като се наблюдава и при абсолютните стойности на Фигура 6.1; нормализираното представяне само го прави визуално по-отчетливо. Това потвърждава необходимостта влиянието на слънчевата активност да се разглежда съвместно със сезонността и времевото покритие на наблюденията.

Неравномерният брой денонощия между отделните години може да повлияе и върху параметрите на регресионния модел. Поради това влиянието му е проверено отделно чрез WLS анализ, при който всяка година получава еднаква обща статистическа тежест.

6.3. Месечно изменение на VTEC и F10.7 през периода 2019–2026 г.

Годишното обобщаване, разгледано в §6.2, позволява да се проследи общото изменение на йоносферното електронно съдържание през наличния период, но същевременно прикрива значителна част от изменчивостта в рамките на отделните години. Поради това е извършен допълнителен анализ на месечна времева основа, който позволява по-детайлно да се проследи съвместното изменение на VTEC и слънчевия радиоиндекс F10.7.

За непосредствената съпоставка между отделните TEC продукти е използвана строгата обща часова извадка, формирана само от епохите, за които едновременно са налични валидни стойности от PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI.

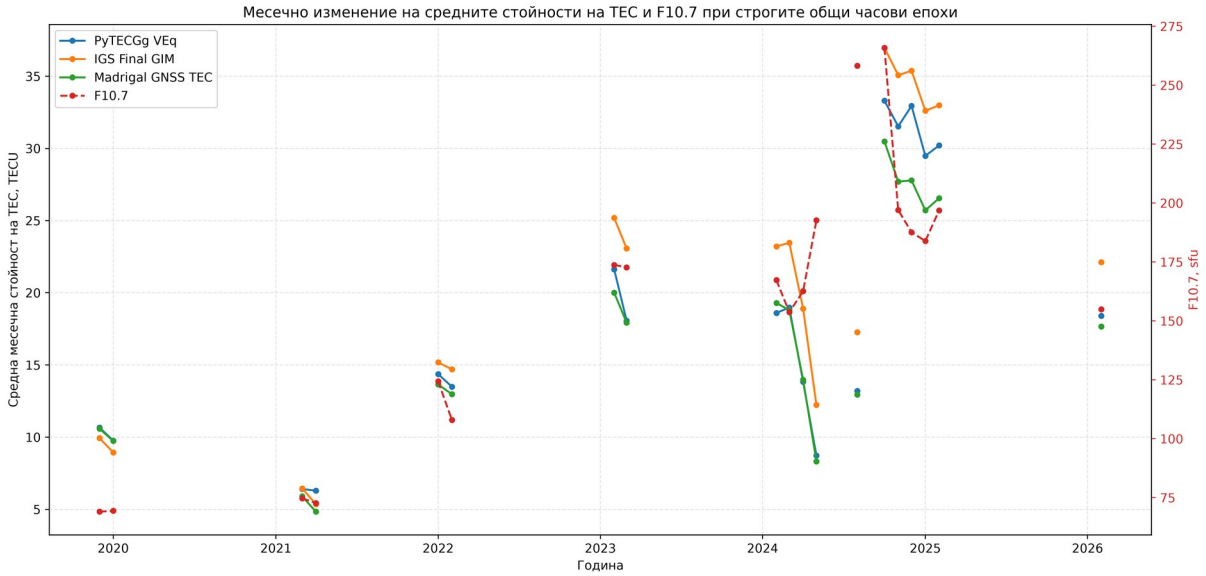
Валидираният набор съдържа общо **6983 общи часови епохи**, разпределени в **325 денонощия с данни** и **19 месеца с налични общи стойности**.

Месечното обобщаване е извършено на два последователни етапа. Първо за всяко денонощие се определя средната стойност на съответния TEC продукт от наличните общи часови епохи. След това месечната стойност се формира като средна от денонощните стойности. По този начин всяко денонощие участва с еднаква статистическа тежест, независимо от конкретния брой валидни часови епохи в него. F10.7 се обработва по аналогичен начин – използвана е една стойност за денонощието, след което е извършено месечно осредняване.

Схематично използваното обобщаване може да бъде представено като:

общи часови епохи → средна стойност за денонощието → средна месечна стойност

Липсващите месеци не се интерполират и не се запълват със синтетични стойности. Те се запазват като прекъсвания във времевия ред, така че графичното представяне да отразява действителната наличност на наблюденията. Това е особено важно при настоящия набор, тъй като данните не осигуряват непрекъснато месечно покритие за целия период 2019–2026 г.



Фигура 6.3. Месечно изменение на средните стойности на PyTECGg VEq, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и F10.7 за наличните общи часови епохи през периода 2019–2026 г.

Месечното представяне на Фигура 6.3 показва, че трите GNSS-базирани оценки следват сходно общо времево изменение. Периодите с по-високи стойности на PyTECGg VEq обикновено съответстват и на по-високи стойности на IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC. Различията между абсолютните им нива, установени още при валидационния анализ, остават видими, но не променят общия характер на времевото изменение.

С увеличаването на F10.7 през възходящата и високата фаза на 25-ия слънчев цикъл се наблюдава и общо увеличение на VTEC. Това съответствие е особено отчетливо при преминаването от периодите с ниска слънчева активност в началото на разглеждания интервал към по-високите стойности през 2023–2025 г. Независимо от тази обща зависимост, месечните TEC стойности не следват F10.7 еднозначно и пропорционално. В отделни периоди сходни стойности на слънчевия радиоиндекс съответстват на различни нива на VTEC.

Това поведение показва, че слънчевата активност е само един от факторите, определящи многогодишното изменение на йоносферното електронно съдържание над о-в Ливингстън. Върху наблюдаваните стойности влияят също сезонните изменения, геомагнитната активност и динамичните процеси в системата термосфера–йоносфера. Поради това визуалното съответствие между VTEC и F10.7 не следва да се интерпретира само по себе си като количествена оценка на влиянието на слънчевата активност.

Неравномерното сезонно покритие остава съществено ограничение и при месечния анализ. Наличните 19 месеца не представляват непрекъсната месечна последователност за периода 2019–2026 г. Следователно фигурата характеризира изменението през реално наличните периоди с данни, а не пълна месечна климатология на TEC за всяка календарна година. Това ограничение трябва да бъде отчитано особено при непосредствено сравнение между различни години.

Месечният анализ обаче предоставя по-подходяща основа от годишните средни стойности за разграничаване на влиянието на слънчевата активност от сезонната изменчивост. Поради това в следващия раздел зависимостта между VTEC и F10.7 се оценява количествено чрез регресионен модел, в който наред със слънчевия радиоиндекс са включени и годишна и полугодишна сезонна компонента.

Денонощните средни стойности не се разглеждат като отделен многогодишен времеви ред в настоящия раздел, тъй като неравномерната наличност на наблюденията би затруднила непосредствената визуална интерпретация. Те обаче се запазват като основна времева единица при последващия статистически анализ. Именно денонощните стойности се използват при оценката на зависимостта от F10.7, сезонността и геомагнитната активност.

6.4. Зависимост на VTEC от слънчевата активност и сезонността

Наблюдаваното в §6.2 и §6.3 общо съответствие между увеличаването на VTEC и нарастването на F10.7 е оценено количествено чрез регресионен анализ. За разлика от непосредствената корелация между двете величини, използваният модел отчита и сезонното изменение на йоносферното електронно съдържание. Това е необходимо, тъй като наличните наблюдения за KOH2 са неравномерно разпределени както между отделните години, така и между отделните сезони.

За всяко денонощие са използвани средните TEC стойности, получени от строгата обща часова извадка. Като основен показател за слънчевата активност е използван F10.7, а сезонността е представена чрез годишна и полугодишна хармонична компонента. В използваната процедура моделът има вида $VTEC \sim F10.7 +$¿ годишни и полугодишни хармонични членове.

За денонощието d моделът може да бъде записан като:

(91) $$VTEC_d = \beta_0 + \beta_1 F10.7_d + \beta_2 \sin\left(\frac{2\pi DOY_d}{365.25}\right) + \beta_3 \cos\left(\frac{2\pi DOY_d}{365.25}\right) + \beta_4 \sin\left(\frac{4\pi DOY_d}{365.25}\right) + \beta$$

където DOY_d е номерът на денонощието в годината, β_1 характеризира изменението на VTEC, свързано с изменението на F10.7 при отчетена сезонна компонента, а ε_d е разликата между наблюдаваната и определената от модела стойност. Годишната сезонна компонента е представена чрез синусов и косинусов член с период една година, а полугодишната – чрез аналогична двойка с два цикъла годишно. Точно тези пет входни променливи (фактори) в регресионния модел – F10.7 и четирите сезонни хармонични члена – са използвани при изчисленията.

6.4.1. Резултати от регресионния модел

Резултатите за PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC показват ясно изразена положителна зависимост на VTEC от F10.7 и в трите разглеждани GNSS-базирани времеви реда. При първоначалния модел, в който всяко налично денонощие участва с еднаква статистическа тежест, коефициентът на детерминация R^2 е 0.780 за PyTECGg VEq, 0.759 за IGS Final GIM и 0.740 за Madrigal GNSS TEC. Следователно комбинацията от F10.7 и сезонните хармонични членове описва приблизително 74–78% от изменчивостта на разглежданите денонощни VTEC стойности.

Таблица 6.2. Резултати от регресионния анализ на VTEC спрямо F10.7 и сезонните компоненти

TEC продукт	**n**	R^2**, OLS**	**RMSE, TECU**	$\beta_{F\,10.7}$**, TECU/sfu**	**p за F10.7**
PyTECGg VEq	325	0.780	4.337	0.1006	8.21×10^{-55}
IGS Final GIM	326	0.759	4.869	0.1279	7.99×10^{-65}
Madrigal GNSS TEC	326	0.740	3.972	0.0871	6.07×10^{-51}

Стойностите на коефициента пред F10.7 са положителни и статистически значими и при трите продукта. За PyTECGg VEq коефициентът е **0.1006 TECU/sfu**, за IGS Final GIM – **0.1279 TECU/sfu**, а за Madrigal GNSS TEC – **0.0871 TECU/sfu**.

За по-непосредствена физична интерпретация тези стойности могат да бъдат представени за изменение на F10.7 със 100 sfu. При непроменена сезонна компонента моделът съответства на увеличение приблизително с **10.1 TECU за PyTECGg VEq, 12.8 TECU за IGS Final GIM и 8.7 TECU за Madrigal GNSS TEC** при увеличение на F10.7 със 100 sfu (Фигура 6.4).

Тези стойности не следва да се интерпретират като универсални коефициенти на реакция на йоносферата. Те характеризират конкретния набор от налични наблюдения над KOH2 през периода 2019–2026 г. и са получени при едновременно статистическо отчитане на годишната и полугодишната сезонност.

6.4.2. Проверка на влиянието на неравномерното разпределение на данните между годините

Съществена особеност на използвания набор е много по-големият брой денонощия с данни през 2024 г. в сравнение с останалите години. При обикновената регресия с най-малки квадрати всяко денонощие има еднаква статистическа тежест и поради това годината с най-голям брой наблюдения може да оказва непропорционално влияние върху определените коефициенти.

За проверка на влиянието на неравномерния брой денонощия между отделните години е приложен **претеглен метод на най-малките квадрати (WLS)**, при който теглата са определени така, че всяка година да участва с еднаква обща статистическа тежест:

$$w_i = \frac{1}{N_{year,i}} \tag{92}$$

По този начин сумарната статистическа тежест на всяка от осемте представени години е еднаква, независимо от броя на наличните денонощия. Използваният анализ на чувствителността сравнява резултатите от регресията, определена по **метода на най-малките квадрати (OLS)**, с резултатите от регресията, определена по претегления метод на най-малките квадрати.

Таблица 6.3. Съпоставка между стандартната регресия и модела с еднаква статистическа тежест на годините

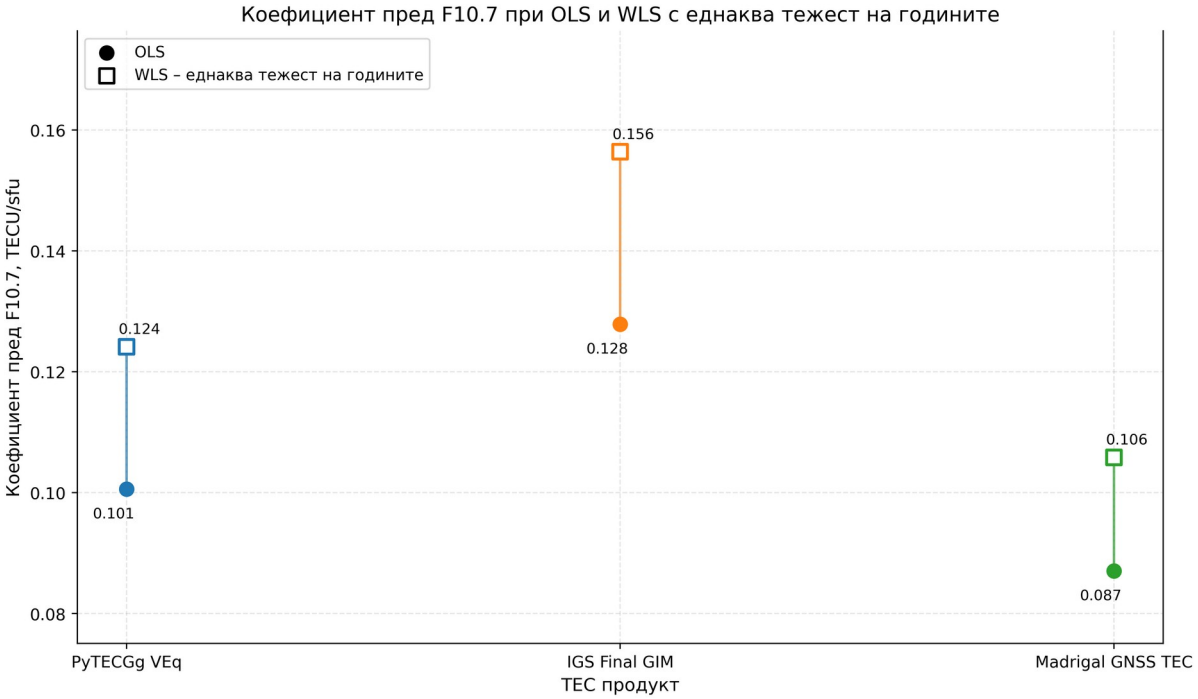
TEC продукт	R^2**, OLS**	R^2**, WLS**	**F10.7, OLS, TECU/sfu**	**F10.7, WLS, TECU/sfu**
PyTECGg VEq	0.780	0.756	0.1006	0.1241
IGS Final GIM	0.759	0.793	0.1279	0.1564
Madrigal GNSS TEC	0.740	0.747	0.0871	0.1058

След изравняването на статистическата тежест на годините коефициентът на детерминация остава висок: **0.756 за PyTECGg VEq, 0.793 за IGS Final GIM и 0.747 за Madrigal GNSS TEC**. Следователно установената зависимост между VTEC, F10.7 и сезонната компонента не е резултат единствено от големия брой наблюдения през 2024 г.

Същевременно коефициентът пред F10.7 се увеличава при претегления анализ до **0.1241 TECU/sfu за PyTECGg VEq, 0.1564 TECU/sfu за IGS Final GIM и 0.1058 TECU/sfu за Madrigal GNSS TEC**. Това представлява увеличение приблизително с 23%, 22% и 22% спрямо стандартния OLS модел. И при трите продукта коефициентът остава с много висока статистическа значимост.

Този резултат има две важни следствия. От една страна, положителната връзка между F10.7 и VTEC е устойчива спрямо начина, по който отделните години участват в регресията. От друга страна, изменението на големината на коефициента показва, че **неравномерното времево покритие влияе върху количествената оценка на зависимостта**. Поради това претегленият анализ трябва да се разглежда като важна проверка на устойчивостта, а не като напълно отделен модел на физичния процес.

За PyIRI също е получена много висока обяснителна способност на модела ($R^2 = 0.953$ при OLS и $R^2 = 0.960$ при еднаква статистическа тежест на годините), но този резултат **не се използва като независимо потвърждение на връзката между VTEC и слънчевата активност**, тъй като F10.7 участва като входен параметър при формирането на PyIRI.



Фигура 6.4. Коефициент пред F10.7 в регресионния модел на VTEC при стандартен метод на най-малките квадрати и при претеглен метод на най-малките квадрати с еднаква обща статистическа тежест на отделните години.

6.4.3. Интерпретация

Получените резултати показват, че нарастването на слънчевата активност през 25-ия слънчев цикъл е съпроводено от устойчиво увеличение на йоносферното електронно съдържание над о-в Ливингстън. Този резултат се наблюдава последователно при PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC и се запазва след статистическо отчитане на годишната и полугодишната сезонност.

В същото време $R^2<1$ и RMSE от приблизително 4–5 TECU при стандартния модел показват, че F10.7 и сезонността не описват напълно наблюдаваната изменчивост. Оставащите разлики съдържат както краткопериодична йоносферна изменчивост, така и възможен принос от геомагнитни смущения и други процеси в системата термосфера–йоносфера.

Именно тези разлики между наблюдавания VTEC и определеното от модела фоново ниво предоставят основата за следващия етап на анализа — оценката на връзката между отклоненията от фоновото изменение и геомагнитната активност.

6.5. Връзка между отклоненията от фоновия VTEC и геомагнитната активност

Докато слънчевото радиоизлъчване и сезонността определят значителна част от фоновото изменение на електронното съдържание, геомагнитните смущения могат да предизвикват допълнителни изменения с различна продължителност и знак. За да бъде ограничено смесването на тези два типа въздействие, зависимостта от геомагнитната активност е анализирана след отстраняване на описаната в §6.4 зависимост от F10.7 и сезонните компоненти. Основният анализ е извършен върху денонощните средни стойности, което осигурява съгласуваност с използваната времева разделителна способност на слънчевите и геомагнитните показатели.

6.5.1. Геомагнитни показатели и класификация на денонощията

За характеризиране на геомагнитната обстановка са използвани индексите Kp, ap[6], Dst и SYM-H. Данните за Kp, ap и Dst са получени от часовите продукти OMNI2 на NASA/SPDF, а SYM-H — от петминутните данни на High Resolution OMNI. За всяко денонощие са определени максималната стойност на **Kp**, средната стойност на наличните тричасови **ap** стойности, означена в анализа като Ap_{daily}, както и минималните стойности на Dst и SYM-H. При анализа на интензивността на смущенията отрицателните Dst и SYM-H са представени чрез положителни величини $-Dst_{min}$ и $-SYM\text{-}H_{min}$, така че по-голямата стойност да съответства на по-силно геомагнитно смущение.

За допълнително разграничаване на различните условия денонощията са класифицирани като спокойни, активни без достигане на критерия за буря и геомагнитно смутени. Като **спокойни** са определени денонощията, за които едновременно са изпълнени условията:

- $Kp_{max} < 4$
- $Dst_{min} > -30$ nT
- $SYM\text{-}H_{min} > -30$ nT

Към **геомагнитно смутените** са отнесени денонощията, за които е изпълнено поне едно от условията:

- $Kp_{max} \geq 5$

[6] Забележка: във фигури 6.5, 6.7 и 8.1 означението Ap е запазено като съкратен графичен етикет за величината Ap_{daily}, дефинирана в §3.6.5.

- $Dst_{min} \leq -50\ nT$
- $SYM\text{-}H_{min} \leq -50\ nT$

За наличния набор от данни са идентифицирани общо **168 спокойни и 63 геомагнитно смутени денонощия**. Разпределението им обаче е силно неравномерно между отделните години: през 2019 и 2020 г. в наличните наблюдения няма денонощия, отговарящи на критерия за геомагнитно смущение, докато през 2024 г. са налични 88 спокойни и 41 смутени денонощия. Поради това директното обединяване на всички денонощия може да придаде непропорционално голямо влияние на годините с по-пълно покритие.

6.5.2. Корелационен анализ след отстраняване на слънчевата и сезонната компонента

За всяко денонощие е определено отклонението на наблюдавания VTEC от стойността, предсказана от регресионния модел в §6.4:

(93) $$\Delta VTEC_d = VTEC_d - \widehat{VTEC}_d,$$

където $\widehat{VTEC}_d$ е стойността, определена от F10.7 и годишните и полугодишните сезонни хармонични членове. По този начин анализът на геомагнитната активност не се извършва върху самите стойности на VTEC, а върху отклоненията от фоновия модел, след като основната зависимост от слънчевата активност и сезонността е отстранена.

Между тези отклонения и четирите геомагнитни показателя са изчислени коефициентите на линейна корелация на Пирсън и ранговата корелация на Спирман. Тъй като едновременно са проверени множество зависимости, вероятностите са коригирани чрез процедурата на Benjamini–Hochberg за контрол на дела на погрешно отхвърлените нулеви хипотези (FDR).

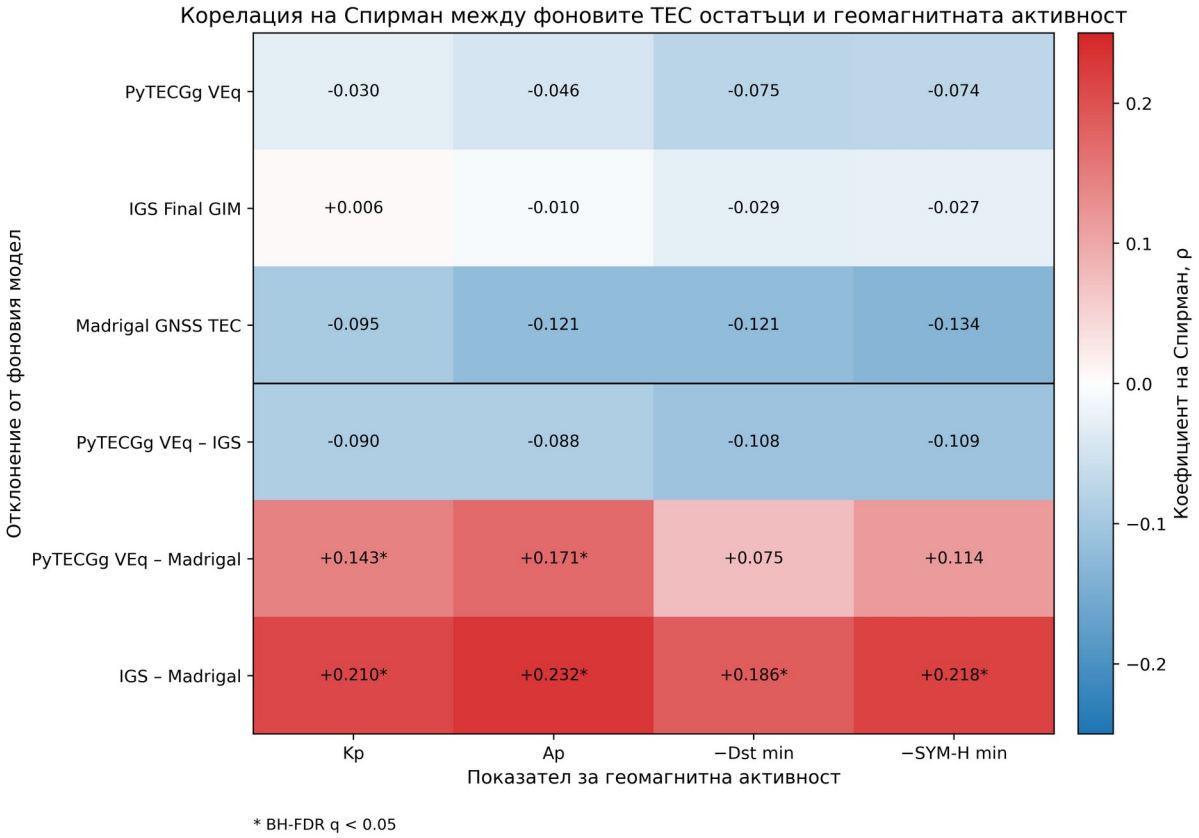
За основния локален времеви ред **PyTECGg VEq** зависимостите от интензивността на Dst и SYM-H са слаби. За SYM-H е получено $r = -0.086$ при $n = 325$, а за Dst — $r = -0.084$. Съответните рангови коефициенти на Спирман са -0.074 и -0.075. След корекцията за множествени проверки тези зависимости не са статистически значими. Аналогично слаби зависимости се установяват и за отклоненията на IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC от съответните им фонови модели.

Таблица 6.4. Връзка между отклоненията от фоновия модел и избрани показатели за геомагнитна активност

TEC ред	Геомагнитен показател	n	Pearson r	Spearman ρ	FDR-коригирана значимост
PyTECGg VEq	$-SYM-H_{min}$	325	−0.086	−0.074	няма
PyTECGg VEq	$-Dst_{min}$	325	−0.084	−0.075	няма
IGS Final GIM	$-SYM-H_{min}$	326	−0.087	−0.027	няма
IGS Final GIM	$-Dst_{min}$	326	−0.085	−0.029	няма
Madrigal GNSS TEC	$-SYM-H_{min}$	326	−0.095	−0.134	няма
Madrigal GNSS TEC	$-Dst_{min}$	326	−0.083	−0.121	няма

Получените резултати показват, че **след отстраняване на зависимостта от F10.7 и сезонността не се установява силна еднозначна зависимост между денонощните отклонения на PyTECGg VEq и интензивността на геомагнитната активност**. Това е важно, тъй като простата корелация между необработените стойности на VTEC и геомагнитните индекси би могла частично да отразява

едновременното им изменение в хода на слънчевия цикъл, а не непосредствена реакция на йоносферата към геомагнитните смущения.



Фигура 6.5. Рангов коефициент на корелация на Спирман между отклоненията от фоновия модел на TEC и показателите за геомагнитна активност

Забележка: *Фоновият модел включва зависимостта от F10.7 и годишната и полугодишната сезонна компонента. Звездичката означава статистически значима зависимост след корекция на Benjamini–Hochberg за множествени проверки* $(q<0.05)$*. При Dst и SYM-H са използвани положително дефинирани показатели за интензивността на отрицателното отклонение.*

Най-ясната статистически устойчива рангова зависимост в пълния набор от проверки е установена не за самия локален VTEC, а за **разликата между IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC** спрямо $K\,p_{max}$, за която $\rho=0.210$, а коригираната стойност е $q=0.0018$. Това подсказва, че при повишена геомагнитна активност могат да се изменят и различията между отделните глобални и регионални оценки на TEC. Този резултат обаче не трябва да се интерпретира като пряка зависимост на локалния VTEC от Kp, а като изменение на взаимното съответствие между два различни TEC продукта.

6.5.3. Съпоставка между спокойни и геомагнитно смутени денонощия

Като допълнителна оценка на връзката между геомагнитната активност и поведението на използваните TEC продукти е извършена непосредствена съпоставка между денонощията, класифицирани като спокойни и геомагнитно смутени съгласно критериите, въведени в §6.5.1. За наличния набор от данни към първата група принадлежат 168 денонощия, а към втората – 63.

Първоначално сравнението е извършено върху всички налични денонощия независимо от годината. Този подход използва максимално наличната информация, но има съществено ограничение: наблюдателното покритие е силно неравномерно и

повече от половината от целия многогодишен набор принадлежи на 2024 г. Освен това фоновото ниво на ТЕС се изменя значително в хода на 25-ия слънчев цикъл. Поради това непосредственото обединяване на всички денонощия може да отразява едновременно ефекта на геомагнитното състояние и различната представителност на отделните години.

При обединения анализ най-ясно увеличение при геомагнитно смутени условия се установява за средноквадратичната грешка спрямо IGS Final GIM. За PyTECGg VEq средната денонощна RMSE нараства от 3.19 TECU при спокойни условия до 4.64 TECU при смутени условия, т.е. с 1.45 TECU. За спътниково зависимото PyTECGg VTEC съответните стойности са 3.33 и 4.69 TECU, или увеличение с 1.36 TECU. При pyOASIS VTEC увеличението е от 2.75 на 3.58 TECU, или с 0.83 TECU. При тези обединени сравнения разликите са статистически значими и след корекцията за множествени проверки.

Значително по-слаби различия се наблюдават при съпоставката с Madrigal GNSS ТЕС. За PyTECGg VEq средната RMSE нараства от 2.73 на 3.11 TECU, а при PyTECGg VTEC – от 2.98 на 3.27 TECU. Разликите са съответно около 0.38 и 0.29 TECU и не достигат статистическа значимост след корекцията за множествени сравнения. Това показва, че влиянието на геомагнитното състояние върху взаимното съответствие на ТЕС продуктите не се проявява еднакво спрямо различните външни решения.

За да се ограничи влиянието на неравномерното наблюдателно покритие, е приложена и втора схема, при която сравнението между спокойните и смутените условия първо се извършва поотделно за всяка година. За даден показател Q е определена годишната разлика:

(94) $$\Delta Q_y = \overline{Q}_{storm,\,y} - \overline{Q}_{quiet,\,y}$$

след което получените годишни разлики са обобщени с еднаква статистическа тежест. В тази оценка участват шестте години от 2021 до 2026 г., за които в наличната извадка присъстват както спокойни, така и геомагнитно смутени денонощия.

Таблица 6.5. Изменение на избрани показатели за RMSE при геомагнитно смутени спрямо спокойни условия

Показател	**Обединена разлика storm − quiet, TECU**	**Средна годишна разлика при еднаква тежест, TECU**	**Години с положителна разлика**	**ВН-коригирана q за знаковия тест**
PyTECGg VEq – IGS RMSE	+1.446	+0.646	5 от 6	0.492
PyTECGg VTEC – IGS RMSE	+1.365	+0.707	6 от 6	0.094
pyOASIS VTEC – IGS RMSE	+0.834	+0.676	4 от 6	0.773
PyTECGg VEq – Madrigal RMSE	+0.377	+0.288	4 от 6	0.773
PyTECGg VTEC – Madrigal RMSE	+0.294	+0.359	4 от 6	0.773

След изравняване на статистическата тежест на годините посоката на изменението спрямо IGS Final GIM се запазва, но големината на ефекта намалява. За PyTECGg VEq средната от шестте годишни разлики е +0.65 TECU, като RMSE е по-голяма през смутените денонощия в пет от шестте години. При PyTECGg VTEC средната разлика е +0.71 TECU и положителна разлика се наблюдава и през шестте години. Въпреки тази последователност, след корекцията за множествени проверки знаковият тест не достига приетото ниво $q<0.05$; за PyTECGg VTEC спрямо IGS е получено $q=0.094$.

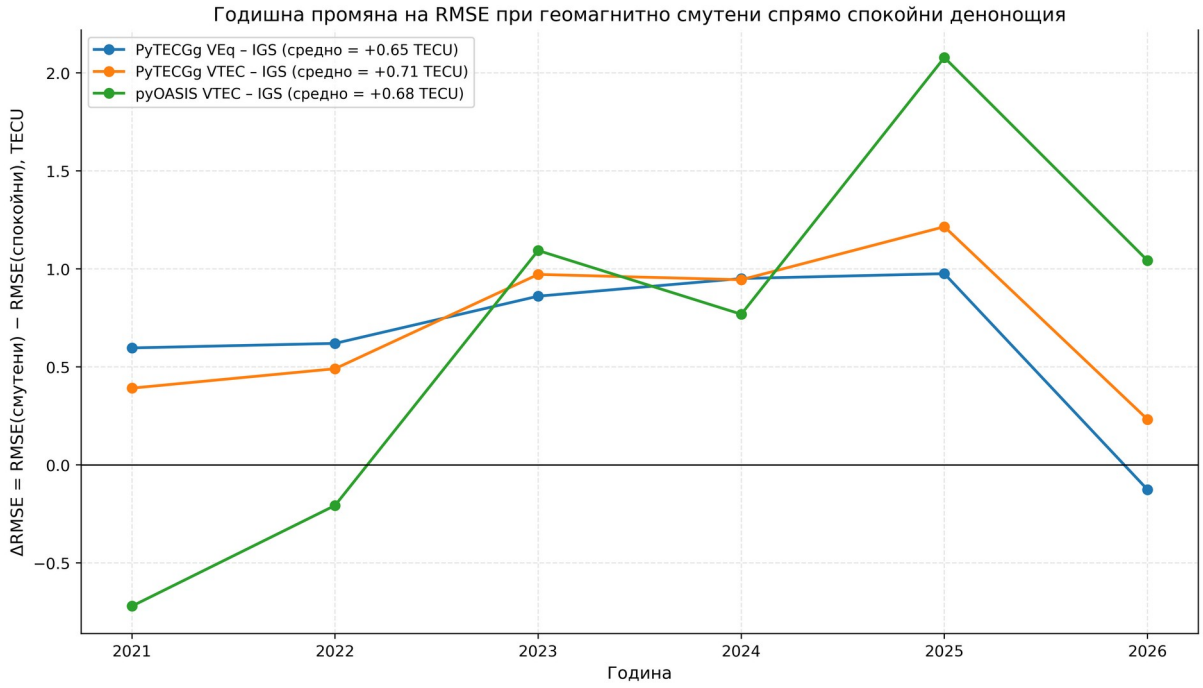
При сравнението с Madrigal годишните разлики са по-малки и по-малко последователни. Средната годишна промяна на RMSE е +0.29 TECU за PyTECGg VEq и +0.36 TECU за PyTECGg VTEC, като и в двата случая положителна разлика се

наблюдава в четири от шестте години. Следователно наличните данни не подкрепят наличие на универсално увеличение на несъответствието между всички TEC продукти при геомагнитно смутени условия.

Получените резултати показват важна разлика между анализа на обединените наблюдения и анализа, при който отделните години имат еднаква статистическа тежест. Обединеният анализ установява ясно и статистически значимо увеличение на RMSE спрямо IGS при смутени условия, докато при еднаква статистическа тежест на отделните години ефектът остава по посока на увеличаване на RMSE, но статистическата му убедителност намалява. Това показва, че част от силата на обединената зависимост е свързана с неравномерното разпределение на наблюденията между годините.

Следователно резултатите от сравнението между спокойни и смутени денонощия не дават основание да се формулира еднозначна зависимост от типа „геомагнитното смущение води до определено изменение на локалния VTEC“. По-устойчивият резултат е тенденцията към увеличаване на несъответствието между локално определените TEC стойности и IGS Final GIM при повишена геомагнитна активност. Значително по-слабата проява на същия ефект спрямо Madrigal показва, че наблюдаваната зависимост е свързана и с начина, по който различните TEC продукти представят пространствено-времевата структура на йоносферата.

Сравнението само между две категории геомагнитни условия обаче не отчита възможността йоносферният отговор да бъде изместен във времето спрямо максимума на геомагнитното смущение. Поради това в следващия подраздел зависимостите са анализирани и при времево отместване от един и два календарни дни.



Фигура 6.6. Годишна разлика между средноквадратичната грешка при геомагнитно смутени и спокойни денонощия за съпоставките на локалните TEC решения с IGS Final GIM.

Забележка: *Положителните стойности означават по-голяма RMSE при геомагнитно смутени условия. Посочените в легендата средни стойности са изчислени при еднаква статистическа тежест на отделните години.*

6.5.4. Анализ на зависимостите при времево отместване

Физическите механизми, чрез които геомагнитните смущения могат да повлияят върху йоносферата, не предполагат непременно максимален отговор в същото денонощие, в което съответният геомагнитен показател достига най-висока интензивност. Измененията на плазмения транспорт, електрическите полета, нагряването на горната атмосфера и преразпределението на термосферния състав могат да се развиват в различни времеви мащаби. Поради това анализът само при едновременно съпоставяне на ТЕС и геомагнитните показатели може да не отчете зависимости, проявяващи се с известно времево отместване.

За проверка на тази възможност са разгледани три положения на геомагнитните показатели спрямо анализирания ТЕС показател – без времево отместване и с отместване съответно с едно и две календарни денонощия назад:

(95) $L=0: Y(D)\ спрямо\ G(D)$

(96) $L=1: Y(D)\ спрямо\ G(D-1)$

(97) $L=2: Y(D)\ спрямо\ G(D-2)$

където $Y(D)$ е анализираният ТЕС остатък или показател за съответствие през денонощието D, а G е съответният показател за геомагнитна активност. Следователно при $L=1$ резултатът за денонощието D се съпоставя с геомагнитната активност през предходното календарно денонощие, а при $L=2$– с активността две денонощия по-рано.

Важно методическо условие е, че времевото отместване е определено по **действителни календарни дати**, а не спрямо предходния ред с налични наблюдения от KOH2. Това разграничение е необходимо поради наличието на пропуски в многогодишната наблюдателна серия. При липса на данни за дадено денонощие то не се „прескача“ при определяне на времевото отместване, тъй като в противен случай стойност за дадена дата би могла да бъде съпоставена с геомагнитни условия отпреди повече от едно или две реални денонощия.

Една от най-ясните зависимости се установява за денонощната средноквадратична грешка между основния локален ред PyTECGg VEq и IGS Final GIM спрямо интензивността на SYM-H.

- При липса на времево отместване ранговият коефициент на корелация на Спирман е:

(98) $\rho=0.247$

- При BH-коригирана стойност:

(99) $q=6.05\times10^{-5}$

- При отместване на геомагнитния показател с едно денонощие назад зависимостта остава положителна:

(100) $\rho=0.200, q=0.00117$

- При времево отместване с две денонощия:

(101) $\rho=0.264, q=1.66\times10^{-5}$

Следователно увеличаването на несъответствието между PyTECGg VEq и IGS Final GIM не е ограничено единствено до денонощието на геомагнитното смущение. Положителната статистическа зависимост се запазва и при съпоставка с геомагнитните условия от предходните едно и две денонощия, като в разглеждания набор най-високият от трите рангови коефициента е получен при времево отместване с две денонощия.

Подобна структура се наблюдава и при разликата между IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC след отстраняване на зависимостта от F10.7 и годишната и полугодишната сезонна компонента. За Kp коефициентът на Спирман е $\rho = 0.210$без времево отместване, $\rho = 0.134$ при отместване с едно денонощие и $\rho = 0.147$ при отместване с две денонощия. И при трите положения зависимостта остава статистически значима след корекцията на Benjamini–Hochberg за множествени проверки.

По-ясно изменение с увеличаване на времевото отместване се наблюдава за показателите, свързани с отрицателните отклонения на Dst и SYM-H. За интензивността на Dst коефициентът на Спирман за остатъчната разлика IGS–Madrigal е $\rho = 0.186$ без отместване, $\rho = 0.183$ при едно денонощие и $\rho = 0.230$ при две денонощия. За SYM-H съответните стойности са $\rho = 0.218$, $\rho = 0.192$ и $\rho = 0.244$. Всички тези рангови зависимости остават статистически значими след корекцията за множествени проверки.

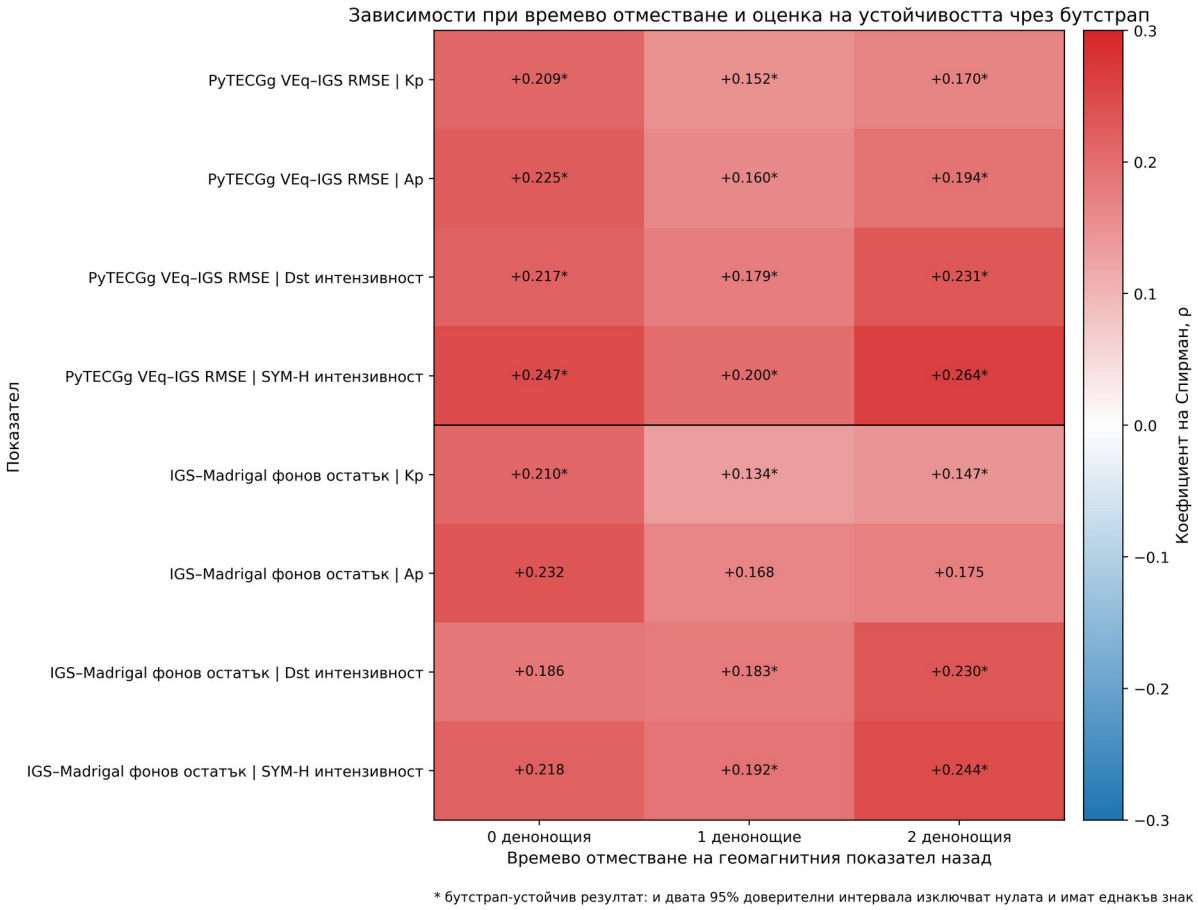
Получените резултати са съвместими с наличие на времево разпределена реакция, при която несъответствията между отделните TEC продукти могат да останат повишени и през едно или две денонощия след период на засилена геомагнитна активност. От анализа обаче не следва, че едно или две денонощия представляват универсално физическо време на реакция на йоносферата. Изследваните времеви отмествания са дискретни дневни интервали, наблюдателното покритие е неравномерно, а използваните геомагнитни показатели характеризират различни аспекти на магнитосферното смущение.

Съществено е също, че най-ясните зависимости при времево отместване отново се проявяват не като еднозначно увеличение или намаление на самия локален PyTECGg VEq остатък, а преди всичко като изменение на **съответствието между различните TEC продукти**. Този резултат е в съгласие с установеното в §6.5.2 и §6.5.3 и показва, че в наличната извадка геомагнитната активност се откроява по-убедително чрез увеличаване и времево изменение на между-продуктовите различия, отколкото чрез проста зависимост между локалния VTEC и отделен геомагнитен показател.

Резултатите са обобщени на Фигура 6.7, където са представени коефициентите на Спирман при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия. Наред с величината на корелацията на фигурата е показано и кои от зависимостите запазват знака си и остават различими от нулев ефект при допълнителния бутстрап анализ.

Самите коефициенти на корелация и FDR-коригираната статистическа значимост не отчитат напълно силно неравномерното разпределение на наблюденията между годините и зависимостта между близки във времето наблюдения. Поради това устойчивостта на установените зависимости е проверена допълнително чрез **бутстрап анализ**[7], разгледан в §6.5.5.

[7] **Бутстрап (bootstrap)** е преизвадков статистически метод, при който чрез многократно формиране на нови извадки от наличните данни се оценява изменчивостта на даден статистически показател и се определят доверителни интервали. В настоящото изследване бутстрапът по години проверява чувствителността на резултатите към неравномерното представяне на отделните години, а 7-дневният блоков бутстрап отчита зависимостта между близки във времето наблюдения.



Фигура 6.7. Рангов коефициент на корелация на Спирман между избрани показатели за съответствие на ТЕС продуктите и геомагнитната активност при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия.

***Забележка**: Времевото отместване означава съпоставка на анализирания показател за денонощието (D) с геомагнитната активност съответно през същото денонощие (D), през предходното денонощие (D-1) и две денонощия по-рано (D-2). Звездичката обозначава бутстрап-устойчив резултат, при който 95% доверителните интервали, получени чрез два независими подхода – бутстрап по години и 7-дневен блоков бутстрап с движещи се блокове – не включват нулата и имат еднакъв знак.*

6.5.5. Оценка на устойчивостта чрез бутстрап анализ

Статистическата значимост на зависимостите, разгледани в §6.5.4, не е достатъчна сама по себе си за оценка на тяхната устойчивост. Това е особено важно при използвания набор от данни поради силно неравномерното разпределение на наблюденията между отделните години и наличието на времева зависимост между близки денонощия. Поради това резултатите са проверени допълнително чрез бутстрап анализ.

Използвани са два допълващи се подхода. При **бутстрапа по години** отделните години се преизбират като цели групи, с което се проверява чувствителността на резултата към различното представяне на отделните години и по-специално към големия брой наблюдения през 2024 г. При **7-дневния блоков бутстрап** се преизбират последователни времеви блокове, което позволява да се запази част от зависимостта между близки във времето наблюдения.

За всеки от двата подхода са извършени по 1000 преизвадки и са определени 95% доверителни интервали за регресионния коефициент, оценен при еднаква статистическа тежест на отделните години. Дадена зависимост е приета за **бутстрап-**

устойчива, когато доверителните интервали, получени и чрез двата подхода, не включват нулата и имат еднакъв знак.

В Таблица 6.6 са представени само зависимостите, които удовлетворяват този по-строг критерий.

Таблица 6.6. Бутстрап-устойчиви зависимости между избрани ТЕС показатели и геомагнитната активност при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия

Анализиран показател	*Геомагнитен показател*	*Времево отместване, дни*	*Spearman ρ*	*β*	*95% CI – бутстрап по години*	*95% CI – 7-дневен блоков бутстрап*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*Kp*	*0*	*0.209*	*0.4744*	*[0.1935; 0.6720]*	*[0.2665; 0.6414]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*Kp*	*1*	*0.152*	*0.4162*	*[0.0819; 0.6213]*	*[0.1579; 0.6240]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*Kp*	*2*	*0.170*	*0.4183*	*[0.0625; 0.7006]*	*[0.1583; 0.6383]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	Ap_{daily}	*0*	*0.225*	*0.0347*	*[0.0108; 0.0673]*	*[0.0161; 0.0799]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	Ap_{daily}	*1*	*0.160*	*0.0319*	*[0.0076; 0.0689]*	*[0.0118; 0.0682]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	Ap_{daily}	*2*	*0.194*	*0.0347*	*[0.0116; 0.0696]*	*[0.0198; 0.0679]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*Dst intensity*	*0*	*0.217*	*0.0182*	*[0.0057; 0.0307]*	*[0.0092; 0.0351]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*Dst intensity*	*1*	*0.179*	*0.0173*	*[0.0069; 0.0345]*	*[0.0078; 0.0332]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*Dst intensity*	*2*	*0.231*	*0.0197*	*[0.0043; 0.0321]*	*[0.0122; 0.0323]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*SYM-H intensity*	*0*	*0.247*	*0.0170*	*[0.0050; 0.0291]*	*[0.0090; 0.0326]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*SYM-H intensity*	*1*	*0.200*	*0.0160*	*[0.0055; 0.0302]*	*[0.0075; 0.0297]*
PyTECGg VEq–IGS RMSE	*SYM-H intensity*	*2*	*0.264*	*0.0183*	*[0.0031; 0.0313]*	*[0.0115; 0.0296]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*Kp*	*0*	*0.210*	*0.3957*	*[0.0007; 0.5886]*	*[0.1340; 0.6318]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*Kp*	*1*	*0.134*	*0.3930*	*[0.0288; 0.5659]*	*[0.1179; 0.6076]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*Kp*	*2*	*0.147*	*0.3914*	*[0.0245; 0.6580]*	*[0.1079; 0.6074]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*Dst intensity*	*1*	*0.183*	*0.0140*	*[0.0010; 0.0311]*	*[0.0031; 0.0287]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*Dst intensity*	*2*	*0.230*	*0.0183*	*[0.0033; 0.0388]*	*[0.0042; 0.0321]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*SYM-H intensity*	*1*	*0.192*	*0.0125*	*[0.0004; 0.0303]*	*[0.0026; 0.0253]*
IGS–Madrigal фонов остатък	*SYM-H intensity*	*2*	*0.244*	*0.0174*	*[0.0031; 0.0388]*	*[0.0048; 0.0302]*

Забележка: *β представлява регресионния коефициент, определен при еднаква статистическа тежест на отделните години. При Dst и SYM-H са използвани положително дефинирани показатели за интензивността на отрицателното отклонение. За PyTECGg VEq–IGS RMSE анализът включва 325 денонощия, а за остатъчната разлика IGS–Madrigal – 326 денонощия.*

Резултатите показват най-последователна устойчивост при средноквадратичната грешка между PyTECGg VEq и IGS Final GIM. За всички четири геомагнитни показателя – Kp, Ap_{daily}, Dst и SYM-H – зависимостите остават бутстрап-устойчиви както без времево отместване, така и при отместване с едно и две денонощия. Следователно нарастването на несъответствието между локалната

PyTECGg VEq оценка и IGS Final GIM при засилена геомагнитна активност не се определя единствено от конкретното разпределение на наблюденията между годините или от ограничен брой последователни денонощия.

По-селективна е картината при остатъчната разлика между IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC. За Kp устойчивост се установява и при трите времеви положения. При Dst и SYM-H бутстрап-устойчиви са зависимостите при отместване с едно и две денонощия, докато при липса на отместване съответните резултати не удовлетворяват едновременно двата критерия за доверителните интервали.

Особено показателен е резултатът за Ap_{daily} при остатъчната разлика IGS–Madrigal. В §6.5.4 са установени статистически значими рангови корелации, но те не са включени в Таблица 6.6, тъй като при бутстрап анализа поне един от доверителните интервали включва нулата. Това показва, че статистическата значимост на корелацията и устойчивостта спрямо структурата на извадката не са еквивалентни характеристики.

Обобщената картина е представена и на Фигура 6.7. В нея величината и знакът на ранговата корелация се съчетават с означение на зависимостите, които преминават и двата бутстрап критерия.

Бутстрап анализът потвърждава основния извод от §6.5.2–§6.5.4, че геомагнитната активност не се проявява като проста и универсална зависимост на локалния VTEC от отделен геомагнитен показател. По-устойчивата статистическа проява е увеличаването на несъответствията между отделните TEC продукти при засилена геомагнитна активност, като част от тези зависимости се запазват и при съпоставка с геомагнитните условия от предходните едно и две денонощия. Последният резултат следва да се интерпретира като статистическа асоциация, а не като доказателство за определено причинно-следствено време на реакция на йоносферата. Наблюдаваната устойчивост е съвместима с различно представяне на засилената пространствено-времева неоднородност на йоносферата от локалните и глобалните TEC продукти.

6.5.6. Интерпретация на резултатите

Резултатите от §6.5.2–§6.5.5 показват, че влиянието на геомагнитната активност върху разглежданите TEC редове не се проявява като проста и еднозначна зависимост на локалния VTEC от отделен геомагнитен показател. След отстраняване на зависимостта от F10.7 и на годишната и полугодишната сезонна компонента остатъчният ред на VEq показва слаби зависимости с Kp, Ap_{daily}, Dst и SYM-H. Това означава, че в рамките на наличната извадка краткопериодичната изменчивост на локалния VTEC не може да бъде обяснена убедително само чрез разглежданите дневни показатели за геомагнитна активност.

По-ясна зависимост се установява при показателите, характеризиращи съответствието между различните TEC продукти. При геомагнитно смутени денонощия се наблюдава увеличаване на средноквадратичната грешка между локалните решения и IGS Final GIM, като този ефект е най-последователен за PyTECGg VEq–IGS и PyTECGg VTEC–IGS. При сравненията с Madrigal GNSS TEC различията между спокойни и смутени условия са по-слабо изразени. Следователно геомагнитната активност се проявява по-ясно чрез промяна в степента на съответствие между отделните TEC продукти, отколкото чрез еднозначно увеличение или намаление на самия локален VTEC.

Този резултат е физически правдоподобен, тъй като разглежданите TEC продукти се различават по начина, по който представят пространствената и времевата структура на йоносферата. PyTECGg VEq представлява локализирана оценка, отнесена към района на станция KOH2, докато глобалните йоносферни карти и Madrigal GNSS TEC използват различни източници на наблюдения, пространствено осредняване и интерполационни процедури. При спокойни условия тези различия могат да имат относително ограничено значение, но при повишена геомагнитна активност, когато пространствените градиенти и времевата изменчивост на йоносферата се усилват,

различните методи могат да представят състоянието на йоносферата по различен начин.

Анализът при времево отместване допълнително показва, че наблюдаваните зависимости не се ограничават само до денонощието на геомагнитното смущение. За редица показатели положителните зависимости се запазват и при съпоставка с геомагнитната активност от предходните едно и две денонощия. Това ясно се проявява при PyTECGg VEq–IGS RMSE, където зависимостите с Kp, Ap_{daily}, Dst и SYM-H остават положителни и при трите разглеждани времеви положения. Подобна, макар и по-селективна, картина се наблюдава и при остатъчната разлика IGS–Madrigal.

Бутстрап анализът показва, че част от тези зависимости са устойчиви както спрямо неравномерното представяне на отделните години, така и спрямо локалната времева зависимост между близки наблюдения. Най-последователна устойчивост се установява за PyTECGg VEq–IGS RMSE, докато при IGS–Madrigal устойчивостта зависи от конкретния геомагнитен показател и времевото отместване. Това разграничение е важно, тъй като показва, че статистически значимата корелация не винаги е достатъчна за заключение относно стабилността на наблюдавания ефект.

Получените резултати не следва да се интерпретират като доказателство за конкретно причинно-следствено време на реакция на йоносферата от едно или две денонощия. Използваното времево отместване представлява статистически инструмент за проверка дали асоциациите се запазват и извън денонощието на геомагнитната активност. Самите геомагнитни индекси характеризират различни аспекти на магнитосферното смущение, а дневното времево осредняване ограничава възможността да се разграничат по-кратки по продължителност процеси.

В обобщение, анализът показва, че през разглеждания период геомагнитната активност е свързана не толкова с еднопосочна промяна на локалния VTEC над о-в Ливингстън, колкото с повишена изменчивост и с нарастване на различията между различните TEC продукти. Това подкрепя използването на многопродуктов подход при изследване на геомагнитно смутени условия и показва, че оценката на йоносферния отговор само чрез един TEC продукт може да не отрази напълно сложната пространствено-времева структура на смущенията.

6.6. Обобщение

В Глава 6 е извършен многогодишен анализ на измененията на вертикалното пълно електронно съдържание над о-в Ливингстън през периода 2019–2026 г., обхващащ възходящата фаза и максимума на 25-ия слънчев цикъл. Като основен локален ред е използван PyTECGg VEq, тъй като предоставя единна оценка, отнесена към района на станция KOH2 и е подходящ за проследяване на дългопериодични изменения. Данните от IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и ruOASIS са използвани а сравнителен анализ, оценка на външната съгласуваност и чувствителността на резултатите към избрания TEC продукт.

Годишният и месечният анализ показват ясно изразено нарастване на VTEC с увеличаването на слънчевата активност. Тази зависимост се проявява едновременно в локалния PyTECGg VEq ред и в методически различните TEC продукти. Съпоставката с F10.7 показва, че слънчевата активност представлява основен фактор за многогодишната изменчивост на TEC през разглеждания период, като върху тази зависимост се наслагват изразени годишни и полугодишни сезонни изменения.

Регресионният анализ потвърждава положителната зависимост между VTEC и F10.7. Получените резултати се запазват и при използване на претеглен метод на най-малките квадрати с еднаква обща статистическа тежест на отделните години. Разликите между стандартния OLS подход и претегления WLS модел показват, че величината на оценения ефект е чувствителна към неравномерното разпределение на наблюденията между отделните години, но основният извод за положителната връзка със слънчевата активност остава устойчив. Това е особено важно за наличния набор от данни, в който 2024 г. е представена значително по-пълно от останалите години.

След отстраняване на влиянието на F10.7 и на годишната и полугодишната сезонна компонента е изследвана връзката между краткопериодичната изменчивост на TEC и геомагнитната активност. За остатъчния ред на PyTECGg VEq не се установява силна и статистически устойчива еднозначна зависимост от Kp, Ap_{daily}, Dst или SYM-H. Това показва, че дневната геомагнитна активност сама по себе си не е достатъчна за обяснение на остатъчните изменения на локалния VTEC след отстраняване на основната слънчева и сезонна компонента.

По-ясна зависимост се установява при показателите, характеризиращи съответствието между различните TEC продукти. При геомагнитно смутени денонощия средноквадратичната грешка между локалните решения и IGS Final GIM като цяло се увеличава спрямо спокойните условия. Този резултат е най-последователен за сравненията PyTECGg VEq–IGS и PyTECGg VTEC–IGS, докато при съпоставките с Madrigal GNSS TEC ефектът е по-слаб. Анализът с еднаква статистическа тежест на отделните години показва, че посоката на промяната се запазва, макар статистическата ѝ увереност да намалява спрямо обединената извадка.

Анализът при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия показва, че част от установените зависимости между несъответствията на TEC продуктите и геомагнитната активност не се ограничават само до денонощието на самото смущение. За PyTECGg VEq–IGS RMSE положителните зависимости с разглежданите геомагнитни показатели се запазват и при трите времеви положения. Подобна, но по-селективна картина се наблюдава и при остатъчната разлика между IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC.

Допълнителният бутстрап анализ потвърждава, че част от тези зависимости са устойчиви както спрямо неравномерното представяне на отделните години, така и спрямо времевата зависимост между близки наблюдения. Най-последователна бутстрап устойчивост се установява за средноквадратичната грешка между PyTECGg VEq и IGS Final GIM. При IGS–Madrigal устойчивостта зависи от конкретния геомагнитен показател и от разглежданото времево отместване. Това показва, че статистическата значимост на дадена корелация не трябва автоматично да се приема като доказателство за устойчив ефект.

Статистическата значимост на установените зависимости не се интерпретира самостоятелно, а съвместно с големината и знака на ефекта (βF10.7, ΔRMSE или ρ според конкретния анализ), неравномерната структура на наблюдателната извадка, устойчивостта при еднаква статистическа тежест на отделните години и при времево отместване, бутстрап оценките и корекцията за множествени сравнения чрез FDR.

В обобщение, многогодишните изменения на VTEC над о-в Ливингстън през периода 2019–2026 г. се определят преди всичко от изменението на слънчевата активност и от сезонния ход на йоносферата. Геомагнитната активност не се проявява като проста и универсална еднопосочна зависимост на локалния VTEC, а по-скоро като фактор, свързан с повишена краткопериодична изменчивост и с увеличаване на различията между методически различните TEC продукти. Получените резултати подчертават значението на едновременното използване на локални GNSS оценки, глобални йоносферни карти и различните TEC продукти при анализа на йоносферните изменения в полярните области и показват необходимостта от предпазливо разграничаване между статистическа асоциация и причинно-следствена интерпретация.

7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН АНАЛИЗ НА КРАТКОПЕРИОДИЧНИ ФАЗОВИ ФЛУКТУАЦИИ ОТ 10 HZ GNSS НАБЛЮДЕНИЯ

7.1. Цел и обхват на експеримента

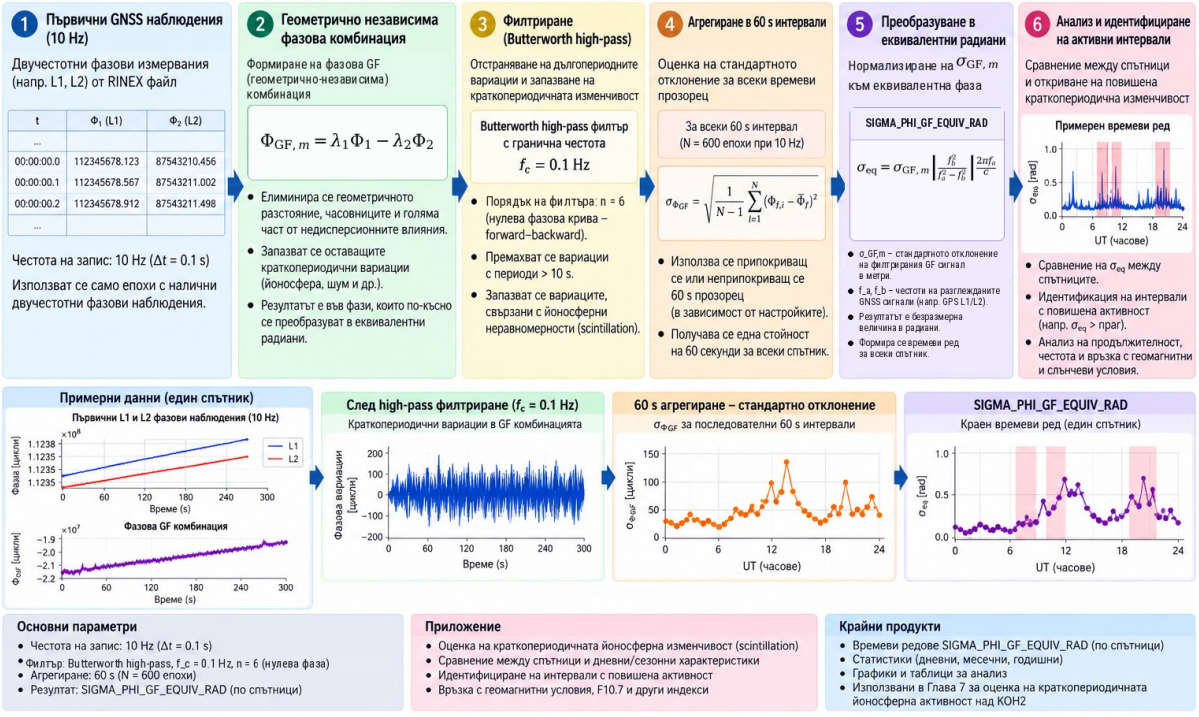
Наред с анализа на TEC, високочестотните GNSS наблюдения предоставят възможност за изследване на краткопериодични изменения на фазата на носещия сигнал. За станция KOH2 са налични RINEX наблюдения с честота на запис 10 Hz, които позволяват да бъдат анализирани изменения в значително по-кратки времеви мащаби от използваните в предходните глави часови и дневни TEC редове.

Целта на настоящия експериментален анализ е да се провери възможността от стандартни високочестотни геодезически GNSS наблюдения да бъде извлечен показател, чувствителен към краткопериодични йоносферни фазови флуктуации. Анализът има допълващ характер и не се използва при формирането на основните многогодишни изводи за TEC.

Като представително денонощие е избран **1 януари 2025 г. (DOY 001)**. За него са обработени 24 едночасови RINEX 3 файла с честота 10 Hz. Методиката и получените показатели имат **експериментален статус** и не се разглеждат като стандартни или независимо калибрирани индекси за йоносферни сцинтилации.

7.2. Методика за обработка

За експерименталния анализ са използвани високочестотни RINEX 3 наблюдения от станция KOH2 с честота на регистрация 10 Hz. Обработката е организирана непрекъснато за цялото денонощие, като 24-те едночасови файла се четат последователно в хронологичен ред. Този подход е необходим, тъй като независимото филтриране на отделните часови файлове може да създаде изкуствени пикове в близост до границите между тях. При проведените проверки непрекъснатата обработка отстранява този ефект и поради това е използвана в окончателната процедура (Фигура 7.1).



Фигура 7.1. Последователност на обработката на високочестотни 10 Hz GNSS фазови наблюдения (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН АНАЛИЗ НА КРАТКОПЕРИОДИЧНИ ФАЗОВИ ФЛУКТУАЦИИ ОТ 10 Hz GNSS НАБЛЮДЕНИЯ

Първоначалният анализ на фазовите наблюдения по отделни носещи честоти показва наличие на значителна обща недисперсионна компонента. Поради това едночестотният фазов показател не е използван като основна характеристика на краткопериодичните йоносферни изменения. Вместо него са формирани двучестотни геометрично независими фазови комбинации (GF) в съответствие с теоретичната постановка, въведена в §2.4.3. При тази комбинация общите честотно независими компоненти, включително геометричното разстояние спътник–приемник и часовниковите членове, се елиминират, докато честотно зависимото йоносферно влияние се запазва.

За GPS са използвани фазовите наблюдения L1C и L2W/L2X, като вторият сигнал се избира автоматично според наличността за съответния спътник. За GLONASS са използвани L1C и L2C, като при преобразуването на фазата от цикли в метри са отчетени индивидуалните честоти на FDMA каналите, съдържащи се в RINEX метаданните.

За всеки спътник наблюденията се разделят на непрекъснати фазови интервали. Нов интервал се формира при наличие на: пропуск в наблюденията; епохи с флаг, различен от 0; индикатор за прекъсване на фазовото проследяване (LLI); индикация за фазова неопределеност от половин цикъл (*half-cycle ambiguity*[8]) или рязко изменение на геометрично независимата комбинация. По този начин фазовите участъци с вероятно нарушена непрекъснатост се отделят преди изчисляването на крайния показател.

От всеки непрекъснат GF интервал първо се отстранява линеен тренд. След това е приложен високочестотен Butterworth филтър от шести ред с гранична честота 0.1 Hz. Филтрирането се извършва с нулево фазово отместване, така че да не се въвежда допълнително времево изместване във фазовия ред. Получената високочестотна компонента на геометрично независимата комбинация се преобразува в еквивалентна фазова флуктуация на първата носеща вълна.

Крайният експериментален показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD се определя като стандартно отклонение на тази високочестотна фазова компонента в последователни 60-секундни интервали. При 10 Hz всеки пълен интервал съдържа 600 наблюдения, като за валидно изчисление се изисква минимум 80% пълнота. Показателят се изразява в радиани.

За ограничаване на влиянието на прекъсванията и краищата на фазовите сегменти е приложена защитна зона от 120 s. Едноминутна оценка се включва в анализа само ако: не попада в тази зона; няма индикатор за прекъсване на фазовото проследяване; няма фазова неопределеност от половин цикъл; не съдържа установен рязък GF скок и няма епохи с флаг, различен от 0.

Геометрията спътник–приемник е определена чрез прецизни SP3 орбити. За всяка едноминутна оценка са изчислени височината и азимутът на съответния спътник. Основната процедура използва маска по височина ≥30°, като допълнително е проведен анализ на чувствителността при 35°, 40° и 45°. По-строгата маска от ≥40° е използвана при детайлния анализ на интервала 16:50–17:10 UTC, за да се ограничи влиянието на ниските височини над хоризонта.

Следователно крайният едноминутен резултат се приема за валиден само когато едновременно са изпълнени критериите за непрекъснатост на фазовия ред, липса на LLI и GF скокове, достатъчно отдалечаване от краищата на фазовите сегменти, наличие на валидна SP3 геометрия и преминаване на избраната маска по височина.

---

[8] Фазовата неопределеност от половин цикъл (*half-cycle ambiguity*) е особеност на фазовите GNSS наблюдения, при която приемникът не може еднозначно да определи дали измерената носеща фаза е изместена с половин цикъл (0.5 цикъл = 180°). Това **е различен от цикличен скок (cycle slip) ефект**. При цикличния скок се прекъсва непрекъснатостта на фазовия ред и броят на циклите се изменя внезапно; при half-cycle ambiguity проблемът е, че фазата може да бъде определена само до половин цикъл. В RINEX това може да бъде отбелязано чрез съответния **LLI бит**, за да знае обработващият софтуер, че фазовото наблюдение не трябва да се приема като нормална целочислена непрекъсната фаза.

Важно е да се подчертае, че SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD има **експериментален характер**. Той представлява показател за краткопериодични фазови флуктуации, изведен от високочестотни геодезически RINEX наблюдения, и не се приема за стандартен или независимо калибриран индекс Φ_{60}. Аналогично, допълнително изчисляваният от стойностите за отношението сигнал/шум S4_CNO_PROXY представлява некалибриран диагностичен показател и не е еквивалентен на стандартния S4 индекс от специализиран приемник за сцинтилации.

Тази обработваща схема позволява високочестотните данни от KOH2 да бъдат използвани за идентифициране на краткопериодични фазови изменения, като същевременно се запазва ясно разграничение между експерименталния показател и стандартните сцинтилационни индекси.

7.3. Резултати за представителното денонощие

За експерименталната оценка на краткопериодичните фазови флуктуации е анализирано денонощието **1 януари 2025 г. (DOY 001)**. След формиране на двучестотните геометрично независими фазови комбинации и прилагане на критериите за контрол на качеството са получени 23 867 едноминутни оценки. При основната маска по височина ≥30° за последващ анализ остават **12 605 валидни едноминутни оценки**, от които 7342 за GPS и 5263 за GLONASS.

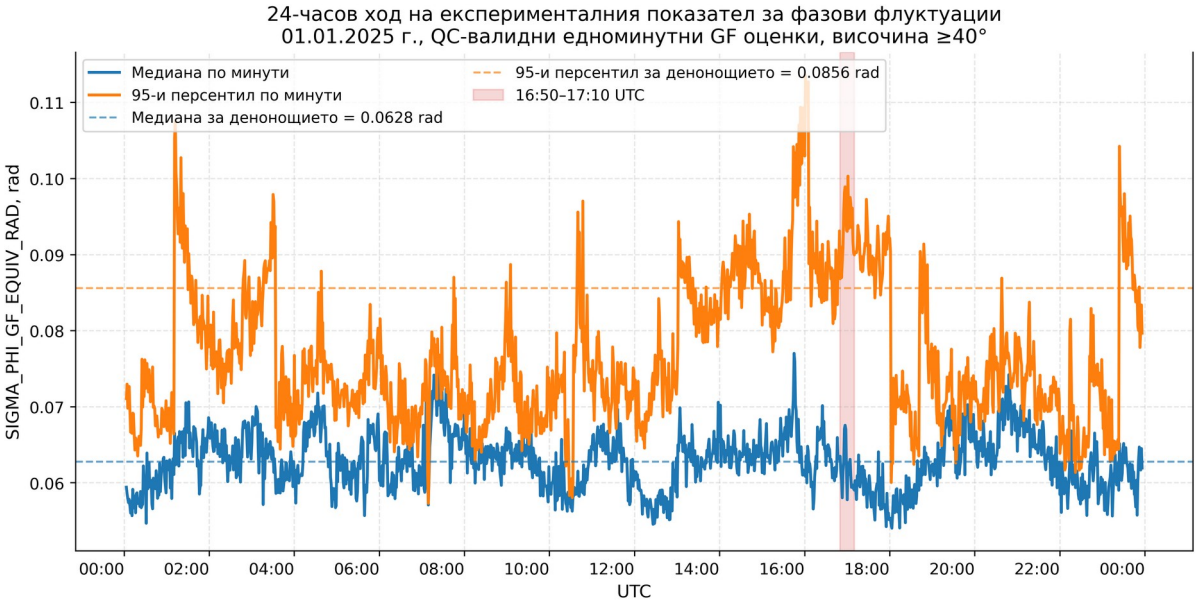
Основните статистически характеристики на експерименталния показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD при тази маска са представени в Таблица 7.1.

Таблица 7.1. Основни статистически характеристики на експерименталния показател за фазови флуктуации за 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥30°.

Показател	**Стойност**
Брой валидни едноминутни оценки	12 605
GPS	7342
GLONASS	5263
Медиана	0.0665 rad
95-и процентил	0.0967 rad
99-и процентил	0.1185 rad
Максимална стойност	0.1912 rad

Разпределението на стойностите показва ясно изразена зависимост от геометрията на наблюдение. При ограничаване на анализа до спътници с височина ≥40° броят на валидните едноминутни оценки намалява до 8713, а медианата на показателя – до 0.0628 rad. Съответно 95-ият и 99-ият процентил са 0.0856 и 0.1007 rad, а максималната стойност намалява до 0.1209 rad. Това потвърждава, че част от най-високите стойности при по-ниски височини могат да бъдат повлияни от геометрията на разпространение и локална многопътност. Поради това за детайлния анализ на краткопериодичните изменения е използвана по-строгата маска ≥40°.

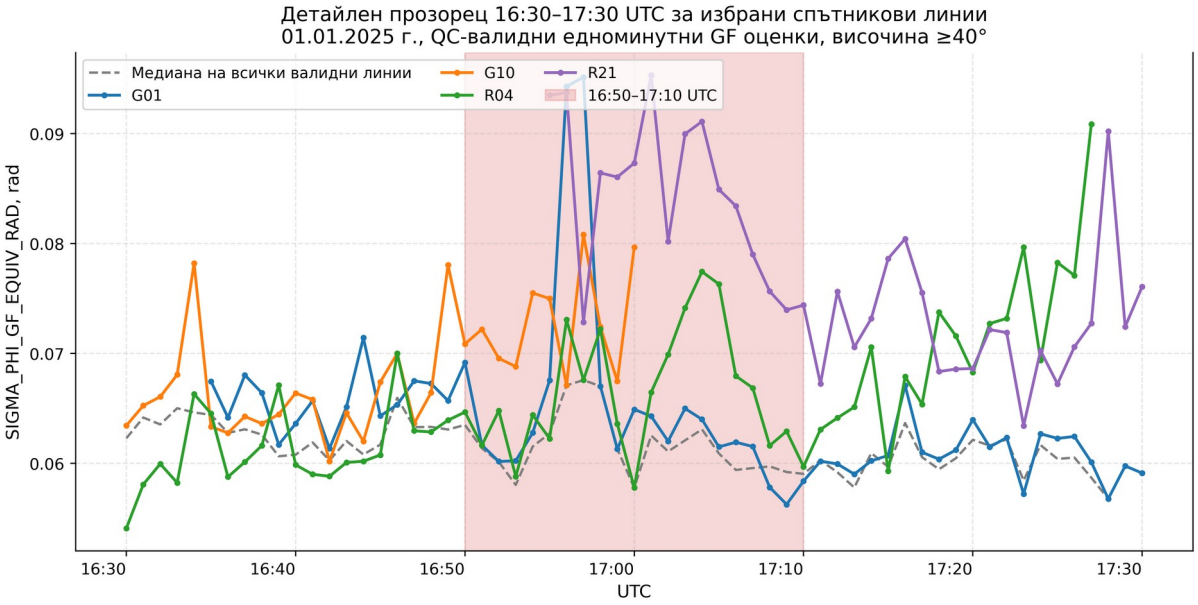
Денонощният ход на експерименталния показател при тази маска е представен на Фигура 7.2. Денонощен ход на медианата и 95-ия процентил на експерименталния показател за фазови флуктуации SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD за 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥40°. За всяка минута са изчислени медианата и 95-ият процентил на валидните спътникови оценки. Медианата характеризира общото ниво на фазовата изменчивост за наблюдаваната спътникова конфигурация, докато 95-ият процентил е по-чувствителен към ограничен брой направления с повишени стойности.



Фигура 7.2. Денонощен ход на медианата и 95-ия процентил на експерименталния показател за фазови флуктуации SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD за 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥40°.

Денонощният ход показва, че измененията на медианата и на горната част на разпределението не протичат идентично. В редица интервали 95-ият процентил се увеличава по-силно от медианата, което показва, че повишените фазови флуктуации могат да бъдат ограничени до отделни спътници, а не да обхващат едновременно всички.

За по-подробен анализ е разгледан интервалът **16:30–17:30 UTC**, като специално внимание е отделено на периода **16:50–17:10 UTC**. В този интервал са установени едновременно повишени стойности при няколко GPS и GLONASS спътника. На Фигура 7.3 са представени избрани направления към G01, G10, R04 и R21 заедно с медианата на всички валидни спътникови наблюдения.



Фигура 7.3. Изменение на експерименталния показател за фазови флуктуации за избрани GPS и GLONASS спътници в интервала 16:30–17:30 UTC на 1 януари 2025 г. при височина на спътника ≥40°.

***Забележка**: Маркираният интервал 16:50–17:10 UTC съдържа най-ясно изразеното едновременно регистриране на повишени стойности при няколко различни спътника.*

За количествена оценка на тази концентрация за всеки спътник е определен индивидуален 95-и процентил от неговите валидни стойности за цялото денонощие. В интервала 16:50–17:10 UTC са установени 8 минути, в които при поне две направления на наблюдение са регистрирани стойности над съответния индивидуален 95-и процентил, като в 2 от тези минути това условие е изпълнено при поне три направления. За непосредствено предходния интервал 16:30–16:49 UTC и за следващия интервал 17:10–17:29 UTC не са установени минути, в които стойности над индивидуалния 95-и процентил да са регистрирани едновременно при две или повече направления на наблюдение.

Тази особеност е важна, тъй като показва, че разглежданият интервал не представлява просто единичен висок максимум при един спътник. Повишени стойности се регистрират едновременно при няколко независими направления на наблюдение и включват както GPS, така и GLONASS спътници. Същевременно медианата на всички валидни стойности не показва съпоставимо рязко увеличение. Следователно ефектът е концентриран предимно в горната част на разпределението и се проявява при ограничена група спътници.

Полученият резултат подкрепя използването на критерий за едновременно повишение при няколко различни спътника при интерпретацията на краткопериодичните фазови флуктуации. Самостоятелно високата стойност при един спътник може да бъде свързана и с локални фактори по конкретното направление на наблюдение, докато едновременното повишение при няколко различни спътника предоставя по-силен индикатор за пространствено по-широко разпространено изменение.

Наблюдаваният интервал 16:50–17:10 UTC се разглежда по-нататък като **кандидат за период на повишена краткопериодична йоносферна изменчивост**, а не като независимо доказано сцинтилационно събитие. Тази предпазлива интерпретация е необходима поради експерименталния характер на използвания показател и липсата на паралелно независимо калибрирано измерване със специализиран сцинтилационен приемник.

7.4. Интерпретация и ограничения

Получените резултати показват, че високочестотните 10 Hz GNSS наблюдения от KOH2 съдържат информация за краткопериодични фазови изменения, която не може да бъде проследена със същата детайлност в часовите и дневните TEC редове. Използването на двучестотната геометрично независима фазова комбинация позволява да се потиснат общите недисперсионни компоненти и да се повиши чувствителността към честотно зависимите изменения на сигнала.

Особен интерес представлява интервалът **16:50–17:10 UTC** на **1 януари 2025 г**., в който повишени стойности на експерименталния показател се наблюдават едновременно при няколко GPS и GLONASS спътника. Регистрирането на повишени стойности в няколко независими направления на наблюдение, при отсъствие на аналогично едновременно повишение при няколко различни спътника непосредствено преди и след разглеждания интервал, е съвместимо с наличие на краткопериодична йоносферна нееднородност.

Тази особеност е характерна за наблюденията в полярни условия, където йоносферните структури могат да имат ограничен пространствен обхват и да пресичат само част от наблюдаваните линии. Поради това едновременното регистриране на повишени стойности при няколко различни спътника е по-информативно от отделна висока стойност при един спътник. Независимо от това, наличието на едновременно повишение по няколко линии не е достатъчно само по себе си за определяне на наблюдавания интервал като сцинтилационно събитие.

Съществено ограничение е зависимостта на експерименталния показател от геометрията на наблюдение. Намаляването на медианата, горните процентили и максималната стойност при повишаване на маската по височина показва, че част от фазовата изменчивост при ниски височини може да бъде свързана с многопътност и отражения от обекти и повърхности в непосредствена близост до антената, както и с увеличената дължина на пътя на сигнала през йоносферата. Поради това за детайлния анализ е използвана по-строга маска от 40°, а отделни високи стойности при ниски височини не трябва да се интерпретират автоматично като йоносферни.

Друго важно ограничение произтича от характера на използвания показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD. Той е разработен като експериментална характеристика на високочестотните фазови флуктуации и не представлява стандартен индекс Phi60. Аналогично, показателите, получени от RINEX стойностите за отношението сигнал/шум, не са еквивалентни на стандартния S4 индекс. За количествено определяне на сцинтилационна активност е необходимо независимо сравнение със специализиран сцинтилационен приемник или с друг калибриран високочестотен продукт.

Настоящият експеримент е ограничен и по своя времеви обхват, тъй като подробната проверка е извършена върху едно представително денонощие. Следователно получените стойности и установеният интервал 16:50–17:10 UTC не могат да бъдат използвани за оценка на честотата или сезонната повторяемост на подобни събития над о-в Ливингстън. За тази цел е необходимо разширяване на обработката към по-голям брой спокойни и геомагнитно смутени денонощия.

Въпреки тези ограничения резултатите показват, че високочестотните данни от KOH2 представляват перспективен допълнителен източник на информация за краткопериодичната структура на полярната йоносфера. Методът не замества стандартните TEC и сцинтилационни показатели, а ги допълва чрез анализ на времеви мащаби, които остават извън обхвата на основния многогодишен TEC анализ.

7.5. Обобщение

В Глава 7 е представен експериментален подход за използване на високочестотни 10 Hz GNSS наблюдения от станция KOH2 за изследване на краткопериодични фазови флуктуации. За ограничаване на общите недисперсионни компоненти са използвани двучестотни геометрично независими фазови комбинации, а

крайният показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD е определен в едноминутни интервали след последователен контрол на качеството и прилагане на маска по височина.

Анализът на 1 януари 2025 г. показва, че високочестотните наблюдения съдържат допълнителна информация за краткопериодичната изменчивост на фазата, която не се проявява по същия начин в часовите и дневните TEC редове. Особено ясно се откроява интервалът 16:50–17:10 UTC, в който повишени стойности на експерименталния показател се наблюдават едновременно по няколко GPS и GLONASS спътника. Едновременното регистриране на повишени стойности при няколко различни спътника е съвместимо с наличие на засилена краткопериодична йоносферна изменчивост, но не е достатъчно за независимо определяне на сцинтилационно събитие.

Резултатите показват също, че интерпретацията на високочестотните фазови показатели е чувствителна към геометрията на наблюдение и към използваните критерии за контрол на качеството. Поради това експерименталният показател не следва да се отъждествява със стандартен индекс Phi60, а анализът му трябва да се разглежда като допълващ подход към традиционните TEC и сцинтилационни оценки.

В обобщение, обработката на 10 Hz GNSS данни от KOH2 демонстрира потенциал за изследване на краткопериодичната структура на полярната йоносфера. Получените резултати обосновават разширяване на анализа към по-голям брой денонощия и бъдещо независимо валидиране със специализирани сцинтилационни наблюдения. В рамките на настоящата монография този анализ има експериментален характер и допълва основните резултати от многогодишното изследване на TEC.

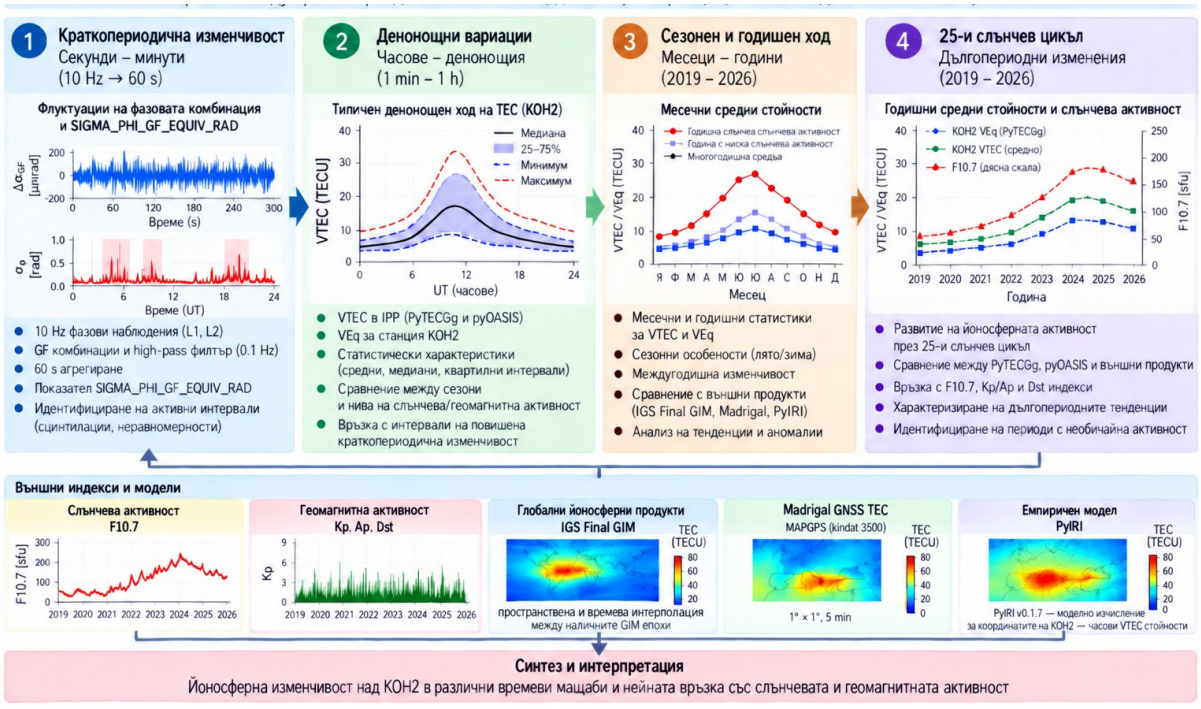
8. ОБОБЩЕНА ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

8.1. Надеждност и представителност на локалните GNSS оценки на TEC

Един от основните въпроси в настоящото изследване е доколко TEC оценките, получени от наблюденията на една сезонно действаща GNSS станция в антарктически условия, могат да бъдат използвани като представителна характеристика на йоносферното електронно съдържание над района на о-в Ливингстън. Проведените в Глава 5 сравнителни анализи показват, че локалните решения, получени чрез PyTECGg и pyOASIS, възпроизвеждат основната времева изменчивост, установена и в независимите външни TEC продукти. Наред с това обаче се наблюдават различия в абсолютното ниво на TEC, систематичното отместване и средноквадратичната грешка.

Това разграничение между **съгласуваност на времевото поведение** и **съвпадение на абсолютните стойности** е съществено за оценката на локалните решения. Високата корелация между два TEC продукта показва сходство в проследяването на измененията във времето, но не означава непременно малка абсолютна разлика между тях. Поради това надеждността на локалната GNSS оценка не може да се характеризира само чрез един статистически показател. Използваното в монографията съчетаване на систематично отместване, средноквадратична грешка, корелационни показатели и времево покритие позволява различните аспекти на съответствието да бъдат разглеждани отделно.

Установените разлики между PyTECGg, pyOASIS, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC не трябва да се интерпретират автоматично като грешка на един от методите. Отделните продукти не представляват напълно еквивалентни оценки, получени при еднаква пространствена и времева постановка. Те се различават по входните наблюдения, алгоритмите за обработка, начина на преобразуване от STEC към VTEC, пространственото представяне на йоносферата и степента на осредняване. Следователно част от наблюдаваните несъответствия са закономерно следствие от различната пространствено-времева представителност на продуктите (Фигура 8.1).



Фигура 8.1. Схематично обобщение на многомащабния анализ на йоносферното електронно съдържание над KOH2 за периода 2019–2026 г. и връзката му със слънчевата и геомагнитната активност (авторска инфограма, създадена с помощта на ChatGPT [88]).

***Забележка**: графичните елементи на Фигура 8.1 са илюстративни и не представляват самостоятелни количествени резултати. Числената TEC скала е концептуална.*

Особено значение за интерпретацията има разграничението между PyTECGg VTEC и PyTECGg VEq. Индивидуалните VTEC оценки са свързани с отделните направления спътник–приемник и съответните йоносферни пробивни точки, поради което съдържат информация за пространствената структура на наблюдавания TEC. PyTECGg VEq, от друга страна, предоставя единна времева оценка, отнесена към района на KOH2, и по тази причина е избран за основния многогодишен анализ в Глава 6. Това решение ограничава смесването на дългопериодичните изменения на йоносферата с измененията в спътниковата геометрия и разпределението на пробивните точки. Изборът на VEq обаче не означава, че този продукт се приема за по-точен в абсолютен смисъл от индивидуалните VTEC оценки.

Съществен резултат от валидационния анализ е и зависимостта на получените статистически характеристики от избрания референтен продукт. Систематичното отместване и RMSE на един и същ локален TEC ред не са еднакви при сравнение с IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC. Анализът с отделните глобални йоносферни карти CODE, ESA, JPL и UPC допълнително показва, че част от наблюдаваните различия зависи от конкретната реализация на GIM. Поради това глобалната карта е подходяща референтна основа за сравнителна оценка, но не следва да се разглежда като безусловна „истинска“ стойност на локалния TEC.

Този въпрос е особено важен за района на Антарктика. При по-ограничено пространствено покритие с наземни GNSS наблюдения глобалните продукти неизбежно съдържат по-голям компонент на пространствено моделиране и интерполация. Локалната станция KOH2, обратно, осигурява непосредствени наблюдения за конкретния район, но те са ограничени от геометрията на наличните спътници. По тази причина локалните и глобалните решения трябва да се разглеждат като **взаимно допълващи се**, а не като пряко взаимозаменяеми източници на TEC.

Допълнителна подкрепа за представителността на локалния PyTECGg VEq ред се получава от многогодишния анализ в Глава 6. Въпреки различията в абсолютните стойности, PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC показват сходна обща реакция към изменението на слънчевата активност през разглеждания период. Положителната зависимост между VTEC и F10.7 се запазва както при стандартния метод на най-малките квадрати, така и при претегления анализ с еднаква статистическа тежест на отделните години. Това показва, че основният дългопериодичен физически сигнал се възпроизвежда независимо от конкретния TEC продукт, макар величината на оценената зависимост да се различава.

Следователно надеждността на локалните TEC оценки от KOH2 е по-правилно да се оценява чрез **съвкупност от взаимно допълващи се критерии**, а не чрез степента на съвпадение с един конкретен референтен продукт. Към тези критерии се отнасят възпроизвеждането на основната времева динамика, устойчивостта на изводите спрямо различни референтни продукти, съгласуваността между независими методи за обработка и физически правдоподобната зависимост от слънчевата активност. В този смисъл резултатите подкрепят използването на GNSS наблюденията от KOH2 като надежден локален източник за изследване на изменението на TEC над о-в Ливингстън, като абсолютните стойности следва да се интерпретират в контекста на конкретната методика и пространствената представителност на използвания продукт.

8.2. Значение на избора на референтен йоносферен продукт

Резултатите от сравнителния анализ показват, че количествената оценка на локалните TEC решения от KOH2 зависи съществено от избрания референтен йоносферен продукт. Това се проявява както в стойностите на систематичното отместване, така и в средноквадратичната грешка, а в по-малка степен и в отделните корелационни характеристики. Следователно оценката на даден локален TEC метод не

може да бъде разглеждана независимо от характеристиките на продукта, спрямо който се извършва сравнението.

IGS Final GIM е използван като основен глобален референтен продукт поради неговата последователност, широкото приложение при йоносферни изследвания и възможността за еднородно сравнение през разглеждания период. В същото време глобалната йоносферна карта представлява пространствено моделирано поле, получено от разпределена мрежа от GNSS станции, а стойността за района на KOH2 се определя в рамките на тази глобална пространствена постановка. Тя следователно не е пряко локално измерване над станцията и не следва да се интерпретира като абсолютна референтна стойност, спрямо която всяко отклонение на локалния продукт представлява грешка.

Сравнението с Madrigal GNSS TEC предоставя различна референтна постановка. Получените спрямо Madrigal стойности на Δ и RMSE не съвпадат с тези спрямо IGS Final GIM, а при анализа на геомагнитно спокойни и смутени денонощия различията между локалните решения и Madrigal са по-слабо изразени от съответните различия спрямо IGS. Това показва, че част от количествената оценка на локалния продукт е обусловена от начина, по който самият референтен продукт представя пространствената и времевата изменчивост на йоносферата.

Особено показателни са резултатите от анализа с отделните глобални йоносферни карти CODE, ESA, JPL и UPC. Те не са използвани като четири независими валидации на локалния TEC, а като анализ на чувствителността спрямо избора на глобална йоносферна карта. Разликите между получените статистически оценки показват, че самата реализация на GIM въвежда ненулева неопределеност в сравнението. Следователно стойността на Δ или RMSE спрямо една конкретна карта не трябва да се разглежда изолирано, а в контекста на диапазона, получен при други независимо разработени глобални решения.

Това наблюдение има особено значение за района на о-в Ливингстън. В полярните области пространствената структура на йоносферата може да бъде значително по-нееднородна, а плътността на наземните наблюдателни станции е по-ниска в сравнение с добре обезпечените средни географски ширини. При тези условия пространственото осредняване и интерполацията в глобалните карти могат да имат по-съществено влияние върху локалната представителност на продукта. От друга страна, наблюденията от KOH2 са локално чувствителни, но са ограничени от конкретната спътникова геометрия и използваната методика за преобразуване и осредняване на TEC.

По тази причина понятието **„валидация“** в настоящата работа трябва да се разбира като сравнителна оценка на съгласуваността между независими или методически различни TEC решения, а не като проверка спрямо безусловно известна истинска стойност. Когато няколко продукта с различна методика показват сходен времеви ход, сезонна структура и реакция спрямо слънчевата активност, това увеличава увереността, че наблюдаваният сигнал е реална характеристика на йоносферната изменчивост. Разликите в абсолютните стойности, от своя страна, дават информация за методическата и пространствената чувствителност на отделните решения.

PyIRI заема различно място в тази система от сравнения. За разлика от IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC, той представлява моделна оценка на йоносферното състояние. Поради включването на показатели за слънчевата активност във входната му постановка силната зависимост на моделирания TEC от F10.7 не може да се използва като независимо потвърждение на наблюдаваната зависимост в GNSS продуктите. PyIRI е по-подходящ за оценка на съгласуваността между наблюдаваната и очакваната моделна изменчивост, отколкото като единствен критерий за точност на локалните TEC оценки.

Резултатите от Глава 6 допълнително показват, че значението на избора на референтен продукт се увеличава при геомагнитно смутени условия. Част от най-устойчивите зависимости с геомагнитната активност се проявяват именно като промяна

на разликите между отделните TEC продукти, а не като еднозначно изменение на локалния PyTECGg VEq. Това предполага, че при засилена пространствено-времева нееднородност различните методи могат да представят йоносферното състояние по различен начин. Следователно увеличаването на RMSE при смутени условия не трябва автоматично да се приписва на влошаване на един конкретен продукт, а може да отразява нарастващо несъответствие между различните пространствени и методически представяния на TEC.

В обобщение, изборът на референтен йоносферен продукт представлява съществен компонент от самата методика за оценка на локалния TEC. Надеждните изводи се получават не чрез търсене на пълно съвпадение с един референтен източник, а чрез съпоставка на резултатите спрямо няколко методически различни продукта и оценка на устойчивостта на основните зависимости. Именно този многопродуктов подход позволява да бъдат разграничени устойчивите характеристики на локалния йоносферен сигнал от различията, свързани със специфичната методика и пространствена представителност на отделните TEC решения.

8.3. Многогодишна изменчивост, слънчева и геомагнитна активност

Многогодишният анализ в Глава 6 показва, че изменението на VTEC над о-в Ливингстън през периода 2019–2026 г. се определя преди всичко от дългопериодичния ход на слънчевата активност и от сезонната структура на йоносферата. Нарастването на VTEC с развитието на 25-ия слънчев цикъл се проследява последователно в PyTECGg VEq, IGS Final GIM и Madrigal GNSS TEC. Тази съгласуваност между методически различни продукти показва, че основният многогодишен сигнал не е специфичен за конкретна обработваща схема, а отразява реална мащабна изменчивост на йоносферното електронно съдържание.

Положителната зависимост между VTEC и F10.7 се запазва както при стандартния метод на най-малките квадрати, така и при претегления анализ с еднаква статистическа тежест на отделните години. Разликите между двата подхода показват, че величината на оценения регресионен коефициент е чувствителна към неравномерното представяне на годините в извадката, но знакът и общата интерпретация на зависимостта остават устойчиви. Това е важно, тъй като наблюдателното покритие не е равномерно и отделни години, особено 2024 г., участват с по-голяма статистическа тежест в непретегления анализ.

Сезонната компонента допълва слънчевото влияние и има съществен принос към общата изменчивост на VTEC. Използването на годишна и полугодишна хармонична компонента позволява тези повтарящи се сезонни изменения да бъдат отделени от по-краткопериодичните отклонения. Това разграничение е необходимо, тъй като без него част от сезонната структура би могла погрешно да бъде интерпретирана като реакция на краткотрайни външни въздействия.

След отстраняване на слънчевата и сезонната компонента връзката между остатъчния локален PyTECGg VEq и дневните геомагнитни показатели остава слаба. Това показва, че геомагнитната активност не се проявява в наличната извадка като проста и еднопосочна промяна на локалния VTEC. Подобен резултат е физически правдоподобен, тъй като реакцията на полярната йоносфера към геомагнитни смущения може да включва едновременно увеличения и намаления на електронното съдържание, промени в пространствените градиенти и различни времеви мащаби на развитие.

По-ясна статистическа структура се наблюдава не при самия локален VTEC, а при показателите за съответствие между различните TEC продукти. При геомагнитно смутени условия средноквадратичната грешка между локалните решения и IGS Final GIM нараства спрямо спокойните денонощия, а част от тези зависимости се запазват и при времево отместване от едно и две денонощия. Това предполага, че при засилена геомагнитна активност различията между локалното и глобалното представяне на йоносферата се увеличават.

Този резултат е особено важен за интерпретацията на валидационните показатели. Нарастването на RMSE при смутени условия не следва да се разглежда непременно като влошаване на локалната обработка. По-вероятно е то да отразява увеличена пространствено-времева нееднородност на йоносферата, при която различните продукти, използващи различни пространствени модели, направления на наблюдение и степени на осредняване, започват да се разминават по-съществено.

Анализът при времево отместване подкрепя тази интерпретация. Част от зависимостите между междупродуктовите различия и геомагнитната активност се запазват и при съпоставка с условията от предходните едно и две денонощия. Това не трябва да се тълкува като установено универсално време на реакция на йоносферата, а като индикация, че въздействието на геомагнитното смущение върху съответствието между TEC продуктите може да има времево разпределен характер.

Допълнителният бутстрап анализ показва, че най-последователните зависимости не са резултат само от конкретния състав на извадката или от кратки групи последователни наблюдения. Особено устойчиви са зависимостите на PyTECGg VEq–IGS RMSE с разглежданите геомагнитни показатели. При остатъчната разлика IGS–Madrigal устойчивостта е по-селективна, което отново подчертава, че различните TEC продукти реагират различно на сложната пространствено-времева структура на смутената йоносфера.

В обобщение, резултатите очертават две различни нива на йоносферна изменчивост. В многогодишен мащаб доминиращи са слънчевата активност и сезонността, които определят основния ход на VTEC. При по-кратки времеви мащаби геомагнитната активност се проявява по-слабо като директна промяна на локалния VTEC и по-ясно като фактор, свързан с увеличаване на несъответствията между различните TEC продукти. Това разграничение е съществено за правилната физическа интерпретация на резултатите и подкрепя необходимостта дългопериодичната и краткопериодичната изменчивост да бъдат анализирани чрез различни, но взаимно допълващи се статистически подходи.

8.4. Високочестотните GNSS наблюдения като допълващ източник на информация

Резултатите от Глава 7 показват, че високочестотните 10 Hz GNSS наблюдения от станция KOH2 могат да предоставят информация за краткопериодични фазови изменения, която не се проявява със същата детайлност в часовите и дневните TEC редове. По този начин високочестотният анализ допълва основното многогодишно изследване, като разширява разглеждания времеви мащаб към процеси с продължителност от минути и по-малко.

Съществено предимство на използвания подход е прилагането на двучестотни геометрично независими фазови комбинации, чрез които се ограничават общите недисперсионни компоненти в наблюденията. Това повишава чувствителността към краткопериодични изменения, свързани с честотно зависимото влияние на йоносферата. В същото време не могат напълно да бъдат изключени други фактори, поради което при обработката са приложени допълнителни критерии за контрол на качеството, включително проверка за прекъсвания, LLI индикации, резки изменения във фазовите редове, защитни интервали около прекъсванията и ограничения по височина на спътниците.

Анализът на 1 януари 2025 г. показва, че краткопериодичната фазова изменчивост не се проявява еднакво при всички наблюдавани спътници и направления на наблюдение. В интервала 16:50–17:10 UTC са установени повишени стойности на експерименталния показател едновременно при няколко GPS и GLONASS спътника, докато медианата за всички валидни наблюдения остава сравнително стабилна. Това показва, че наблюдаваният ефект е ограничен до част от направленията спътник–приемник и не представлява общо повишение на фазовата изменчивост за цялата наблюдавана спътникова конфигурация.

Тази особеност допълва резултатите от Глава 6. При дневните TEC оценки геомагнитната активност не се проявява като проста и еднозначна промяна на локалния VTEC, а по-ясно чрез увеличаване на различията между отделните TEC продукти. При високочестотните наблюдения също се установява, че краткопериодичните изменения могат да бъдат пространствено селективни и да се проявяват само при част от пътищата на GNSS сигнала между спътниците и приемника. И в двата случая резултатите насочват към значението на пространствено-времевата нееднородност на полярната йоносфера и към ограниченията на показатели, които представят състоянието ѝ чрез една единствена осреднена стойност.

Едновременното регистриране на повишени стойности при няколко различни спътника е особено важно от методическа гледна точка. Единична повишена стойност на показателя при наблюдение на един спътник може да бъде обусловена от конкретната геометрия на наблюдението, многопътност, локални условия около антената или от проблеми при проследяването на фазата на носещия GNSS сигнал. Когато сходни изменения се регистрират едновременно при няколко спътника и в повече от една GNSS система, вероятността те да са свързани с по-общо изменение на средата на разпространение на сигнала се увеличава. Въпреки това подобно съвпадение само по себе си не е достатъчно за еднозначното определяне на наблюдавания интервал като сцинтилационно събитие.

Поради експерименталния характер на разработения показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD резултатите от Глава 7 трябва да се разглеждат като демонстрация на потенциала на наличните 10 Hz данни, а не като завършена методика за количествено определяне на сцинтилационна активност. Показателят не е еквивалентен на стандартния Phi60, а наличните RINEX стойности за отношението сигнал/шум не позволяват без допълнително калибриране да бъде получен стандартен S4 индекс.

В този смисъл високочестотните наблюдения имат най-голяма стойност като допълващ диагностичен източник към анализа на TEC. Докато дългопериодичните TEC редове позволяват да бъдат проследени сезонните и слънчево обусловените изменения, 10 Hz данните предоставят възможност за изследване на локализирани и краткотрайни фазови флуктуации. Съвместното използване на двата времеви мащаба създава по-пълна картина на йоносферната изменчивост над о-в Ливингстън и очертава перспектива за бъдещо интегриране на стандартни TEC показатели, ROTI/DTEC и независимо калибрирани сцинтилационни наблюдения.

8.5. Ограничения на изследването

Получените резултати следва да се интерпретират с оглед на няколко ограничения, свързани с наблюдателните данни, пространствената представителност на станция KOH2 и използваните методи за обработка и сравнение. Тези ограничения не обезсилват установените зависимости, но определят границите, в които могат да бъдат обобщавани изводите.

Първото съществено ограничение е неравномерното времево покритие на GNSS данните през периода 2019–2026 г. Броят на денонощията с налични данни се различава значително между отделните години, като 2024 г. е представена значително по-пълно. Това може да увеличи статистическото влияние на по-добре представените години при обединените анализи. За ограничаване на този ефект в Глава 6 са използвани претеглени регресионни модели с еднаква обща статистическа тежест на отделните години, анализи по години и бутстрап процедури. Въпреки това непълното времево покритие ограничава възможността за напълно равномерно представяне на сезонните и геомагнитните условия през целия разглеждан период.

Второто ограничение е свързано с пространствената представителност на наблюденията от една GNSS станция. KOH2 предоставя локална информация за района на о-в Ливингстън, но отделните GNSS наблюдения характеризират различни направления спътник–приемник и съответни йоносферни пробивни точки. Поради това

получените резултати не могат директно да бъдат обобщени за цялата Антарктика или дори за по-широкия регион на Антарктическия полуостров без допълнителни наблюдения от други станции. Същевременно именно локалният характер на KOH2 е едно от предимствата на изследването при оценката на йоносферната изменчивост над конкретния район.

Допълнителна неопределеност произтича от методическите различия между използваните TEC продукти. PyTECGg, pyOASIS, IGS Final GIM, Madrigal GNSS TEC и PyIRI се различават по входни данни, пространствено и времево осредняване, моделиране и алгоритми за определяне на TEC. Поради това нито един от външните продукти не може да се разглежда като безусловна истинска референтна стойност. Установените Δ и RMSE следва да се интерпретират като показатели за съответствието между различни оценки на йоносферното електронно съдържание, а не като директна абсолютна грешка на локалния продукт.

Използването на дневни стойности на F10.7 и геомагнитните показатели също поставя ограничение върху времевата разделителна способност на анализа. Геомагнитните смущения и реакцията на полярната йоносфера могат да се развиват в рамките на часове или по-кратки интервали, докато дневното агрегиране изглажда част от тази структура. Поради това слабата зависимост между остатъчния локален VTEC и дневните геомагнитни индекси не означава отсъствие на по-краткопериодична реакция. Анализът при времево отместване от 0, 1 и 2 денонощия позволява да се провери устойчивостта на зависимостите в дневен мащаб, но не определя конкретното физическо време на реакция на йоносферата.

Периодът 2019–2026 г. обхваща значителна част от развитието на 25-ия слънчев цикъл, включително неговата възходяща фаза и периода на висока слънчева активност, но не представлява завършен слънчев цикъл. Следователно резултатите характеризират разглежданата част от цикъла и не позволяват окончателно сравнение между всички негови фази. Продължаването на реда от наблюдения след 2026 г. би позволило по-пълно проследяване на последващото намаляване на слънчевата активност и проверка на получените многогодишни зависимости.

Високочестотният анализ от Глава 7 има експериментален и ограничен времеви обхват. Подробната обработка е извършена за едно представително денонощие, а използваният показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD не представлява стандартен индекс за фазова сцинтилация. Липсата на паралелни измервания със специализиран сцинтилационен приемник не позволява независимо количествено валидиране на установените краткопериодични фазови флуктуации. Поради това резултатите от този анализ трябва да се разглеждат като демонстрация на потенциала на наличните 10 Hz GNSS данни, а не като основание за статистическа характеристика на сцинтилационната активност над о-в Ливингстън.

Проверката на възпроизводимостта на публикуваната програмна реализация е извършена чрез представителни контролни случаи. Това потвърждава численото възпроизвеждане на приложените процедури за избраните тестови денонощия, но не представлява независимо повторно обработване на всеки отделен ден от многогодишния набор.

В обобщение, основните ограничения на изследването са свързани с неравномерното времево покритие, използването на една локална GNSS станция, различната пространствено-времева представителност на референтните TEC продукти, дневната времева резолюция на част от външните показатели и експерименталния характер на високочестотния анализ. Голяма част от тези ограничения са отчетени чрез използване на външни TEC продукти с различен методически произход, анализ на чувствителността, претеглени статистически модели и бутстрап проверки, но следва да бъдат вземани предвид при обобщаването на резултатите извън конкретния район и период на изследването.

8.6. Перспективи за бъдещи изследвания

Получените резултати очертават няколко направления, в които изследването може да бъде продължено и разширено. На първо място, удължаването на времевия ред след 2026 г. би позволило по-пълно проследяване на развитието на 25-ия слънчев цикъл и по-надеждно сравнение между неговите отделни фази. Това би намалило и влиянието на неравномерното представяне на отделните години в настоящата извадка.

Перспективно направление е включването на допълнителни GNSS станции от района на Антарктическия полуостров и съседните острови. Подобно разширяване би позволило локалните резултати от KOH2 да бъдат поставени в по-широк пространствен контекст и би дало възможност за изследване на хоризонталните градиенти, регионалната съгласуваност и пространственото разпространение на йоносферните смущения. Особено полезно би било съвместното разглеждане на KOH2 с близки GNSS станции, включително BJC1 при испанската база „Хуан Карлос I“, както и представянето на резултатите чрез геомагнитна ширина и магнитно местно време и спрямо положението на авроралния овал и полярната шапка.

Полезно би било и преминаването към по-висока времева разделителна способност при анализа на геомагнитните въздействия. Използването на часови или субчасови стойности на индексите Dst, SYM-H, Kp, AE (Auroral Electrojet), AL (Auroral Lower) и други показатели би позволило по-прецизно проследяване на краткопериодичната реакция на йоносферата и би намалило ограниченията, свързани с дневното осредняване. Това би дало възможност и за по-детайлно изследване на времевото отместване между геомагнитната активност и измененията на TEC.

Допълнителна перспектива е разширяването на многосистемната обработка чрез включване на Galileo и BeiDou наред с използваните в настоящото изследване GPS и GLONASS. Подобно разширяване следва да се основава на достатъчно продължителни и хомогенни наблюдателни редове и на последователно оценяване на междучестотните и междусистемните инструментални отмествания.

Друго важно направление е разширяването на високочестотния 10 Hz анализ към по-голям брой денонощия, включително както геомагнитно спокойни, така и смутени периоди. Това би позволило да се оцени повторяемостта на установените краткопериодични фазови флуктуации и да се изследва дали наблюдаваните при отделни спътници и направления спътник–приемник изменения имат систематична връзка с по-широки йоносферни процеси.

По-силна независима проверка на възпроизводимостта би могла да бъде постигната чрез повторна обработка с независимо реализирана процедура на по-голяма стратифицирана извадка от наблюдения, включваща различни сезони, нива на слънчева активност и геомагнитно спокойни и смутени периоди.

Особено ценна би била независимата проверка на експерименталния показател SIGMA_PHI_GF_EQUIV_RAD чрез специализиран сцинтилационен приемник или друг калибриран високочестотен продукт. Съвместният анализ с ROTI, DTEC и стандартни индекси като Phi60 и S4 би позволил да се оцени доколко разработеният подход може да бъде използван не само като диагностичен инструмент, но и като количествен показател за краткопериодична йоносферна изменчивост.

В по-дългосрочен план комбинирането на локалните TEC оценки, глобалните йоносферни карти, моделни продукти, високочестотните GNSS наблюдения и геомагнитните показатели би позволило изграждането на по-цялостна система за анализ на полярната йоносфера над о-в Ливингстън. Подобен подход би съчетал информация от различни пространствени и времеви мащаби и би подобрил възможността за разграничаване на дългопериодичните слънчево обусловени изменения от краткопериодичните геомагнитно свързани процеси.

9. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ПРИНОСИ

9.1. Основни резултати

В настоящото изследване е разработена и приложена последователна методика за определяне, проверка и анализ на пълното електронно съдържание на йоносферата над о-в Ливингстън въз основа на наблюденията от сезонно действащата GNSS станция KOH2. Изследването обхваща периода 2019–2026 г. и съчетава локални оценки, получени от наблюденията на глобалните навигационни спътникови системи, глобални и регионални йоносферни продукти, моделни данни, показатели за слънчевата и геомагнитната активност и експериментална обработка на високочестотни наблюдения.

Основните резултати могат да бъдат обобщени по следния начин:

1. Разработена и приложена е последователна процедура за определяне на пълното електронно съдържание на йоносферата от наблюденията на станция KOH2. Използвани са двучестотни фазови и кодови наблюдения, от които чрез геометрично независими линейни комбинации са получени оценки на електронното съдържание по направлението спътник–приемник и вертикалното пълно електронно съдържание. Формирана е и единна времева характеристика за района на станцията, подходяща за многогодишен анализ.
2. Извършена е сравнителна оценка чрез съпоставка с няколко външни йоносферни продукта с различен методически произход. Локалните резултати, получени с PyTECGg и pyOASIS, са сравнени с окончателните глобални йоносферни карти на Международната GNSS служба, с продукта за пълно електронно съдържание Madrigal и с моделните оценки на PyIRI. Допълнително е проверена чувствителността на резултатите спрямо глобални йоносферни карти, създадени от различни аналитични центрове.
3. Установено е, че локалните оценки възпроизвеждат надеждно основната времева изменчивост на йоносферното електронно съдържание. Независимо от различията в абсолютните стойности, локалните и външните продукти показват сходни изменения във времето. Това потвърждава, че наблюденията от KOH2 са представителни за проследяване на основните изменения на йоносферата над района на о-в Ливингстън.
4. Показано е, че количествената оценка на съответствието зависи от избрания референтен йоносферен продукт. Систематичното отместване и средноквадратичната грешка на локалните оценки се различават при сравнение с различните външни продукти. Това показва, че валидирането на локален метод не трябва да се основава само на един референтен източник, тъй като самите глобални и регионални продукти имат различна пространствена и времева представителност.
5. Установено е ясно нарастване на вертикалното пълно електронно съдържание с увеличаването на слънчевата активност през разглежданата част от 25-ия слънчев цикъл. Този резултат се наблюдава едновременно в локалния ред от KOH2, в глобалните йоносферни карти и в продукта Madrigal. Сходството между методически различните оценки показва, че установеният многогодишен ход представлява реален йоносферен сигнал, а не особеност на конкретен метод за обработка.
6. Потвърдена е положителната зависимост между йоносферното електронно съдържание и слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm. Зависимостта се запазва както при стандартния регресионен анализ, така и когато на отделните години се придава еднаква обща статистическа тежест. Това показва, че основният извод не се определя единствено от по-добре представените години в наблюдателната извадка.

7. Показано е, че величината на оцененото влияние на слънчевата активност е чувствителна към неравномерното времево покритие. При различно статистическо претегляне на годините се променя количествената оценка на зависимостта, въпреки че нейният знак и общата физическа интерпретация се запазват. Това подчертава необходимостта неравномерното разпределение на данните да бъде отчитано при анализ на многогодишни йоносферни редове.
8. След отстраняване на влиянието на слънчевата активност и на годишната и полугодишната сезонна компонента не е установена силна и устойчива еднозначна зависимост между локалното вертикално електронно съдържание и дневните показатели за геомагнитна активност. Това показва, че краткопериодичните изменения над о-в Ливингстън не могат да бъдат обяснени достатъчно чрез проста зависимост от един геомагнитен индекс.
9. По-ясно влияние на геомагнитната активност е установено чрез увеличаването на различията между различните йоносферни продукти. При геомагнитно смутени денонощия средноквадратичната грешка между локалните оценки и глобалните йоносферни карти на Международната GNSS служба нараства спрямо спокойните условия. Това показва, че при засилена геомагнитна активност различните методи за определяне на електронното съдържание започват да представят състоянието на йоносферата по-различно.
10. Установено е, че част от зависимостите между геомагнитната активност и различията между йоносферните продукти се запазват и при времево отместване от едно и две денонощия. Полученият резултат показва, че наблюдаваните статистически връзки не се ограничават само до денонощието на геомагнитното смущение. Той обаче не се интерпретира като доказателство за определено универсално време на реакция на йоносферата.
11. Устойчивостта на установените зависимости е проверена чрез два вида преизвадков статистически анализ (бустрап). Чрез бутстрап по години е оценена чувствителността към неравномерното представяне на отделните години, а чрез 7-дневен блоков бутстрап е отчетена зависимостта между близки във времето наблюдения. Най-последователни устойчиви зависимости са установени между геомагнитната активност и средноквадратичната грешка между локалната оценка от KOH2 и глобалните йоносферни карти на Международната GNSS служба.
12. Разработен е експериментален подход за използване на високочестотни спътникови наблюдения с честота 10 Hz за изследване на краткопериодични фазови флуктуации. Подходът използва двучестотни геометрично независими фазови комбинации и последователен контрол на качеството, което позволява да бъдат проследявани изменения в значително по-кратки времеви мащаби от тези на основния многогодишен анализ.
13. За представително денонощие е установен ограничен времеви интервал с едновременно повишени фазови флуктуации при няколко GPS и GLONASS спътника. Това показва потенциала на високочестотните наблюдения за изследване на краткопериодичната пространствено-времева изменчивост на полярната йоносфера. Поради липсата на независимо калибриран сцинтилационен приемник резултатът е интерпретиран предпазливо като период на повишена краткопериодична йоносферна изменчивост, а не като доказано сцинтилационно събитие.

В обобщение, изследването показва, че наблюденията от станция KOH2 могат да бъдат използвани за надеждно проследяване на йоносферното електронно съдържание над о-в Ливингстън в различни времеви мащаби. В многогодишен план основният ход се определя от слънчевата активност и сезонността, докато при по-кратки времеви мащаби геомагнитната активност се проявява по-ясно чрез увеличаване на различията между методически различните йоносферни оценки, отколкото чрез еднозначно увеличение

или намаление на локалното електронно съдържание. Високочестотните наблюдения допълват тази картина, като предоставят възможност за анализ на краткотрайни фазови изменения, които остават скрити при дневното и часовото осредняване.

9.2. Научни и методически приноси

Получените резултати позволяват приносите на изследването да бъдат разграничени в две основни направления – научни и методически.

9.2.1. Научни приноси

1. Получена е многогодишна характеристика на изменението на йоносферното електронно съдържание над о-в Ливингстън за периода 2019–2026 г. Проследено е развитието на локалното вертикално пълно електронно съдържание през съществена част от 25-ия слънчев цикъл и е показана устойчивата му положителна зависимост от слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm.
2. Разграничена е ролята на дългопериодичната и краткопериодичната йоносферна изменчивост. Показано е, че в многогодишен мащаб основните изменения на вертикалното пълно електронно съдържание са свързани със слънчевата активност и сезонността, докато при по-кратки времеви мащаби геомагнитната активност не се проявява като проста еднозначна промяна на локалното електронно съдържание.
3. Установено е, че геомагнитната активност се проявява по-ясно чрез увеличаване на несъответствията между различни оценки на йоносферното електронно съдържание. При геомагнитно смутени условия се наблюдава по-голямо разминаване между локалните оценки и глобалните йоносферни продукти, което насочва към по-силно влияние на пространствено-времевата нееднородност на йоносферата върху различните методи за нейното представяне.
4. Показано е, че част от зависимостите, свързани с геомагнитната активност, се запазват и при времево отместване от едно и две денонощия. Това разширява интерпретацията отвъд едновременното сравнение и показва, че статистическите асоциации могат да имат времево разпределен характер.
5. Демонстриран е потенциалът на високочестотните 10 Hz наблюдения от станция KOH2 за изследване на краткопериодични фазови флуктуации. За представително денонощие е установен ограничен интервал с едновременно повишени стойности при няколко GPS и GLONASS спътника, което показва възможност за допълващо изследване на краткотрайни йоносферни изменения в полярни условия.

9.2.2. Методически приноси

1. Разработена е последователна схема за определяне и проверка на локални оценки на йоносферното електронно съдържание от наблюденията на станция KOH2. Методиката обхваща подготовката на наблюденията, формирането на двучестотни геометрично независими комбинации, определянето на електронното съдържание и последващата му съпоставка с външни продукти с различен методически произход.
2. Приложен е многопродуктов сравнителен подход за оценка и валидация спрямо няколко различни йоносферни продукта. Това позволява да се оцени не само съответствието с конкретен референтен източник, но и чувствителността на резултатите към избора на глобална или регионална йоносферна оценка.
3. Въведен е подход за ограничаване на влиянието на неравномерното времево покритие при многогодишния анализ. Използването на претеглен регресионен

модел с еднаква обща статистическа тежест на отделните години позволява да се намали доминиращото влияние на по-добре представените години върху оценката на зависимостта със слънчевата активност.

4. Разработена е комбинирана схема за оценка на устойчивостта на геомагнитно свързаните зависимости. Чрез бутстрап по години и 7-дневен блоков бутстрап едновременно се отчита неравномерното представяне на отделните години и зависимостта между близки във времето наблюдения.
5. Разработен е експериментален метод за извличане на показател за краткопериодични фазови флуктуации от високочестотни геодезически GNSS наблюдения. Подходът използва двучестотни геометрично независими фазови комбинации, контрол на непрекъснатостта на фазата, филтриране и ограничения по височина на спътниците. Методът е формулиран така, че ясно да се разграничава от стандартните сцинтилационни индекси.

9.2.3. Приложна стойност

Практическата стойност на изследването се състои в създаването на възпроизводима схема за обработка и интерпретация на GNSS наблюдения от полярна станция в условия на непълно и неравномерно времево покритие. Разработените процедури могат да бъдат адаптирани към други постоянно действащи GNSS станции, при които е необходимо съчетаване на локални оценки, глобални йоносферни продукти, показатели за слънчевата и геомагнитната активност и високочестотни наблюдения.

Получената методическа рамка е приложима както при дългопериодични изследвания на йоносферното електронно съдържание, така и при целенасочен анализ на краткотрайни смущения. Това създава основа за бъдещо разширяване на изследването към повече антарктически станции, по-висока времева разделителна способност и независимо валидиране със специализирани сцинтилационни наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата монография е посветена на определянето, валидирането и анализа на йоносферното пълно електронно съдържание над о-в Ливингстън въз основа на наблюденията от сезонно действащата GNSS станция KOH2. Изследването обхваща периода 2019–2026 г. и съчетава локална обработка на двучестотни GNSS наблюдения, сравнение с глобални и регионални йоносферни продукти с различен методически произход, анализ на влиянието на слънчевата и геомагнитната активност и експериментално използване на високочестотни 10 Hz данни. По този начин йоносферната изменчивост е разгледана едновременно в многогодишен, дневен и краткопериодичен времеви мащаб.

Разработената схема за обработка на наблюденията от KOH2 позволява получаването на локални оценки на електронното съдържание и формирането на единна времева характеристика за района на станцията. Съпоставката с окончателните глобални йоносферни карти на Международната GNSS служба, Madrigal GNSS TEC, моделните оценки на PyIRI и отделни глобални йоносферни решения показва, че локалните резултати възпроизвеждат основната времева динамика на йоносферата. Същевременно установените различия в абсолютните стойности, систематичното отместване и средноквадратичната грешка показват, че оценката на локален йоносферен продукт зависи съществено от избрания референтен източник. Поради това валидацията следва да се разглежда като сравнителна оценка между методически различни продукти, а не като проверка спрямо единствена безусловно истинска стойност.

Многогодишният анализ показва ясно изразена връзка между изменението на вертикалното пълно електронно съдържание и развитието на слънчевата активност през разглежданата част от 25-ия слънчев цикъл. Положителната зависимост от слънчевия радиопоток при дължина на вълната 10.7 cm се установява последователно в локалния ред и в методически различните йоносферни продукти. Тя се запазва и при статистическо претегляне, което ограничава влиянието на неравномерното представяне на отделните години. Наред със слънчевата активност съществен принос към наблюдаваната изменчивост има сезонният ход, представен чрез годишна и полугодишна компонента.

След отстраняване на слънчевото и сезонното влияние не се установява силна и универсална еднопосочна зависимост между локалното вертикално електронно съдържание и дневните показатели за геомагнитна активност. По-ясна статистическа проява на геомагнитните смущения се наблюдава в увеличаването на несъответствията между различните йоносферни продукти. При смутени условия разликите между локалните оценки и глобалните йоносферни карти нарастват, като част от тези зависимости се запазват и при времево отместване от едно и две денонощия. Проведените бутстрап проверки показват, че най-последователните зависимости не се определят единствено от неравномерното разпределение на наблюденията или от кратки последователности от близки във времето данни.

Тези резултати подчертават сложния характер на реакцията на полярната йоносфера. Геомагнитното въздействие не следва да се търси само като увеличение или намаление на една локална стойност на електронното съдържание. При засилена пространствено-времева неоднородност различните методи и продукти могат да представят йоносферното състояние по различен начин. Именно затова съвместното използване на локални наблюдения, глобални карти и външни йоносферни продукти с различен методически произход предоставя по-пълна основа за интерпретация от анализа на един единствен времеви ред.

Експерименталната обработка на високочестотните 10 Hz наблюдения допълва основния анализ чрез изследване на значително по-кратки времеви мащаби. Използването на двучестотни геометрично независими фазови комбинации позволява да бъдат проследени краткопериодични фазови флуктуации по различни направления спътник–приемник. За разгледаното представително денонощие е установен ограничен

интервал с едновременно повишени стойности при няколко GPS и GLONASS спътника. Този резултат показва потенциала на високочестотните геодезически GNSS наблюдения за допълващо изследване на полярната йоносфера, но поради липсата на независимо калибрирани сцинтилационни измервания е интерпретиран предпазливо и не е използван като доказателство за конкретно сцинтилационно събитие.

В обобщение, изследването показва, че станция KOH2 предоставя ценен локален източник на информация за йоносферните изменения над о-в Ливингстън. Комбинирането на локално определено електронно съдържание, външни референтни продукти, показатели за слънчевата и геомагнитната активност и високочестотни наблюдения позволява йоносферата да бъде разглеждана в няколко взаимно допълващи се времеви и пространствени мащаба. Получените резултати създават основа за продължаване на времевия ред след 2026 г., включване на допълнителни антарктически станции и разширяване на високочестотния анализ към по-голям набор от спокойни и геомагнитно смутени периоди.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агенция по геодезия, картография и кадастър. (2016). Антарктика, Южни Шетландски острови, о-в Ливингстън: Българска антарктическа база. Лист 1 и лист 2. Топографска карта, М 1:2000. Изработена от Военно-географската служба на Българската армия. София.
2. Александров, Б., Цановски, Ю. (2011). Хидрографски дейности при екстремните условия на Антарктида. Геомедия, бр. 3, с. 24–27. ISSN 1313-3365.
3. Александров, Б. (2018). Първата българска мареографна станция в Антарктика, о-в Ливингстън. Геомедия, бр. 4. ISSN 1313-3365.
4. Александров, Б., Л. Пашова. Геодезически изследвания на БАБ „Св. Кл. Охридски“ на о-в Ливингстън и приносът им за изучаване на съвременни геофизични процеси. X Национална конференция по геофизика, 4 юни 2021, с. 1–10. DOI: 10.48368/BGS-2021.1.N1.
5. Александров, Б., Л. Пашова. Геодезически изследвания на БАБ „Св. Климент Охридски“ в Антарктика и приносът им за проследяване на глобалните климатични промени. В: Сборник доклади XXXI Международен симпозиум на СГЗБ, София, 4–5 ноември 2021 г., с. 167–177. ISSN 2367-6051.
6. Берданков, М., Н. Александрова. Регистриране движението на ледник „Перуника“ чрез радарни дистанционни методи. Геодезия, картография, земеустройство, 2025, бр. 3–4, с. 13–17. ISSN 0324-1610.
7. Велев, С. и др. Първи съвместни геолого-геодезични работи на нос Хана, о-в Ливингстън, Антарктика. В: Национална конференция с международно участие „Геонауки 2016“, 2016, с. 187–188. ISSN 1313-2377.
8. Геомедия. (2017). Геодезията на Антарктида – българският принос през сезон 2016–2017 г. Геомедия, 11 май 2017. ISSN 1313-3365.
9. Иванов, Л., Х. Пимпирев. България в Антарктида. Български антарктически институт и Атлантически клуб в България, 1995.
10. Камбуров, А. Геодинамични ГНСС изследвания в рамките на XXI Българска антарктическа експедиция на остров Ливингстън. В: Сборник с материали от 23-ти международен симпозиум по модерни технологии, образователни и професионални практики в геодезията и сходни дисциплини [CD-ROM]. София, 7–8 ноември 2013, № 13. ISBN 978-80-87159-33-0.
11. Камбуров, А. (2013). Кратък преглед на геодезическите точки в Антарктида. Геомедия, бр. 2, с. 42–45. ISSN 1313-3365.
12. Камбуров, А. (2013). Геодезически изследвания в Антарктика. Минно дело и геология, бр. 4, с. 55–60. ISSN 0861-5713.
13. Милев, Г., Василева, К. (2002**).** Развитие на GNSS и интегриране на България в тях. Геодезия, картография, земеустройство, бр. 5–6, с. 3–8. ISSN 0324-1610.
14. Милев, Г., Минчев, М. и др. (2006). Европейската референтна система в България. София: Академично издателство „Проф. Марин Дринов“. ISBN 978-954-322-118-9.
15. Славова, Т. Визуализирай света: пътеводител в геопространствените технологии. София: ИК „Св. Иван Рилски“, 2025, 154 с. ISBN 978-954-353-502-6.
16. Ads, A. G. et al. A comprehensive sounding of the ionospheric HF radio link from Antarctica to Spain. Radio Science, 2013, Vol. 48, pp. 1–12. DOI: 10.1029/2012RS005074.
17. Alexandrov, B., Y. Tzanovsky. Geodetic and hydrological research around Bulgarian Antarctic Base on Livingston Island, Antarctica. Ukrainian Antarctic Journal, 2012, No. 10–11, pp. 94–96. DOI: 10.33275/1727-7485.10-11.2012.290.
18. Andalsvik, Y. L., K. S. Jacobsen. Observed high-latitude GNSS disturbances during a less-than-minor geomagnetic storm. Radio Science, 2014, Vol. 49, No. 12, pp. 1277–1288. DOI: 10.1002/2014RS005418.
19. Arslan, A. E., A. Kamburov. Application of Terrestrial LiDAR for 3D Modelling of the Bulgarian Antarctic Station “St. Kliment Ohridski”. FIG Congress 2018, Istanbul,

Turkey, 6–11 May 2018, paper 9272. FIG Proceedings. ISBN 978-87-92853-78-3. ISSN 2308-3441.
20. Atanasova, M. Ice velocity monitoring of Livingston Island glaciers by time series SAR data. XI National Geophysical Conference, 9 June 2023. DOI: 10.48368/bgs-2023.1.N14.
21. Atanasova-Zlatareva, M., H. Nikolov. Creation of glaciers velocity maps in Livingston Island using Sentinel-1 data. In: Proceedings Vol. 2, 8th International Conference on Cartography and GIS, Nessebar, Bulgaria, 20–25 June 2022, pp. 191–198. ISSN 1314-0604.
22. Beggs, H. M., E. A. Essex, D. Rasch. Antarctic polar cap total electron content observations from Casey Station. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1994, Vol. 56, No. 5, pp. 659–666. DOI: 10.1016/0021-9169(94)90105-8.
23. Bilitza, D. et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. Space Weather, 2017, Vol. 15, No. 2, pp. 418–429. DOI: 10.1002/2016SW001593.
24. Bojilova, R., P. Mukhtarov, D. Pancheva. Global Ionospheric Response During Extreme Geomagnetic Storm in May 2024. Remote Sensing, 2024, Vol. 16, No. 21, Article 4046. DOI: 10.3390/rs16214046.
25. Bojilova, R., P. Mukhtarov. Ionospheric Response to Two Geomagnetic Storms on 12–13 November 2025 over European Region. Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 2026, Vol. 79, No. 8, pp. 1074–1082. DOI: 10.7546/CRABS.2026.08.08.
26. Brunini, C., F. Azpilicueta. Accuracy assessment of the GPS-based slant total electron content. Journal of Geodesy, 2009, Vol. 83, No. 8, pp. 773–785. DOI: 10.1007/s00190-008-0296-8.
27. Buchta, E. et al. Advancing geodynamic research in Antarctica: reprocessing GNSS data to infer consistent coordinate time series (GIANT-REGAIN). Earth System Science Data, 2025, Vol. 17, pp. 1761–1780. DOI: 10.5194/essd-17-1761-2025.
28. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). BKG GNSS Data Center. https://igs.bkg.bund.de/ (Посетен на 04.09.2026).
29. Buonsanto, M. J. Ionospheric storms — a review. Space Science Reviews, 1999, Vol. 88, No. 3–4, pp. 563–601. DOI: 10.1023/A:1005107532631.
30. Cardenas-O'Toole, A. M. et al. Phase and amplitude scintillations associated with polar cap patches: Statistical and event analyses. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2024, Vol. 129, e2023JA031765. DOI: 10.1029/2023JA031765.
31. Chakraborty, S., G. K. Seemala. Ionospheric responses over the Antarctic region to intense space weather events: Plasma convection vs. auroral precipitation. Advances in Space Research, 2026, Vol. 77, No. 2, pp. 2602–2613. DOI: 10.1016/j.asr.2025.10.107.
32. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document: Open Service Signal B1C, Version 1.0. December 2017.
33. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document: Open Service Signal B1I, Version 3.0. February 2019.
34. China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document: Open Service Signal B2a, Version 1.0. December 2017.
35. Ciraolo, L. et al. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. Journal of Geodesy, 2007, Vol. 81, No. 2, pp. 111–120. DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1.
36. Clynch, J., C. Henry. Ionospheric effects on GPS and DGPS in polar regions. Proceedings of ION GPS 1994, Salt Lake City, Utah, 1994, pp. 1579–1587.
37. Dechev, H., L. Pashova, B. Alexandrov, S. Lyubenova. Development of a web-based information system for polar research conducted in the region of the Bulgarian Antarctic Base "St. Kliment Ohridski", Livingston Island. In: Proceedings Vol. 2, 8th International Conference on Cartography and GIS, Nessebar, Bulgaria, 20–25 June 2022, pp. 83–94. ISSN 1314-0604.

38. De Franceschi, G. et al. Dynamics of high-latitude patches and associated small-scale irregularities during the October and November 2003 storms. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, Vol. 70, No. 6, pp. 879–888. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.05.018.
39. Deshpande, K. B. et al. Initial GPS scintillation results from CASES receiver at South Pole, Antarctica. Radio Science, 2012, Vol. 47, RS5009. DOI: 10.1029/2012RS005061.
40. Dimitrova, L. et al. Complex study of seismicity and Earth's structure on Livingston Island and surroundings. 35th General Assembly of the European Seismological Commission, Trieste, 4–10 September 2016, ESC2016-313.
41. Dimitrova, L. et al. Experimenting seismological and GNSS equipment in extreme conditions in preparation for complex studies in the area of the Bulgarian Antarctic Base. Geophysical Research Abstracts, 2015, Vol. 17, EGU2015-11069.
42. Dimitrova, L., G. Georgieva, V. Gourev. Exploring seismicity and ice cover of Livingston Island – research projects. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, EGU23-16573. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16573.
43. Dow, J. M., R. E. Neilan, C. Rizos. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. Journal of Geodesy, 2009, Vol. 83, No. 3–4, pp. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
44. European Union Agency for the Space Programme (EUSPA). Galileo Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD), Issue 2.2. November 2025.
45. Forsythe, V. V., D. Bilitza, A. G. Burrell, K. F. Dymond, B. A. Fritz, S. E. McDonald. PyIRI: Whole-Globe Approach to the International Reference Ionosphere Modeling Implemented in Python. Space Weather, 2024, Vol. 22, No. 4, e2023SW003739. DOI: 10.1029/2023SW003739.
46. Forsythe, V. V. et al. PyIRI [Computer software]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.8235173.
47. Galushko, V. G. et al. Statistics of ionospheric disturbances over the Antarctic Peninsula as derived from TEC measurements. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2016, Vol. 121, No. 4, pp. 3395–3409. DOI: 10.1002/2015JA022302.
48. Georgieva, G., L. Dimitrova, V. Gourev. Ice generated events in Perunika Glacier, recorded by LIVV station. 10th Congress of the Balkan Geophysical Society, Conference Proceedings, 2019, Vol. 2019, pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201902661.
49. Gonzalez, W. D. et al. What is a geomagnetic storm? Journal of Geophysical Research, 1994, Vol. 99, No. A4, pp. 5771–5792. DOI: 10.1029/93JA02867.
50. Harris, C. R. et al. Array programming with NumPy. Nature, 2020, Vol. 585, pp. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
51. Hernández-Pajares, M. et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. Journal of Geodesy, 2009, Vol. 83, pp. 263–275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
52. Hernández-Pajares, M., J. M. Juan, J. Sanz. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1999, Vol. 61, No. 16, pp. 1237–1247. DOI: 10.1016/S1364-6826(99)00054-1.
53. Hilla, S. The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-d). National Geodetic Survey, NOAA, 21 February 2016.
54. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, E. Wasle. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Vienna: Springer, 2008, XXIX + 518 p. DOI: 10.1007/978-3-211-73017-1.
55. Hunter, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering, 2007, Vol. 9, No. 3, pp. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
56. International GNSS Service (IGS). Ionosphere Working Group and Global Ionosphere Maps. https://igs.org/wg/ionosphere/ (Посетен на 04.09.2026).

57. International GNSS Service / RTCM-SC104. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format, Version 3.04. 23 November 2018.
58. Iyemori, T. Storm-Time Magnetospheric Currents Inferred from Mid-Latitude Geomagnetic Field Variations. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 1990, Vol. 42, No. 11, pp. 1249–1265. DOI: 10.5636/jgg.42.1249.
59. Juan, J. M. et al. A method for scintillation characterization using geodetic receivers operating at 1 Hz. Journal of Geodesy, 2017, Vol. 91, No. 11, pp. 1383–1397. DOI: 10.1007/s00190-017-1031-0.
60. Kamburov, A. et al. Establishment of geodetic GNSS network on Livingston Island, Antarctica. Geodesy, 2017, Vol. 22, pp. 123–137. ISSN 0324-1114.
61. Kamburov, A., Ivanov, L. (2023). Bowles Ridge and Central Tangra Mountains: Livingston Island, Antarctica. Topographic map, scale 1:25 000. Sofia: Manfred Wörner Foundation. Available at: Wikimedia Commons, Bowles Ridge and Tangra Mountains BG.png, CC BY-SA 4.0 (accessed 07.09.2026).
62. Kamburov, A. (2026). KOH2 GNSS Ionospheric TEC Processing and Validation Scripts (Version 1.0.1) [Computer software]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.22309322.
63. Kamburov, A. (2026). KOH2 GNSS Ionospheric TEC Analysis and Reproducibility Dataset (2019–2026), Version 1.0.0. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.22494210.
64. Kelley, M. C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2009, XIV + 556 p.
65. Kinrade, J. et al. Ionospheric scintillation over Antarctica during the storm of 5–6 April 2010. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012, Vol. 117, A05304. DOI: 10.1029/2011JA017073.
66. Kintner, P. M., B. M. Ledvina, E. R. de Paula. GPS and ionospheric scintillations. Space Weather, 2007, Vol. 5, S09003. DOI: 10.1029/2006SW000260.
67. Kivelson, M. G., C. T. Russell, eds. Introduction to Space Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, 568 p. DOI: 10.1017/9781139878296.
68. Kozarev, K. et al. First Observations at the Bulgarian Antarctic Astronomical Observatory. Bulgarian Astronomical Journal, 2026, Vol. 45, pp. 110–122.
69. Krankowski, A. et al. The occurrence of polar cap patches in TEC fluctuations detected using GPS measurements in southern hemisphere. Advances in Space Research, 2006, Vol. 38, No. 11, pp. 2601–2609. DOI: 10.1016/j.asr.2005.12.006.
70. Kutiev, I. et al. Adjustments of the TaD electron density reconstruction model with GNSS-TEC parameters for operational application purposes. Journal of Space Weather and Space Climate, 2012, Vol. 2, A21. DOI: 10.1051/swsc/2012021.
71. Lisachenko, V. et al. Investigation of total electron content variations in the ionosphere above the Antarctic Peninsula. Radio Physics and Radio Astronomy, 2010, Vol. 1, No. 2, pp. 137–147. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v1.i2.70.
72. Mannucci, A. J. et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. Radio Science, 1998, Vol. 33, No. 3, pp. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.
73. Matzka, J. et al. The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity. Space Weather, 2021, Vol. 19, e2020SW002641. DOI: 10.1029/2020SW002641.
74. McKinney, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 2010, pp. 56–61. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
75. Mendillo, M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. Reviews of Geophysics, 2006, Vol. 44, RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193.
76. Mendillo, M., J. A. Klobuchar. Total electron content: Synthesis of past storm studies and needed future work. Radio Science, 2006, Vol. 41, RS5S02. DOI: 10.1029/2005RS003394.
77. Milev, G., Valev, G., Minchev, M., Vassileva, K., Tashkov, T., Gegov, K., Belyashki, T., Petrov, G. (2003). National Report of Bulgaria. In: Torres, J. A., Hornik, H. (eds.), Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), held in Ponta Delgada, 5–8 June 2002. EUREF Publication No. 12, Mitteilungen des

Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 29, Frankfurt am Main, pp. 232–235. ISBN 3-89888-873-8.
78. MIT Haystack Observatory. Madrigal Distributed Database — GNSS Total Electron Content products. http://cedar.openmadrigal.org/ (Посетен на 04.09.2026).
79. Mosert, M. et al. Variations of foF2 and GPS total electron content over the Antarctic sector. Earth, Planets and Space, 2011, Vol. 63, pp. 327–333. DOI: 10.5047/eps.2011.01.006.
80. Mukhtarov, P. et al. Global TEC maps based on GNSS data: 1. Empirical background TEC model. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, Vol. 118, pp. 4594–4608. DOI: 10.1002/jgra.50413.
81. Mukhtarov, P. et al. Global TEC maps based on GNSS data: 2. Model evaluation. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, Vol. 118, pp. 4609–4617. DOI: 10.1002/jgra.50412.
82. Mukhtarov, P., B. Andonov, D. Pancheva. Empirical model of TEC response to geomagnetic and solar forcing over Balkan Peninsula. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018, Vol. 167, pp. 80–95. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.11.010.
83. Mukhtarov, P., B. Andonov, D. Pancheva. Global empirical model of TEC response to geomagnetic activity. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, Vol. 118, No. 10, pp. 6666–6685. DOI: 10.1002/jgra.50576.
84. Mukhtarov, P., R. Bojilova. Influence of Short-Term Variations in Solar Activity on Total Electron Content. Atmosphere, 2024, Vol. 15, No. 8, Article 913. DOI: 10.3390/atmos15080913.
85. NASA Goddard Space Flight Center, Space Physics Data Facility. OMNIWeb Plus database. https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ (Посетен на 04.09.2026).
86. Ngwira, C. M., L.-A. McKinnell, P. J. Cilliers. GPS phase scintillation observed over a high-latitude Antarctic station during solar minimum. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010, Vol. 72, No. 9–10, pp. 718–725. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.03.014.
87. Nischan, T. GFZRNX – RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox. GFZ Data Services, 2016. DOI: 10.5880/GFZ.1.1.2016.002.
88. OpenAI. ChatGPT [AI software]. 2026. Available at: https://chatgpt.com/ (accessed 07.09.2026).
89. Orús, R. et al. Validation of the GPS TEC maps with TOPEX data. Advances in Space Research, 2003, Vol. 31, No. 3, pp. 621–627. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00026-7.
90. Pancheva, D., P. Mukhtarov, B. Andonov. Global structure of ionospheric TEC anomalies driven by geomagnetic storms. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2016, Vol. 145, pp. 170–182. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.04.015.
91. Pancheva, D., P. Mukhtarov, R. Bojilova. Response to geomagnetic storm on 23–24 March 2023: long-lasting longitudinal variations of the global ionospheric TEC. Advances in Space Research, 2024, Vol. 73, No. 12, pp. 6006–6028. DOI: 10.1016/j.asr.2024.03.023.
92. Pashova, L., B. Srebrov, O. Kounchev. Investigation of Strong Geomagnetic Storms Using Multidisciplinary Big Data Sets. 2019 Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering (BdKCSE), 2019, Article 9010611. DOI: 10.1109/BdKCSE48644.2019.9010611.
93. Pashova, L., B. Alexandrov. Estimation of tidal constituents from sea level registrations in BAB “St. Kliment Ohridski”, Livingston Island. In: Proceedings of the 3rd Intercontinental Geoinformation Days (IGD), Mersin, Turkey, 17–18 November 2021, pp. 50–53. ISBN 978-625-44303-7-4.
94. Pashova, L., B. Alexandrov, Need of a geodetic core infrastructure to support interdisciplinary research at the Bulgarian Antarctic Base “St. Kliment Ohridski”, Livingston Island, 11th SCAR Open Science Conference, Pucón, Chile, 19–23 August 2024, poster S47-408.

95. Pi, X. et al. Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network. Geophysical Research Letters, 1997, Vol. 24, No. 18, pp. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.
96. Picanço, G. A. S. OASIS: Open-Access System for Ionospheric Studies, Version 1.0.3 [software]. 2025. https://pypi.org/project/pyOASIS/ (Посетен на 04.09.2026).
97. Pijoan, J. L. et al. Remote Geophysical Observatory in Antarctica with HF Data Transmission: A Review. Remote Sensing, 2014, Vol. 6, No. 8, pp. 7233–7259. DOI: 10.3390/rs6087233.
98. Pimpirev, C., N. Chipev, eds. Bulgarian Antarctic Research: A Synthesis. Sofia: St. Kliment Ohridski University Press, 2015, 335 p. ISBN 978-954-07-3939-7.
99. Pimpirev, C., N. Davidov. Antarctica: The Extreme South. Sofia: St. Kliment Ohridski University Press, 2003, 60 p.
100. Prikryl, P. et al. GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum. Annales Geophysicae, 2010, Vol. 28, pp. 1307–1316. DOI: 10.5194/angeo-28-1307-2010.
101. Priyadarshi, S., Q.-H. Zhang, Y. Wang. Geomagnetic storm-time scintillation study in Antarctica — a comparison of model and observation. Polar Science, 2021, Vol. 28, 100634. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100634.
102. Priyadarshi, S., Q.-H. Zhang, Y.-Z. Ma. Antarctica SED/TOI associated ionospheric scintillation during 27 February 2014 geomagnetic storm. Astrophysics and Space Science, 2018, Vol. 363, Article 262. DOI: 10.1007/s10509-018-3484-x.
103. Rideout, W., A. J. Coster. Automated GPS processing for global total electron content data. GPS Solutions, 2006, Vol. 10, No. 3, pp. 219–228. DOI: 10.1007/s10291-006-0029-5.
104. Roma-Dollase, D. et al. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle. Journal of Geodesy, 2018, Vol. 92, No. 6, pp. 691–706. DOI: 10.1007/s00190-017-1088-9.
105. Russian Institute of Space Device Engineering. Global Navigation Satellite System GLONASS: Interface Control Document, Navigational Radio Signal in Bands L1, L2, Edition 5.1. Moscow, 2008.
106. Russian Space Systems. GLONASS Interface Control Document: Code Division Multiple Access Open Service Navigation Signal in L3 Frequency Band, Edition 1.0. Moscow, 2016.
107. Schaer, S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Vol. 59. Zürich, 1999, 205 p.
108. Schunk, R. W., A. F. Nagy. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 628 p. DOI: 10.1017/CBO9780511635342.
109. Seemala, G. K. et al. Seasonal and solar activity dependence of TEC over Bharati station, Antarctica. Polar Science, 2023, Vol. 38, 101001. DOI: 10.1016/j.polar.2023.101001.
110. SILSO World Data Center. Sunspot Index and Long-term Solar Observations. https://www.sidc.be/SILSO/ (Посетен на 04.09.2026).
111. Sopin, A. O. et al. Background variations in the total electron content of the ionosphere over the Antarctic Peninsula. Radio Physics and Radio Astronomy, 2012, Vol. 3, No. 3, pp. 233–240. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i3.60.
112. Spogli, L. et al. Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions. Annales Geophysicae, 2009, Vol. 27, pp. 3429–3437. DOI: 10.5194/angeo-27-3429-2009.
113. Srebrov, B., L. Pashova. Investigation of the influence of strong geomagnetic storms on the signal parameters in GNSS station SOFI. In: Proceedings of the Seventh Scientific Conference with International Participation “Space, Ecology, Safety” – SES 2011, Sofia, 29 November–1 December 2011, pp. 214–221. ISSN 1313-3888.
114. Srebrov, B., L. Pashova. Study of the ionospheric state over Sofia area during the geomagnetic storm in October 2003 using measured and modelled parameters.

Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 2012, Vol. 65, No. 10, pp. 1419–1426.
115. Srebrov, B., L. Pashova, O. Kounchev. Study of local manifestations of G5 – extreme geomagnetic storms (29–31 October 2003) in midlatitudes using geomagnetic data by continuous wavelet transforms. Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 2018, Vol. 71, No. 6, pp. 803–811. DOI: 10.7546/CRABS.2018.06.11.
116. Stankov, S. M., P. Y. Muhtarov. Reconstruction of the electron density profile from the total electron content using upper transition level and vertical incidence sounding measurements. Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 2001, Vol. 54, No. 9, pp. 45–48. ISSN 0861-1459.
117. Sugiura, M. Hourly Values of Equatorial Dst for the IGY. Annals of the International Geophysical Year, Vol. 35. Oxford: Pergamon Press, 1964.
118. Tapping, K. F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). Space Weather, 2013, Vol. 11, No. 7, pp. 394–406. DOI: 10.1002/swe.20064.
119. Tate, B. S., E. A. Essex. Investigation of irregularities in the southern high latitude ionosphere. Advances in Space Research, 2001, Vol. 27, No. 8, pp. 1385–1389. DOI: 10.1016/S0273-1177(01)00035-7.
120. Teunissen, P. J. G., O. Montenbruck, eds. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer, 2017, XXIV + 1268 p. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
121. Tiwari, S. et al. Ionospheric irregularities at Antarctic using GPS measurements. Journal of Earth System Science, 2012, Vol. 121, No. 2, pp. 345–353. DOI: 10.1007/s12040-012-0168-8.
122. Torta, J. M. et al. Behaviour of the quiet-day geomagnetic variation at Livingston Island and variability of the Sq focus position in the South American-Antarctic Peninsula region. Earth, Planets and Space, 2010, Vol. 62, pp. 297–307. DOI: 10.5047/eps.2009.11.004.
123. U.S. Space Force. IS-GPS-200N: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, L1 and L2. 22 August 2022; Revision Notice IRN-IS-200N-003, 19 January 2024.
124. U.S. Space Force. IS-GPS-705J: Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces. 22 August 2022; Revision Notice IRN-IS-705J-003, 19 January 2024.
125. Van Dierendonck, A. J., J. Klobuchar, Q. Hua. Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers. Proceedings of ION GPS 1993, Salt Lake City, Utah, 1993, pp. 1333–1342.
126. Ventriglia, V. et al. PyTECGg: total electron content calibration with GNSS data. SoftwareX, 2026, Vol. 34, 102737. DOI: 10.1016/j.softx.2026.102737.
127. Vilella, C., D. Miralles, J. L. Pijoan. An Antarctica-to-Spain HF ionospheric radio link: Sounding results. Radio Science, 2008, Vol. 43, RS4008. DOI: 10.1029/2007RS003812.
128. Virtanen, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods, 2020, Vol. 17, pp. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
129. Wernik, A. W., J. A. Secan, E. J. Fremouw. Ionospheric irregularities and scintillation. Advances in Space Research, 2003, Vol. 31, No. 4, pp. 971–981. DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00795-0.
130. Wielgosz, P. et al. Validation of GNSS-derived global ionosphere maps for different solar activity levels: case studies for years 2014 and 2018. GPS Solutions, 2021, Vol. 25, Article 103. DOI: 10.1007/s10291-021-01142-x.
131. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Dst and related geomagnetic indices. https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ (Посетен на 04.09.2026).
132. Yeh, K. C., C.-H. Liu. Radio wave scintillations in the ionosphere. Proceedings of the IEEE, 1982, Vol. 70, No. 4, pp. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.
133. Yordanov, A., V. Gourev, G. Georgieva. Evaluating the Impact of Radiometric Calibration and Thermal Noise Removal on Glacier Velocity Estimates from Sentinel-1 SAR Data:

A Case Study on Livingston Island. Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 2026, Vol. 79, No. 6, pp. 742–750. DOI: 10.7546/CRABS.2026.06.05.
134. Zhang, B. et al. A single station ionospheric empirical model using GPS-TEC observations based on nonlinear least square estimation method. Advances in Space Research, 2021, Vol. 68, No. 9, pp. 3821–3834. DOI: 10.1016/j.asr.2021.07.017.
135. PyTECGg. Official documentation. https://viventriglia.github.io/PyTECGg/ (Посетен на 04.09.2026).

Първо електронно издание

София, 2026

ISBN (електронно издание, PDF): 978-619-92493-3-8

DOI: 10.5281/zenodo.23857919

Издател: Съюз на геодезистите и земеустроителите в България

Монографията представя многогодишно изследване на йоносферното пълно електронно съдържание над о-в Ливингстън, Антарктика, въз основа на GNSS наблюдения от станция KOH2 през периода 2019–2026 г. Разработена и проверена е възпроизводима методика за определяне на локални TEC оценки и за тяхната съпоставка с глобални, регионални и моделни йоносферни продукти. Изследването съчетава геодезическа обработка, йоносферен анализ, статистическо моделиране и програмни процедури.

чл.-кор. проф. д-р инж. Георги Костов Милев:
„Давам много висока оценка на рецензираната от мен монография и изказвам похвала на нейния автор.“

доц. д-р инж. Любка Георгиева Пашова:
„Монографията съответства на академичния стандарт; текстовото и графично оформление са на високо професионално ниво.“



ЗА АВТОРА
Аспарух Камбуров е преподавател и изследовател в областта на геодезията и GNSS технологиите. Участвал е в XXI и XXV български антарктически експедиции на о-в Ливингстън.

ЕЛЕКТРОННО ИЗДАНИЕ
Свободно достъпно онлайн
DOI: 10.5281/zenodo.23857919

СЪЮЗ НА ГЕОДЕЗИСТИТЕ И ЗЕМЕУСТРОИТЕЛИТЕ В БЪЛГАРИЯ