

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
Учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Направление: 03.03.03 – Радиофизика
Профиль: Радиофизические методы по областям применения
(Радиофизические измерения)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПОСТРОЕНИЕ ДВУМЕРНЫХ КАРТ ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО
ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО ПЛОТНОЙ СЕТИ ГНСС
СТАНЦИЙ ВО ВРЕМЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИОНОСФЕРУ МОЩНЫМ
РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Студент 4 курса группы 06-521

«19» июня 2019 г.



(Максимов Д.С.)

Научный руководитель

к.ф.- м.н., доцент

«19» июня 2019 г.

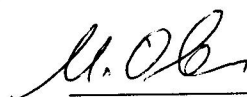


(Насыров И.А.)

Заведующий кафедрой радиоэлектроники

д.ф.- м.н., профессор

«19» июня 2019 г.



(Овчинников М.Н.)

Казань-2019

Содержание

Введение	2
Цель и основные задачи бакалаврской работы	5
1. Теоретическая часть.....	7
1.1 Ионосфера	7
1.2 Ионосферные возмущения.	9
1.2.1 Классификация ионосферных возмущений	9
1.2.2 Методы радиофизического детектирования возмущений ионосферы. 11	
1.3 Трансионосферное зондирование на основе ГНСС	13
1.3.1 Основная информация о ГНСС	13
1.3.2 Глобальная и региональные сети приемников ГНСС.....	13
1.3.3 Расчет ПЭС по данным ГНСС приемников	14
2 Практическая часть	18
2.1 Основные сведения об эксперименте.	18
2.2 Обработка данных эксперимента.....	20
2.3 Определение пространственного положения подионосферной точки	21
2.4 Расчет ПЭС	23
2.5 Построение двумерных карт ПЭС	24
Заключение	31
Литература.....	32

Введение

Проблемы изучения возмущений ионосферы являются актуальными на протяжении уже нескольких десятков лет, причиной тому являются многие практические аспекты. Неоднородностями ионосферы являются изменения различных параметров ее составляющих, таких, например, как полное электронное содержание (ПЭС), концентрация электронов (N_e), температура электронов и ионов и др. Возмущения ионосферы являются одним из факторов, характеризующих космическую погоду в околоземном космическом пространстве и сильно влияющих на работу актуальных средств связи, навигации, локации, наземной и космической техники, энергетики и т.д. [1].

На данный момент крупномасштабная структура ионосферы изучена достаточно хорошо, такие параметры как: сезонные и климатические ее вариации, глобальное распределение ионизации. Достаточно хорошо исследовано влияние однородной и фоновой (регулярно-неоднородной) ионизированной структуры на распространение радиоволн [4].

Значительно меньше исследованы перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИБ). Серьезной проблемой является анализ процессов появления, перемещения и разрушения неоднородностей электронной концентрации. И определение источников неоднородностей в конкретных случаях является непростой задачей. Существует множество современных международных организаций, занимающихся решением данных проблем (SCOTER, COSPAR, URSI и др.). Некоторые страны разрабатывают собственные национальные программы космической погоды для своевременной диагностики ионосферы и околоземного космического пространства [1].

Существует множество методов радиофизического зондирования (радары некогерентного рассеяния, ионозонды, регистрация сигналов космических радиоисточников и т.д.), которые образовали базу наших знаний о составе и

динамике ионосферы. Представленные способы исследования и изучения ионосферы пользуются популярностью и на сегодняшний день. Правда, стоит заметить, что современные требования, связанные с детальной диагностикой и прогнозами возмущений в ионосфере, становятся все выше и выше к качеству получаемой информации и техническим характеристикам систем. Наиболее важные с точки зрения научного интереса воздействия требуют непрерывного детектирования и работы системы мониторинга.

В настоящее время активное развитие получают глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) американская – GPS и российская – ГЛОНАСС, предназначенные для определения местоположения пользователя, регистрируя сигналы навигационных спутников. При прохождении радиосигнала через толщу ионосферы проявляется ионосферная задержка. Время задержки прямо пропорционально ПЭС вдоль всей траектории распространения радиоволны. Также изменения ПЭС катализируют пропорциональные фазовые изменения и искажения амплитуды сигнала. Наблюдая за вариациями ПЭС, можно использовать полученные данные для прогнозирования землетрясений, а также существенных влияний на наземную радиосвязь. Естественно, информация о полном электронном содержании даст возможность улучшить определение местоположения пользователя, и чем выше пространственно-временное разрешение концентрации электронов в ионосфере, тем точнее это можно сделать [1].

На основе данных ГНСС–систем широко распространились сети приемников. Чувствительность фазовых двухчастотных измерений дает возможность регистрировать возмущения амплитудой до тысячных долей процента от суточных изменений полного электронного содержания. Приемники, размещенные на расстояниях порядка нескольких и десятков километров, дают возможность определять пространственные характерные параметры возмущений, неоднородностей и их характеристики перемещения. Использование наземных сетей двухчастотных приемников ГНСС дают

возможность глобального, локального и непрерывного мониторинга возмущений ионосферы с временным и пространственным разрешением, удовлетворяющим современным высоким требованиям качества.

Вышесказанное создает актуальность задач по применению и развитию зондирования околоземного космического пространства, основанного на использовании навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS .

Цель и основные задачи бакалаврской работы

Целью работы является исследование возмущений ионосферы в поволжском регионе, обусловленных влиянием мощных радиоимпульсов со станции «Сура» в поселке Васильсурск Нижегородской области, на основе разработанных методов обработки данных двухчастотных приемников навигационных систем GPS и ГЛОНАСС.

Решались следующие задачи:

1. Разработка быстродействующего считывания данных из файлов RINEX-формата.
2. Определение спутников, проходящих в зоне видимости в моменты времени, когда происходила накачка ионосферы.
3. Разработка алгоритмов для вычисления ПЭС в соответствии с местом и углом наклона спутника относительно каждой исследуемой станции.
4. Разработка методики построения двумерных карт распределения ПЭС в ионосфере на основе полученных данных.
5. Исследование отклика ионосферы на мощные радиоимпульсы станции накачки.

Апробация результатов работы.

Основные результаты, полученные в работе докладывались и обсуждались на:

XXVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов», Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, 2019г;

Планируются:

выступление на XXVI Всероссийской открытой научной конференции "Распространение радиоволн" Казань, 2019 г;

выступление на Байкальской научной молодежной школе по фундаментальной физике БШФФ– 2019, Иркутск;

печать статьи в сборнике статей итоговой научно-образовательной конференции студентов казанского федерального университета 2019 год, Казань, 2019 г.

1. Теоретическая часть

1.1 Ионосфера

Ионосфера- плазменный слой в верхней атмосфере Земли на высотах от 60 до 1000 км. Она состоит из положительных ионов (O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ , N^+ , H^+ , He^+) и свободных электронов, «вырванных» в результате ионизации атомов (рис.1). В нижних областях ионосферы ионизация мала, а концентрация нейтральных частиц достаточно велика, в этих областях также образуются отрицательные ионы при присоединении свободного электрона к нейтральному атому[12].

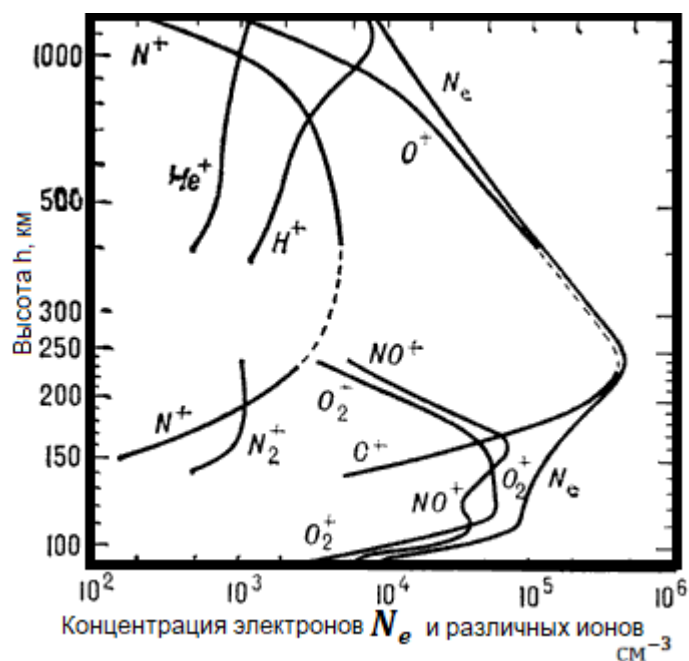


Рис. 1. Распределение ионов и свободных электронов в ионосфере

Условно ионосферу разделяют на слои D, E и F (рис. 2). Для слоя D (60-90 км) свойственна слабая ионизация. Основополагающим источником ионизации данной области служат рентгеновское солнечное излучение и метеорные потоки, сгорающие на высотах около 60-90 км. В ночное время ионизация в D области значительно уменьшается. В слое E (90-120 км) в дневное время возрастает концентрация электронов с высотой в связи с поглощением коротковолнового солнечного излучения. На высоте $h \sim 110$ км максимальна

концентрация электронов ($n_e \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$), данное свойство сильно влияет на распространение средних радиоволн, отражаемых от рассматриваемой нами части ионосферы.

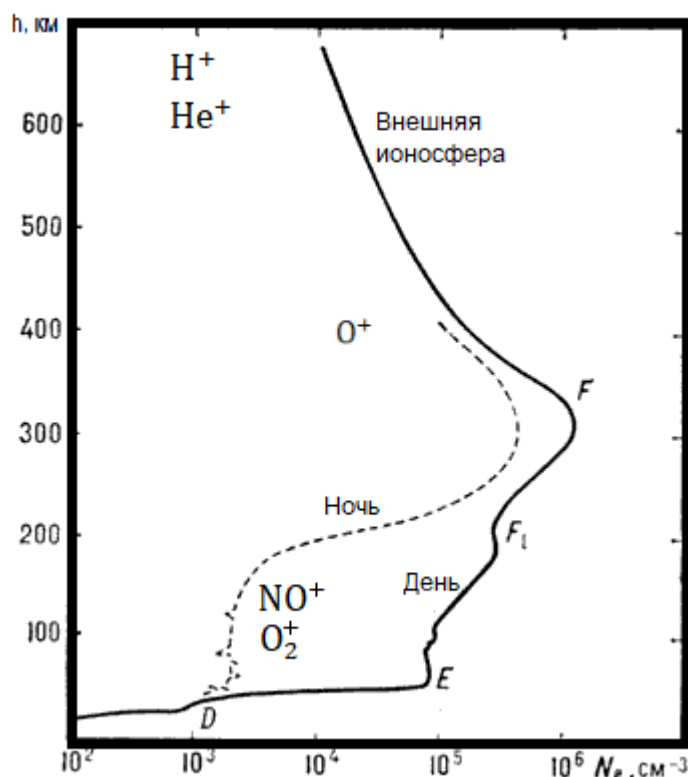


Рис. 2 Структура дневной и ночной ионосферы, показывающая распределение концентрации электронов и ионосферные слои.

Слоем F обычно называют ионосферу расположившуюся выше 120 км. Наибольшее образование ионов сконцентрировано на высотах $h_{max1} \sim 150 - 200 \text{ км}$ и коррелировано оно также с коротковолновым излучением Солнца, но из-за процессов диффузии происходит перемещение электронов и ионов вверх и вниз от h_{max1} . Благодаря этому качеству наибольшая концентрация ионов и электронов перемещается выше к высотам $h_{max2} \sim 250 - 400 \text{ км}$. Из-за мощной ионизации ультрафиолетовым излучением Солнца в дневное время образуется новый слой F_1 , располагающийся на высотах 150–200 км, оказывающий сильное влияние на распространение коротких радиоволн. Расположенную выше области F_1 , часть слоя F часто называют слоем F_2 [12].

1.2 Ионосферные возмущения

По своей природе ионосфера подвержена изменениям в силу внешних факторов, воздействующих как из-за пределов нашей планеты, так и исходящих с ее недр и поверхности. Неоднородности ионосферы проявляются в виде изменения параметров ионосферной плазмы: концентрации электронов (N_e), концентрации ионов, их температуры, а также температуры электронов (T_i , T_e), полного электронного содержания (ПЭС).

1.2.1 Классификация ионосферных возмущений

Возмущения ионосферы классифицируются по их скорости перемещения, по величине вариации электронной концентрации, пространственно-временным масштабам. Временные и пространственные неоднородности определяются характеристиками причины этих возмущений [4-5]. В основном возмущения ионосферной плазмы разделяют на крупномасштабные (КМ), среднемасштабные (СМ), мелкомасштабные (ММ) ПИВ (перемещающиеся ионосферные возмущения), ударно-акустические волны (УАВ) и внезапные ионосферные возмущения (ВИВ).

Крупномасштабные ПИВ образуются в результате сильных магнитных бурь, они достигают масштабов 600-1200 км и имеют скорость перемещения до 1000 м/с. Среднемасштабные ПИВ – наиболее частый тип возмущений, причиной им может быть различное множество факторов от землетрясений до солнечных терминаторов, имеют длины волн 50-600 км. Ударные акустические волны образуются при разовых выбросах энергии, как те же землетрясения или извержения вулканов, также причиной их генерации становятся запуски космических аппаратов. Внезапные ионосферные возмущения генерируются в результате вспышек на Солнце, вследствие чего резко увеличивается концентрация электронов в ионосфере.

Изучение всех вышеперечисленных типов возмущений имеет важный интерес в прикладных аспектах, для своевременной диагностики ионосферы или прогнозирования условий космической погоды.

1.2.2 Методы радиофизического детектирования возмущений ионосферы

Существует множество методов радиофизического детектирования неоднородностей в ионосфере, и они играют одну из важнейших ролей в её исследовании.

Измерения доплеровского сдвига частоты

Благодаря данному методу можно регистрировать весьма слабые ПИВ различной природы (неоднородности, генерируемые грозами, ураганами, торнадо, взрывами, солнечными затмениями и т.д.)

Метод некогерентного рассеяния радиоволн

Заключается в излучении на зафиксированной частоте радиоимпульса с аппарата, находящегося на Земле и измерении сигнала, который рассеялся на свободных электронах в ионосфере, эффект томсоновского рассеяния [6,7]. Данный метод позволяет изучать вертикальное движение неоднородности по ионосфере. Однако, оборудование для применения метода некогерентного рассеяния является дорогостоящим и довольно сложным, а чувствительность метода не превышает одного процента.

Трансионосферное зондирование

Представляет собой просвечивание атмосферы высокочастотными сигналами, причем источниками сигналов могут служить как естественные объекты космического радиоизлучения, так и передатчики радиосигналов с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Земная атмосфера прозрачна для двух диапазонов частот: первый захватывает видимый и инфракрасный спектр излучения (1–1000 ТГц), второй расположился на отрезке 5–20 МГц.

Получение сигналов от естественных космических радиоисточников позволяет получать информацию о нижних слоях ионосферы, и в качественные данные можно извлечь лишь от сильных выбросов энергии.

Использование спутников как источников высокочастотных радиосигналов и наземных приемников этих сигналов позволяет рассчитывать ПЭС вдоль прямой видимости «спутник-приемник». Спутники, использующиеся для данного метода исследования, могут быть геостационарными, низко- и высокоорбитальными.

Геостационарные спутники, в силу сохранения их расположения относительно приемников позволяют исследовать временные вариации ПЭС. Также геостационарные спутники, как и низкоорбитальные дают возможность измерять вариации фазы принимаемых радиосигналов, доплеровский сдвиг частоты и угол поворота плоскости поляризации, причиной которому служит фарадеевское вращение. Их рабочий диапазон частот 100-400 МГц. Низкоорбитальные спутники из-за высокой скорости движения позволяют определять пространственные параметры возмущений.

Важной вехой в развитии трансionoсферного зондирования стало масштабное распространение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) второго поколения (ГЛОНАСС и GPS) и образования на их основе большой сети приемников. Благодаря развитию ГНСС появились новые средства диагностики ионосферных структур- глобальные карты абсолютного вертикального ПЭС, а также развитие получили методы радиотомографии ионосферы, основанные на GPS-сигналах.

1.3 Трансионосферное зондирование на основе ГНСС

1.3.1 Основная информация о ГНСС

Глобальные навигационные спутниковые системы

На данный момент полноценно функционируют две глобальные навигационные спутниковые системы второго поколения (российская-ГЛОНАСС и GPS (США)), также в процессе ввода в строй стоят системы глобального позиционирования других стран (Galileo- Европа, BeiDou-2- Китай) и две региональные системы (индийская-IRNSSи японская-QZSS). Главным отличием от систем первого поколения является использование высокоорбитальных навигационных ИСЗ, это позволяет обеспечивать непрерывное радионаблюдение в любой точке Земли одновременно минимум четырех спутников, что дает возможность определять три пространственные координаты приемника в произвольный момент времени, а также точное время.

1.3.2 Глобальная сеть и региональные сети приемников ГНСС

Глобальная сеть приемников

Сеть приемников распределена на поверхности Земли весьма неравномерно, высокая плотность GPS- станций имеется для регионов Европы и Северной Америки, ГЛОНАСС имеет множество станций приема на территории России, в основном вокруг крупных городов, особенно в европейской части нашей страны. Африканские и Тихоокеанские районы имеют намного меньшее количество приемников. Многие станции позволяют использовать сохраненные данные в RINEX (ReceiverIndependentExchangeFormat) формате свободно в сети Интернет.

Региональные сети приемников

Для региональных сетей характерны: более высокая плотность станций и более высокое разрешение данных (временное разрешение достигает 1 с), особенно большую плотность станции имеют в зонах повышенной сейсмической активности (Япония, Калифорния)

Формат передачи и хранения данных- RINEX

Измерения хранятся и передаются в качестве текстовых файлов. Они имеют уникально разработанный формат RINEX. Структура таких файлов образована таким образом, чтобы файлы имели всегда одинаковое строение и занимали минимальный объем вне зависимости от вида приемника и набора измеряемых параметров. Данные, собираемые спутников в течение суток: псевдодальности, набеги фазы, временные метки и т.д.

1.3.3 Расчет ПЭС по данным ГНСС приемников

Методика восстановления ПЭС по данным двухчастотных приемников сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС) типа GPS/ГЛОНАСС в достаточной степени разработана и описана в ряде источников [3,8,9]. Приведем конечные формулы вычисления ПЭС вдоль луча «приемник-спутник», (m^{-2}):

$$I_S = -\frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_1 - P_2) + nP], \quad (1)$$

$$I_S = -\frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + nL], \quad (2)$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты СРНС; P_1, P_2 – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные групповым запаздыванием в ионосфере, м; $L_1 \lambda_1, L_2 \lambda_2$ – дополнительные пути радиосигналов, обусловленные фазовыми

запаздываниями в ионосфере, м; L_1, L_2 – число набегов фазы на рабочих частотах СРНС; λ_1, λ_2 – длины волн, м; K – постоянная неоднозначности фазы; nL, nP – погрешности фазового и группового пути.

Значения L_1, L_2, P_1, P_2 , измеряемые сетью ГНСС приемников содержатся в RINEX-файле. Использующиеся приемники сообщений ГНСС выдают данные о задержках фаз сигналов на рабочих частотах f_1, f_2 ($f_1 = 1575,42$ МГц, $f_2 = 1227,60$ МГц для GPS-приемников и $f_1 = 1602 + n \cdot 0,5625$ МГц, $f_2 = 1246 + n \cdot 0,4375$ МГц для приемников сигналов ГЛОНАСС, где n – номер канала, $n = -7, -6, -5, \dots, 0, \dots, 6$). Наклонное ПЭС, полученное из выражений (1) и (2), можно преобразовать в значения вертикального ПЭС относительно подионосферной точки (точки пересечения луча зрения на навигационный ИСЗ с высотой главного максимума концентрации электронов ионосферы) по формуле(3):

$$I_V = I_S \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_Z}{R_Z + h_{\max}} \cos \gamma \right) \right], (3)$$

где I – значения наклонного ПЭС, м⁻²; R_Z – радиус Земли, м; h_{\max} – высота максимума электронной концентрации в слое F₂ ионосферы, м; γ – угол места навигационного ИСЗ относительно линии местного горизонта, град.

В случае, когда можно пренебречь кривизной Земли (при $\theta_S > 30^\circ$), для определения вертикального ПЭС применяют формулу:

$$I_V = I_S \cdot \theta_S, (4)$$

где θ_S – угол места луча «приемник-спутник».

Метод вычисления ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям хорошо подходит для решения проблем, не нуждающихся в определении абсолютных значений ПЭС[11].

Вариации ПЭС могут быть получены с помощью удаления тренда, связанного с движением спутника относительно станции-приемника, с помощью скользящего среднего. Этот метод нивелирования тренда достаточно простой и подходит при наблюдении за ПИВ с помощью плотной сетки спутниковых навигационных приемников [9].

Для расчета ПЭС на луче прямой видимости «приемник-спутник» помимо определения концентрации электронов в ионосфере необходимо также иметь точную траекторию движения спутника. Азимут α_s и угол места θ_s ИСЗ рассчитывают на основе геодезических координат ИСЗ и точки наблюдения. С достаточной для решения практических задач точностью азимут и угол места вычисляются по следующим выражениям:

$$\alpha_s = \arccos\left(\frac{\sin\varphi_s - \sin\varphi \cdot \cos\psi_s}{\sin\sigma \cdot \cos\varphi}\right), (5)$$

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\cos\psi_s - R_E/R_S}{\sin\psi_s}\right), (6)$$

$$\psi_s = \arccos(\sin\varphi \cdot \sin\varphi_s + \cos\varphi \cdot \cos\varphi_s \cos(\lambda_s - \lambda)), (7)$$

где R_S – радиус орбиты ИСЗ, R_E – радиус Земли, φ, λ – геодезические широта и долгота точки приемника ИСЗ, φ_s, λ_s – геодезические широта и долгота ИСЗ, ψ_s – центральный угол между точкой наблюдения и ИСЗ. $R_S, \varphi, \lambda, \varphi_s, \lambda_s$ – также могут быть извлечены из RINEX-файлов.

Ионосферной точкой называют точку пересечения луча ИСЗ со слоем максимальной концентрации электронов в ионосфере (F_2). Высота F_2 - слоя варьируется от 250 до 350 км в зависимости от географического положения и времени суток. Проекция ионосферной точки на земную поверхность называется подионосферной точкой. Обе они, и ионосферная и подионосферная точки имеют одинаковые широту и долготу. Географическую

долготу l_p и широту φ_p подионосферной точки рассчитывают по следующим формулам:

$$\varphi_p = \arcsin(\sin\varphi_B \cdot \cos\psi_p + \cos\varphi_B \cdot \sin\psi_p \cdot \cos\alpha_s), \quad (8)$$

$$l_p = l_B + \arcsin(\sin\psi_p \cdot \sin\alpha_s \cdot \sec\varphi_p), \quad (9)$$

$$\psi_p = \frac{\pi}{2} - \theta_s - \arcsin\left(\frac{R_Z}{R_Z + h_{\max}} \cos\theta_s\right) \quad (10)$$

где φ_B, l_B – географические координаты точки наблюдения, ψ_p – центральный угол между ионосферной точкой и приемником. Соотношения (1)-(10) взяты из [11].

2 Практическая часть

2.1 Основные сведения об эксперименте

29 августа 2016 года проводилось воздействие на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», который расположен в пос. Васильсурск Нижегородской области. Воздействие проводилось циклами: 3 минуты длился нагрев (накачка), и 3 минуты была пауза. Диаграмма направленности стенда была ориентирована в Зенит. Частота накачки составляла 4,3 МГц.

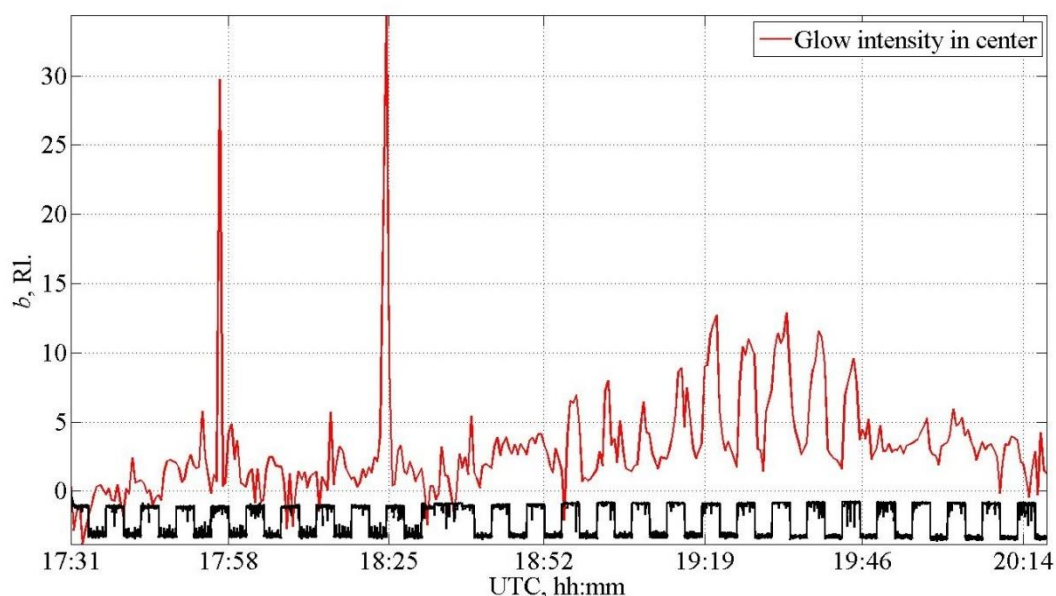


Рис. 3 Внизу графика показан режим накачки стенда «Сура» красная кривая характеризует интенсивность свечения ионосферы в Рэлях

Помимо незначительных флуктуаций и чрезвычайно резких выбросов интенсивности были замечены явные и стабильные импульсы интенсивности свечения ионосферы, достигавшие значений порядка 13 Рэлей, при производстве на нее мощного высокочастотного воздействия, наблюдались они в диапазоне времени от 18:55 и до 19:46 UTC и совпадали с трехминутными периодами воздействия, характерно убывая в периоды пауз, что видно на рис. 3.

В результате работы обрабатывались экспериментальные данные, полученные во время проведения измерений искусственных вариаций ПЭС ионосферы. Экспериментальные данные были получены на сети из 26 ГНСС-станций (02kr (53.39 с.ш.; 58.84в.д.), 02ta (56.29с.ш.; 55.85в.д.), 16al (54.88с.ш.; 52.30в.д.), 16ba (54.40с.ш.; 53.22в.д.), 16na (55.62с.ш.; 52.17в.д.), 52nn (56.33с.ш.; 43.95в.д.), 59pe (57.99с.ш.; 56.16в.д.), ALAT (54.84с.ш.; 46.58в.д.), BATR (55.06с.ш.; 47.60в.д.), care (53.44с.ш.; 50.17в.д.), CHEB (56.13с.ш.; 47.28в.д.), dimi (54.21с.ш.; 49.62в.д.), EAO (55.83с.ш.; 48.81), KANA (55.50с.ш.; 47.49в.д.), KOZL (55.84с.ш.; 48.26в.д.), KZN (55.79с.ш.; 49.11в.д.), mdvj (56.02с.ш.;37.21в.д.), obya (60.33с.ш.;49.61в.д.), oren (51.75 с.ш.;55.09в.д.) samr (53.22 с.ш.;50.23в.д.), SHUM (55.50 с.ш.;46.41в.д.), SURA (56.15 с.ш.;46.10в.д.), sura2 (53.19 с.ш.;45.01в.д.), toli (53.51 с.ш.;49.42в.д.), ulia (54.25 с.ш.;48.31в.д.), YADR (55.94 с.ш.; 46.19в.д.)). Расположение этих станций представлено на рис. 4.

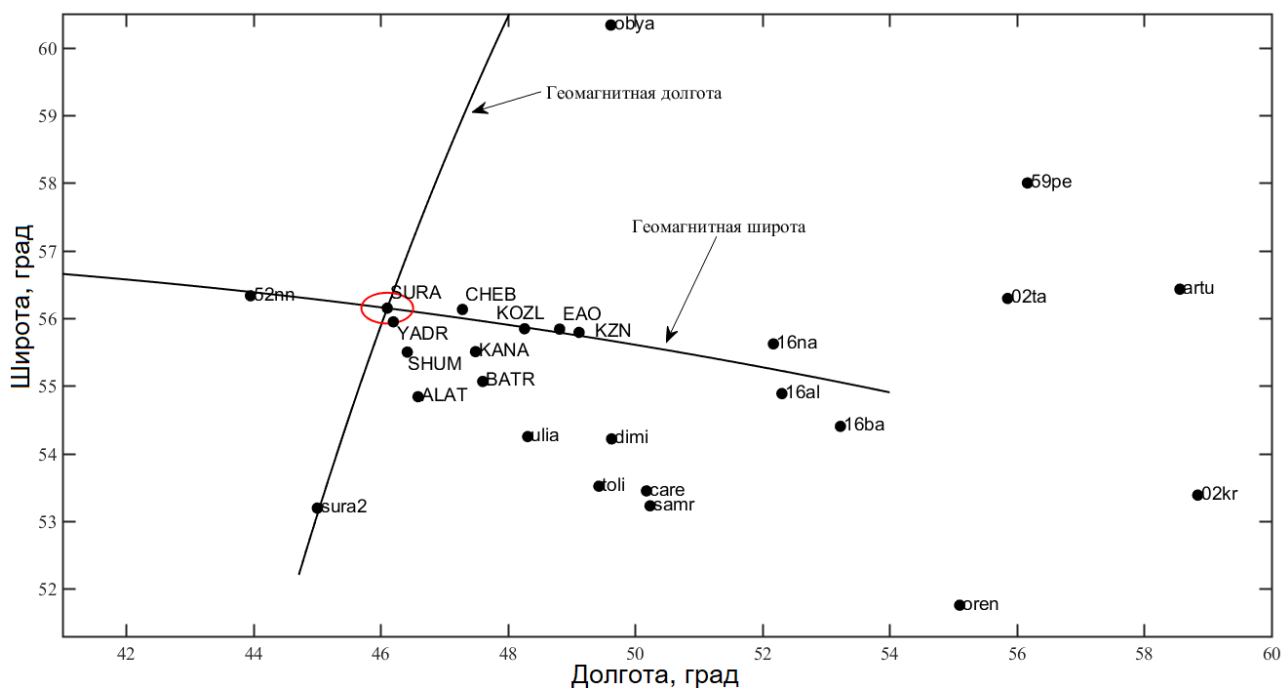


Рис. 4 Расположение ГНСС-станций. Сплошными линиями представлены геомагнитная широта и долгота станции «Сура»

2.2 Обработка данных эксперимента

При помощи программного пакета МАТЛАБ был разработан алгоритм конвейерного считывания информации из файлов типа RINEX. Программой производится запись данных о географическом положении станций приема (APPROXPOSITIONXYZ), количестве и типах измеряемых параметров (TYPESOFOBSERV), начало времени записи (TIMEOFFIRSTOBS) и интервалзаписи (INTERVAL), а также о видимых спутниках (ГЛОНАСС и GPS) для каждого момента записи и других параметров. Вся перечисленная выше информация и величины измеряемых параметров записываются в удобную для дальнейшей обработки форму mat-файла.

1	2.11	OBSERVATION DATA	M (MIXED)	RINEX VERSION /	TYPE
2	JPS2RIN v.2.0.96	JAVAD GNSS	20160830 051053 UTC	PGM / RUN BY /	DATE
3	SURA			MARKER NAME	
4	Uriy B. Gribov	Srednevolgskoe AGP		OBSERVER /	AGENCY
5	8RRHNEEN8CG	JAVAD EGGDT PREGO	2.7.0 Mar,31,2008	REC # / TYPE /	VERS
6	02460	TPSPG_A1+GP		ANT # / TYPE	
7	2707629.4585	2708094.7271	5083677.2672	APPROX POSITION	XYZ
8	0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA	H/E/N
9	1	1		WAVELENGTH FACT	L1/2
10	2016	8	29	0	0
11	30.000			0.0000000	GPS
12	17				
13	5	C1	P1	P2	L1
14				L2	
15	16	8	29	0	0
16				0.0000000	0
17	23913596.277	23913596.727	23913600.867	125666819.778	3
18	20854993.908	20854996.138	20854997.968	111286267.732	6
19	21002229.612	21002228.132	21002233.702	111953716.415	6
20	23319714.159	23319716.019	23319716.449	124876033.070	5
21	21638692.644	21638692.034	21638693.234	113712097.795	4
22	19292038.273	19292038.193	19292039.503	103090841.585	7
23	22731633.643	22731634.383	22731634.383	121598932.611	5
24	23730126.367	23730126.107	23730128.647	124702656.300	3

Рис. 5 RINEX- файл для станции приема «Сура»

2.3 Определение пространственного положения подионосферной точки

Разработана программа для определения ориентации луча «приемник-спутник», необходимая для вычисления траектории подионосферных точек, используя известные координаты станции приема, полученные из файла RINEX, и известное положение спутника в каждые 30 секунд его движения по орбите Земли. Азимут и угол места для станций определялись по формулам (5) и (6), для них вычислялись центральные углы между точками наблюдения и ИСЗ по формуле (7).

Произведен расчет траекторий ионосферных и подионосферных точек каждого из интересующих нас искусственных навигационных спутников Земли относительно используемых 26-ти ГНСС-станций. Географические координаты подионосферной точки были рассчитаны по формулам (8) и (9), с определенными для них центральными углами между наблюдательными пунктами и ионосферной точкой по формуле (10).

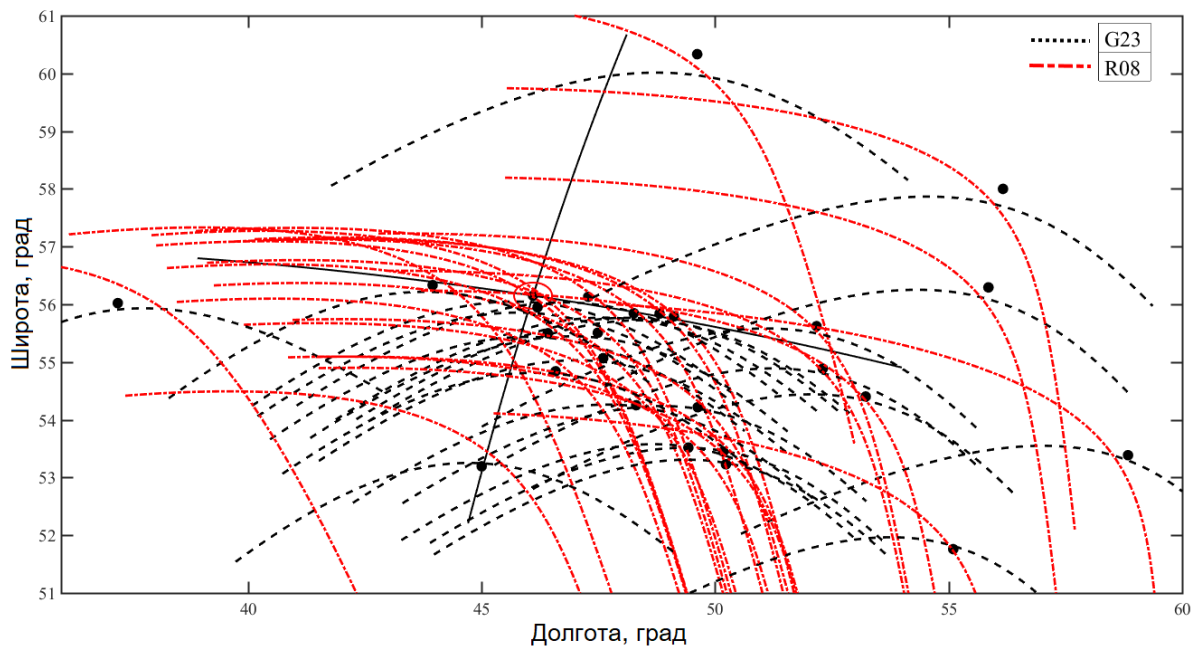


Рис. 6 Траектории подионосферных точек для спутников G23 (черная пунктирная линия) и R08 (красная штрихпунктирная линия). Точками отмечены ГНСС-станции

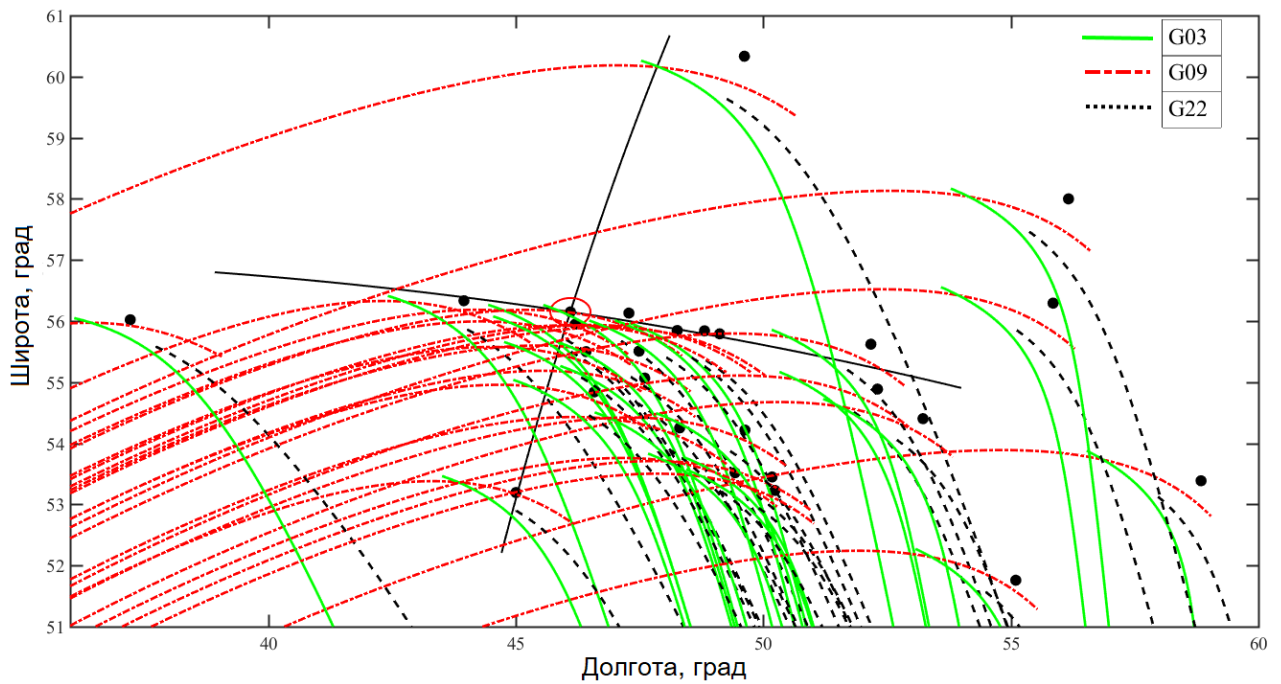


Рис. 7 Траектории подионосферных точек для спутников G22 (черная пунктирная линия), G09 (красная штрихпунктирная линия) и G03 (зеленая сплошная линия). Точками отмечены ГНСС-станции

Всего в интервале времени 18:55–19:46UTC в зону видимости исследуемой сетки станций попали 5 навигационных спутников, из них четыре спутника относятся к семейству GPS (G03, G09, G22, G23) и один спутник из семейства ГЛОНАСС (R08). Траектории их подионосферных точек, относительно пунктов приема, представлены на рис. 6 и рис. 7.

2.4 Расчет ПЭС

По формулам (1) и (2) производился расчет полного электронного содержания для каждой пары спутник-приемник, константа неопределенности, входящая в выражение (2), определялась разностью этих двух выражений.

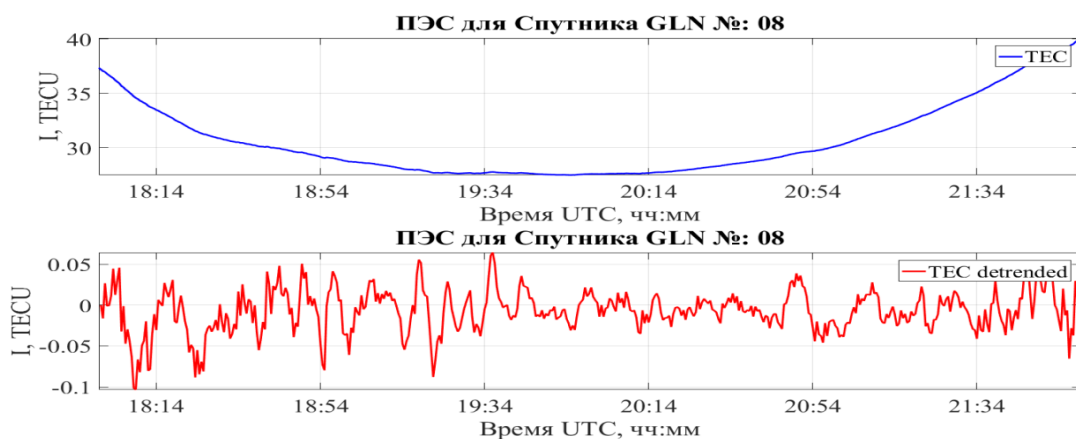


Рис. 8 Верхний график представляет ПЭС для пары спутник R08-станция Канаш (республика Чувашия) с трендом во время максимального сближения спутника со станцией, связанным с движением спутника относительно станции приема, нижний график - ПЭС без тренда

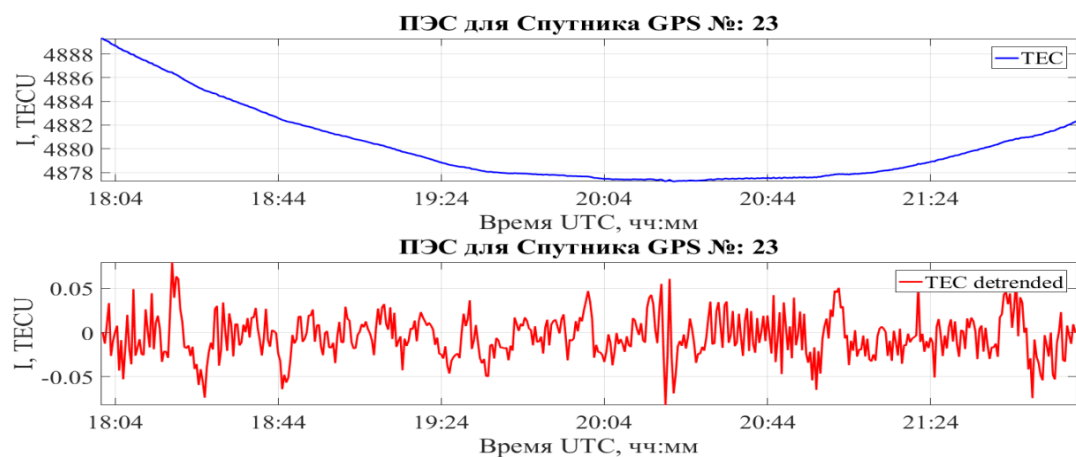


Рис. 9 Верхний график представляет ПЭС для пары спутник G23-станция Сура с трендом во время максимального сближения спутника со станцией, связанным с движением спутника относительно станции приема, нижний график - ПЭС без тренда

Для вычисленных таким образом значений было обнаружено наличие характерного тренда, связанного с движением спутника относительно измерительного пункта. Удаление тренда производилось при помощи алгоритма скользящего среднего с интервалом усреднения 13 минут, потому что

именно такой интервал усреднения выделяет интересующие нас крупномасштабные неоднородности.

Видно, что время максимального сближения спутников с разными станциями различно, так, например, спутник R08 находился на кратчайшем расстоянии от станции Канаш в промежуток времени с 19:34 до 20:04UTC, а спутник G23, в свою очередь, максимально сблизился со станцией Сура в интервале времени 20:04–20:44 UTC.

Легко видно из рис. 8 и рис.9, что в течение всего времени исследования значения ПЭС испытывали непрерывающиеся флуктуации, хотя стоит заметить, что наблюдались и резкие возрастания концентрации электронов на значения не превосходящие 0,1 TECU.

2.5 Построение двумерных карт ПЭС

Блок-схема цикла созданных программ обработки представлена на рисунке 10.



Рис.10 Блок-схема цикла программ

Методом трехмерных изображений на неравномерной сетке были построены двумерные карты распределения ПЭС над территорией Поволжья, охваченной исследуемыми ГНСС-станциями приема сигналов со спутников. Для осуществления многомерной интерполяции экспериментальных данных использовался многочлен Лагранжа для двух переменных [13]. Полученные двумерные карты представлены на следующих изображениях.

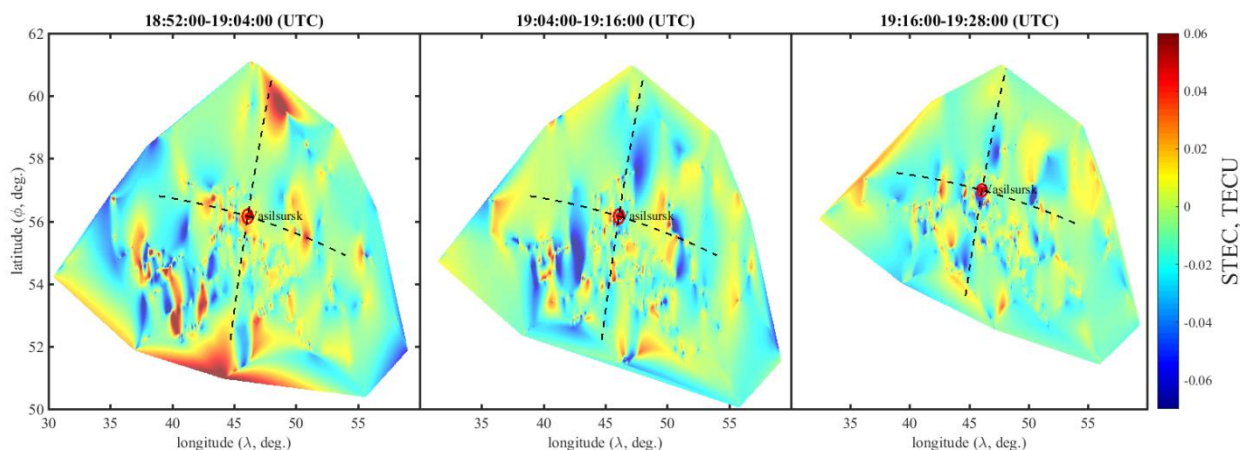


Рис. 11 Три двумерные карты вариаций ПЭС, полученные на основе 12-ти минутных данных, соответствующих двум циклам накачки и двум циклам паузы на стенде «Сура». Первая карта соответствует интервалу 18:52-19:04. Вторая- 19:04-19:16. Третья- 19:16-19:28UTC

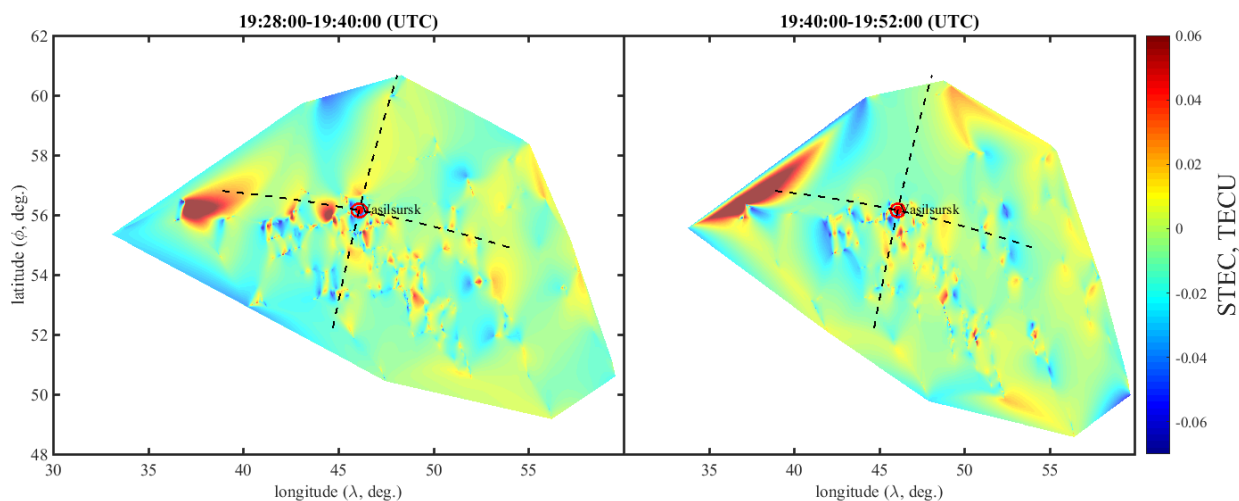


Рис. 12 Две двумерные карты вариаций ПЭС, полученные на основе данных, соответствующих двум циклам накачки и двум циклам паузы на стенде «Сура». Первая соответствует интервалу 19:28-19:40. Вторая -19:40-19:52 UTC

Для лучшей детализации вариаций полного электронного содержания решено было рассматривать карты ПЭС, полученные на шестиминутном интервале времени, захватывая один трехминутный цикл накачки и один трехминутный цикл паузы.

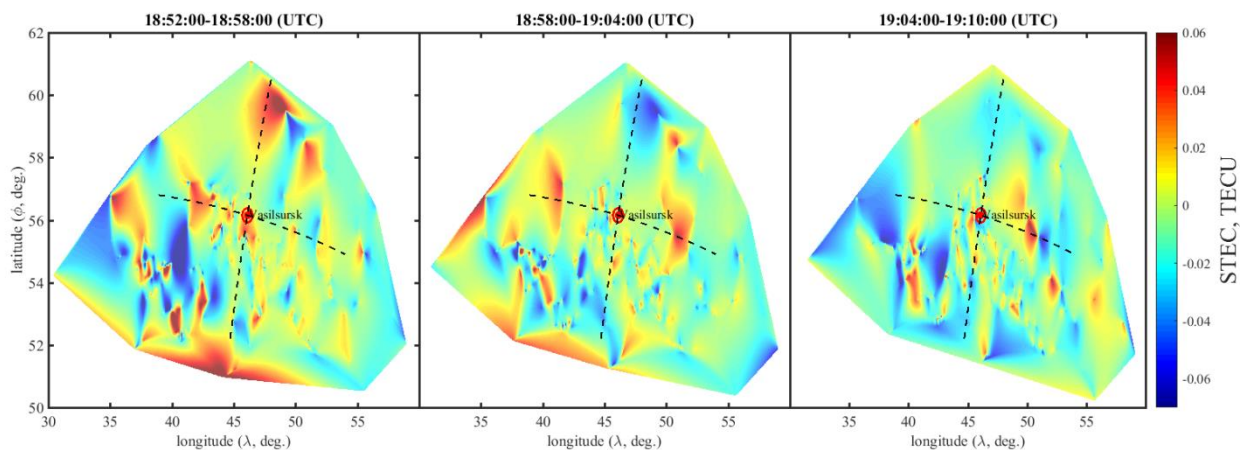


Рис. 13 Три двумерные карты вариаций ПЭС, полученные на основе данных, соответствующих одному циклу накачки и одному циклу паузы на стенде «Сура»

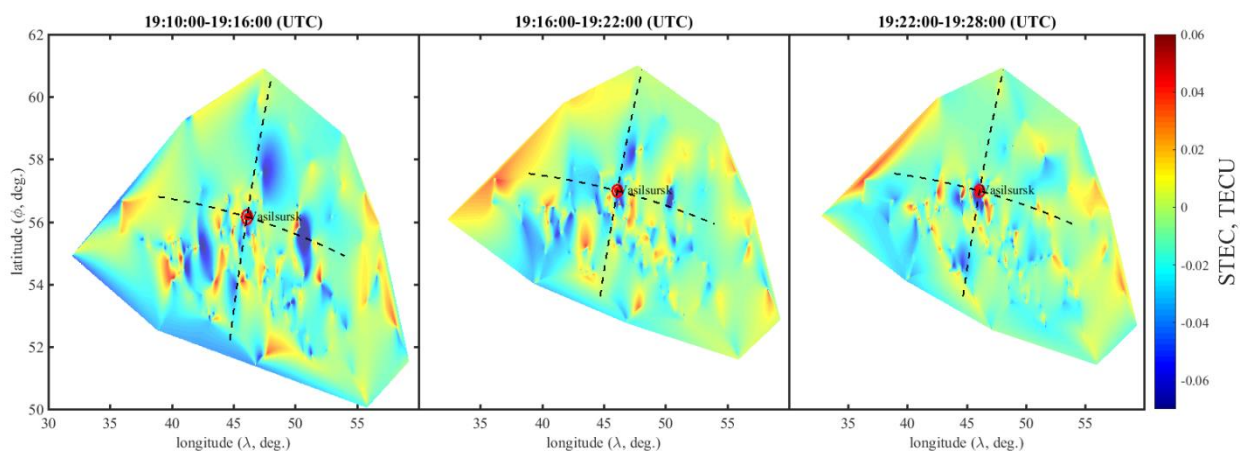


Рис. 14 Три двумерные карты вариаций ПЭС, полученные на основе данных, соответствующих одному циклу накачки и одному циклу паузы на стенде «Сура»

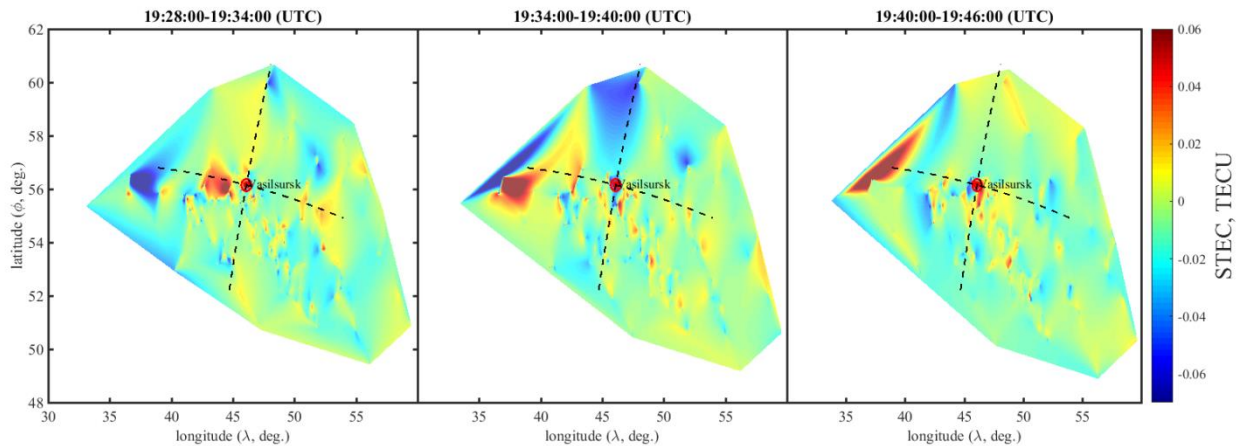


Рис. 15 Три двумерные карты вариаций ПЭС, полученные на основе данных, соответствующих одному циклу накачки и одному циклу паузы на стенде «Сура»

В начале регистрации были замечены крупные по масштабам возмущения, особенно локации на юге и севере исследуемой области, и эти вариации обладали достаточно высокой амплитудой, достигая значений 0,06 TECU. С течением времени масштабные неоднородности уменьшались в размере, распространяясь от места своего изначального положения по всем направлениям, стоит отметить, что определенный вектор распространения не наблюдается.

Интересно пронаблюдать, наличие неоднородностей вблизи станции «Сура», которая является инициатором их появления. Для этого, рассмотрим карту распределения ПЭС только в окружении диаграммы направленности стенда и сравним её с изображениями, полученными на ПЭС камеру SantaBarbaraInstrumentGroup (SBIG), в окрестности той же области ионосферы. Особенностью ПЭС камеры является её снимки нижней части ионосферы, которые фиксируют нейтральные частицы, в отличие от трансionoсферных наблюдений, которые регистрируют непосредственно концентрацию электронов. Фиксация изображений на камере SBIG производилась в течение 30-ти секундного интервала времени.

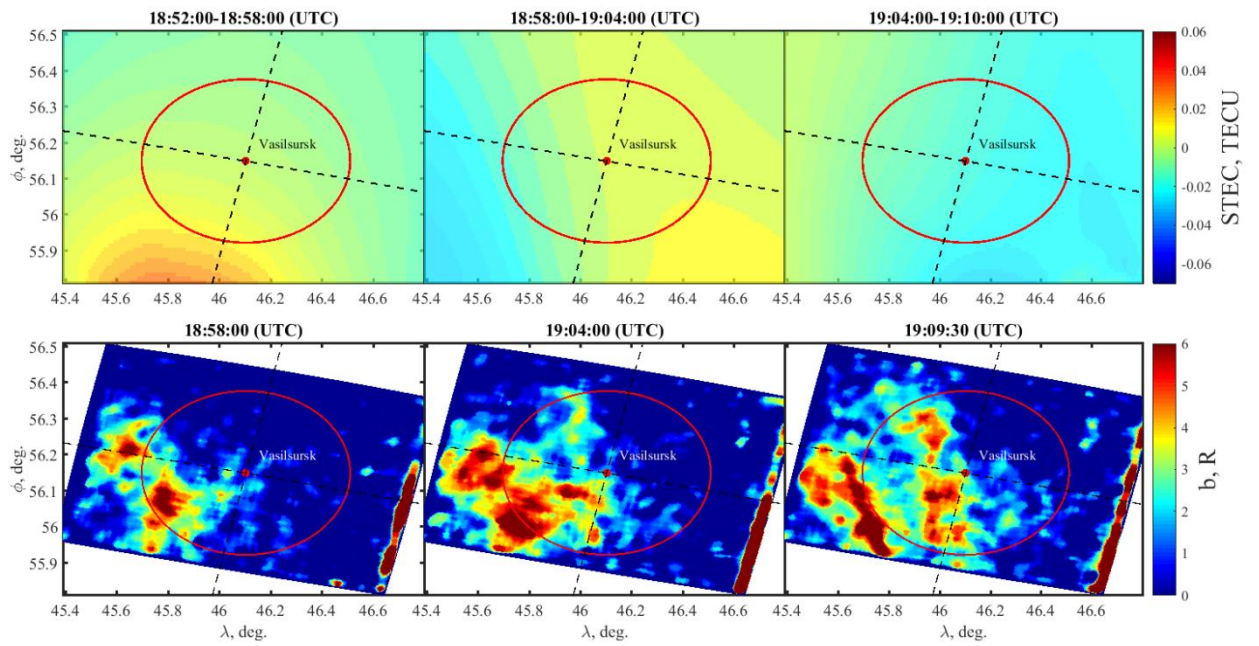


Рис. 16 Верхний ряд - карты распределения ПЭС в окрестности диаграммы направленности (красная окружность) станда «Сура» с шестиминутным интервалом. Нижний ряд - снимки на камеру SBIG, полученные в момент завершения накачки

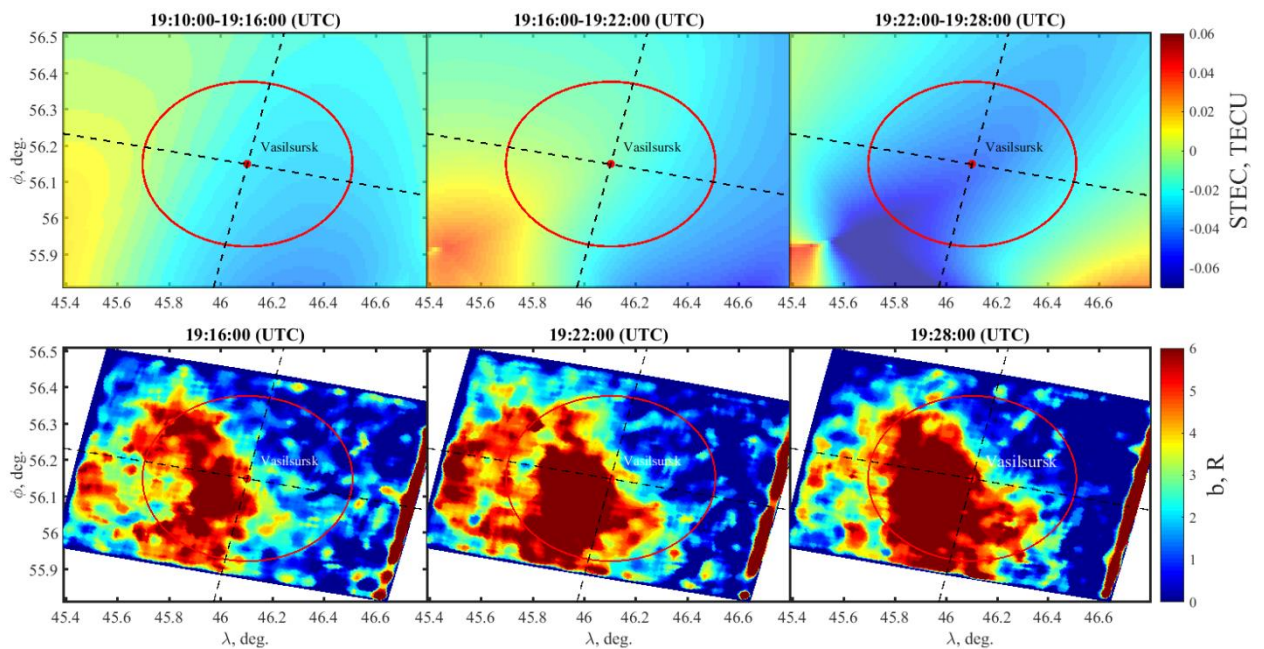


Рис. 17 Верхний ряд - карты распределения ПЭС в окрестности диаграммы направленности (красная окружность) станда «Сура» с шестиминутным интервалом. Нижний ряд - снимки на камеру SBIG, полученные в момент завершения накачки

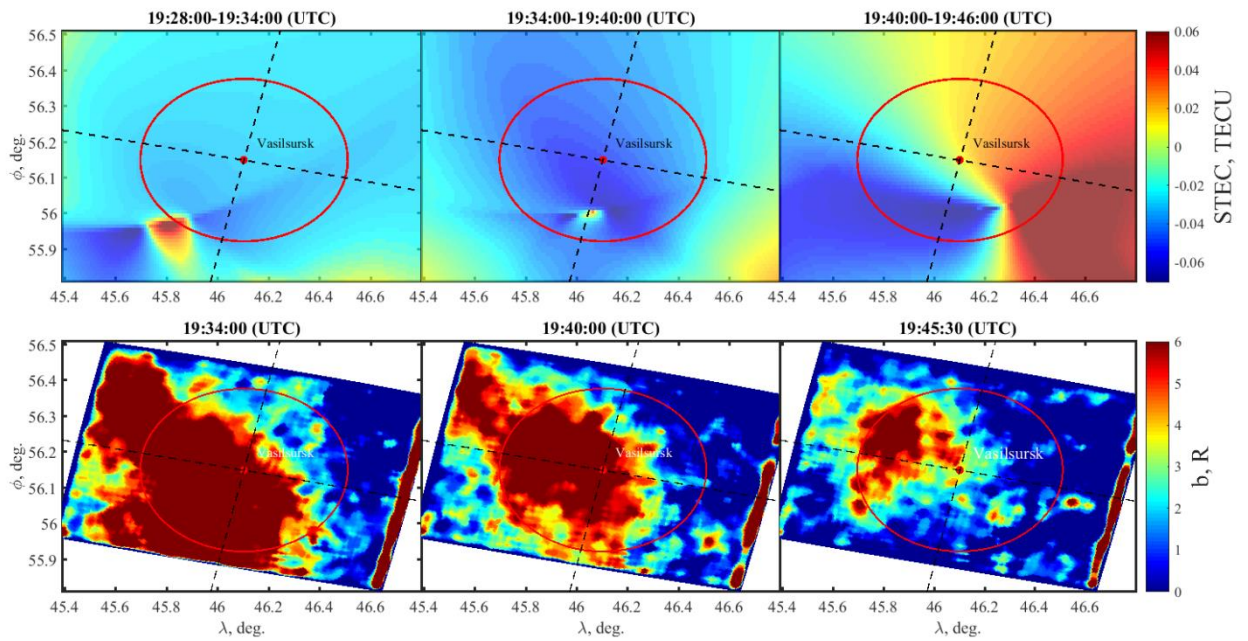


Рис. 18 Верхний ряд - карты распределения ПЭС в окрестности диаграммы направленности (красная окружность) стенда «Сура» с шестиминутным интервалом. Нижний ряд - снимки на камеру SBIG, полученные в момент завершения накачки

Сравнивая изображения, полученные двумя методами, замечаем, что данные с ПЭС камер имеют лучшую детализацию, нежели двумерные карты ПЭС. Но стоит заметить, что ПЭС камеры регистрируют нейтральные частицы в нижней части ионосферы, концентрация которых значительно превосходит концентрацию электронов, регистрируемых методом трансферного зондирования вдоль всей линии исследования «приемник-спутник».

Для демонстрации проявления неоднородностей на снимках, приведем пример изображений с ПЭС камеры в интервалах, когда производилось воздействие на ионосферу со стенда «Сура», и в интервалах без воздействия.

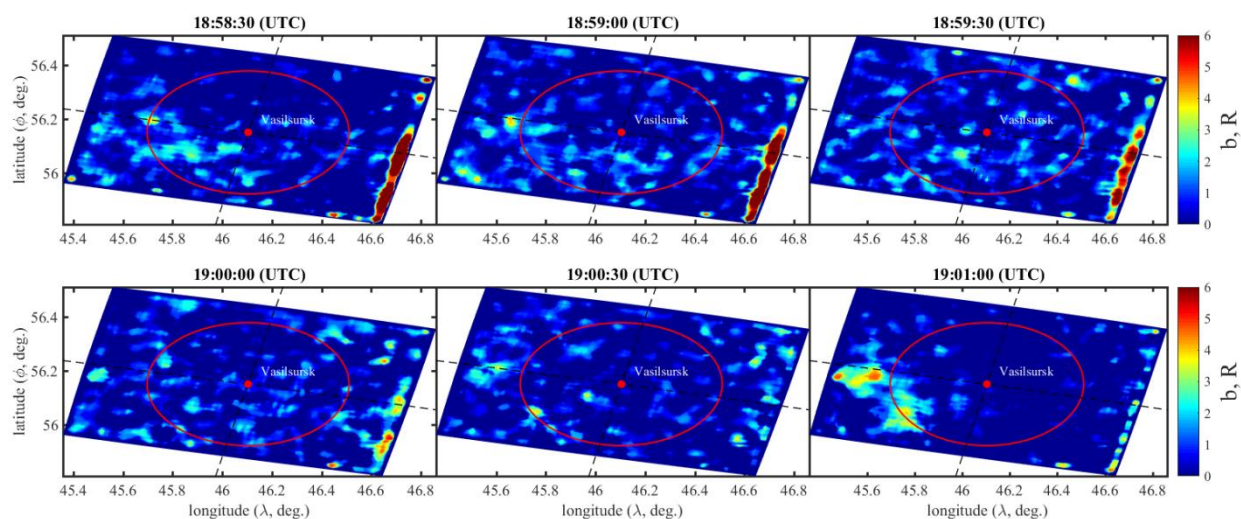


Рис. 19 Ряд снимков на ПЗС камеру SBIGв интервал времени без воздействия накачки на ионосферу

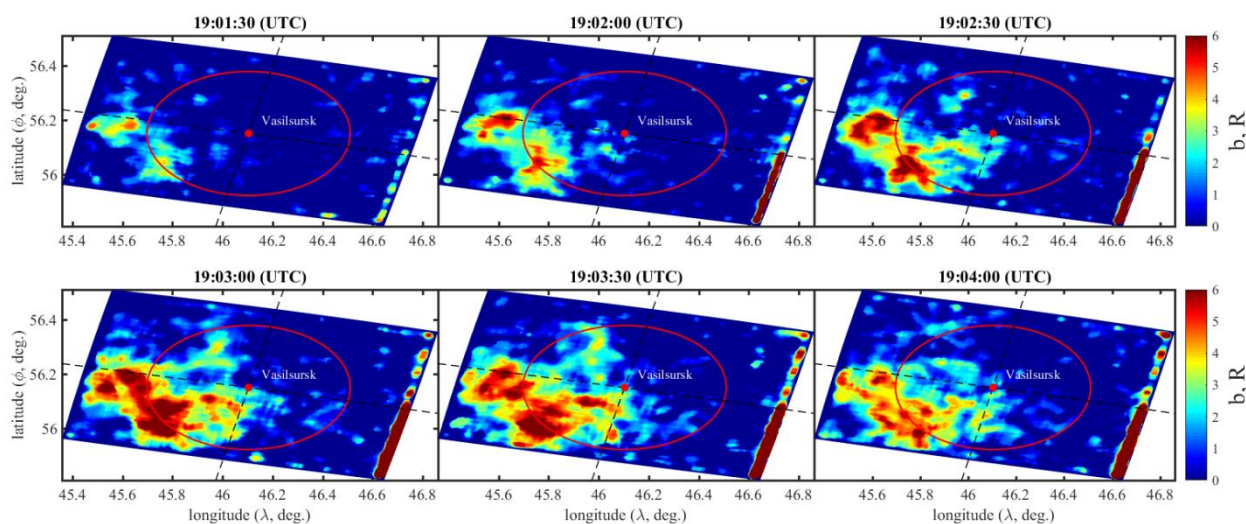


Рис. 20 Ряд снимков на ПЗС камеру SBIGв интервал времени с воздействием накачки на ионосферу

Во время накачки явно наблюдается повышение амплитуды возмущений в юго-западной области снимка на всем протяжении времени воздействия, тогда как в паузах видны лишь флуктуации концентрации нейтральных частиц.

Заключение

В ходе выполнения выпускной-квалификационной работы:

разработан оригинальный алгоритм считывания данных RINEX-формата на основе программного пакета MATLAB;

проведена обработка экспериментальных данных с сети приволжских ГНСС-станций в виде фазовых измерений и измерений псевдодальностей от 29 августа 2016 года. На их основании построены двумерные карты распределения вариации ПЭС для отслеживания перемещения возмущений в составе ионосферы. Тем самым наблюдали отклик ионосферы на воздействие в виде мощного радиоизлучения со стенда «Сура»;

обработаны снимки на ПЗС камеру SBIGи проведен анализ содержания нейтральных частиц и свободных электронов в составе ионосферы на основе информации, о которой сказано выше.

Результат обработки показал, что наиболее интенсивное свечение наблюдалось в местах с пониженной электронной концентрацией, что дополняет предыдущие работы [14,15].

Показано, что оба метода имеют свои достоинства и недостатки, так ПЗС камера не может дать полной информации о содержании нейтральных частиц во всей толще ионосферы, лишь в нижних ее слоях, которые в большинстве своем влияют на распространение средних радиоволн. Тридцатисекундные данные со спутников, в свою очередь, не дают достаточного временного и пространственного разрешения для наблюдения за узколокализованными перемещающимися ионосферными возмущениями, также существенную роль в построении двумерных карт играет количество ГНСС-станций приема, хотелось бы иметь доступ к большему количеству станций, особенно расположенных севернее станции «Сура», т.к если из-за достаточно большого числа станций, расположенных южнее, юго-восточнее и юго-западнее, в целом отследить перемещения возмущений удалось, то в области севернее данных недостаточно для качественного наблюдения.

Литература

1. Перевалова Н.П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферногоGPS– зондирования: дис....док.физ-мат. наук/
Н.П. Перевалова.–Иркутск, 2014. –31 с.
2. Власов А.А.Оценка способов определения полного электронного содержания в ионосфере/А.А.Власов,Е.В. Кузьминых., В.В.Чукин//
Всероссийские радиофизические научные чтения-конференция памяти
Н.А. Арманда. Муром, 2010.
3. Э.Л. Афраимович, П.В. Татаринов. Восстановление полного электронного
содержания по данным двухчастотного GPS-приемника, установленного
на борту низкоорбитального искусственного спутника Земли//
Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ», 2005
[Электронный ресурс]. URL:<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/042.pdf>
(Дата обращения 02.04.2019)
4. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
5. Григорьев, Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере (обзор) /
Г. И. Григорьев // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1999. – Т. XLII, № 1. –
С. 3–23.
6. Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. –
М.: Наука, 1988. – 528 с.
7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн./ Ф.Б. Черный. - М.: Сов.
Радио, 1972, 464 с.
8. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning
System: Theory and Practice. N.Y.: Springer – Verlag Wien. 1992.
9. Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A.J., Saito A. Medium-scale traveling
ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North
America. Geophysical research letters, Vol. 34, no. 22.
doi:10.1029/2007GL031663.

10. Шерстюков Р.О., А.Д. Акчурин Анализ дневных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по двумерным картам вариаций полного электронного содержания и ионограммам. // Ученые записки казанского университета. Серия физико-математические науки - 2017, -Т.159, кн 3, -С. 374-389.
11. Afraimovich E.L., Perevalova N.P. GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere. Irkutsk, GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN, -2006. 480 p.
12. Акасофу С. – И., Чепмен С., Солнечно-земная физика, пер. с англ., ч. 1 - 2, М., 1974-75;
13. Иткин В.Ю., Кочуева О.Н. Интерполяция и сглаживание данных в пакете MATLAB/ В.Ю. Иткин, О.Н. Кочуева .–М.: уч. пособие Российский государственный университет нефти и газа И.М. Губкина, 2006. –131с.
14. О связи пространственного поведения полного электронного содержания ионосферы на трассе GPS-сигналов и искусственного оптического свечения ионосферы в линии 630 нм /С.М. Грач, И.А. Насыров, Д.А. Когогин, А.В. Шиндин, В.О. Дементьев, Е.Н. Сергеев, А.Д. Акчурин. //Изв. вузов. Радиофизика. - 2018. - Т. 61, № 3. - С. 181-197.
15. Grach, S. M., Nasyrov, I. A., Kogogin, D. A., Shindin, A. V., Sergeev, E. N., RaziMousavi, S. A. Mutual allocation of the artificial airglow patches and large-scale irregularities in the HF-pumped ionosphere //Geophysical Research Letters. - 2018. - Vol. 45, Iss. 12. P. 12,749-12,756