Министерство образования и науки РФ

«Казанский (Приволжский) федеральный университет»

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Направление: 03.04.03 – радиофизика

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

ТЕМА

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ, С ПОМОЩЬЮ GPS

Работа завершена:

"___"_____ 2016 г. _____ (А.М.Синетова)

Работа допущена к защите:

Научный руководитель

"___"_____ 2016 г. _____ (И.А.Насыров)

Заведующий кафедрой

"___"_____ 2016 г. _____ (М.Н.Овчинников)

Содержание

Содержание 2
Введение 3
Глава 1. Ионосфера 4
1.1. Плазма и её свойства 5
1.2. Состав ионосферы 6
1.3. Распространение радиоволн в ионосфере 9
1.4. Методы исследования ионосферы 11
1.4.1. Измерение угла поворота плоскости поляризации радиоволн, проходящих через ионосферу. 13
1.4.2. Кодовые дальномерные измерения и измерения по фазе несущей 18
1.4.3. Связь доплеровского смещения частоты с электронной концентрацией 22
1.5. Солнечный терминатор 28
Глава 2. Обработка экспериментальных данных 29
2.1. Формат RINEX 32
2.2. Орбитальное движение спутников 36
2.3. Расчет ПЭС в ионосфере Земли 43
Глава 3. Результаты 45
3.1. Результаты измерений 2 апреля 2016г. 45
3.2. Результаты измерений 8 марта 2016г. 47
3.3. Статистика результатов 49
3.4. Интерпретация результатов 50
Заключение 54
Список литературы 55

Введение

Исследование процессов в околоземном пространстве и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Изучение структуры ионосферы и явлений, влияющих на ее состояние, важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для решения разнообразных радиофизических задач.

Перемещающиеся ионосферные возмущения в F–слое ионосферы, влияют на изменчивость параметров ионосферы и волновода Земля–ионосфера и их влияние необходимо учитывать при решении широкого спектра задач, связанные с изучением волновых возмущений на ионосферных высотах.

Одной из актуальных задач является исследование состояния ионосферы во время прохождения солнечного терминатора (СТ) – области, отделяющей пространство, освещаемое полным диском Солнца, от области полной тени, отбрасываемой Землей.

Целью дипломной работы является исследования ионосферных волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором во время захода солнца, с помощью сигналов глобальной спутниковой радионавигационной системы (ГНСС) GPS.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- Построить орбитальное движение спутников систем ГЛОНАСС и GPS над приволжским федеральным округом.
- Обработать и рассчитать полное электронное содержание (ПЭС) по экспериментальным данным, полученным с ГНСС–приемников, расположенных в Казани (KZN) и Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельрадта (ЕАО).
- Выделить вариации ПЭС, связанные с движением вечернего терминатора.

Глава 1. Ионосфера

Атмосферой принято считать ту область вокруг Земли, в которой газовая среда вращается вместе с Землёй как единое целое. При таком определении граница между атмосферой и межпланетным пространством располагается в экзосфере, начинающейся на высоте около 700 км от поверхности Земли, и может условно проводится по высоте в 1300 км.

По определению, предложенному Международной Авиационной Федерацией, граница атмосферы и космоса проводится по линии Кармана, расположенной на высоте около 100 км, где аэронавтика становится полностью невозможной.

NASA использует в качестве границы атмосферы отметку в 122 километра, недавние эксперименты уточняют границу атмосферы Земли и ионосферы, как находящуюся на высоте 118 километров [8].

Ионосфера – это верхняя часть атмосферы Земли, сильно ионизированная вследствие облучения космическими лучами. Ионосфера состоит из мезосферы, мезопаузы и термосферы.

Границы ионосферы лежат на высотах от 50 до 600 км, хотя её толщина меняется в зависимости от времени суток, сезона и уровня солнечной активности.

Ионосфера возникает в результате воздействия ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца.

Ионосфера представляет собой природное образование разреженной слабо ионизированной плазмы, находящейся в магнитном поле Земли.

1.1. Плазма и её свойства

Плазма – это частично или полностью ионизированный газ, который образуется из нейтральных атомов, или молекул, и заряженных частиц (ионов и электронов). Слово «ионизированный» означает, что от электронных оболочек значительной части атомов или молекул отделен, по крайней мере, один электрон. При достаточно сильном нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. А если температуру и дальше увеличивать, резко усилится процесс термической ионизации. То есть молекулы газа начнут распадаться на составляющие их атомы, которые затем превращаются в ионы. Ионизация газа может быть вызвана взаимодействием с электромагнитным излучением (фотоионизания) или бомбардировкой газа заряженными частицами.

Степень ионизации – это отношение числа ионизированных атомов к полному числу в единице объема плазмы. В Ионосфере степень ионизации становится существенной уже на высоте 60 км и неуклонно увеличивается с удалением от Земли. В зависимости от степени ионизации существует 3 вида плазмы: слабо, сильно и полностью ионизированная плазма.

Плазму иногда называют четвертым агрегатным состоянием вещества. Плазма была открыта в 1923 году учеными И.Ленгмюром и Л.Тонксом, проводившими зондовые измерения параметров низкотемпературной газоразрядной плазмы [9].

Существует два основных свойства плазмы, которое характеризует её как четвертое агрегатное состояние вещества.

1. Взаимодействие частиц плазмы между собой характеризуется кулоновскими силами притяжения и отталкивания, убывающими с расстоянием гораздо медленнее, чем силы взаимодействия нейтральных частиц. Поэтому взаимодействие частиц в плазме является не «парным», а

«коллективным». То есть одновременно взаимодействует друг с другом больше число частиц.

2. Электрические и магнитные поля очень сильно влияют на плазму, вызывая появление в плазме объемных зарядов и токов и обуславливая целый ряд специфических свойств плазмы.

А так же важнейшей особенностью плазмы является ее квазинейтральность. Квазинейтральность означает, что объемные плотности положительных и отрицательных заряженных частиц оказываются почти одинаковыми. То есть суммарный электрический заряд плазмы приблизительно равен нулю, несмотря на наличие свободных зарядов (электронов и ионов). Наличие свободных электрических зарядов делают плазму проводящей средой. Отсюда следует, что плазма имеет большое взаимодействие с магнитными и электрическими полями, по сравнению с другими агрегатными состояниями вещества.

Благодаря своей высокой электропроводности плазма, обладает специфическими свойствами, определяющими характер распространений в ней радиоволн и различных возмущении. Только благодаря ионосфере возможен такой простой и удобный вид связи на дальние расстояния, как радиосвязь.

1.2. Состав ионосферы

Ионосфера состоит из нескольких основных слоев, плавно переходящих один в другой. (Рис.1)

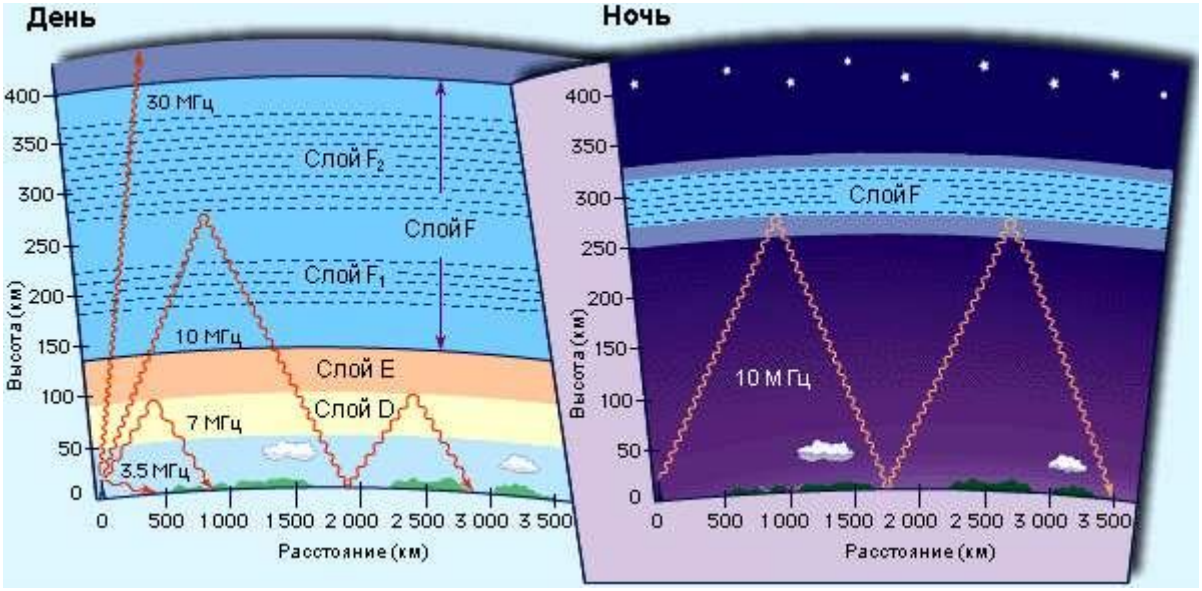

Рисунок 1 – Слои ионосферы и распространение коротких волн [6]

В дневные часы возникают четыре основных максимума ионизации:

- Область F2, высота 250–450км.
- Область F1, высота 180 – 200км.
- Область E, высота 100–120км.
- Область D, высота 60–80км.

Так же слои различают в зависимости от плотности заряженных частиц N.

Слой D имеет низкую электронную плотность. Концентрация заряженных частиц составляет $N\ max \sim 10^2 - 10^3 см^{-3}$. Основной вклад в ионизацию этой области вносит рентгеновское излучение Солнца. Так же не большую роль играют дополнительные слабые источники ионизации: метеориты, сгорающие на высоте 60 – 100 км, космические лучи, а так же энергичные частицы магнитосферы. Слой D так же характеризуется резким снижением степени ионизации в ночное время суток [6].

Основная часть ионосферы составляют слои E и F.

Слой E характеризуется плотностями плазмы до $N\ max \sim 10^5 см^{-3}$. В этом слое наблюдается рост концентрации электронов в дневное время, из за того, что основным источником ионизации является солнечное коротковолновое излучение, к тому же рекомбинация ионов в этом слое

идет очень быстро и ночью плотность может упасть до $10^3 см^{-3}$. Этому процессу противодействует диффузия зарядов из области F, находящейся выше, где концентрация ионов относительно велика, и ночные источники ионизации (метеоры, космические лучи).

Спорадически на высотах 100 – 110 км возникает слой ES, очень тонкий (0,5 – 1 км), но плотный. Особенностью этого подслоя является высокая концентрации электронов (ne ~ 10^5 см–3), которые оказывают значительное влияние на распространение средних и даже коротких радиоволн, отражающихся от этой области ионосферы.

Слой Е в силу относительно высокой концентрации свободных носителей тока играет важную роль в распространении средних и коротких волн.

Областью F называют теперь всю ионосферу выше 130 – 140 км. Максимум ионо – образования достигается на высотах 150 – 200 км. Однако вследствие диффузии и относительно долгой длительности жизни ионов образовавшаяся плазма распространяются вверх и вниз от области максимума. Из – за этого максимальная концентрация электронов и ионов в области F находится на высотах 250 – 400 км.

В дневное время также наблюдается образование «ступеньки» в распределении электронной концентрации, вызванной мощным солнечным ультрафиолетовым излучением [11]. Область этой ступеньки называют областью F1 (150 – 200 км). Она заметно влияет на распространение коротких радиоволн.

Выше лежащую часть слоя F называют слоем F2. Здесь плотность заряженных частиц достигает своего максимума – N ~ 10^5–10^6 $см^{-3}$. На больших высотах преобладают более лёгкие ионы кислорода (до высот 400–1000 км), а ещё выше – ионы водорода (протоны) и в небольших количествах – ионы гелия.

После захода Солнца прекращается ионизация атмосферы и начинается процесс рекомбинации электронов, который более активно

проходит в плотных слоях атмосферы. Этим объясняется быстрое исчезновение наиболее низкого слоя D. Уменьшаются и сливаются слои F1 и F2.

Рекомбинация электронов

В ночные часы ионосфера состоит только из 2–х слоев: слоя E, с пониженной концентрацией свободных электронов, и слоя F2, который в ночные часы обозначается символом F без индекса. Слои F1, E и D достаточно устойчивы.

1.3. Распространение радиоволн в ионосфере

Вся радиосвязь на коротких, средних и длинных волнах осуществляется с помощью отражения от ионосферы. Так же в ионосфере происходит преломление и поглощение радиоволн. Преломление радиоволн обусловлено изменениями диэлектрической проницаемости, а, следовательно, показателя преломления по высоте слоев. По мере распространения радиоволн от наземного источника через более высоко расположенные слои показатель преломления уменьшается, траектория электромагнитной волны искривляется и при определенных условиях волна возвращается на Землю.

Отражение радиоволн на той или иной высоте ионосферы зависит от частоты радиоволн и угла их падения на слой.

При прочих равных условиях чем больше угол падения волны, отсчитываемый от вертикальной линии в точке падения, тем более полога траектория луча в ионосфере и тем меньшая электронная концентрация потребуется для возвращения луча на Землю [8]. Минимальное значение угла падения, при котором еще возможно отражение радиоволн от ионосферы называется критическим. При угле падения меньше

критического, радиоволны проходят через ионосферу, не отразившись. Так как коэффициент преломления уменьшается с увеличением частоты, то длинные волны преломляются сильнее, чем короткие, а для УКВ преломление недостаточно для возвращения волн на Землю и они уходят в космическое пространство. Наивысшая частота, при которой электромагнитная волна еще может возвратиться на Землю, называется максимально применимой частотой.

Но значение этой частоты неоднозначно вследствие зависимости ее от угла падения. Поэтому вводят понятие критической частоты, которая является максимально применимой частотой при угле падения 90 градусов. Из определения следует, что эта частота представляет собой низшую из всех максимально применимых частот. За счет многократного переотражения радиоволн от слоев ионосферы и земной поверхности электромагнитная волна может распространяться на большие расстояния вплоть до огибания Земли. Но при переотражениях возникают зоны молчания, куда не попадают отраженные от ионосферы электромагнитные лучи.

В международный геофизический год (1957–1959 гг.) было установлено, что при критической частоте сигнала Fкр радиоволна перестает взаимодействовать с ионосферой [4].

$$F\text{кр} = \sqrt{80.8 * N} \quad (\text{кГц}) \qquad (1.3.1)$$

где N – удельная концентрация электронов в ионосфере

При F>Fкр. волна, пришедшая из космического пространства, преломляется и уходит к поверхности нашей планеты.

При F<Fкр. волна отражается или поглощается ионосферой. Поглощающие свойства ионосферы зависят от колебаний свободных электронов. После возбуждения волной, электрон сталкивается с нейтральной молекулой или ионом газа, он отдает полученную им энергию. Энергия радиоволны превращается в энергию движения частиц газа, т.е. в тепловую. Исходя из этих постулатов, было произведена

градация на радиоволны КВ (до 30мГц) и УКВ диапазонов. КВ диапазон используется для дальней радиосвязи между объектами, находящимися на поверхности нашей планеты, УКВ для связи с ИСЗ, локации планет, радиоастрономических наблюдений [4].

1.4. Методы исследования ионосферы

Сведения об ионосфере получают различными методами. Эти методы можно разделить на три группы: методы, связанные с наблюдением различных естественных явлений, экспериментальные методы, осуществляемые при помощи радиозондирования, и методы прямых измерений физических характеристик.

Существует ряд явлений, наблюдение которых может дать сведения об ионосфере. К ним в первую очередь относится свечение ночного неба и полярные сияния. Изучение спектров полярных сияний и свечения ночного неба позволяет установить состав и температуру газов ионосферы.

С запуском искусственных спутников Земли и ракет приобретают большое значение и прямые измерения физических характеристик ионосферы. Однако наиболее информативными для изучения влияния ионосферы на процесс распространения радиоволн являются методы радиозондирования ионосферы [24]. Последние позволяют выявить непосредственно интегральные параметры ионосферы, определяющие процесс распространения радиоволн.

СТ представляет собой повторяющееся регулярное природное явление, что дает возможность проводить множественные наблюдения, повышающие статистическую достоверность полученных результатов. В настоящее время для определения параметров и характеристик волновых возмущений применяется радиофизический метод, позволяющий проводить экспериментальные исследования с помощью спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Использование навигационной спутниковой

системы очень удобно, так как позволяет наблюдать пространственно–временную структуру ионосферных возмущений непрерывно с хорошим (30 с) временным разрешением.

Под непрерывностью в данном случае мы понимаем постоянное наблюдение каждым приемным пунктом не менее трех спутников и, как следствие, получение данных о полном электронном содержании (ПЭС) (т. е. о количестве электронов, содержащихся в столбе с сечением 1 м²) вдоль лучей к ним. Это обеспечивает круглосуточное получение данных о состоянии ионосферы над станцией наблюдения.

В результате более ранних исследований было установлено, что СТ вызывает генерацию волновых возмущений в ионосфере. По данным измерений приемников GPS было обнаружено, что эти возмущения наблюдаются в форме волновых пакетов (ВП) в вариациях ПЭС.

Известно, что радиозондированием с поверхности земли можно определить ход концентрации электронов только в нижней ионосфере, т. е. только да максимума слоя F2, и притом только в тех областях, где нет экранировки нижерасположенными слоями [23]. Что же касается концентрации электронов между слоями и концентрации в верхней ионосфере, т. е. выше максимума слоя F2, то её нельзя определить при помощи радиозондирования с поверхности земли. Разумеется, можно применить импульсный метод для зондирования ионосферы сверху. Однако это потребует установки громоздкой аппаратуры ионосферной станции на ИСЗ, поэтому данный метод не обрел широкого применения.

Для определения концентрации электронов в верхней ионосфере используется ряд других радиометодов. Некоторые из них, возможно, реализовать только при помощи искусственных спутников Земли и запускаемых на большую высоту в верхнюю ионосферу ракет.

Рассмотрим метод измерения электронной концентрации при помощи искусственных спутников Земли, который основан на измерении угла поворота плоскости поляризации радиоволн, проходящих через

ионосферу и связи доплеровского смещения частоты с электронной концентрацией.

1.4.1.Измерение угла поворота плоскости поляризации радиоволн, проходящих через ионосферу.

Интегральная концентрация электронов в ионосфере (*интегральная концентрация – число электронов в столбе единичного сечения и заданной высоты*) может быть определена по данным измерения угла поворота плоскости поляризации волн, излучаемых передатчиками искусственных спутников Земли. Угол поворота плоскости поляризации после прохождения волной расстояния $z_2 - z_1$ в ионосфере равен:

где
$$\Omega = \kappa \int_{z_1}^{z_2} \alpha dz$$
$$\alpha = \frac{1}{2}(n_2 - n_1) \qquad (1.1.;1.2.)$$

Предположим, что несущая частота w сигнала настолько высока, что можно считать

$$\frac{w_T^{\,2}}{w^{\,2}} << 1; \frac{w_L^{\,2}}{w^{\,2}} << 1. \qquad (1.3)$$

Эффект Фарадея имеет место при продольном распространении, а при произвольном направлении только при достаточно высоких частотах, для данного случая имеем

$$n_1^2 \approx 1-\frac{w_0^2}{w^2}\frac{1}{1+\frac{w_L}{w}}\ ; \qquad n_2^2 \approx 1-\frac{w_0^2}{w^2}\frac{1}{1-\frac{w_L}{w}}$$

$$n_1^2 - n_2^2 \approx 2\frac{w_0^2}{w^2}\frac{w_L}{w} \ \Rightarrow\ (n_1-n_2)(n_1+n_2) = 2\frac{w_0^2}{w^2}\frac{w_L}{w} \ \Rightarrow$$

$$\left(Обозначим: n_1 - n_2 = 2a;\quad (n_1+n_2) = n_{ср}\right)$$

$$\Rightarrow\ \ 2n_{ср}\cdot a = 2\frac{w_0^2}{w^2}\frac{w_L}{w} \qquad (1.4)$$

При достаточно высокой частоте имеет место неравенство

$$\frac{w_0^2}{w^2} << 1 \qquad (1.5)$$

Поэтому

$$n_{ср} \approx 1 \qquad (1.6)$$

и следовательно,

$$a = \frac{1}{2}\frac{w_0^2}{w}\frac{w_L}{w}; \qquad (1.7)$$

И используя соотношения

$$w_N^2 = \frac{e^2 N}{m\varepsilon_0}, \quad w_L = \frac{|e|\mu_0}{m}H_{OL}, \quad w_T = \frac{|e|\mu_0}{m}H_{OT} \qquad (1.8)$$

Таким образом, угол поворота плоскости поляризации волны, излученной передатчиком спутника, находящимся на высоте z, равен

$$\alpha = \frac{1}{2\pi}\frac{e^2}{m^2}\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\frac{1}{w^2}\int_z^{z_0} NH_{NL}dz \qquad (1.9)$$

где z_0 – высота нижней границы ионосферы. Подставив в данную формулу численные значения $e, \mu_0, \varepsilon_0, m, c$ получаем

$$\Omega = \frac{1.2}{w^2}\int_z^{z_0} NH_{OL}\,dz \qquad (1.10)$$

В пределах ионосферы H_{OL} меняется слабо, а поэтому можно эту величину вынести за знак интеграла, тогда

$$\Omega = \frac{1.2H_{0L}}{w^2}\int_z^{z_0} N(z)\,dz \qquad (1.11)$$

В данной формуле угол Ω может быть, каким угодно. Однозначное же соответствие между измеренным углом поворота $\Omega_{изм}$ и истинным углом Ω имеет место в том случае, если Ω не превосходит значения π. Неоднозначность в определении угла Ω можно устранить, если излучать две волны с двумя достаточно близкими частотами w_1, w_2 и с одинаковыми первоначальными положениями плоскостей поляризации. Тогда вычисление интегральной концентрации электронов можно производить по формуле

$$\Omega_{2\ изм} - \Omega_{1\ изм} = 1{,}2H_{OL}\left(\frac{1}{w_2^2} - \frac{1}{w_1^2}\right)\int_z^{z_0} N(z)\,dz \qquad (1.12)$$

В качестве базовой системы планируется использовать навигационные сигналы спутниковой системы ГЛОНАСС. Каждый НКА (Навигационный космический аппарат) системы ГЛОНАСС передает навигационные радиосигналы в двух частотных поддиапазонах (L1 ~ 1,6 ГГц и L2 ~ 1,2 ГГц). В системе ГЛОНАСС используется частотное разделение навигационных радиосигналов НКА в обоих поддиапазонах L1 и L2 [24]. Каждый НКА передает навигационные радиосигналы на собственных частотах поддиапазонов L1 и L2. НКА, находящиеся в противоположных точках орбитальной плоскости (антиподные НКА), могут передавать навигационные радиосигналы на одинаковых частотах. В радиолиниях частотных поддиапазонов L1 и L2 НКА ГЛОНАСС передают

навигационные радиосигналы двух типов: стандартной точности и высокой точности.

Сигнал стандартной точности с тактовой частотой 0,511 МГц предназначен для использования отечественными и зарубежными гражданскими потребителями.

Сигнал высокой точности с тактовой частотой 5,11 МГц модулирован специальным кодом и не рекомендуется к использованию без согласования с Министерством обороны Российской Федерации.

Сигнал стандартной точности является доступным для всех потребителей, которые оснащены соответствующей НАП (Навигационная аппаратура потребителя) и в зоне видимости, которых находятся спутники системы ГЛОНАСС.

Навигационный радиосигнал, передаваемый каждым НКА системы ГЛОНАСС на собственной несущей частоте в поддиапазонах L1 и L2, является многокомпонентным фазоманипулированным сигналом. Фазовая манипуляция несущей осуществляется на π радиан с максимальной погрешностью не более $\pm$ 0,2 радиана.

Фаза несущего колебания поддиапазона L1 в НКА ГЛОНАСС и фазы несущих колебаний поддиапазонов L1 и L2 в НКА ГЛОНАСС–М модулируется двоичной последовательностью, образованной суммированием по модулю два псевдослучайного (ПС) дальномерного кода, цифровой информации навигационного сообщения и вспомогательного колебания типа меандр.

На основе фазовых измерений навигационных спутниковых сигналов системы ГЛОНАСС, принимаемых на двух частотных поддиапазонах L1 и L2, и предлагается определить параметры ионосферы, в частности определить интегральную концентрацию и восстановить полное электронное содержание (ПЭС).

Рассмотрим подробнее, будут ли удовлетворять частоты спутников системы ГЛОНАСС требованиям, что бы можно было пользоваться формулой (1.12).

Во–первых, при произвольном распространении (не только квазипродольном) они должны быть достаточно высокими, что бы вообще можно было наблюдать эффект Фарадея. Поскольку напряженность магнитного поля $H_0 = 40\ A/m$, то гиромагнитная частота равна

$$f_{H_0} = 1.4 МГц \tag{1.13}$$

Следовательно, w_1, w_2 должны быть гораздо больше $w_{H_0} = 8.85 \cdot 10^6$ (или больше 1.4 МГц).

Во–вторых, так как при любых возможных значениях концентрации электронов должно иметь место неравенство

$$\Omega_2 - \Omega_1 < \pi \tag{1.14}$$

то разность $\left(\frac{1}{w_2^2} - \frac{1}{w_1^2} \right)$ должна быть достаточно малой.

Задаваясь максимальным значением концентрации электронов в ионосфере $N_m = 10^{12}\ эл/м^3$ и верхней границы ионосферы $z_в = 1000 км$ получаем что

$$\int_z^{z_0} N(z)dz < N_m z_в = 10^{18}\ \frac{эл}{м^3} \tag{1.15}$$

зная одну из частот, можно найти разность частот удовлетворяющую этому неравенству, и соответственно вторую частоту из формулы

$$\pi = 1.2 H_0 \left(\frac{1}{w_2^2} - \frac{1}{w_1^2} \right) N_m z_b \approx 2.4 H_0 \frac{w_2 - w_1}{w_1^3} N_m z_b \tag{1.16}$$

Преобразуем данную формулу к следующему виду:

$$\pi = 0.05H_0\left(\frac{1}{f_2^2}-\frac{1}{f_1^2}\right)N_m z_b \approx 0.1H_0\,\frac{f_2-f_1}{f_1^3}\,N_m z_b \qquad (1.17)$$

Если f_1=1250 МГц

$$f_2 - f_1 = \frac{\pi \cdot f_1^{\,3}}{0.1 \cdot H_0 N_m z_b} \qquad (1.18)$$

Находим разность частот и вторую частоту

$$f_2 - f_1 = \frac{3.14\cdot(1.25)^3\cdot 10^{27}\ {}^{1}\!/\!_{c^3}}{4\cdot 10^{18}\ A\cdot эл\ {}^{/}\!_{м^3}} \approx 1.533\cdot 10^9\,Гц = 1.53 ГГц \qquad (1.19)$$

$$f_2 = f_1 \pm 1.533\cdot 10^9\,Гц$$

Анализируя проделанный расчёт, делаем вывод, о том, что вторая частота 1600МГц входит в допустимый интервал и позволяет нам рассчитывать угол Ω по формуле (1.12). В заключение данного пункта отметим что эффект Фарадея при произвольном направлении распространения можно наблюдать если частоты не слишком велики. Так при частоте $f = 3000 МГц$ согласно формуле (1.11) имеем

$$\Omega = \frac{0.05\cdot 40}{9\cdot 10^{18}}\cdot 10^{18} = 0.22\,рад = 12.7^0$$

то есть угол поворота плоскости поляризации будет очень малым при измерениях.

1.4.2.Кодовые дальномерные измерения и измерения по фазе несущей

При проведении измерений в навигационной системе «ГЛОНАСС» могут использоваться как несущие частоты, так и их коды модуляции

(измерения по несущей имеют более точное значение, в силу того, что длительность сигнала по несущей меньше, чем длительность сигнала кодовой последовательностью).

В настоящее время в качестве измеряемых величин используются, как правило, кодовые измерения типа дальности (псевдодальности – *псевдослучайный дальномерный код представляет собой последовательность максимальной длины регистра сдвига (М–последовательность) с периодом 1 мс и скоростью передачи символов 511 кбит/с*.) и измерения по фазе несущей.

При измерении псевдодальности используется сравнение двух сигналов, один из которых принятый спутниковый сигнал, второй – копия, генерируемая приёмником. С учётом ошибок, измеряемая псевдодальность может быть представлена в следующем виде:

$$R(f,t) = R_0(t) + c(T_s - T_R) + R_I(f,t) + R_T(t) + \delta \qquad (1.20)$$

где $R(f,t)$ – измеренная на частоте f псевдодальность от приёмника до спутника в момент времени t; $R_0(t)$ – геометрическое расстояние между спутником и приёмником; $T_s - T_R$ – разность показаний часов приёмника относительно универсальной шкалы времени; $R_I(f,t)$ и $R_T(t)$ – изменения псевдодальности за счёт влияния ионосферы и тропосферы; δ – прочие ошибки измерения; *c* – скорость распространения сигнала.

Фазовые измерения несущей имеют более высокую разрешающую способность по сравнению с другими видами измерений. Концепция фазовых измерений заключается в следующем[25]. Амплитуда излучаемого сигнала на несущей частоте f_S в момент времени t выражается в виде:

$$E_s = E_o \cos(2\pi f_s t + \varphi_S(t_o)), \qquad (1.21)$$

где $\varphi_S(t_o)$ – начальная фаза сигнала, которая может быть определена только косвенно. Учитывая время Δt распространения сигнала в среде, фазу принятого сигнала в момент времени $t_R = t + \Delta t$ в процессе распространения можно записать в следующем виде:

$$\varphi(t_r) = (2\pi f_s(t_r - \Delta t) + \varphi_R(t_0)), \tag{1.22}$$

где $\varphi_R(t_0)$ – неизвестная начальная фаза, t_r – время, фиксируемое приёмником.

В приёмной аппаратуре происходит сравнение сигнала с его копией генерируемой приёмником: $E_R = E_{Ro}\cos(2\pi f_R t + \varphi_R(t_o))$. Комбинируя фазы сигналов, получают значения измерения биения фазы несущей в момент времени t_r :

$$\varphi(t_r) = 2\pi(f_s - f_R)t_r - 2\pi f_s \Delta t + \varphi_S(t_0) - \varphi_R(t_0), \tag{1.23}$$

Разность начальных фаз $\varphi_S(t_0) - \varphi_R(t_0)$ называется неоднозначностью биения фаз. Учитывая то, что $\Delta t = R_l / c$ окончательное выражение для биения фаз запишем в следующем виде:

$$\varphi(t_r) = -2\pi\left[f_S(t_R)\right]\cdot\left[R_L(t-T) + RI_L + RT_L\right]/c + fT_s(t_R) - fT_R(t_R)] + N \tag{1.24}$$

где f – номинальная частота для диапазонов L1 и L2.

Для измерения полной интегральной концентрации используются как псевдодальномерные измерения (кодовые измерения дальности), так и измерения по фазе несущей. С учётом возможных ошибок измерения псевдодальномерные и фазовые измерения могут быть представлены в следующем виде:

<u>псевдодальномерные измерения по *P* – или *C/A* – коду:</u>

$$\begin{cases} PR_{L_1} = R + RI_{L_1} + RT_{L_1} + RM_{L_1} + RN_{L_1} \\ PR_{L2} = R + RI_{L2} + RT_{L2} + RM_{L2} + RN_{L2} \end{cases} \quad (1.25)$$

фазовые измерения (измерения по фазе несущей):

$$\begin{cases} \Phi_{L_1} = \frac{2\pi}{\lambda_1}\left(R - RI_{L_1} + R\Phi_{L_1} + N_1\lambda_1 + RM\Phi_{L_1} + RN\Phi_{L_1}\right), \\ \Phi_{L_1} = \frac{2\pi}{\lambda_2}\left(R - RI_{L_2} + R\Phi_{L2} + N_2\lambda_2 + RM\Phi_{L2} + RN\Phi_{L2}\right). \end{cases} \quad (1.26)$$

Здесь R – псевдодальность включающая в себя тропосферную задержку, погрешности, обусловленные рассинхронизацией бортовых частот спутника и приемника, прочие частотно – независимые погрешности, общие для всех четырех уравнений наблюдения; RI_L – изменения псевдодальности за счёт влияния тропосферы; RT_L и $R\Phi_L$ – аппаратурная погрешность передатчика при кодовых и фазовых измерениях, соответственно; RM и $RM\Phi$ – изменения псевдодальности вызванные, многолучевостью распространения при дальномерных и фазовых измерениях, соответственно; RN и $RN\Phi$ – шумовая ошибка измерений.

Значение полной электронной концентрации (ПЭС–TEC) можно определить непосредственно из измерений псевдодальности по следующей формуле:

$$\mathrm{TEC(t)} = 9.52 \cdot 10^{16}\left\{\left|PR_{L_2}(t) - PR_{L_1}(t)\right| + \delta R_K\right\}, эл/м^2 \quad (1.27)$$

где δR_K – суммарная ошибка кодовых измерений.

При фазовых измерениях на частотах диапазонов L1 и L2 значения интегральной концентрации можно определить по следующей формуле:

$$\mathrm{TEC(t)} = 1.81 \cdot 10^{16}\left\{\left|\lambda\Phi_{L2}(t) - \lambda\Phi_{L1}(t)\right| + \left[N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2\right] + \delta R_\varphi\right\}, эл/м^2 \quad (1.28)$$

где δR_φ – суммарная ошибка фазовых измерений.

Учитывая высокую точность фазовых измерений, основным источником ошибок является дифференциальная неоднородность биения фаз. Эта неоднородность может быть устранена путём линейной комбинации кодовых и фазовых измерений.

$$\left[PR_{L_1}(t) - PR_{L_2}(t)\right] - \left[\lambda_1 \Phi_{L_1}(t) - \lambda_2 \Phi_{L_{21}}(t)\right] = \Delta RT - \left[\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2\right]$$

Выразив отсюда неоднозначность биения фаз, и, подставив её в формулу (1.28), можно определить интегральную электронную концентрацию по данным фазовых измерений с учётом погрешности кодовых измерений.

Анализ возможных ошибок измерений, проведенный в [4] показал, что основная ошибка определения ПЭС может возникать из – за влияния аппаратурных задержек. Последние обусловлены различием трактов прохождения сигналов *L1* и *L2* диапазонов. Использование корректирующих поправок, передаваемых в навигационном сообщении, а так же проведение предварительной калибровки приемника позволяет уменьшить влияние задержек в трактах до 0.5нс [4,5,6]. Эффекты многолучевости и шумы могут вносить ошибку в измерения псевдодальности до 0.35 нс. С учётом этих оценок погрешность измерения разности псевдодальностей может достигать 1нс. При этом ошибка определения ПЭС будет составлять 2–3TU $\left(1\,\mathrm{TU} = 10^{16}\ эл/м^2\right)$.

1.4.3.Связь доплеровского смещения частоты с электронной концентрацией

Наряду с методом, рассмотренным в предыдущих пунктах, для вычисления интегральной концентрации (и ПЭС) можно использовать подход, основанный на связи доплеровского смещения частоты с

электронной концентрацией [23]. Ниже рассмотрено теоретическое обоснование данного метода.

Эффект Доплера есть изменение частоты принимаемых волн, обусловленное относительным движением источника.

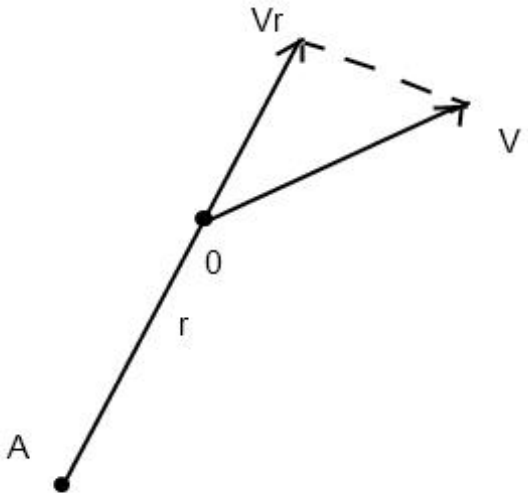

Рисунок 2 – К определению доплеровского смещения частоты

Для однородной среды это изменение равно:

$$\Delta w = -w_0 \frac{v_r}{v_\Phi} = -w_0 n \frac{v_r}{c} \qquad \text{или} \qquad \Delta w = -knv_r \tag{1.29}$$

где v_r – составляющая скорости V источника O вдоль направления луча (Рис.2).

Знак «минус» показывает, что если скорость *V* источника направлена так, что расстояние *r* между источником и точкой наблюдения *A* увеличивается, то частота уменьшается, если же в результате движения расстояние между источником и точкой наблюдения уменьшается, то частота увеличивается. Формулу (1.20) можно получить из выражения для фазы волны

$$\varphi = w_0 t - knr$$

если учесть, что при наличии движения источника фаза φ в точке наблюдения меняется как вследствие изменения t, так и вследствие изменения пространственной координаты r. Поэтому, дифференцируя φ по времени, получим

$$\frac{d\varphi}{dt} - w_0 = \Delta w = -kn\frac{dr}{dt} = -knv_r$$

Аналогичным образом получаем формулу для эффекта Доплера и в случае неоднородной среды. Дифференцируя по времени выражение для фазы волны

$$\varphi = w_0 t - k\int_0^l n(x, y, z)dl$$

справедливое в геометрооптической трактовке, учитывая при этом изменение времени t, так и изменение пространственной координаты l вдоль луча, находим

$$\frac{d\varphi}{dt} - w_0 = \Delta w = -kn\frac{dl}{dt} = -knv_l \qquad (1.30)$$

где *Vl*– проекция скорости источника на касательную к лучу в точке его выхода.

В более общем случае фаза φ может дополнительно меняться ещё и за счёт изменения во времени параметра среды, т.е.

$$\varphi = w_0 t - k\int_0^l n(x, y, z, f)dl$$

Дифференцируя данное выражение по правилу дифференцирования определенного интеграла по параметру, для доплеровского смещения частоты получаем формулу

$$\frac{d\varphi}{dt} - w_0 = -(knv_r + k\int_0^l \frac{dn}{dt} dl)$$

Первое слагаемое раскрывает нам возможность использования доплеровского смещения частоты для измерения электронного содержания в ионосфере. Пользуясь формулой для второго слагаемого можно при фиксированных положениях корреспондирующих пунктов, путем измерения доплеровского сдвига частоты получить информацию о скорости движения неоднородностей ионосферы. Остановимся подробнее на исследовании первого слагаемого.

Если угол между скоростью источника и касательной к лучу точке его выхода обозначить через γ, то

$$\Delta w = -knv \cdot \cos\gamma \tag{1.31}$$

По этой формуле и можно рассчитать концентрацию электронов, если измерено доплеровское смещение частоты. Простота расчётов по формуле (1.31) только кажущаяся, так как угол γ в свою очередь сложным образом зависит от концентрации электронов. Для ориентирования в этих расчётах выполним соответствующие вычисления в предположении, что траектории источника и точка наблюдения лежат в одной плоскости. По ходу этих вычислений так же покажем, какие пренебрежения при этом можно иногда делать.

Пусть в некоторый момент времени движущийся со скоростью ν источник (спутник, ракета) находится на высоте z над поверхностью Земли в точке *O*; α– геоцентрический угол, определяющий положение источника в этот же момент времени; β – угол между касательными к лучу в точках *O* и *A*; υ– угол между вектором скорости источника и касательной к окружности, концентрической с поверхностью Земли, в точке *O*; θ – угол между касательной к лучу и касательной к той же окружности в точке *O* (Рис.3).

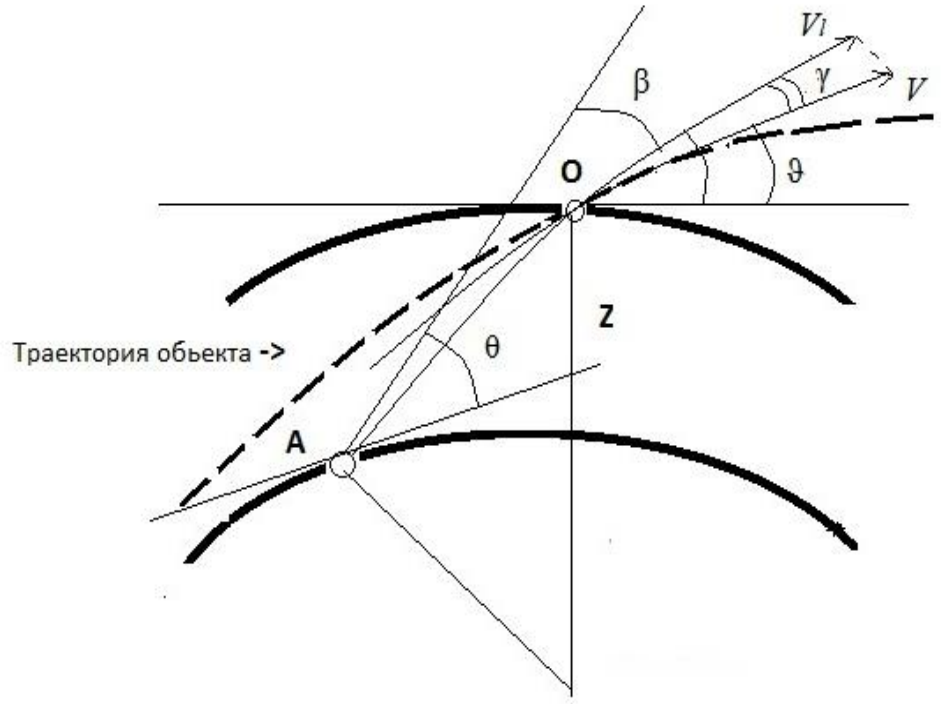

Рисунок 3 – К определению доплеровского смещения частоты для движущегося в ионосфере объекта

Как видно из рис.(1.2), $\theta = a + \theta_0 - \beta;$ $\gamma = \theta - \nu,$ так что

$$\cos\gamma = \cos(\theta - \vartheta) = \cos\theta\cos\vartheta - \sin\theta\sin\vartheta = \cos(a + \theta_0 - \beta)\cos\vartheta - \sin(a + \theta_0 - \beta)\sin\vartheta$$

Если частота ώ достаточно высокая, то очевидно, что $\beta << 1$ и можно считать, что

$$\cos\gamma \approx \cos\vartheta\left[\cos(a + \theta_0) + \beta\sin(a + \theta_0)\right] + \sin\vartheta\left[\sin(a + \theta_0) - \beta\cos(a + \theta_0)\right]$$
$$= \cos(a + \theta_0 - \vartheta) - \beta\sin(a + \theta_0 - \vartheta)$$

отсюда находим доплеровское смещение частоты

$$\Delta w = -knv[\cos(a + \theta_0 - \vartheta) - \beta\sin(a + \theta_0 - \vartheta)] \quad \text{или}$$
$$\Delta f = -\frac{v}{c} f \cdot n \cdot [\cos(a + \theta_0 - \vartheta) - \beta\sin(a + \theta_0 - \vartheta)] \qquad (1.32)$$

Если мы будем рассматривать слоистую среду, то для β можно записать следующее выражение:

$$\beta = -\int_0^z \frac{1}{n}\frac{dn}{dz'}\frac{\cos\theta \; dz'}{\sqrt{\left[n\left(1+\frac{z'}{a}\right)^2 - \cos^2\theta_0\right]}}$$

Учитывая данную формулу можем переписать соотношение (1.32) в след. виде

$$\Delta f = -\frac{v}{c} f \cdot n \cdot [\cos(a+\theta_0-\vartheta) + \cos\theta_0 \sin(a+\theta_0-\vartheta) \times \int_0^z \frac{1}{n}\frac{dn}{dz'}\frac{dz'}{\sqrt{\left[n\left(1+\frac{z'}{a}\right)^2 - \cos^2\theta_0\right]}}]$$

(1.33)

Если измерены для различных высот z значения Δf, то численным интегрированием можно решить это интегродифференциальное уравнение и найти $n(z)$, а затем, зная связь между показателем преломления n и концентрацией N, можно найти функцию распределения концентрации электронов по высоте $N(z)$.

В ряде случаев уравнение (1.33) в результате пренебрежений можно упростить. Кратко рассмотрим, какие пренебрежения могут иметь место в конкретных расчётах и выведем упрощённое выражение для Δf.

Если частота достаточно высокая и можно пренебречь влиянием магнитного поля Земли и так отбрасывая величины второго порядка малости имеем

$$\frac{1}{n}\frac{dn}{dz'} \approx -\frac{40.4}{f^2}\frac{dN}{dz'}$$

$$\left[n\left(1+\frac{z'}{a}\right)\right]^2 \approx 1 - 80.8\frac{N(z')}{f^2} + \frac{2z'}{a} \qquad \left(\text{Пологаем } \frac{z'}{a} << 1\right).$$

Подставляя полученные преобразования в (1.33) получим

$$\Delta f = -\frac{v}{c} f\left(1 - 40.4\frac{N(z')}{f^2}\right) \times \left[\cos(a + \theta_0 - \vartheta) + \cos\theta_0 \sin(a + \theta_0 - \vartheta) \cdot \frac{40.4}{f^2} \times\right]$$

$$\times \int_0^z \frac{dn}{dz'} \frac{dz'}{\sqrt{\left[\sin^2\theta_0 - 80.8\frac{N(z')}{f^2} + \frac{2z'}{a}\right]}} \qquad (1.34)$$

Отмечу, что в данных формулах (1.33–1.34) величины z, υ, ϑ, $\alpha = \frac{R}{a}$, где R – горизонтальная дальность до источника, характеризующая элементы траектории, должны быть известны заранее.

Радиотехническими методами измеряются лишь величины Δf и θ_0. Частота *w*, разумеется, так же известна. При этих условиях уравнение (1.34) позволяет непосредственно определить $N(z)$.

1.5. Солнечный терминатор

Терминатор (от лат. termino – разграничиваю, разделяю), линия на диске планеты или спутника, отделяющая освещенное (дневное) полушарие от тёмного (ночного). Для точек поверхности планеты или спутника, находящихся на линии Терминатор, Солнце либо восходит (утренний Терминатор), либо заходит (вечерний Терминатор). На видимый с Земли диск светила (например, Луны) Терминатор проектируется в виде половины эллипса. Его перемещение по диску определяет явление смены фаз (см., например, Фазы Луны). При наличии у планеты атмосферы Терминатор несколько смещается в сторону ночного полушария вследствие влияния рефракции и сумерек.

Глава 2. Обработка экспериментальных данных

Все программы постобработки написаны на языке m–скрипт (программный комплекс MatLab R2012a).

Полученные экспериментальные измерения состоят из суточных и часовых данных. Для получения результатов необходимо подготовить экспериментальные данные.

Общая структура работы программного комплекса представлена ниже.

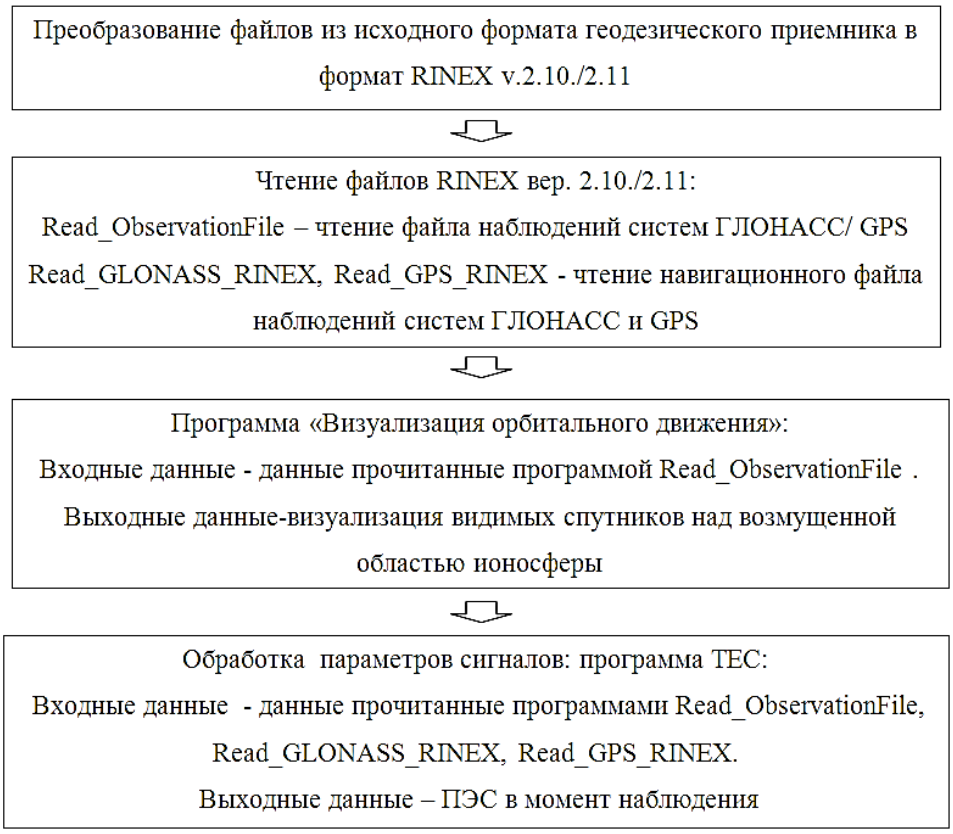

Рисунок 4 – Блок – схема алгоритма обработки файлов

1. Подготовка файлов к чтению. Для использования суточных данных необходимо разархивировать с помощью обычного ZIP**, а часовые с помощью Convert to RINEX.

2. Программа Read_DATA предназначена для часовых данных.

Программа для чтения файла наблюдений. Исходные данные из формата T02 должны быть преобразованы в RINEX 2.11. Главное Отличие от исходных данных в формате RINEX v. 2.11 и самого приемника Trimble NET R9 в том, что здесь есть количество измерений каждого параметра для наблюдаемых спутников.

3. Суточные данные обрабатываем программой Orbita_GPS, которая рассчитывает углы видимости, азимута и положение видимых спутников на заданный момент времени навигационных спутников GPS (Рис.2). С помощью программы «Визуализация орбитального движения» определяются спутники, которые в момент модификации ионосферы находились в зоне видимости и соответственно их сигналы при распространении проходили через данную область.

Таким образом, дальнейшим расчетам подвергаются лишь данные части спутников, которые находились в зоне видимости, что позволяет повысить скорость работы приложения.

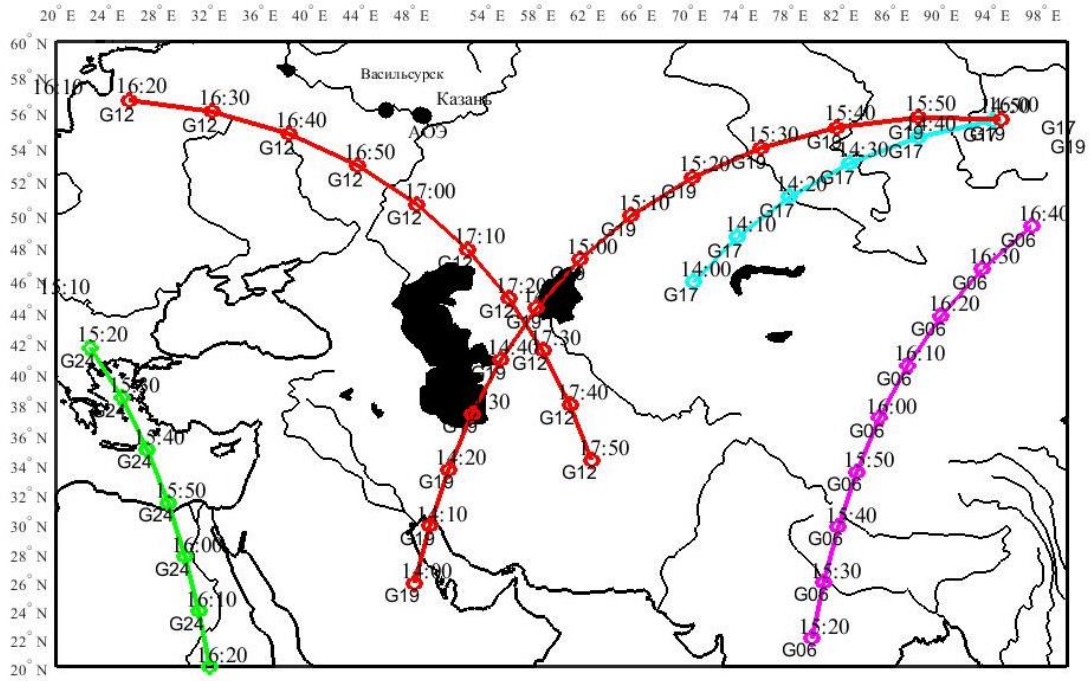

Рисунок 5 – Орбитальное движение спутников

Используя суточные данные, программа Orbita_GPS показывает спутники, проходящие на заданной широте и долготе.

4. Далее расчет ведется с помощью программы «ПЭС/ TEC». Данные после обработки программой Read_DATA загружаются в программу TEC_GPS, которая необходима для расчёта ПЭС на интересующем спутнике. При вычислении ПЭС расчет ведется по измерениям фазы несущей, с учетом константы неопределенности рассчитываемой с помощью псевдодальномерных измерений..

5. Программа Plot_TEC склеивает несколько часовых данных, в частности в дипломной работе склеивались 15,16, 17UTC и выводит результаты измерений в удобном для просмотра виде (Рис.3).

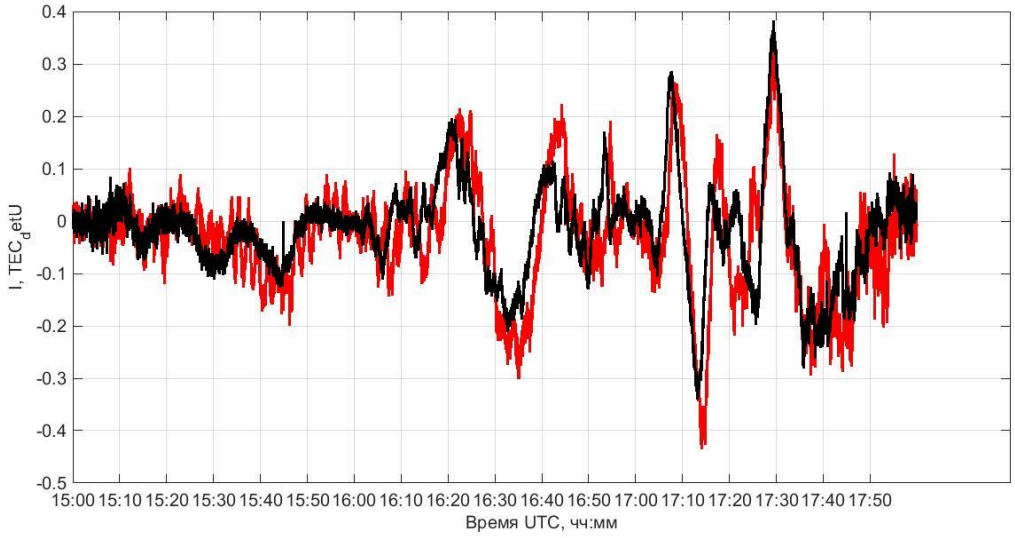

Рисунок 6 – ПЭС экспериментальных данных

2.1. Формат RINEX

С середины 2000–х годов начато активное использование сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС для определения ПЭС в ионосфере Земли. Данные для обработки представляют собой файлы в формате RINEX.

Предпосылкой для разработки аппаратно – независимого формата обмена навигационными данными RINEX (Receiver Independent Exchange Format), было упрощение обмена GPS данными, которые были собраны в течение большой Европейской кампании "GPS EUREF 89" с помощью более чем 60 приемников четырех различных производителей [9]. Главным подходом к разработке формата был следующий факт – большая часть геодезического программного обеспечения обработки данных GPS использует определенный набор наблюдений:

- фазовые измерения на одной или двух несущих частотах (в действительности, являющиеся результатом измерения биений частоты между принятой несущей спутникового сигнала и генерируемой приемником опорной частоты).

- измерения псевдодальности, которые соответствуют разности между временем получения (выражаемого в единицах времени приемника) и временем передачи (выражаемого в единицах времени спутника) отдельных сигналов спутника.
- время наблюдения считывается с часов приемника в момент измерения фазы несущей и/или кода. Обычно, в программном обеспечении заложено, что время наблюдения соответствует фазовым и кодовым измерениям, и используется для всех наблюдаемых спутников.

Следовательно, все эти программы не нуждаются в информации, которая обычно записывается приемником. При обработке необходимыми являются: фаза, код и время, определение которых дано выше, и некоторая информация относительно станции, такая как название станции, высота антенны и др.

Формат RINEX содержит семь типов ASCII–файлов:

1. Файл данных наблюдений

2. Файл навигационных сообщений GPS

3. Файл метеорологических данных

4. Файл навигационных сообщений ГЛОНАСС

5. Файл навигационных сообщений GEO

6. Файл данных часов спутников и приемников

7. Файл широкозонной корректирующей информации SBAS

Каждый тип файла состоит из секции заголовка и секции данных. Заголовок файла содержит глобальную информацию для всего файла и помещается в начале файла. Заголовок содержит текст меток заголовка в столбцах 61–80 для каждой строки заголовка. Эти метки обязательны и должны располагаться точно в той последовательности, как указано в

описании и примерах. Формат оптимизирован для минимизации объема хранимой информации, независимо от числа различных типов наблюдений, производимых определенным приемником, путем указания в заголовке типов сохраненных данных наблюдений. В операционных системах, позволяющих хранить записи переменной длины, записи данных наблюдений могут быть сокращены насколько это возможно. Следовательно, файл навигационных сообщений от одного приемника может быть заменен или создан составной файл навигационных сообщений, содержащий не избыточную информацию от нескольких приемников для того, чтобы получить наиболее полный файл.

Рассмотрим в качестве примера широко распространенный на данный момент формате RINEX версии 2.10.

Таблица 1 – Пример структуры формата RINEX (представлены только те файлы, которые используются в расчете)

Файл данных наблюдений	Файл навигационных сообщений GPS	Файл навигационных сообщений ГЛОНАСС
Имя .yyO Пример: kazn241e.10O	Имя .yyN Пример: kazn241e.10N	Имя .yyG Пример: kazn241e.10G

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2.10           OBSERVATION DATA    M (MIXED)           RINEX VERSION / TYPE
BLANK OR G = GPS,  R = GLONASS,  E = GALILEO,  M = MIXED    COMMENT
XXRINEXO V9.9       AIUB                24-MAR-01 14:43     PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF A MIXED RINEX FILE (NO FEATURES OF V 2.11)       COMMENT
A 9080                                                      MARKER NAME
9080.1.34                                                   MARKER NUMBER
BILL SMITH          ABC INSTITUTE                           OBSERVER / AGENCY
X1234A123           XX                  ZZZ                 REC # / TYPE / VERS
234                 YY                                      ANT # / TYPE
  4375274.       587466.      4589095.                      APPROX POSITION XYZ
        .9030          .0000          .0000                 ANTENNA: DELTA H/E/N
     1     1                                                WAVELENGTH FACT L1/2
     1     2     6   G14   G15   G16   G17   G18   G19      WAVELENGTH FACT L1/2
     0                                                      RCV CLOCK OFFS APPL
     5    P1    L1    L2    P2    L5                        # / TYPES OF OBSERV
    18.000                                                  INTERVAL
  2005     3    24    13    10   36.0000000                 TIME OF FIRST OBS
                                                           END OF HEADER
 05  3 24 13 10 36.0000000  0  4G12G09G06E11                        -.123456789
  23629347.915            .300 8         -.353    23629364.158
  20891534.648           -.120 9         -.358    20891541.292
  20607600.189           -.430 9          .394    20607605.848
                          .324 8                                          .178 7
 05  3 24 13 10 50.0000000  4  4
     1     2     2   G 9   G12                               WAVELENGTH FACT L1/2
  *** WAVELENGTH FACTOR CHANGED FOR 2 SATELLITES ***        COMMENT
      NOW 8 SATELLITES HAVE WL FACT 1 AND 2!                COMMENT
                                                            COMMENT
```

Рисунок 7 – Пример файла ГНСС наблюдений [9]

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2.10           N: GPS NAV DATA                         RINEX VERSION / TYPE
XXRINEXN V2.10      AIUB                3-SEP-99 15:22      PGM / RUN BY / DATE
EXAMPLE OF VERSION 2.10 FORMAT                              COMMENT
     .1676D-07   .2235D-07  -.1192D-06  -.1192D-06          ION ALPHA
     .1208D+06   .1310D+06  -.1310D+06  -.1966D+06          ION BETA
     .133179128170D-06  .107469588780D-12   552960     1025 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
    13                                                      LEAP SECONDS
                                                            END OF HEADER
 6 99  9  2 17 51 44.0 -.839701388031D-03 -.165982783074D-10  .000000000000D+00
     .910000000000D+02  .934062500000D+02  .116040547840D-08  .162092304801D+00
     .484101474285D-05  .626740418375D-02  .652112066746D-05  .515365489006D+04
     .409904000000D+06 -.242143869400D-07  .329237003460D+00 -.596046447754D-07
     .111541663136D+01  .326593750000D+03  .206958726335D+01 -.638312302555D-08
     .307155651409D-09  .000000000000D+00  .102500000000D+04  .000000000000D+00
     .000000000000D+00  .000000000000D+00  .000000000000D+00  .910000000000D+02
     .406800000000D+06  .000000000000D+00
13 99  9  2 19  0  0.0  .490025617182D-03  .204636307899D-11  .000000000000D+00
     .133000000000D+03 -.963125000000D+02  .146970407622D-08  .292961152146D+01
    -.498816370964D-05  .200239347760D-02  .928156077862D-05  .515328476143D+04
     .414000000000D+06 -.279396772385D-07  .243031939942D+01 -.558793544769D-07
     .110192796930D+01  .271187500000D+03 -.232757915425D+01 -.619632953057D-08
    -.785747015231D-11  .000000000000D+00  .102500000000D+04  .000000000000D+00
     .000000000000D+00  .000000000000D+00  .000000000000D+00  .389000000000D+03
     .410400000000D+06  .000000000000D+00
```

Рисунок 8 – Пример файла навигационных сообщений GPS [9]

```
----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|

     2.10           GLONASS NAV DATA                         RINEX VERSION / TYPE
ASRINEXG V1.1.0 VM  AIUB                19-FEB-98 10:42     PGM / RUN BY / DATE
STATION ZIMMERWALD                                          COMMENT
  1998     2    16    0.379979610443D-06                    CORR TO SYSTEM TIME
                                                            END OF HEADER
 3 98  2 15  0 15  0.0 0.163525342941D-03 0.363797880709D-11 0.108000000000D+05
    0.106275903320D+05-0.348924636841D+00 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
   -0.944422070313D+04 0.288163375854D+01 0.931322574615D-09 0.210000000000D+02
    0.212257280273D+05 0.144599342346D+01-0.186264514923D-08 0.300000000000D+01
 4 98  2 15  0 15  0.0 0.179599039257D-03 0.636646291241D-11 0.122400000000D+05
    0.562136621094D+04-0.289074897766D+00-0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
   -0.236819248047D+05 0.102263259888D+01 0.931322574615D-09 0.120000000000D+02
    0.762532910156D+04 0.339257907867D+01 0.000000000000D+00 0.300000000000D+01
11 98  2 15  0 15  0.0-0.559808686376D-04-0.272848410532D-11 0.108600000000D+05
   -0.350348437500D+04-0.255325126648D+01 0.931322574615D-09 0.000000000000D+00
    0.106803754883D+05-0.182923507690D+01 0.000000000000D+00 0.400000000000D+01
    0.228762856445D+05 0.447064399719D+00-0.186264514923D-08 0.300000000000D+01
12 98  2 15  0 15  0.0 0.199414789677D-04-0.181898940355D-11 0.108900000000D+05
    0.131731816406D+05-0.143945598602D+01 0.372529029846D-08 0.000000000000D+00
    0.171148715820D+05-0.118937969208D+01 0.931322574615D-09 0.220000000000D+02
    0.135737919922D+05 0.288976097107D+01-0.931322574615D-09 0.300000000000D+01

----|---1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
```

Рисунок 9 – Пример файла навигационных сообщений ГЛОНАСС [9]

В зависимости от поставленной задачи происходит чтение смешанного файла наблюдений или чтение навигационного сообщения систем ГЛОНАСС/ GPS.

2.2. Орбитальное движение спутников

Орбитальное движение спутников имеет важное значение при решении основной навигационной задачи – определении координат, скорости и времени на основании измерений псевдодальностей до спутников и использовании информации, передаваемой в соответствующих сообщениях спутников [10]. В данной части работы представлены алгоритмы расчета траекторий движения космических аппаратов спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, написанные в полном соответствии с интерфейсными контрольными документами[7, 8] систем

ГЛОНАСС и GPS. Средой разработки был выбран программный комплекс MatLab.

Стоит отметить, что исследование орбитального движения и соответственно размножение эфемерид спутников, в различных системах происходит по разным законам. Рассмотрим систему ГЛОНАСС.

Размножение эфемерид в системе ГЛОНАСС происходит через решение системы дифференциальных уравнений. Полная система дифференциальных уравнений имеет вид [7]:

$$dx_a/dt = Vx_a \qquad dy_a/dt = Vy_a \qquad dz_a/dt = Vz_a \tag{2.9}$$

$$\begin{cases} dVx_a/dt = -\mu * X_a + 3/2 * C_{20} * \mu * X_a * \rho^2 * (1 - 5 * Z_a^2) + Jx_a л + Jx_a c, \\ dVy_a/dt = -\mu * Y_a + 3/2 * C_{20} * \mu * Y_a * \rho^2 * (1 - 5 * Z_a^2) + Jy_a л + Jy_a c, \\ dVz_a/dt = -\mu * Z_a + 3/2 * C_{20} * \mu * Z_a * \rho^2 * (1 - 5 * Z_a^2) + Jz_a л + Jz_a c, \end{cases} \tag{2.10}$$

В системе ПЗ–90 (Параметры Земли 1990 года – государственная геоцентрическая система координат; в настоящее время используется ПЗ–90.02):

$J_{x_a}c, J_{y_a}c, J_{z_a} -$ ускорения от солнечных гравитационных возмущений

$J_{x_a}л, J_{y_a}л, J_{z_a}л -$ ускорения от лунных гравитационных возмущений

$a_e -$ экваториальный радиус Земли, равный 6378,136 км

$\mu -$ константа гравитационного поля Земли (398600,44 км^3/м^2)

$C_{20} = \sqrt{5}\, C_{20} -$ нормализованное значение гармонического коэффициента при второй зональной гармонике $= -484{,}165 \cdot 10^{-6}$

Пересчет эфемерид с момента времени $t_э$ на моменты t_i измерения навигационных параметров ($|\tau_i| = |t_i - t_э| < 15$ мин) проводится методом численного интегрирования дифференциальных уравнений движений космического аппарата (КА). В расчете применена функция Mat Lab (ode45–комбинированный метод Рунге–Кутта (4–5) –го порядка с автоматическим выбором шага, для решения нежестких СДУ) для решения

системы дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутта 4–5 порядка[10]. Расчеты для ускорения от солнечных и лунных гравитационных возмущений приведены в интерфейсном контрольном документе системы ГЛОНАСС.

Начальными условиями для интегрирования системы являются гринвичские координаты $X(t_э)$, $Y(t_э)$, $Z(t_э)$ и составляющие вектора скорости $Vx(t_э)$, $Vy(t_э)$, $Vz(t_э)$, содержащиеся в навигационном кадре, которые пересчитываются из гринвичской системы координат OXYZ (ПЗ–90) в абсолютную $OX_aY_aZ_a$ по формулам:

$$\left.\begin{aligned}
X_ф(t_э) &= X(t_э)\cdot\cos S - Y(t_э)\cdot\sin S\\
Y_a(t_э) &= Y(t_э)\cdot\sin S + Y(t_э)\cdot\cos S\\
Z_a(t_э) &= Z(t_э),\\
Vx_a(t_э) &= Vx(t_э)\cdot\cos S - Vy(t_э)\cdot\sin S - \omega_з\cdot Ya(t_э),\\
Vy_a(t_э) &= Vx(t_э)\cdot\sin S + Vy(t_э)\cdot\cos S + \omega_з\cdot Xa(t_э),\\
Vz_a(t_э) &= Vz(t_э),\\
S &= s + \omega_з\cdot(t - 3^h).
\end{aligned}\right\} \qquad (2.11)$$

В формулах: $\omega_з$ – угловая скорость вращения Земли, равная 0,7292115 $*$ 10^{-4} $с^{-1}$; s – истинное звездное время в гринвичскую полночь даты задания эфемерид $t_э$.

Номинальные значения несущих частот навигационных радиосигналов НКА ГЛОНАСС в частотных поддиапазонах L1 и L2 определяются следующими выражениями:

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1,$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2,$$

где К – номера несущих частот навигационных радиосигналов, излучаемых НКА в частотных поддиапазонах L1 и L2, соответственно;

f_{01} = 1602 МГц; Δf_1 = 562,5 кГц, для поддиапазона L1;

f_{02} = 1246 Мгц; Δf_2 = 437,5 кГц, для поддиапазона L2.

Далее перейдем к системе GPS и рассмотрим алгоритм расчета эфемерид спутников данной системы. Алгоритм соответствует интерфейсному контрольному документу системы GPS [8].

С целью получения координат НКА GPS на моменты измерения псевдодальности используется алгоритм, представленный в. Определяется поправка для перехода от бортовой шкалы измерения времени к системной шкале:

$$\Delta t_s = A0 + A1 \cdot (Ts - t_{oc}) + A2 \cdot (Ts - t_{oc})^2 + \Delta t_r \qquad (2.12)$$

где A0,A1,A2 – коэффициенты полинома для расчёта поправки для перехода, от бортовой шкалы измерения времени к системной шкале (для каждого НКА разные), Ts – время в UTC, на момент которого производится вычисление координат НКА. Для получения координат НКА ежесекундно к Ts необходимо на каждом новом шаге прибавлять одну секунду; Δtr – поправка на релятивистский эффект.

Получаем время излучения метки времени по системной шкале:

$$tk = Ts - \Delta t_s - t_{oc} \qquad (2.13)$$

если tk > 302400 с, то истинное tk = tk – 604800 с, если tk < 302400 с, то истинное tk = tk + 604800.

Далее вычисляется средняя аномалия НКА на момент излучения метки времени (средняя аномалия эпохи tk):

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{a^3} + \Delta n} \qquad (2.14)$$

где n0 – среднее движение НКА или средняя угловая скорость НКА.

μ – гравитационная постоянная для WGS–84;

a – большая полуось орбиты НКА GPS;

Δn – изменение среднего движения НКА, передаётся в кадре навигационного сообщения.

Далее: $$M = M_0 + n \cdot tk \qquad (2.15)$$

где M0 – средняя аномалия НКА, передаётся в кадре навигационного сообщения.

Средняя аномалия M эпохи tk – это угол между линией апсид и направлением на предполагаемое положение НКА на орбите, в котором он находился бы при равномерном движении.

Затем решается уравнение Кеплера методом итераций для расчёта эксцентрической аномалии НКА:

$$E_0 = M + (e - \frac{e^3}{8}) \cdot \sin(M) + \frac{e^2 \cdot \sin(2 \cdot M)}{2} + \frac{3 \cdot e^3}{8} \cdot \sin(3 \cdot M) \quad (2.16)$$

где E0 – начальное приближение эксцентрической аномалии, e – эксцентриситет орбиты НКА.

Здесь

$$E_{j+1} = E_j + \frac{\left(e \cdot \sin(E_j) + M - E_j\right)}{\left(1 - e \cdot \sin(E_j)\right)} \quad (2.17)$$

где j0– номер итерации.

Критерием истинности значения полученной эксцентрической аномалии является вычисленное значение средней аномалии M эпохи tk по полученному значению:

$$M = E - e \cdot \sin(E) \quad (2.18)$$

Полученное значение средней аномалии M эпохи tk должно быть равно значению рассчитанному по формуле.

После этого поправка на релятивистский эффект в уравнение поправки перехода от бортовой шкалы измерения времени к системной шкале:

$$\Delta tr = \left(\frac{-2\sqrt{\mu} \cdot \cdot e \cdot \sqrt{a} \cdot \sin(E)}{c^2} \right) \quad (2.19)$$

После вычисления Δtr повторяются все вычисления с самого начала. Производится расчёт истинной аномалии НКА на момент излучения временной метки по системной шкале:

$$\cos(v) = \frac{\cos(E) - e}{1 - e \cdot \cos(E)}$$
$$\sin(v) = \frac{\sqrt{1 - e^2}\,\sin(E)}{1 - e \cdot \cos(E)} \quad (2.20)$$

Далее с учётом знака sin и cos определяется номер четверти угла υ. И с учётом номера четверти для нахождения υ вычисляется либо arcsin (υ), либо arccos (υ). Вычисляется предварительный аргумент широты:

$$U'' = v + w \tag{2.21}$$

где ω – аргумент перигея, передаётся в кадре навигационного сообщения НКА GPS.

Аргумент перигея – это угол между направлением между направлением восходящего узла орбиты и направлением перигея. Вычисляется исправленный аргумент широты за счёт гравитационного возмущения орбиты НКА:

$$U' = U' + Cus \cdot \cos(2 \cdot U'') + Cus \cdot \sin(2 \cdot U'') \tag{2.22}$$

где Cuc, Cus – коэффициенты коррекции аргумента широты, передаваемые в кадре навигационного сообщения НКА GPS.

Вычисляется радиус–вектор НКА GPS на момент излучения метки времени по системной шкале:

$$r = a(1 - e \cdot \cos(E)) + Crs \cdot \cos(2 \cdot U) + Crs \cdot \sin(2 \cdot U) \tag{2.23}$$

где Crc, Crs – коэффициенты коррекции радиус–вектора НКА, передаются в кадре навигационного сообщения НКА GPS.

Вычисляется наклон возмущённой плоскости орбиты к плоскости экватора:

$$i = i_0 + Vi \cdot tk + Cis \cdot \cos(2 \cdot U) + Cis \cdot \sin(2 \cdot U) \tag{2.24}$$

где i0 – наклон орбиты к плоскости экватора, передаваемый в кадре навигационного сообщения НКА GPS;

Vi – скорость изменения наклона орбиты, передаваемая в кадре навигационного сообщения НКА GPS;

Cic, Cis – коэффициенты коррекции угла наклона орбиты НКА, передаваемые в кадре навигационного сообщения НКА GPS

Вычисляются координаты НКА в плоскости орбиты:

$$\begin{aligned} X' &= r \cdot \cos(U) \\ Y' &= r \cdot \sin(U) \end{aligned} \tag{2.25}$$

Вычисляется долгота восходящего узла орбиты НКА:

$$\lambda = \Omega + (V \cdot \Omega - \Omega \cdot e) \cdot tk - \Omega \cdot e \cdot t_{oc} \quad (2.26)$$

где Ω – восходящий узел орбиты, передаваемый в кадре навигационного сообщения НКА GPS;

Ωe – угловая скорость вращения Земли;

VΩ – прецессия восходящего узла орбиты НКА, передаваемая в кадре навигационного сообщения НКА GPS.

Вычисляется матрица преобразования геоцентрических координат в геодезические:

$$Mor_g = \begin{pmatrix} \cos(\lambda) & -\sin(\lambda) & 0 \\ \sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & -\sin(i) \\ 0 & \sin(\mathrm{i}) & \cos(\mathrm{i}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(u) & -\sin(u) & 0 \\ \sin(u) & \cos(u) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Вычисляются прямоугольные координаты НКА GPS на момент tk без учёта времени распространения сигнала до потребителя:

$$rs = \cdot Mor_g \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

где элементы матрицы rs представляют собой соответственно: rs1 = X, rs2 = Y, rs3=Z.

Вычисляются прямоугольные координаты НКА GPS на момент tk с учётом времени распространения сигнала от НКА до потребителя (вычисления для НКА ГЛОНАСС аналогичны):

$$\tau = \frac{D}{c} \quad (2.29)$$

где τ – время распространения сигнала от НКА до потребителя;

D – – измеренная псевдодальность НКА – потребитель.

$$M\tau = \begin{pmatrix} \cos(\Omega e \cdot \tau) & -\sin(\Omega e \cdot \tau) & 0 \\ \sin(\Omega e \cdot \tau) & \cos(\Omega e \cdot \tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

$$Rs = M\tau \cdot rs \tag{2.31}$$

где элементы матрицы rs представляют собой соответственно: Rs1 = X, Rs2 = Y, Rs3=Z с учётом времени распространения сигнала до потребителя.

Для совместного использования двух СРНС ГЛОНАСС/GPS вычисление координат НКА необходимо производить в одной из общеземных систем координат в ПЗ–90 или WGS–84.

2.3. Расчет ПЭС в ионосфере Земли

Для расчета ПЭС использовались следующие формулы [11, 12]

$$I_L = -\frac{1}{K}\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(\lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2) + const \tag{2.32}$$

где $K = 40{,}308 \cdot 10^{16}\, m_e^{-2}/TECU$, $TECU$ – общепринятая единица измерения ПЭС, 1 $TECU$= $10^{16}\,\mathrm{m}^{-2}$, I_L – ПЭС, рассчитанное по измерениям фазы сигнала ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO), $const$ – константа неопределенности, связанная с тем, что фаза принимаемого сигнала измеряется относительно опорного сигнала, генерируемого приемником, который никак не синхронизирован с оборудованием на спутнике.

Так же большинство приемников геодезического класса на данный момент позволяют измерять псевдодальность $P = c\Delta T + c\tau$, где ΔT – время распространения сигнала через ионосферу, τ – отклонение часов приемника от системного времени ГНСС. $P = \lambda_i Li + c\tau$, i =1,2. Отсюда следует, что ПЭС может быть так же определено через разность псевдодальностей на частотах f_1 и f_2.:

$$I_P = -\frac{1}{K}\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(P_2 - P_1) + const \tag{2.33}$$

Поэтому полное электронное содержание на пути следования

сигнала определялось с помощью выражения (2.32), а формула (2.33) использовалась для нахождения константы неопределённости:

$$const = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I_P - I_L) \quad (2.34)$$

суммирование производится по всем реализации, N – общее число отсчетов.

Для детального изучения малых вариаций ПЭС из исходной зависимости $I(t)$ (полное электронное содержание от времени), удалялся тренд при помощи вычитания скользящего среднего с линейной весовой функции [11]:

$$dI(j) = I(j) - \frac{1}{N}\sum_{n=j-N}^{j+N}(I[n]\frac{N-|n-j|}{N}) \quad (2.35)$$

$dI(j)$ – колебания ПЭС относительного среднего уровня, N – параметр усреднения, общее число точек суммирования.

В экспериментах, где регистрация данных велась с частотой оцифровки 1 Гц, N численно равно времени усреднения в секундах. При обработке экспериментальных данных параметр усреднения составлял 15÷20 мин. Соответственно для измерений, проводившихся с частотой 10 Гц, N будет численно равно времени усреднения в десятых долях секунды

Глава 3. Результаты

Солнечный терминатор является областью перехода от дневных условий к ночным и наоборот. Данное явление затрагивает все слои атмосферы, характеризуется глобальной протяженностью и строгой регулярностью, что делает его крайне интересным объектом исследований. Эффекты солнечного терминатора в атмосфере и ионосфере исследуются достаточно давно, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Однако полностью изученным данное явление считать не следует. С использованием методов GPS–радиозондирования ионосферы, стало возможно изучения вариации полного электронного содержания

Обработаны данные за январь, февраль, март, апрель, май 2016г, что составило 152 дня для одного пункта. Исследовались два пункта наблюдения Казань и Астрономическая обсерватория имени В. П. Энгельгардта (АОЭ), расположенная в 20 км к западу от Казани в посёлке Октябрьский (Обсерватория) Зеленодольского района Татарстана.

Для каждого дня было спрогнозировано орбитальное движения спутников и рассчитан теоретический и экспериментальный СТ для пунктов Казань и АОЭ.

3.1. Результаты измерений 2 апреля 2016г.

Построим орбитальное движение спутников с помощью программы Orbita_GPS. Рядом с Казанью проходили спутники G12 с 15–17 часов, G19 с 14 до 16 часов, G17 с 14 до 15 часов (Рис.10). Спутник G12 проходит по траектории движения на встречу СТ и по времени с 15 до 18 UTC, поэтому выбираем данный спутник.

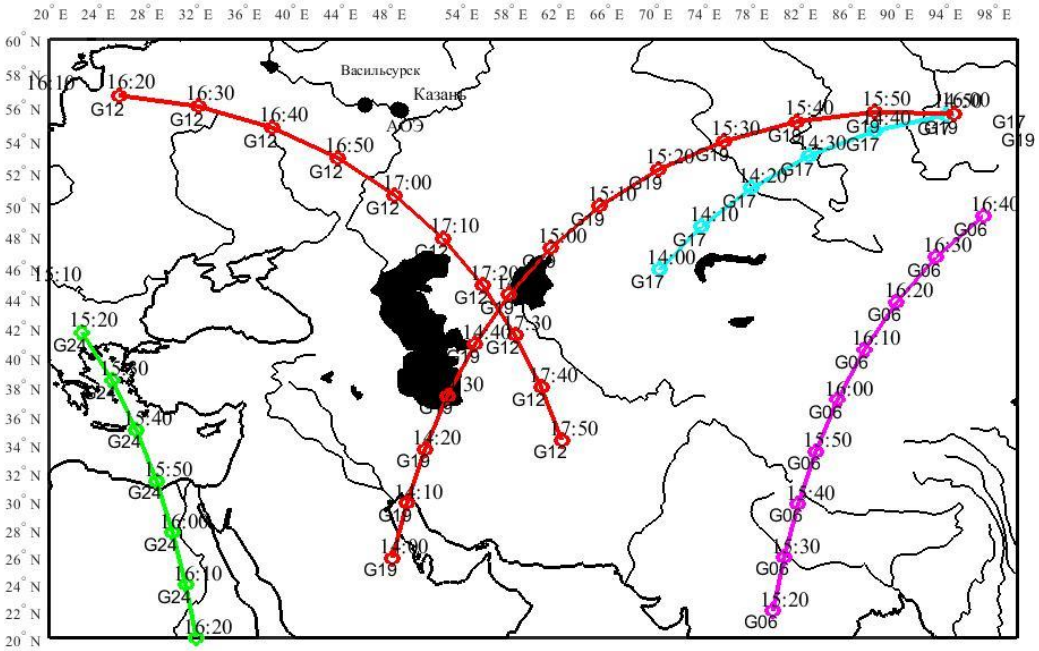

Рисунок 10 – Орбитальное движение спутников 2.04.2016г

Далее построена СТ с помощью программного обеспечения Terminator, которая теоретически рассчитывает прохождения Солнечного терминатора на различных высотах и выводит график зависимости времени от высоты. Так же по экспериментальным данным построен график зависимости ПЭС от времени (Рис.11.).

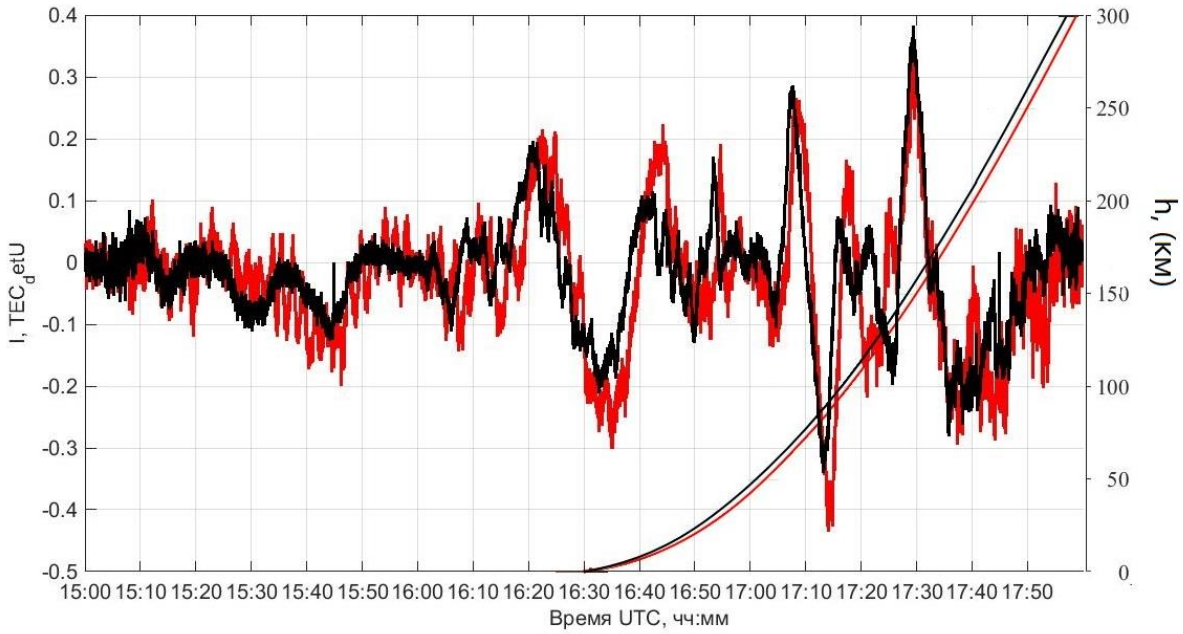

Рисунок 11 – Теоретический и экспериментальный СТ 2.04.2016г.

красная линия –п. АОЭ, черная линия – п. Казань

Время прохода теоретического СТ на высоте 250 км (время UTC): Казань – 17:47; АОЭ –17:50; на высоте 200 км: Казань – 17:37; АОЭ –17:40.

По результатам экспериментальных данных возмущения для п. Казань начинаются в 16:16 и заканчиваются в 17:36, а для п. АОЭ с 16:19 до 17:39. Масштабы возмущений для п. Казань и п. АОЭ одинаковы и равны 80 мин.

Первый локальный минимум (на высоте 0 до 50 км) для приемного п. АОЭ 16:33 UTC, для п. Казань 16:35 UTC (см. рис.11), полный размах амплитуды которого равен 0.31 TECU (1 TECU = 1016 эл/м2) для п. Казань, 0.52 TECU для п. АОЭ. Относительный сдвиг локальных минимумов двух пунктов составило ~ 139 сек

Следующий минимум (на высоте 60 до 200 км) для приемного п. АОЭ 17:15 UTC, для п. Казань 17:13 UTC, полный размах амплитуды которого равен 0.72 TECU (1 TECU = 1016 эл/м2) для п. Казань, 0.82 TECU для п. АОЭ. Относительный сдвиг локальных минимумов двух пунктов составило ~ 62 сек.

Относительный сдвиг, между временем прохода СТ и временем регистрации крупномасштабного возмущения для пункта для пункта АОЭ~ 35 мин.; для пункта Казань~ 34 мин

3.2. Результаты измерений 8 марта 2016г.

Построено орбитальное движение спутников с помощью программы Orbita_GPS. Рядом с Казанью проходил спутники G12 с 15–17 часов. Далее рассмотрим теоретический и экспериментальный СТ (Рис.12).

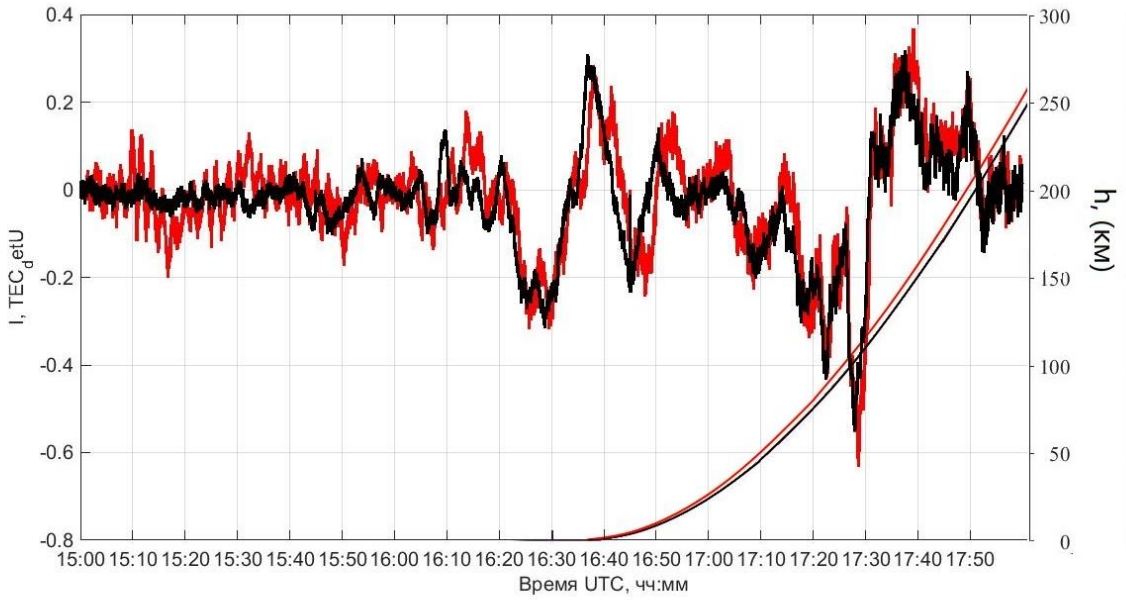

Рисунок 12 – Теоретический и экспериментальный 8.03.2016г

красная линия –п. АОЭ, черная линия – п. Казань

Время прохода СТ на высоте 250 км (время UTC): Казань – 18:00; Зеленодольск –17:57; на высоте 200 км: Казань – 17:50; Зеленодольск – 17:47.

По результатам экспериментальных данных возмущения для п. Казань начинаются в 16:21 и заканчиваются в 17:51, а для п. АОЭ с 16:22до 17:52. Масштабы возмущений для п. Казань и п. АОЭ одинаковы и равны 90 мин

Первый локальный минимум (на высоте от 0 до 60 км) для приемного п. АОЭ 16:25 UTC, для п. Казань 16:24 UTC, полный размах амплитуды которого равен 0.57 TECU (1 TECU = 1016 эл/м2) для п. Казань, 0.59 TECU для п. АОЭ. Относительный сдвиг локальных минимумов двух пунктов составило ~ 36 сек

Следующий минимум (на высоте от 60 до 200 км) для приемного п. АОЭ 17:29 UTC, для п. Казань 17:28 UTC, полный размах амплитуды которого равен 0.84 TECU (1 TECU = 10^{16} эл/м^2) для п. Казань, 0.94 TECU

для п. АОЭ. Относительный сдвиг локальных минимумов двух пунктов составило ~ 85 сек

Относительный сдвиг, между временем прохода СТ и временем регистрации крупномасштабного возмущения для пункта для пункта АОЭ~ 31 мин.; для пункта Казань~ 30 мин

3.3. Статистика результатов

Обработаны данные за январь, февраль, март, апрель, май 2016г, что составило 152 дня для одного пункта. Исследовались два пункта наблюдения Казань и Астрономическая обсерватория имени В. П. Энгельгардта (АОЭ), расположенная в 20 км к западу от Казани в посёлке Октябрьский (Обсерватория) Зеленодольского района Татарстана.

Так как обрабатывались данные не за один час, а во время захода солнца:15, 16, 17 UTC, то количество файлов составило 456 для одного пункта (912 файлов для двух пунктов).

Результаты экспериментальных данных показали проявления солитоноподобных волны в ПЭС было не каждый день, например, в марте 11 дней из 31, что составило 35%

Подсчитано количество дней в каждом месяце, когда видно солитоноподобных волны в ПЭС во время прохождения СТ и составлена диаграмма (Рис.13), по которой можно сделать вывод, что в марте месяце было получено максимальное количество успешных результатов, чем в январе месяце, обусловлено это изменением градиента ионосферных параметров.

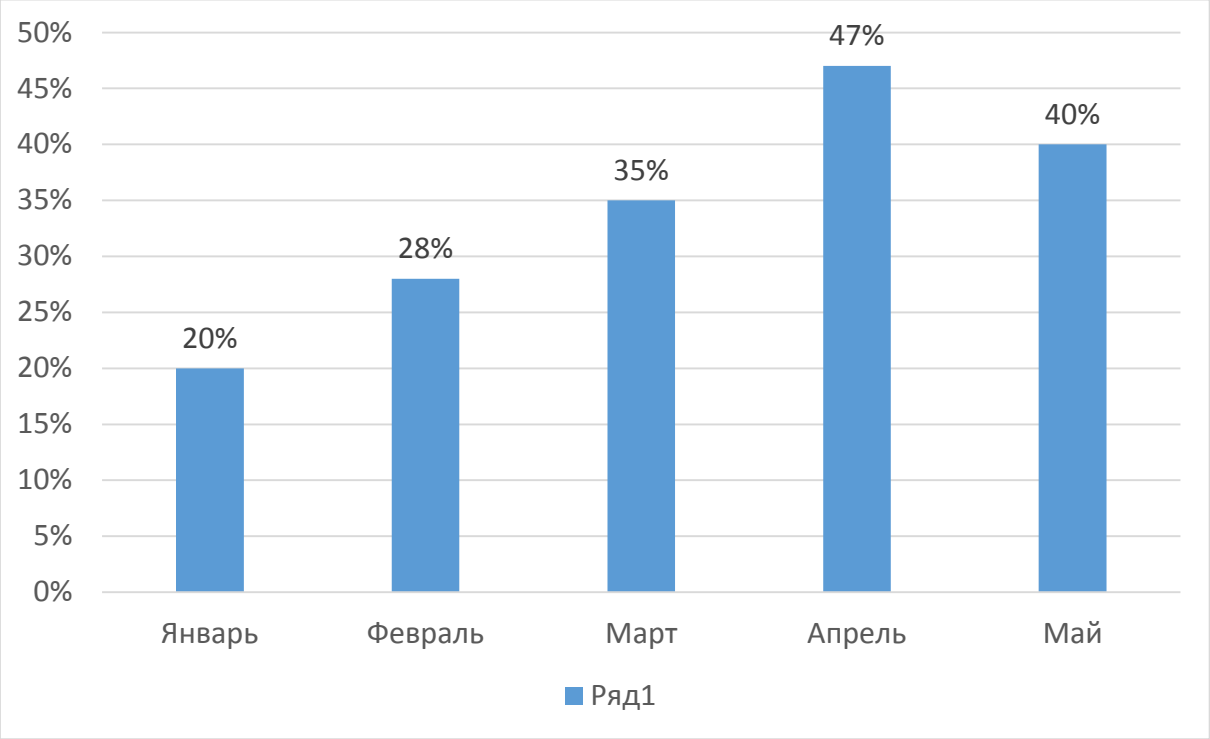

Рисунок 13 – Статистика возникновения вариаций ПЭС во время прохода СТ

Всего результатов 54 дней из 152, что составило 35% из общего количества.

3.4. Интерпретация результатов

Для интерпретации результатов использовалась теория, изложенная Белашовым В.Ю.

На высотах F– слоя ионосферы, где концентрация заряженных частиц много выше, чем в нижележащих областях, при движении СТ, в связи с нарушением им баланса ионизации и динамического равновесия, вызванных быстрым изменением степени освещенности во фронтальной зоне СТ, формируется перемещающаяся со скоростью терминатора область резких градиентов основных ионосферных параметров– электронной концентрации, электронной и ионной температуры, коэффициента рекомбинации, скорости ионообразования и т.д. (Рис.14) [26].

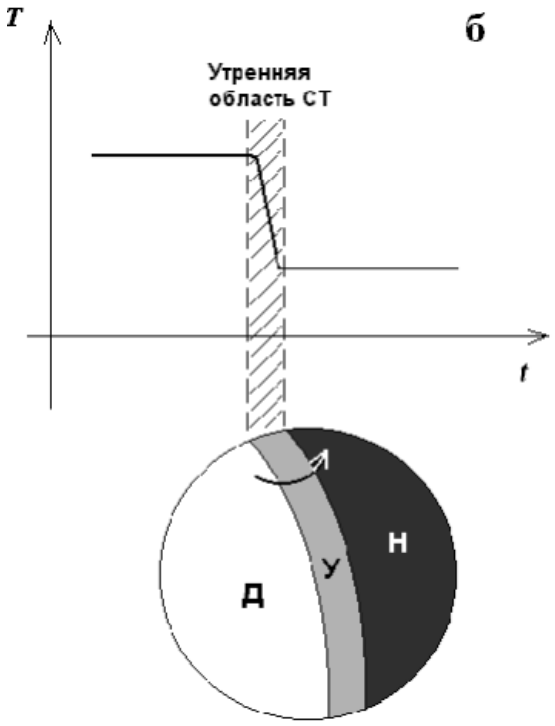

Рисунок 14–СТ во время захода солнца: область резких градиентов основных ионосферных параметров [26]

Внутренние гравитационные волны (ВГВ)– крупномасштабные волновые образования, перемещающиеся в F– слое ионосферы, которые могут возникнуть из различных факторов, один и которых является солнечный терминатор.

ВГВ являются нейтральной компонентой, которая возбуждает перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). На экспериментальных данных наблюдаются ПИВ, так как являются заряженной компонентой, а нейтральную компоненту не видно, но известно, что солитоноподобные ПИВ находятся впереди ВГВ.

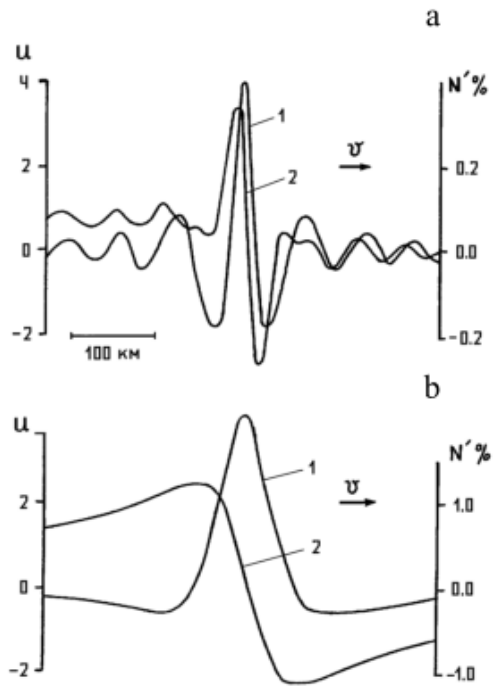

Рисунок 15– Профили возмущений при y=0: 1 – ВГВ, 2 – ПИВ [26]

Решение уравнений КП при характерных для F–слоя значениях параметров позволило получить следующие результаты. Уединенные ВГВ возбуждают в F–области уединенные ПИВ электронной концентрации, структура которых зависит от формы ВГВ и значений ионосферных параметров, определяемых фотохимическими и динамическими процессами на данной высоте [26].

Результаты обработки измерений вариаций (ПЭС) ионосферы с января по май 2016 года позволяют сделать вывод о том, что в области фронта СТ в вечернем секторе возникают солитоноподобные волновые возмущения («предвестники»), имеющие временные масштабы возмущений порядка 80–90 мин.

В работе [26] теоретически были получены оценки масштабов солитоноподобных волновых «предвестников» СТ для усреднённого суточного хода основных ионосферных параметров, которые составили

~40–60 мин, что по порядку величины совпадает с приведёнными экспериментальными оценками.

Относительный сдвиг, между временем прохода СТ и временем регистрации крупномасштабного возмущения для пункта АОЭ ~35–31 мин.; для пункта Казань ~34–30 мин, что совпадает с теоретической оценкой теории Белашова В.Ю.

Проведенный анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что теория, разработанная В. Ю. Белашовым, может быть использована для объяснения наблюдаемых в экспериментах явлений.

Заключение

В ходе выполнения данной работы:

1. Проанализированы данные экспериментальных сессий с января по май 2016 г., что составило 152 дня и получено, что в 35% случаев регистрировалась возникновение вариации ПЭС во время прохода СТ.
2. Проведено сопоставление и сравнение рядов ПЭС для двух приёмных пунктов, которое позволяет заключить, что основной вклад в формирование вариаций ПЭС состояние верхней атмосферы на высотах от 60 до 200 км.
3. Проведенный анализ вариации ПЭС свидетельствует о генерации в области вечернего фронта СТ солитоноподобных волновых возмущений с масштабами около 80–90 мин, что совпадает с теоретическими оценками.
4. Получено, что относительный сдвиг, между временем прохода СТ и временем регистрации крупномасштабного возмущения для пункта для пункта АОЭ~ 35–31 мин.; для пункта Казань~ 34–30 мин.

Выражаю глубокую благодарность моему научному руководителю доценту кафедры радиоэлектроники Насырову И.А. за помощь в подготовке магистерской диссертации.

Список литературы

1. Насыров А.М., Гумеров Р.И., Насыров И.А. Фотометрия свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура» /Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико–математические науки, 2011, –Т. 153, №4, –С. 156 – 166.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере //УФН, 2007, – Т. 177, № 11,–С. 1145 – 1177.
3. Ерухимов Л. М. Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория / СОЖ, 1998, № 4, –С. 71–77.
4. Гумеров Р.И., Насыров И.А., Шаймухаметов Р.Р. Фотоэлектрические наблюдения свечения ионосферы в зеленой линии, возбужденной мощным коротковолновым излучением //Труды XX Всерос. конф. по распространению р/волн. – Нижн. Новгород 2–4 июля 2002 г. – С. 307 – 308.
5. Строение ионосферы. Пути распространения радиоволн. Критическая частота и максимально применимая частота [Электронный ресурс] URL: http://oitzi.ru/Materials.aspx?doc_id=13&id=340
6. Википедия – свободная энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Кингсеп А. С.
7. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС.-М. редакция 5.1, 2008.
8. INTERFACE SPECIFICATION IS–GPS–200 Revision E Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces / 8 June 2010
9. Werner Gurtner, Lou Estey RINEX (The Receiver Independent Exchange Format) version 2.11 / перевод на русский язык: Чукин В.В., Кононова Е. А. – Российский государственный гидрометеорологический университет – 2008 г. – 42 с.
10. Конин В.В., Конина Л.А. Спутниковые системы навигации / Учебное пособие – Киев 2008. – 286 с.

11. Рябов А.В., Грач С.М., Шиндин А.В., Котик Д.С., Исследование характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных воздействием на неё мощного коротковолнового радиоизлучения, с помощью сигналов GPS //Известия вузов. Радиофизика, 2011, –Т.54, № 7, –С. 485 – 496.

12. Шиндин А.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н., Рябов А.В., Пространственная корреляция крупномасштабных неоднородностей плотности (по данным анализа GPS сигналов) и искусственного оптического свечения в линии 630 нм в ионосфере, возмущенной мощной радиоволной //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, № 4 (1), –С. 105–113.

13. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. – М: Атомиздат, 1979.

14. Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. – 3–е изд. – М.: Атомиздат, 1969. – 189 с.

15. Основные понятия по возбуждению ионосферы [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/

16. Как облучают ионосферу, и что при этом получается (что такое HAARP) [Электронный ресурс] URL: http://pozitivchik.info/2010/07/kak–obluchayut–ionosferu–i–chto–pri–etompoluchaetsya–chto–takoe–haarp/

17. Плазма как объект физических исследований //Соросовский образовательный журнал, 1996, №2.

18. Кингисеп А.С. Плазма как объект физических исследований // Соросовский Образовательный Журнал, 1996, № 2, –С. 98–104.

19. Научно–исследовательский радиофизический институт [Электронный ресурс] URL:http://nirfi.ru/index.php/o–nas/34–poligony/133–vasilsursk

20. Васьков В.В., Гуревич А.В. Возбуждение неустойчивости *F*–области ионосферы в поле мощных радиоволн // *УФН* 113, 1974, –С. 730–732.

21. Насыров И.А. Отчет о научно–исследовательской работе. Разработка инструментального комплекса мониторинга в оптическом диапазоне длин волн верхней атмосферы и ближнего космического пространства. – Казань, 2010

22. И.А. Насыров, С.М. Грач, Р.М. Гумеров, В.В. Клименко, А.В. Шиндин, А.М. Насыров. Предварительные результаты измерений стимулированного свечения ионосферы в зелёной линии оптического спектра (557.7 нм) при коротких временах воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» [Электронный ресурс] URL:httpwww.galactic.org.uaSLOVARIn91.htm

23. Чёрный Ф.Б. Распространение радиоволн. Изд. 2–ое, доп. и переработ. М.: «Союз Радио» 1972, 464 с.

24. Медведев П.П., Баранов И.С. Глобальные космические навигационные системы// Итоги науки и техники. Сер. Геодезия и аэросъемка. М.:ВИНИТИ, 1992, –Т.28, 159 с.

25. А.В. Шиндин, С.М. Грач, Е.Н. Сергеев, А.В. Рябов, Пространственная корреляция крупномасштабных неоднородностей плотности (по данным анализа GPS сигналов) и искусственного оптического свечения в линии 630 нм в ионосфере, возмущенной мощной радиоволной // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, № 4 (1),–С. 105–113.

26. Белашова Е.С., Белашов В.Ю. Солитоны как математические и физические объекты. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006, 205 с.