

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 537.632.4: 550.388.2



Алсаткин Сергей Сергеевич

**Метод восстановления высотного профиля электронной концентрации
на основе малопараметрической модели фарадеевских замираний**

(1.3.4 — «Радиофизика»)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН Медведев А.В.

Иркутск – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Выбор сложных зондирующих сигналов для измерения высотного профиля мощности рассеянной ионосферной плазмой радиоволны на Иркутском радаре некогерентного рассеяния.....	14
1.1. Характеристики и особенности антенной системы Иркутского радара некогерентного рассеяния	14
1.1.1. Восстановление профиля электронной концентрации по наблюдаемым замираниям мощности, вызванным эффектом Фарадея.....	19
1.2. Особенности применения сложных сигналов в задаче исследования ионосферной плазмы	22
1.2.1. Сложные сигналы.....	25
1.3. Специфика использования сложных сигналов в ионосферных измерениях.....	32
1.4. Методика подбора параметров специальных сложных сигналов (длительность, ширина спектра), обеспечивающих оптимальное соотношение между разрешающей способностью и отношением сигнал/шум для Иркутского радара некогерентного рассеяния.....	36
1.5. Выводы.....	46
Глава 2. Методика восстановления профиля электронной концентрации на Иркутском радаре некогерентного рассеяния.....	47
2.1 . Структура нового метода.....	47
2.2 . Обсуждение результатов.....	58
2.3 . Выводы.....	64
Глава 3. Особенности поведения ионосферы над Восточно-Сибирским регионом по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния при низкой и умеренной солнечной активности.....	65
3.1. Анализируемые данные.....	68

3.2. Результаты исследования высотно-временного поведения электронной концентрации в период низкой и средней солнечной активности 2007–2014 годов.....	69
3.3. Сравнение с данными Иркутского ионозонда DPS-4.....	76
3.4. Сравнение с Глобальной самосогласованной моделью термосферы, ионосферы и протоносферы и Международной справочной моделью ионосферы IRI.....	78
3.5. Выводы.....	82
Заключение.....	84
Список основных обозначений и сокращений.....	85
Список литературы.....	86

Введение

Метод некогерентного рассеяния (НР) является наиболее информативным методом зондирования ионосферы. Он позволяет восстанавливать профиль базовых параметров ионосферы (электронная концентрация, температуры электронов и ионов, скорость дрейфа и др.) в высотном диапазоне от ста до примерно тысячи километров с высоким пространственным разрешением [Брюнелли и др., 1979; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Эванс, 1969; Veunon, 1975].

В мире существует одиннадцать исследовательских центров изучения ионосферы, оборудованных радарными некогерентного рассеяния (РНР). Каждый радар имеет уникальные технические характеристики и место расположения [Robinson, 2004]. Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [Жеребцов и др., 2002] является единственным в России. Он входит в цепочку среднеширотных радаров, к которым относятся радар исследовательского центра в Милстоун-Хилл, радар в Харькове, японский радар MU, и является единственным радаром, позволяющим проводить исследования ионосферы в центральной части Азиатского региона. На рисунке 1 представлена мировая сеть радаров некогерентного рассеяния.

В эпоху космических и высоких технологий возрос практический и научный интерес к ионосферным исследованиям. Данные об ионосферных процессах необходимы при решении гелиогеофизических теоретических [Kelley, Heelis, 2009; Zolesi, Cander, 2014; Rees, 1989; Schunk, Nagy, 2009] и прикладных задач. К последним относится влияние ионосферы на функционирование технических систем: спутниковой связи, навигации, радиолокации (в том числе загоризонтной) [Калинин, Черенкова, 1971], трубопроводов и линий электропередач, электронной аппаратуры самолетов и искусственных спутников Земли и т.д. [Baker et al., 1998; Barbieri, Mahmot, 2004; Iucci et al., 2005; Belehaki et al., 2006]. Влияние ионосферы на технические системы проявляется по-разному. Например, время функционирования спутников на орбите зависит от гелиоактивности. В геодезии, в автоматиче-

ских системах слежения и управления [Соловьев, 2000] требуется точность порядка одного метра, которую могут обеспечить высокоточные системы позиционирования GPS, ГЛОНАСС и др. [Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins, 2001; Яценков, 2005]. Ошибки измерения дальности в таких системах могут достигать нескольких десятков метров [Kintner, Ledvina, 2005] из-за флуктуаций плотности электронов в ионосфере. Ошибки обусловлены применяемой методикой определения дальности на основе фазовых измерений, чувствительной даже к незначительным изменениям показателя преломления.



Рисунок 1 — Мировая сеть радаров некогерентного рассеяния

Постоянное совершенствование методов обработки данных и технического оснащения является неотъемлемой задачей на всех измерительных комплексах радаров некогерентного рассеяния [Rottger, 1989]. Разработка новых алгоритмов обработки данных [Holt et al., 1992; Lehtinen et al., 1996; Vierinen et al., 2007],

получаемых на установках НР, является комплексной задачей. Для её решения необходимо учитывать не только особенности радиолокационной системы и требования к измерениям исследуемой среды, но и современные достижения в смежных дисциплинах [Hargreaves, 1992; Schunk, Nagy, 2009; Kelley, Heelis, 2009]. Результатом является расширение диагностических возможностей РНР и уменьшение неоднозначности интерпретации результатов наблюдений. Все это способствует получению новых сведений о процессах в ионосфере.

Иркутский радар некогерентного рассеяния представляет собой моностатическую импульсную радиолокационную станцию. Рабочая частота радара является оптимальной для метода измерения параметров плазмы, основанного на наблюдении замираний мощности сигнала, вызванных эффектом Фарадея (далее в работе мы называем эти вариации мощности сигнала «фарадеевскими замираниями»). С одной стороны, это позволяет восстанавливать абсолютные значения электронной концентрации N_e без сторонних источников калибровки (например, ионозонда), с другой — значительно усложняет процедуры обработки данных [Ткачев, 1972; Григоренко, 1979].

В ИСЗФ СО РАН Борисом Геннадьевичем Шпыневым был разработан метод расчета профиля N_e по измеренному профилю мощности сигнала некогерентного рассеяния [Шпынев, 2000]. Радиолокационное уравнение, лежащее в основе метода, подробно обсуждается в главе 1 настоящей диссертации. В методе [Шпынев, 2000] последовательно решаются три основных задачи: 1) устранение влияния зондирующего сигнала методом обращения свертки; 2) расчет высотного профиля фазы фарадеевского вращения интегрированием профиля мощности после устранения влияния зондирующего сигнала; 3) расчет высотного профиля электронной концентрации методом дифференцирования фазы фарадеевского вращения.

Преимущество метода [Шпынев, 2000] состоит в возможности определения произвольного высотного хода N_e . Однако как метод обращения свертки, так и дифференциальный метод определения N_e чувствительны к уровню шума, что приводит к неустойчивости метода [Шпынев, 2000], требует интерактивного

определения минимумов фарадеевских замираний и ведет к невозможности полной автоматизации алгоритма.

В настоящей диссертационной работе предлагается метод устойчивого определения профиля электронной концентрации N_e по измеренному профилю замираний мощности сигнала некогерентного рассеяния, вызванных эффектом Фарадея, позволяющий реализовать полностью автоматизированный алгоритм расчета N_e . В основе метода лежит использование специальных зондирующих сигналов и восстановление высотного профиля электронной концентрации на основе мало-параметрической модели фарадеевских замираний.

Целью работы является совершенствование методик исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния на радарх, измеряющих профиль мощности сигнала, модулированный квазипериодическими замираниями вследствие эффекта Фарадея. Для достижения поставленной цели **решаются следующие основные задачи:**

1. Разработка метода определения характеристик зондирующего сигнала, обеспечивающих наилучшую точность восстановления профиля мощности фарадеевских замираний, в зависимости от текущего состояния ионосферы и входного уровня шума.
2. Разработка комплекса алгоритмов восстановления высотного профиля электронной концентрации, работающего в автоматическом режиме в реальном масштабе времени.
3. Апробация разработанного комплекса алгоритмов на длинных рядах данных Иркутского радара некогерентного рассеяния.

Новизна результатов

1. Впервые разработана методика подбора параметров специальных сложных сигналов (длительность, ширина спектра), обеспечивающих оптимальное соотношение между разрешающей способностью и отношением сигнал/шум для Иркутского радара некогерентного рассеяния.

2. Впервые разработан работающий в автоматическом режиме в масштабе реального времени программный комплекс, реализующий устойчивый метод восстановления высотных профилей электронной концентрации (в том числе при малых ее значениях) по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния.
3. Впервые проведена автоматическая обработка всего набора данных Иркутского радара некогерентного рассеяния и осуществлено морфологическое исследование поведения электронной концентрации над Восточной Сибирью, в том числе во внешней ионосфере, в различных гелиогеофизических условиях.

Научная и практическая ценность работы. Создан программный комплекс, включающий полностью автоматический алгоритм обработки данных и методику определения параметров сложных сигналов, позволяющие одновременно уменьшить неопределенность восстановления профиля электронной концентрации и повысить разрешающую способность по высоте. Использование созданного программного комплекса при обработке данных регулярных наблюдений расширило диагностические возможности Иркутского радара некогерентного рассеяния и дало возможность решить ряд научных задач различным группам исследователей. Новый алгоритм позволил впервые получить большой набор высотновременных профилей электронной концентрации для Восточно-Сибирского региона, обработав в автоматическом режиме данные измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния начиная с 2007 г. На основе полученных данных проведено исследование морфологических особенностей поведения электронной концентрации над Восточной Сибирью, в том числе выше максимума F2-слоя. Результаты исследования могут применяться для построения и апробации ионосферных моделей. Длинные ряды данных по электронной концентрации, полученные с помощью нового алгоритма, использовались научными группами для решения таких задач, как исследование параметров перемещающихся ионосфер-

ных возмущений (включая полный вектор фазовой скорости), исследование поведения нейтрального ветра и ряда других исследований.

Личный вклад автора. Методика определения параметров сложных сигналов, обеспечивающих оптимальное соотношение между разрешающей способностью и отношением сигнал/шум, создана при определяющем участии автора.

Программный комплекс вторичной обработки сигналов некогерентного рассеяния и получения пространственно-временного хода электронной концентрации создан непосредственно автором.

Исследование характерных особенностей поведения электронной концентрации над Восточной Сибирью проведено при определяющем участии автора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан метод восстановления высотного профиля электронной концентрации на основе параметризации обусловленных эффектом Фарадея замираний мощности сигнала некогерентного рассеяния, позволяющий в автоматическом режиме обрабатывать длинные ряды наблюдений.
2. Получены суточно-сезонные зависимости электронной концентрации внешней ионосферы Восточно-Сибирского региона при разных уровнях солнечной активности на основе длинных рядов данных Иркутского радара некогерентного рассеяния.

Достоверность результатов. Представленные в работе результаты получены с использованием физически обоснованных методов и подтверждены статистическим анализом большого объема данных наблюдений. Результаты согласуются с результатами работ отечественных и зарубежных исследователей, что подтверждает их достоверность. Вынесенные на защиту положения обсуждались и докладывались на конференциях и научных семинарах и опубликованы в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на семинаре отдела физики околоземного космического пространства ИСЗФ СО РАН и докладывались на следующих научных конференциях: Молодежной Байкальской научной школе по фундаментальной физике (БШФФ) в 2009, 2011, 2013 гг.; International School-Conference “Remote Radio Sounding of the Ionosphere“ (ION-2011, Харьков; ION-2013, Крым) в 2011 и 2013 гг.; 11-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва) в 2015 г., где работа заняла 1-е место в конкурсе работ молодых ученых.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК или в международные реферативные базы Scopus и Web of Science; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ.

Публикации по теме диссертации:

1. **Alsatkin, S.S.** Features of N_e recovery at the Irkutsk Incoherent Scatter Radar / **S.S. Alsatkin**, A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky // Solar-Terrestrial Physics. — 2020. — Vol. 6, iss. 1. — P. 77–88. — doi: 10.12737/stp-61202009.
2. **Алсаткин, С.С.** Особенности поведения ионосферы вблизи максимума ионизации по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния для низкой и умеренной солнечной активности / **С.С. Алсаткин**, А.В. Медведев, К.Г. Ратовский // Солнечно-земная физика. — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 28–36. — doi: 10.12737/11450.
3. **Alsatkin, S.S.** Analyzing the characteristics of phase-shift keyed signals applied to the measurement of an electron concentration profile using the radio-physical model of the ionosphere / **S.S. Alsatkin**, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev // Geomagnetism and Aeronomy. — 2009. — Vol. 49, no. 7 (Special issue 1). — P. 1022–1027.

4. Medvedev, A.V. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere / A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky, M.V. Tolstikov, A.V. Oinats, **S.S. Alsatkin**, G.A. Zherebtsov // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122, no. 7. — P. 7567–7580. — doi: 10.1002/2017JA024103.
5. Ratovsky, K.G. Comparative study of COSMIC/FORMOSAT-3, Irkutsk Incoherent Scatter Radar, Irkutsk Digisonde and IRI model electron density vertical profiles / K.G. Ratovsky, A.V. Dmitriev, A.V. Suvorova, A.A. Scherbakov, **S.S. Alsatkin**, A.V. Oinats // *Advances in Space Research*. — 2017. — Vol. 60. — P. 452–460. — doi: 10.1016/j.asr.2016.12.026.
6. Zherebtsov, G.A. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions / G.A. Zherebtsov, K.G. Ratovsky, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, A.V. Medvedev, **S.S. Alsatkin**, A.V. Oinats, R.Yu. Lukianova // *Advances in Space Research*. — 2017. — Vol. 60. — P. 444–451. — doi: 10.1016/j.asr.2016.12.008.
7. Medvedev, A.V. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data / A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky, M.V. Tolstikov, **S.S. Alsatkin**, A.A. Scherbakov // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2015. — Vol. 132. — P. 13–21. — doi: 10.1016/j.jastp.2015.06.012.
8. Shcherbakov, A.A. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk incoherent scatter radar / A.A. Shcherbakov, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev, M.V. Tolstikov, **S.S. Alsatkin** // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2015. — Vol. 120. — P. 10,851–10,863. — doi: 10.1002/2015JA021678.
9. Medvedev, A.V. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data / A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky, M.V. Tolstikov, **S.S. Alsat-**

kin, A.A. Scherbakov//Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2013. — Vol. 105-106. — P. 350–357. — doi:10.1016/j.jastp.2013.09.001.

Программа ЭВМ:

Алсаткин, С.С. Автоматизированное определение профиля электронной концентрации по данным, полученным методом некогерентного рассеяния, радаром с антенной линейной поляризации» / С.С. Алсаткин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681957. Дата регистрации: 17.11.2022. Правообладатель: Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук. — 2020.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, списка основных сокращений, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 97 страниц. Диссертация включает 40 рисунков и 4 таблицы. Список литературы состоит из 113 источников.

Краткое содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, отражена актуальность ее темы, сделан краткий обзор литературы по затронутым в работе вопросам, сформулированы цели диссертации и решаемые в ней задачи, приведено краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена использованию специальных зондирующих сигналов в задаче определения профиля электронной концентрации по измеренному

профилю фарадеевских замираний мощности сигнала некогерентного рассеяния. Приводятся необходимые сведения о свойствах сложных сигналов и способах их обработки. Основное внимание уделено методике определения оптимальных параметров (длительности и ширины спектра) сложных зондирующих сигналов, обеспечивающих одновременно наилучшие показатели соотношения сигнал/шум и разрешающей способности и тем самым уменьшающих неопределенность восстанавливаемого высотного профиля электронной концентрации.

Вторая глава посвящена описанию восстановления высотного профиля электронной концентрации на основе малопараметрической модели фарадеевских замираний. Приводятся структура метода, основные априорные данные, необходимые для автоматизации вычисления, описывается методика учета магнитного поля и методы, позволяющие значительно уменьшить время обработки данных.

Третья глава посвящена описанию результатов исследования морфологических особенностей поведения электронной концентрации, усредненной по периодам длительных непрерывных измерений с 2007 по 2014 г. Периоды включают в себя четыре сезона для условий низкой и умеренной солнечной активности. Представлены результаты сравнения с данными Иркутского ионозонда DPS-4, Глобальной самосогласованной моделью термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП), разработанной в ЗО ИЗМИРАН, и Международной справочной моделью International Reference Ionosphere (IRI) 2012.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, и описаны перспективы дальнейших исследований с использованием изложенных в диссертации результатов.

Глава 1. Выбор сложных зондирующих сигналов для измерения высотного профиля мощности рассеянной ионосферной плазмой радиоволны на Иркутском радаре некогерентного рассеяния

В данной главе рассматриваются вопросы использования сложных зондирующих сигналов на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР). Описывается методика определения параметров (длительность и ширина полосы) сложных сигналов, обеспечивающих оптимальное соотношение между отношением сигнал/шум и разрешающей способностью при измерении высотного профиля мощности, модулированного фарадеевскими замираниями.

1.1. Характеристики и особенности антенной системы Иркутского радара некогерентного рассеяния

ИРНР является моностатической импульсной радиолокационной станцией с изменяемой несущей частотой в пределах 154–162 МГц, благодаря чему производится сканирование в диапазоне $\pm 30^\circ$ в направлении север–юг. Импульсная мощность радара 2.5–3.2 МВт.

Вид антенной системы ИРНР представлен на рисунке 1.1. Антенна состоит из двух рупоров, разделенных перегородкой. Каждый рупор состоит из замедляющих структур с щелевыми излучателями. Размеры антенны — 246×12 м. Межимпульсная частота составляет 24.4 Гц. Ширина диаграммы направленности — 0.5° . Благодаря конструкции антенны можно осуществлять наблюдения каждым полурупором независимо.

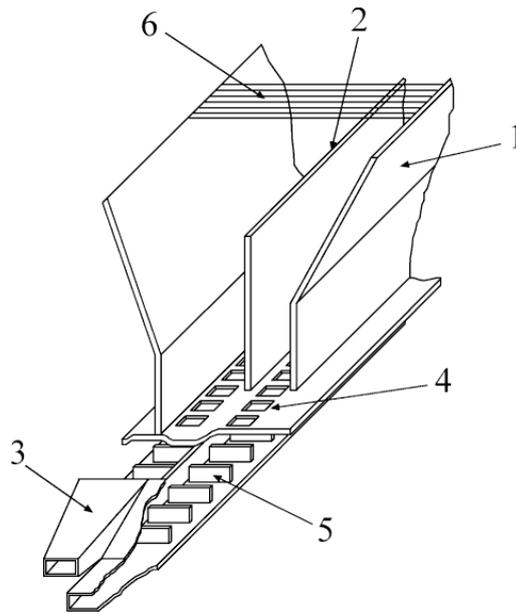


Рисунок 1.1 — Антенна ИРНР: 1 — рупор; 2 — перегородка, разделяющая два рупора; 3 — переход возбуждающего рупора; 4 — щелевые излучатели; 5 — замедляющая структура; 6 — поляризационный фильтр

Во введении упоминалось, что рабочая частота радара является оптимальной для измерения параметров плазмы ионосферы по наблюдаемым замираниям мощности, вызванным эффектом Фарадея. Возможность наблюдать на радиолокационной развертке фарадеевские замирания мощности обусловлена техническими характеристиками радара, а именно способностью излучать и принимать радиоволны со строго линейной поляризацией из-за наличия поляризационного фильтра в антенне радара. Известно, что линейно-поляризованную волну, распространяющуюся в магнитоактивной плазме, можно рассматривать как суперпозицию двух волн с круговой поляризацией, имеющих разные фазовые скорости, из-за чего плоскость поляризации суммарного сигнала испытывает вращение (эффект Фарадея) [Гинзбург, 1967]. На большинстве радаров НР данный эффект стараются нивелировать, используя антенны с круговой поляризацией.

На рисунке 1.2 изображены векторы электрического поля отдельно для обыкновенной волны (левые панели), необыкновенной волны (средние панели) и суммарный вектор электрического поля линейно поляризованной волны (правые панели), определяющий ориентацию линейной поляризации. Верхние панели соответ-

ствуют случаю направления вектора магнитного поля \vec{B} к наблюдателю (совпадает с направлением волнового вектора \vec{k}), нижние панели соответствуют случаю направления вектора магнитного поля \vec{B} от наблюдателя (направление противоположно волновому вектору \vec{k}).

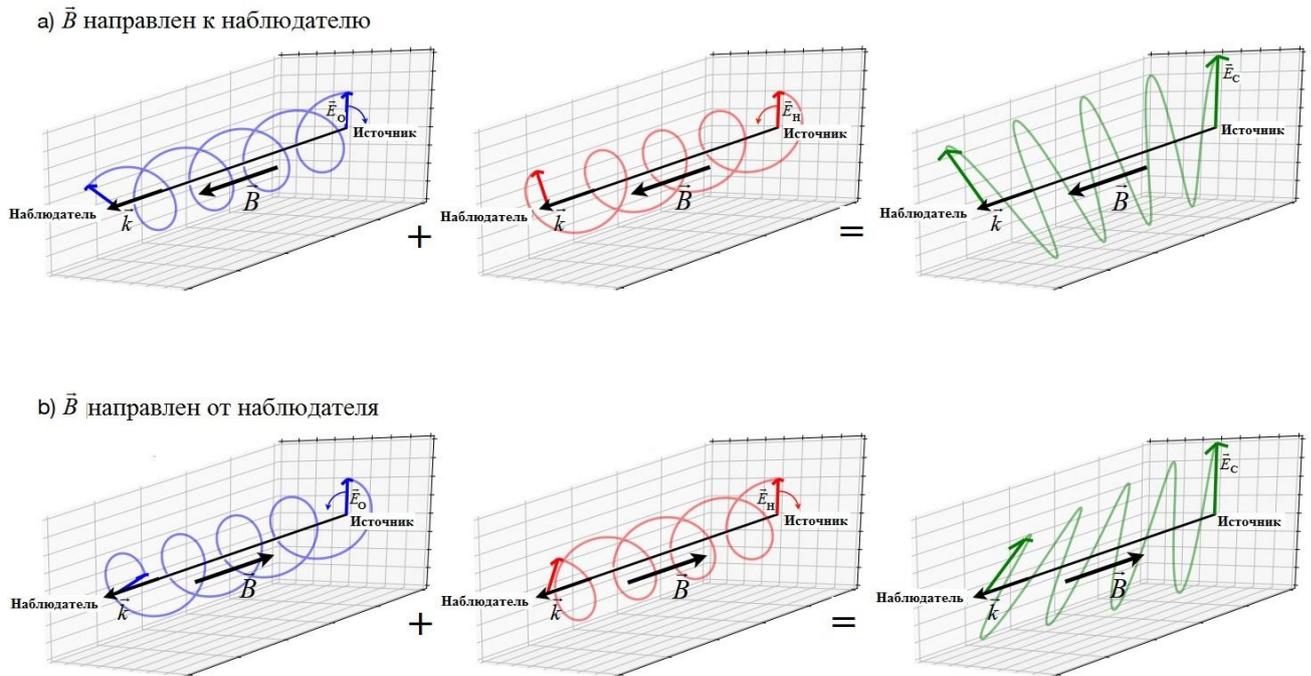


Рисунок 1.2 — Векторы электрического поля для обыкновенной (левая панель) и необыкновенной (правая панель) волн и суммарный вектор электрического поля линейно поляризованной волны (правая панель), определяющий ориентацию линейной поляризации. Верхние панели соответствуют направлению вектора магнитного поля \vec{B} к наблюдателю (совпадает с направлением волнового вектора \vec{k}), нижние панели соответствуют направлению вектора магнитного поля \vec{B} от наблюдателя (направление противоположно волновому вектору \vec{k})

Угол вращения вектора электрического поля для линейно-поляризованной волны определяется разностью фаз обыкновенной и необыкновенной волн, которая в высокочастотном квазипродольном приближении имеет следующий вид [Evans, 1969; Бернгардт, 2000; Shpynev, 2004]:

$$\Delta\psi = \int_0^s \Delta k d\acute{s} = \frac{e^3}{2\varepsilon_0 m_e^2 \omega_0^2 c} \int_0^{r_0} N_e(z) B(z) \cos\alpha dz,$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная; ω_0 — частота несущей волны зондирующего сигнала; m_e , e — масса и заряд электрона; c — скорость света; $B(z)$ — зависимость магнитного поля Земли от высоты; r_0 — радиус-вектор области наблюдения; α — угол между направлением z и силовыми линиями магнитного поля Земли $B(z)$.

На рисунке 1.3 изображен поворот вектора электрического поля на угол $\Delta\psi$: вверху — состояние в момент времени $t=0$, что соответствует $\Delta\psi = 0$, внизу — в момент времени $t>0$.

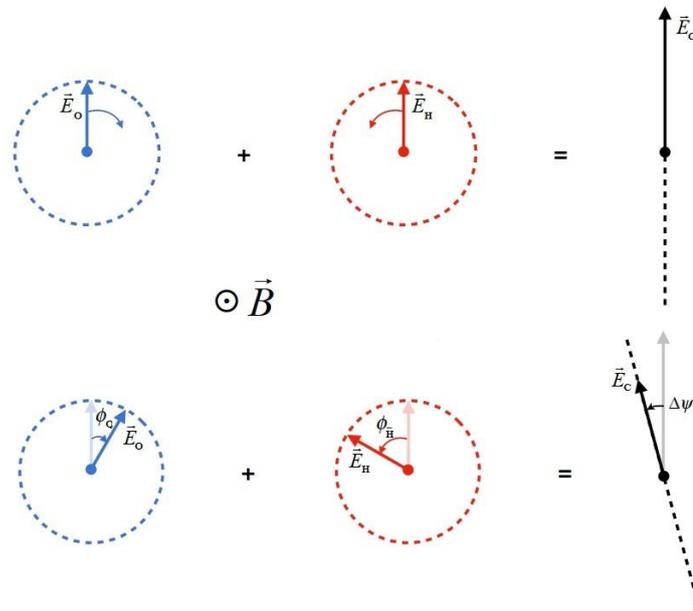


Рисунок 1.3 — Вращение вектора электрического поля в двумерной плоскости

Согласно рисункам 1.2 и 1.3, когда вектор электрического поля параллелен вектору поляризации антенны, на выходе наблюдается максимальная амплитуда принятого сигнала. По мере увеличения $\Delta\psi$ уменьшается амплитуда на выходе антенны. Когда плоскости поляризации сигнала и радара перпендикулярны, на развертке измеряемой мощности сигнала наблюдаются замирания — уменьшения амплитуды до нуля на выходе антенны. Благодаря возможности измерять фарадеевские замирания на ИРНР, удастся восстанавливать абсолютные значения N_e без сторонних источников калибровки (например, без ионозонда).

Получить профиль N_e в методе некогерентного рассеяния можно тремя способами. Первый и наиболее простой состоит в измерении полной мощности, что возможно на радарх, имеющих круговую поляризацию приемной антенны. В этом случае принятая мощность пропорциональна N_e :

$$P(r) = C \frac{N_e(r)}{r^2(1+T_e(r)/T_r(r))},$$

где C — нормировочная постоянная. Для получения абсолютных значений необходима калибровка, как правило, она осуществляется по данным расположенного рядом ионозонда.

Второй способ состоит в измерении плазменной линии [Akbari et al., 2017]. Спектр плазменной линии представлен на рисунке 1.4 вместе с полным теоретическим спектром некогерентного рассеяния.

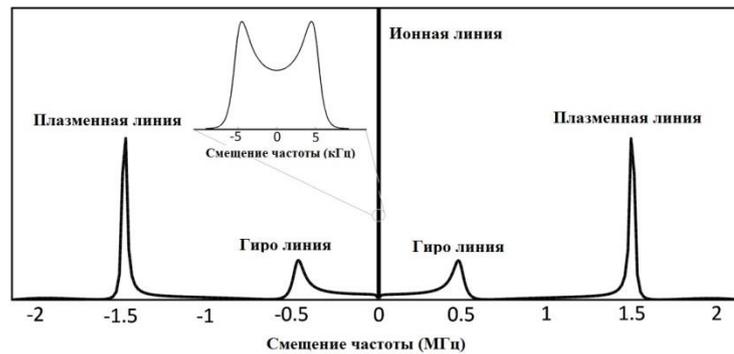


Рисунок 1.4 — Теоретический спектр некогерентного рассеяния

Измеренная резонансная частота $f_{рез}$ пропорциональна в первом приближении плазменной частоте:

$$f_{рез} \approx f_p = \sqrt{\frac{e^2}{\pi m_e} N_e}.$$

Определив высотный ход значений резонансных частот, можно однозначно определить профиль абсолютных значения N_e .

Третий способ основывается на эффекте Фарадея. Применять его можно двояко. Один вариант описан выше и используется на ИРНР — это измерения профиля фарадеевских замираний. Второй вариант заключается в одновременном излучении

двух электромагнитных волн — левополяризованной и правополяризованной. За счет того что данные электромагнитные волны в ионосфере распространяются с разной скоростью, при синхронном раздельном приеме рассеянных сигналов можно непосредственно измерять значения высотного хода $\Delta\psi$, а значит, и абсолютные значения N_e .

1.1.1. Восстановление профиля электронной концентрации по наблюдаемым замираниям мощности, вызванным эффектом Фарадея

Радиолокационное уравнение (РУ), описывающее вызванные эффектом Фарадея замирания мощности, для случая согласованной обработки рассеянного сигнала имеет следующий вид [Шпынев, 2000; Nygren, 1996]:

$$P_{\text{изм}}(t) = C \int \frac{dr}{r^2} \cos^2(\Omega(r)) \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{\rho(\tau, r)}_2 \underbrace{F_{t_r}(t, \tau)}_1 d\tau + \underbrace{\sigma_{\text{шум}}(t)}_3. \quad (1.1)$$

Здесь $\Omega(r)$ — угол поворота плоскости поляризации; $\rho(\tau, r)$ — профиль корреляционной функции плотности тепловых флуктуаций как функция временного сдвига τ и расстояния r ; $F_{t_r}(t, \tau)$ — двумерная функция неопределенности, зависящая от вида излучаемого сигнала:

$$F_{t_r}(t, \tau) = \int_{-T}^T W_t(v, t_r) W_t(v - \tau, t_r) dv, \quad (1.2)$$

$$W_t(v, t_r) = a(v - t_r) b(t - v),$$

где t_r — время распространения сигнала от источника излучения до отражающего слоя на расстоянии r и обратно к приемнику (для случая, когда источник и приемник совмещены); $b(t)$ — импульсная характеристика согласованного фильтра; $a(t)$ — огибающая сигнала, отраженного от слоя на расстоянии r ; T — длительность зондирующего сигнала. Уравнение (1.1) описывает поведение с высотой мощности принятого сигнала, модулированного фарадеевскими замираниями, и учитывает форму зондирующего сигнала и алгоритмы обработки принятого сигнала. Приведенное РУ дает возможность анализировать данные, полученные при

исследовании параметров ионосферной плазмы сложными зондирующими сигналами.

На этапе становления ИРНР в силу технических ограничений использовался радиолокационный сигнал с огибающей прямоугольной формы, без фазовой манипуляции. Поэтому РУ для наблюдаемой мощности сигнала с вариациями вследствие эффекта Фарадея впервые было получено Борисом Геннадьевичем Шпыневым именно для радиолокационного сигнала с огибающей прямоугольной формы. РУ имеет следующий вид [Шпынев, 2000]:

$$P(\tau) = C \int \frac{N_e(r) \cos^2(\Omega(r))}{(1 + T_e(r)/T_i(r))r^2} \left| a\left(\tau - \frac{2r}{c}\right) \right|^2 dr + Q(\tau),$$

где $a(\tau)$ — огибающая зондирующего импульса; $Q(\tau)$ — шумы.

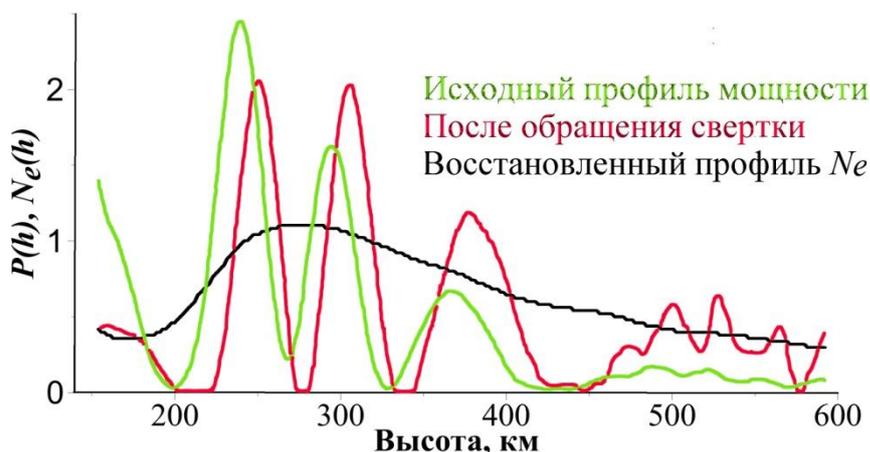
Для восстановления профиля N_e был создан дифференциальный алгоритм, основой которого является полученное РУ. В алгоритме последовательно решаются следующие задачи: 1) устранение влияния зондирующего сигнала; 2) восстановление профиля фазы вращения плоскости поляризации электромагнитной волны, обусловленного эффектом Фарадея; 3) восстановление профиля N_e .

1. Устранение влияния зондирующего сигнала $a(\tau - 2r/c)$ [Voronov, Shpynev, 1998]:

$$P(r) = A \frac{N_e(r) \cos^2(\Omega(r))}{(1 + T_e(r)/T_i(r))r^2} + Q(r).$$

Влияние конечной длительности зондирующего сигнала — как правило, она составляет 200 мкс (разрешение по дальности 30 км) — на измеряемый профиль фарадеевских замираний заключается в уширении наблюдаемых минимумов и подъеме их выше уровня шума, что хорошо видно на рисунке 1.5.

Влияние конечной длительности зондирующего сигнала устраняется применением алгоритма обращения свертки. Данный алгоритм имеет существенную неустойчивость в шумах и требует применения регуляризирующих мер [Тихонов, Арсенин, 1974].

Рисунок 1.5— Процесс восстановления профиля $N_e(r)$

2. После устранения влияния зондирующего сигнала решается задача относительно фазы фарадеевского вращения:

$$\frac{1}{A} \int_0^r P(r) r^2 (1 + T_e(r)/T_i(r)) dr = \Omega(r) + \frac{\sin(2\Omega(r))}{2}.$$

3. Дифференцированием высотного хода рассчитанной фазы восстанавливается профиль N_e :

$$N_e(r) = \frac{1}{\gamma} \frac{d\Omega(r)}{dr}, \text{ где } \gamma = \frac{e^3 B_0 \cos \alpha}{2 \varepsilon_0 m_e^2 \omega_0^2 c}.$$

Разработанный Б.Г. Шпыневым алгоритм из-за применения как метода обращения свертки, так и дифференциального метода определения N_e , имеющих значительную чувствительность к уровню шума, является неустойчивым и требует интерактивного определения минимумов фарадеевских замираний, что ведет к значительным искажениям восстанавливаемых значений N_e и к невозможности полной автоматизации алгоритма.

Далее описываются методы устранения неустойчивости определения профиля N_e по измеренному профилю фарадеевских замираний мощности сигнала некогерентного рассеяния и реализованный на их основе полностью автоматизированный алгоритм расчета N_e .

1.2. Особенности применения сложных сигналов в задаче исследования ионосферной плазмы

Существует несколько способов решить задачу уменьшения влияния конечной длительности импульса, тем самым повысив разрешающую способность. Способ первый — уменьшать (вплоть до дельта-импульса) длительность излучаемого сигнала, являющегося немодулированным прямоугольным импульсом. Данный способ приводит к значительному снижению отношения сигнал/шум и, как следствие, к увеличению неопределенности в вычисляемых значениях параметров ионосферной плазмы.

Второй способ заключается в применении сложных зондирующих сигналов в ионосферных измерениях. Их внедрение в практику ионосферных измерений продиктовано во многом попыткой соответствовать противоречащим друг другу требованиям, предъявляемым к современным измерениям [Alcaide, 1997]. Использование различных схем модуляции зондирующего сигнала является одним из способов обеспечить одновременно высокие показатели связанных между собой параметров: отношения сигнал/шум и пространственного разрешения, временного и спектрального разрешения, а также оптимизировать режимы работы радара. В случае временного разрешения подразумевается уменьшение статистического усреднения независимых реализаций принятого сигнала в интервале времени, в котором ионосфера считается стационарной [Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Nygren, 1996; Virtanen, 2009; Худсон, 1970]. Усреднение является необходимым, поскольку отношение сигнал/шум в единичном измерении может быть значительно меньше единицы, а накопление позволяет уменьшить дисперсию, повышая тем самым отношение сигнал/шум. Уменьшение неопределенности восстанавливаемых параметров ионосферы дает возможность исследовать ионосферные структуры размерами от единиц километров, сформированные волновыми процессами.

Использование на РНР сложных сигналов с последующей обработкой прошедшего рассеянного сигнала [Lehtinen, Haggstrom, 1987; Суни и др., 1989; Рогожкин, 1992; Nygren, 1996] стало возможным благодаря развитию вычислитель-

ной техники. Поскольку изначально сложные схемы модуляции и методы их обработки были разработаны в традиционной радиолокации, потребовалась их модификация под особенности метода НР. О высоком интересе к применению в методе НР различных видов модуляции зондирующего сигнала говорит большое количество опубликованных работ [Farley, 1969; Gray, Farley, 1973; Woodman, 1991]. В частности, была реализована корреляционная методика обработки данных, получаемых методом НР с использованием разработанных для этой методики специальных кодовых последовательностей [Woodman, Hagfors, 1969; Farley, 1969; Gray, Farley, 1973] и методов их обработки [Foster, Tetenbaum, 1991; Хэгфорс и др., 1992; Пуляев, 2006], что способствовало достижению высокой разрешающей способности во всем высотном диапазоне. В последнее время в схемах модуляции сигнала используются альтернативные коды [Nygren, Markkaken, 1997; Lehtinen, Dantie, Nygren, 2004; Lehtinen, Huuskonen, Thuillier, 1997].

Проведенный анализ существующих методик обработки сигналов и оценки параметров ионосферной плазмы [Farley, 1969; Gray, Farley, 1973; Woodman, 1991] показал, что внедрение сложных сигналов (модулированных) в ионосферные измерения имеет свои особенности. С помощью метода НР осуществляется диагностика распределенной по пространству рассеивающей среды, в то время как в задачах традиционной радиолокации анализируется сосредоточенный объект. Это приводит к изменению формы рассеянного сигнала, и информационную значимость имеют уже статистические свойства сигналов, рассеянных с различных высот. К тому же ионосферная плазма характеризуется конечным временем корреляции, что накладывает ограничения на длительность сложного сигнала [Gray, Farley, 1973]. В статье [Gray, Farley, 1973] исследовалось влияние процесса рассеивания на эффективность сжатия (степень искажения автокорреляционной функции сигнала) радиолокационных сигналов с фазовой модуляцией. Основное внимание уделено модуляции кодами Баркера. Выводы делались для радаров, имеющих круговую поляризацию сигнала. Проводилось аналитическое исследование для различных длительностей зондирующего импульса и соотношений между температурами электронов и ионов, но в отсутствие шумов. Согласно [Gray,

Farley, 1973], влияние процесса рассеивания на эффективность применения сигналов с фазовой манипуляцией будет минимально при условии, что длительность зондирующего импульса не превышает времени корреляции среды, на котором функция автокорреляции среды первый раз обращается в ноль. При этом было достигнуто разрешение 600 м. Лучшую функцию автокорреляции имеет 13-элементный код Баркера.

Опираясь на приведенные выше результаты, можно ожидать, что для случая, когда в профиле мощности наблюдаются фарадеевские замирания в отсутствие шумов, если рассматривать среди последовательностей Баркера, оптимальным также будет 13-элементный код. При наличии шумов оптимальная последовательность может быть различной. Для того чтобы определить наилучший код среди последовательностей Баркера, а также других известных последовательностей, обратимся к уравнению (1.1). Из него видны факторы, приводящие к неоднозначности измеряемых значений профиля мощности фарадеевских замираний:

1. Двумерная функция неопределенности сигнала $F_{tr}(t, \tau)$.
2. Время корреляции среды, т.к. от его значения зависит степень искажения автокорреляционной функции сигнала.
3. Отношение сигнал/шум $\sigma_{\text{шум}}(t)$ зависит от длительности зондирующего сигнала, его полосы и значений N_e . При отсутствии шума выбор смещается в сторону более широкополосных сигналов, чтобы обеспечить как можно более узкий главный лепесток. При наличии шума неопределенность измерений будет зависеть уже как от шума, так и от искажений, вызванных конечной длительностью сигнала.
4. От количества наблюдаемых фарадеевских минимумов в измеряемом профиле мощности. Чем их больше, тем более широкополосный сигнал требуется.

Существенное изменение времени корреляции среды и количества наблюдаемых фарадеевских минимумов в течение суток требует создания набора кодовых последовательностей, оптимальных для различных ионосферных условий.

При выборе параметров зондирующего сигнала (ЗС) (длительность и полоса) необходимо учитывать приведенные факторы.

Прежде чем перейти к способу определения параметров сложного зондирующего сигнала, способного обеспечить компромисс между четырьмя приведенными выше пунктами, рассмотрим свойства двумерной функции неопределенности на примере зондирующих сигналов с прямоугольной огибающей и с фазовой манипуляцией несущей с помощью кодов Баркера.

1.2.1. Сложные сигналы

Изначально сложные сигналы начали применять в радиолокации для решения таких ключевых задач, как выделение сигнала из помех, увеличение дальности обнаружения цели, улучшение разрешения по дальности при ограниченной мощности передатчиков. Таким образом, был сделан шаг на пути нахождения компромисса между желанием получить, с одной стороны, хорошее разрешение по дальности (требующее как можно меньшей длительности сигнала в случае прямоугольной огибающей), а с другой — максимально возможную дальность обнаружения (т.е. создание сигнала с максимальной энергией за счет увеличения длительности импульса).

Выбор критерия оптимальности фильтра сигналу с заданными характеристиками зависит от конкретной решаемой задачи. Наиболее часто используются следующие критерии: максимума апостериорной вероятности, максимума отношения сигнал/шум, максимума правдоподобия. В радиолокации в первую очередь речь идет об обнаружении сигнала в шумах с известными статистическими характеристиками, поэтому наибольшее распространение получил критерий максимума отношения сигнал/шум, т. е. на выходе фильтра должно быть обеспечено максимальное отношение пикового значения сигнала к среднеквадратичному значению шума. Фильтр, синтезированный исходя из данного критерия (так называемый согласованный фильтр), относится к классу линейных систем с импульсным откликом вида

$$h_{c.\phi} = s_{\text{вх}}(t_{\text{и}} - t),$$

где $s_{\text{вх}}(t)$ — входной сигнал, а $t_{\text{и}}$ — его длительность. Согласно теории, невозможно создать единственный оптимальный фильтр, обрабатывающий любые детерминированные сигналы наилучшим образом, поскольку импульсный отклик оптимального фильтра представляет собой обращенный во времени входной сигнал. Максимально возможное отношение сигнал/шум на выходе фильтра достигается в момент времени $t_{\text{и}}$ и равно

$$q_{\text{вых max}} = \frac{E}{N_0},$$

где E — энергия сигнала, N_0 — энергетический спектр шума, имеющий постоянное значение во всем частотном диапазоне. Очевидно, что отношение сигнал/шум не зависит от формы излучаемого сигнала, а зависит только от его энергии E (здесь и далее предполагается, что шум белый). Форма сигнала в зависимости от времени на выходе согласованного фильтра определяется выражением

$$s_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^t s_{\text{вх}}(t - \tau) s_{\text{вх}}(t_{\text{и}} - \tau) d\tau = U(t - t_{\text{и}}), \quad (1.3)$$

из чего можно заключить, что сигнал на выходе равен автокорреляционной функции (АКФ) $U(t - t_{\text{и}})$ излученного сигнала и имеет запаздывание на величину, равную $t_{\text{и}}$. Стоит отметить, что АКФ достигает максимального значения, равного энергии сигнала, в момент времени $t = t_{\text{и}}$. Поведение сигнала на выходе согласованного фильтра при различных видах модуляции будет описано ниже.

Рассмотрим поведение отношения сигнал/шум на выходе фильтра. Выразим энергию сигнала через его мощность P_c и длительность T_c , аналогично выразим энергетический спектр шума через его мощность $P_{\text{ш}}$ и ширину полосы частот ΔF и запишем последнее выражение в виде

$$q_{\text{вых max}} = \frac{E}{N_0} = \frac{P_c T_c}{P_{\text{ш}} / \Delta F} = T_c \Delta F \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} = B q_{\text{вх}},$$

где $q_{\text{вх}} = P_c / P_{\text{ш}}$ характеризует отношение сигнал/шум по мощности на входе фильтра, приведенное к полосе фильтра, а $B = T_c \Delta F$ называется базой сигнала. Данное выражение показывает, что отношение сигнал/шум на выходе согласованного

фильтра в момент времени, равный T_c , будет в B раз больше отношения сигнал/шум на его входе.

В случае если $\Delta F = \text{const}$ и $P_c = \text{const}$, отношение сигнал/шум на выходе фильтра при увеличении длительности сигнала T_c растет, а при уменьшении T_c падает. В случае когда $T_c = \text{const}$ и $P_c = \text{const}$, при изменении ΔF отношение сигнал/шум остается постоянным, т.к. изменяется $P_{\text{ш}} = \Delta F N_0$. Т.е. увеличение или уменьшение ΔF равносильно соответствующему увеличению или уменьшению мощности шума на входе фильтра. Данные случаи необходимо учитывать при выборе параметров сигнала, чтобы добиться требуемого баланса между максимальной дальностью, разрешающей способностью и отношением сигнал/шум. Стремление обеспечить такой баланс приводит к использованию и разработке разнообразных видов сигналов.

Чтобы различить объекты в пространстве, используют функцию неопределенности (ФН), которая позволяет судить о разрешающей способности простых и сложных (узкополосных сигналов) как по дальности, так и по скорости:

$$\chi(\tau, \Delta f) = \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t) e^{-i2\pi\Delta f t} dt,$$

где E — энергия сигнала; Δf — доплеровское смещение частоты; «*» означает комплексное сопряжение. Чаще всего под ФН понимается модуль $|\chi(\tau, \Delta f)|$. Форма ФН определяет пределы областей изменения значений τ и Δf , внутри которых сигналы неразличимы.

Формально принято разделять сигналы на две группы: простые и сложные. К первой группе относится радиоимпульс с прямоугольной огибающей. Для данных типов сигналов база (произведение длительности на ширину полосы) равна единице. Сигналы, имеющие внутриимпульсную модуляцию, относятся ко второй группе, база у них больше единицы (в большинстве случаев — много больше единицы).

Увеличение базы сложных сигналов достигается благодаря следующим основным видам модуляции либо их комбинациям:

- 1) частотная модуляция (ЧМ);

- 2) фазовая манипуляция (ФМ);
- 3) амплитудная манипуляция (импульсно-кодовая модуляция).

Каждый из видов модуляции либо каждая их комбинация придает различные свойства как сигналу в спектральной области (ширина и вид спектра), так и его корреляционной функции (ширина основного лепестка, количество и интенсивность боковых лепестков). На практике для получения большой базы сигнала наибольшее распространение получили такие виды модуляции, как линейная частотная модуляция (ЛЧМ-сигналы) и фазовая манипуляция.

Вначале рассмотрим свойства высокочастотного сигнала с огибающей прямоугольной формы, описываемого следующим математическим выражением:

$$s(t) = \begin{cases} U & \text{при } t \geq 0 \text{ и } t \leq t_{\text{и}} \\ 0 & \text{при } t < 0 \text{ и } t > t_{\text{и}} \end{cases}$$

Воспользовавшись уравнением 1.3, запишем выражение, описывающее форму сигнала на выходе согласованного фильтра:

$$s_{\text{вых}}(t) = U^2 t_{\text{и}} \left(1 - \frac{|t|}{t_{\text{и}}} \right).$$

ФН имеет форму треугольника с максимальным значением $U^2 t_{\text{и}}$ в вершине. Основание треугольника составляет $2t_{\text{и}}$. На рисунке 1.6 изображены: слева — радиосигнал с огибающей прямоугольной формы, справа — форма сигнала на выходе согласованного фильтра после устранения несущей частоты.

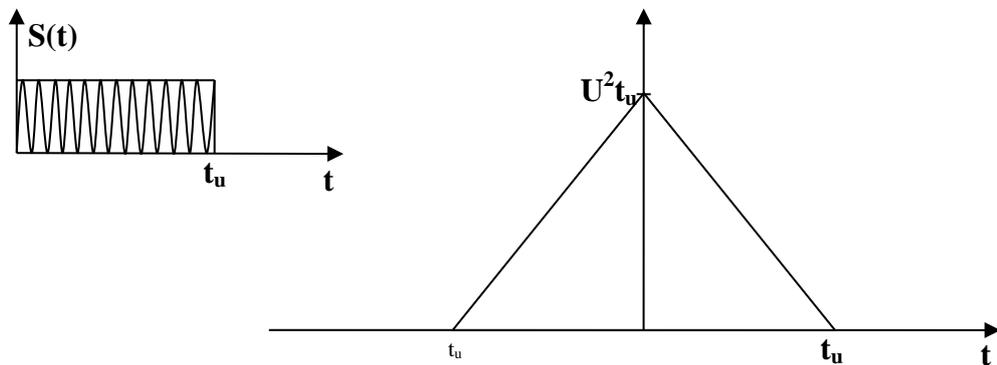


Рисунок 1.6 — Радиосигнал с огибающей прямоугольной формы (слева) и форма сигнала на выходе согласованного фильтра (справа)

Разрешающая способность сигнала равна его длительности, этой же величине равна ширина автокорреляционной функции на уровне $\frac{1}{2}$ от максимума ширины, т.е. от основания треугольника.

Рассмотрим для сравнения фазоманипулированные сигналы (ФМС). Их можно представить как непрерывную последовательность радиоимпульсов равной амплитуды и длительности, начальная фаза каждого из которых меняется скачкообразно по ранее установленному закону. Сегодня существует большое количество разновидностей ФМС. Каждая разновидность имеет свои законы изменения фазы, в частности, фаза может изменяться случайным образом от одного радиоимпульса к другому. Выбор разновидности ФМС определяется желаемой разрешающей способностью, допустимым уровнем боковых лепестков АКФ и простотой реализации на формирующих и обрабатывающих устройствах.

Рассмотрим сигнал длительностью T , заполненный высокочастотным колебанием частотой ω_0 с начальной фазой φ_0 . Зависимость фазы такого сигнала от времени имеет вид $\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_0 t$. Пусть в фиксированные моменты времени фаза изменяется на 180° (π). В общем виде сигнал, фаза которого изменяется в определенные моменты времени на 180° , математически можно описать следующим выражением:

$$U(t) = \sum_i^N U_0(t - (i - 1)t_{\text{и}}) e^{i(\varphi_0 + \omega_0 t + d_i \pi)}, \quad (1.4)$$

где d_i принимает значения 0 или 1 (что соответствует изменению фазы высокочастотного колебания на 0° или на 180°); N — число элементов в коде (соответствующее числу элементарных импульсов (позиций) в сигнале); $U_0(t - (i - 1)t_{\text{и}})$ имеет следующую структуру:

$$U_0(t - (i - 1)t_{\text{и}}) = \begin{cases} U_0 & \text{при } (i - 2)t_{\text{и}} \leq t \leq (i - 1)t_{\text{и}}, \\ 0 & \text{при } t \leq (i - 2)t_{\text{и}} \text{ и } t \geq (i - 1)t_{\text{и}}. \end{cases}$$

Выделим в уравнении (1.4) комплексную огибающую сигнала и высокочастотную составляющую:

$$\begin{cases} U(t) = S(t)e^{i\omega_0 t}, \\ S(t) = \sum_i^N U_0(t - (i - 1)t_{\text{и}})e^{i(\varphi_0 + d_i\pi)}, \end{cases}$$

где $S(t)$ — комплексная огибающая сигнала $U(t)$.

На практике немалый интерес представляют законы, по которым изменяются начальные фазы ФМС, включающие два значения — 0 и π . Теория показала, что наилучшие коды для ФМС обеспечивают максимальное значение АКФ, равное $U^2 N t_{\text{и}}$, и минимальный уровень боковых лепестков, равный $1/N$ от максимального значения. Коды, отвечающие данным требованиям, получили название «коды Баркера». Они могут быть длиной 3, 4, 5, 7, 11 и 13 элементов. В таблице 1.1 приведены законы изменения фазы от одного являющегося частью сигнала простого радиоимпульса к другому для указанных длин кодов Баркера и соответствующие этим законам значения АКФ. Смена фазы происходит при смене «+» на «-» и обратно.

Таблица 1.1. Коды Баркера и значения их АКФ

Длина кода	Вид кода	АКФ
3	++-	3,0,-1
4	+++-	4,1,0,-1
	++-+	4,-1,0,1
5	+++++	5,0,1,0,1
7	++++--+-	7,0,-1,0,-1,0,-1
11	++++----+---+-	11,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1,0,-1
13	+++++---+++++-	13,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1

На рисунке 1.7 изображены радиосигнал $U(t)$ и его огибающая $S(t)$ при использовании 7-элементного кода Баркера, имеющего кодовую последовательность $d_i = \{0, 0, 0, 1, 1, 0, 1\}$, для простоты начальная фаза равна нулю ($\varphi_0 = 0$).

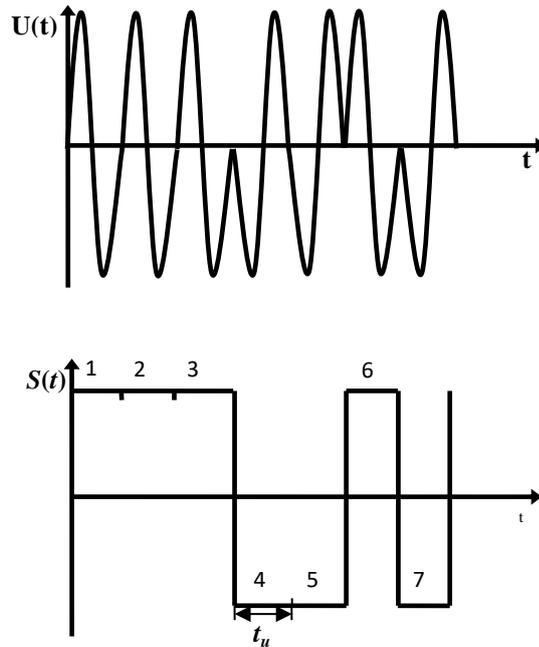


Рисунок 1.7 — Радиосигнал $U(t)$, модулированный 7-элементным кодом Баркера (верхняя панель), и его комплексная огибающая $S(t)$ (нижняя панель)

Аналитическое выражение для функции автокорреляции для сигнала $U(t)$ можно представить в виде

$$|B(rt_u + t_1)| = t_u \sum_{i=r+1}^N Q_i Q_{i-r} + t_1 (\sum_{i=r+2}^N Q_i Q_{i-r-1} - \sum_{i=r+1}^N Q_i Q_{i-r}). \quad (1.5)$$

В выражении (1.5) r — целое число импульсов длительностью t_u , на которое сдвинута копия принятого сигнала; t_1 — сдвиг внутри импульса, он всегда меньше t_u . Данные параметры изображены на рисунке 1.8.

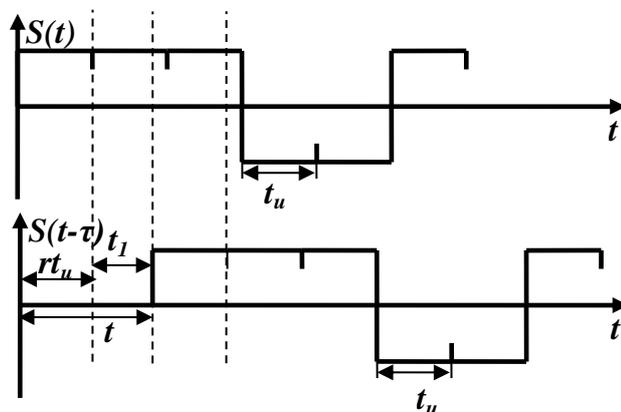


Рисунок 1.8 — Параметры, входящие в формулу, описывающую АКФ фазоманипулированного сигнала

Форма АКФ, соответствующей сигналу, фазоманипулированному 7-элементным кодом Баркера, представлена на рисунке 1.9.

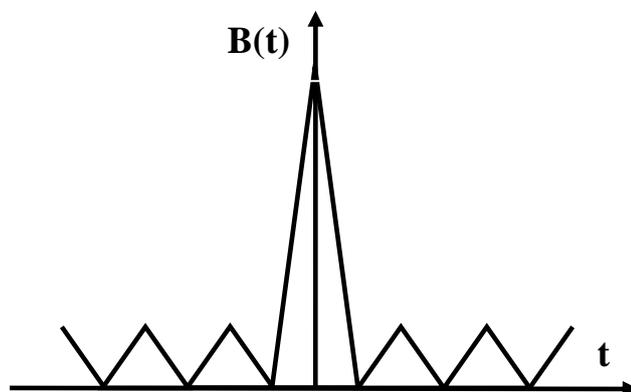


Рисунок 1.9 — АКФ сигнала, фазоманипулированного 7-элементным кодом Баркера

1.3. Специфика использования сложных сигналов в ионосферных измерениях

При обработке принятого сигнала, рассеянного ионосферной плазмой, необходимо учитывать два основных фактора, которые влияют на его форму: импульсный отклик приемника и модуляцию излучаемого сигнала. Учесть их можно с использованием двумерной функции неопределенности, имеющей вид

$$F_{t_r}(t, \tau) = \int_{-T}^T W_t(t_r, \nu) W_t(\nu - \tau, t_r) d\nu, \quad 1.6$$

где

$$W_t(t_r, \nu) = a(\nu - t_r) b(t - \nu) \quad 1.7$$

является одномерной функцией неопределенности по амплитуде. Двумерная функция $F_{t_r}(t, \tau)$ представляет собой автокорреляционную функцию.

Функция неопределенности по амплитуде $W_t(t_r, \tau)$ дает нам понять, как сигнал в момент времени t собирается из принятых в момент времени τ сигналов, рассеянных на элементарных объемах на расстоянии r . Она показывает, что сигнал на выходе фильтра является весовой суммой сигналов от всех элементов за-свечиваемого объема и времени, а сам вес в сумме определяется функцией не-

определенности по амплитуде. Данная функция вносит как добавочный пространственный вес, связанный с длительностью сигнала, так и временной вес, связанный с импульсной характеристикой фильтра.

Двумерная ФН $F_{t_r}(t, \tau)$ является основной при обработке данных, полученных методом НР. Согласно ей, измеренная функция автокорреляции для каждой задержки $t-t'$ представляет собой весовое усреднение функции автокорреляции плазмы в пространстве и во времени. Двумерная ФН учитывает и модуляцию излучаемого сигнала, и импульсную характеристику фильтра приемника. В случае моностатического радара модуляция определяет размер рассеивающего объема. В данном разделе приводятся общие свойства как одномерной, так и двумерной функции неопределенности.

Начнем с простейшего случая: форма огибающей излучаемого сигнала — прямоугольная. Согласно выражению (1.6), двумерная ФН $F_{t_r}(t, \tau)$ равна свертке сдвинутых по задержке функций неопределенности по амплитуде $W_t(t_r, \tau)$, поэтому рассмотрим сначала свойства функции $W_t(t_r, \tau)$. Согласно выражению (1.7), $W_t(t_r, \tau)$ есть произведение огибающей рассеянного сигнала на импульсный отклик фильтра приемного тракта. В рассматриваемом случае длительности сигнала и импульсной характеристики одинаковы (только если фильтр согласованный) и равны T . Тогда область изменения τ , в которой импульсный отклик отличается от нуля, ограничена снизу и сверху пределами $t-T$ и t соответственно. В то же время сигнал не равен нулю при изменении t_r в диапазоне $[\tau-T \dots \tau]$. Из этого следует, что при неизменной переменной τ по переменной t_r огибающая излученного сигнала будет иметь длительность T . При увеличении τ происходит смещение огибающей излученного сигнала вверх по оси t_r , при уменьшении, соответственно, вниз. Теперь, если в выражение $\tau-T$ вместо τ подставить нижний его предел $t-T$, а верхний предел t_r заменить на верхний предел τ , т.е. на t , получим, что изменение τ в диапазоне $[t-T \dots t]$ соответствует изменению t_r в интервале $[t-2T \dots t]$. На рисунке 1.10 показаны формы зондирующего сигнала, импульсной характеристики и области изменения $W_t(t_r, \tau)$ в координатах τ, t_r .

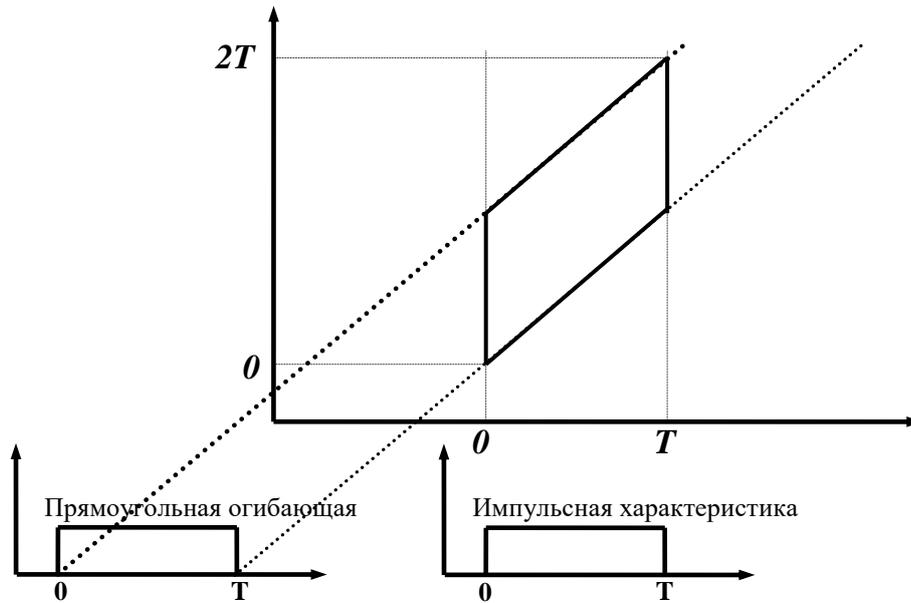


Рисунок 1.10 — Формы зондирующего сигнала, импульсной характеристики и области изменения $W_i(t_r, \tau)$ в координатах τ, t_r для прямоугольного импульса

Функция $W_i(t_r, \tau)$, таким образом, в координатах t_r и τ имеет форму параллелограмма.

Зная поведение функции $W_i(t_r, \tau)$, определим поведение $F_{t_r}(t, \tau)$ в координатах ν, t_r . Для простоты рассмотрим случай нулевого смещения, т.е. $t=t'$. Тогда при $\nu=0$ функции $F_{t_r}(t, \tau)$ и $W_i(t_r, \tau-\nu)$ имеют одинаковую форму и совмещены в координатной плоскости τt_r . $F_{t_r}(t, \tau)$ имеет вид треугольника с максимальной длиной основания $2T$ по оси t_r и максимальным значением в вершине. При увеличении ν происходит сдвиг $W_i(t_r, \tau-\nu)$ относительно $W_i(t_r, \tau)$ вниз и влево (а при ее уменьшении — вверх и вправо), при этом форма $F_{t_r}(t, \tau)$ по оси t_r остается треугольной, но длина основания треугольника уменьшается вплоть до нулевого значения. Нулевые значения $F_{t_r}(t, \tau)$ принимает при $\nu=\pm T$. Таким образом, в координатной плоскости νt_r $F_{t_r}(t, \tau)$ представляет собой пирамиду, имеющую диагональ основания $2T$ как по оси ν , так и по оси t_r . В случае увеличения разности $t-t'$ пирамида сужается и уменьшается по высоте, а при $t-t' \geq T$ ее высота обращается в ноль. Поведение функции $F_{t_r}(t, \tau)$ для рассматриваемого случая показано на рисунке 1.11.

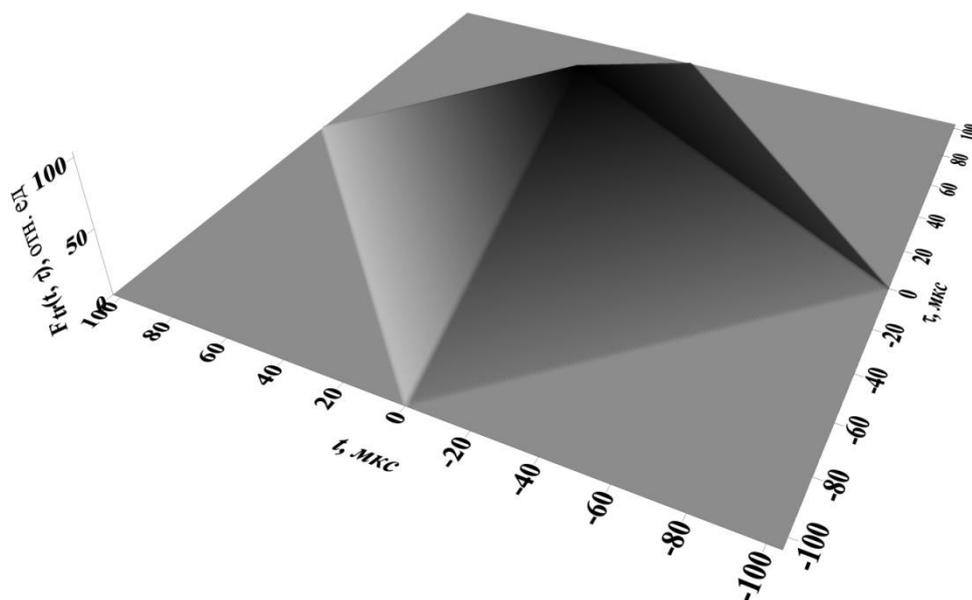


Рисунок 1.11 — Поведение функции $F_{t_r}(t, \tau)$ сигнала с прямоугольной огибающей

В случае кодированного излучаемого сигнала общей длительностью T приведенные выше рассуждения, касающиеся методики построения $W_i(t_r, \tau)$, $F_{t_r}(t, \tau)$, остаются в силе, меняется только форма функций. Теперь $W_i(t_r, \tau)$ при фиксированном значении τ по оси t_r имеет форму, заданную законом кодирования. Аналогично $F_{t_r}(t, \tau)$ при фиксированном значении ν по оси t_r имеет вид автокорреляционной функции, соответствующей кодовой последовательности. График $F_{t_r}(t, \tau)$ для сигнала, кодированного 13-элементным кодом Баркера, представлен на рисунке 1.12.

Из вышесказанного следует, что двумерная функция неопределенности является важной характеристикой, определяющей как высотное разрешение, так и разрешение по задержкам, которые, в свою очередь, влияют на точность определения параметров ионосферной плазмы.

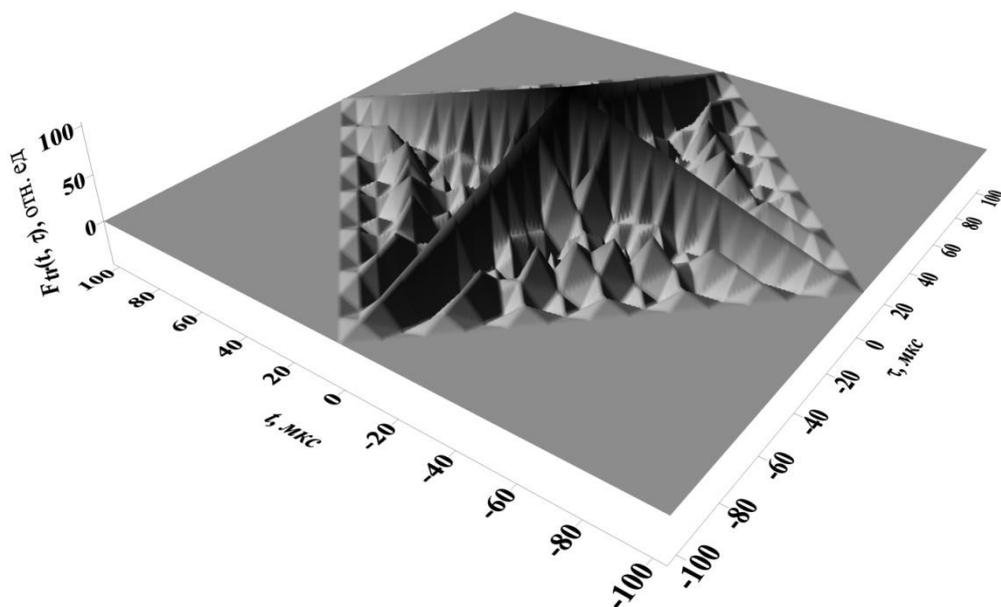


Рисунок 1.12 — Поведение функции $F_{tr}(t, \tau)$ сигнала, кодированного 13-элементным кодом Баркера

1.4. Методика подбора параметров специальных сложных сигналов (длительность, ширина спектра), обеспечивающих оптимальное соотношение между разрешающей способностью и отношением сигнал/шум для Иркутского радара некогерентного рассеяния

Как уже упоминалась выше, первоначально сложные сигналы [Баскаков, 2000; Гоноровский, 1971; Тихонов, 1983; Свистов, 1977] применялись в радиолокации, где цель рассматривается как точечный объект. Сложные сигналы успешно используются на большинстве существующих радаров НР с круговой поляризацией приемной антенны. ИРНР — единственный радар, у которого на временной развертке измеряемой мощности сигнала наблюдаются квазипериодические замирения вследствие эффекта Фарадея при распространении электромагнитной волны в магнитоактивной плазме, что приводит к существенному усложнению алгоритма определения параметров плазмы. Алгоритм имеет высокую чувствительность

к уровню шумов и требователен к точности предоставляемых экспериментальных данных, поскольку относится к классу нелинейных задач. Отсюда следует необходимость удовлетворять сразу двум условиям — высоким значениям сигнал/шум (минимизация дисперсии) и высоким показателям разрешающей способности (минимизация искажений профиля фарадеевских замираний, вызванных зондирующим сигналом). Поэтому использование сложных сигналов на ИРНР является одним из ключевых факторов, уменьшающих неопределенность восстанавливаемых значений параметров ионосферной плазмы.

Выбор критерия поиска оптимальных параметров сигнала является непростой задачей в силу необходимости соответствовать вышеописанным требованиям. В качестве наглядного пояснения вышесказанного рассмотрим рисунок 1.13, на котором представлены профили N_e для различных значений критической частоты слоя F2 (f_0F2) и соответствующие им профили фарадеевских замираний.

Ночью, когда наблюдаются минимальные значения N_e , количество замираний сигнала, вызванных эффектом Фарадея, варьирует от 2 до 4, а отношение сигнал/шум на входе приемного тракта минимально — как правило, меньше 0,1. В таких условиях необходимо обеспечить максимально достижимое отношение сигнал/шум на выходе фильтра приемника. Поскольку расстояние между соседними минимумами фарадеевских замираний превышает сотню километров, для этого достаточно обеспечить разрешение по высоте 10–30 км. Оптимальным сигналом, удовлетворяющим приведенным параметрам, является сигнал длительностью меньше 200 мкс с прямоугольной огибающей. За счет узкой полосы на входе согласованного фильтра будет наблюдаться минимальная мощность шума, обеспечивающая минимальные значения дисперсии на выходе фильтра. Разрешающая способность такого сигнала при длительности 200 мкс составляет ~30 км.

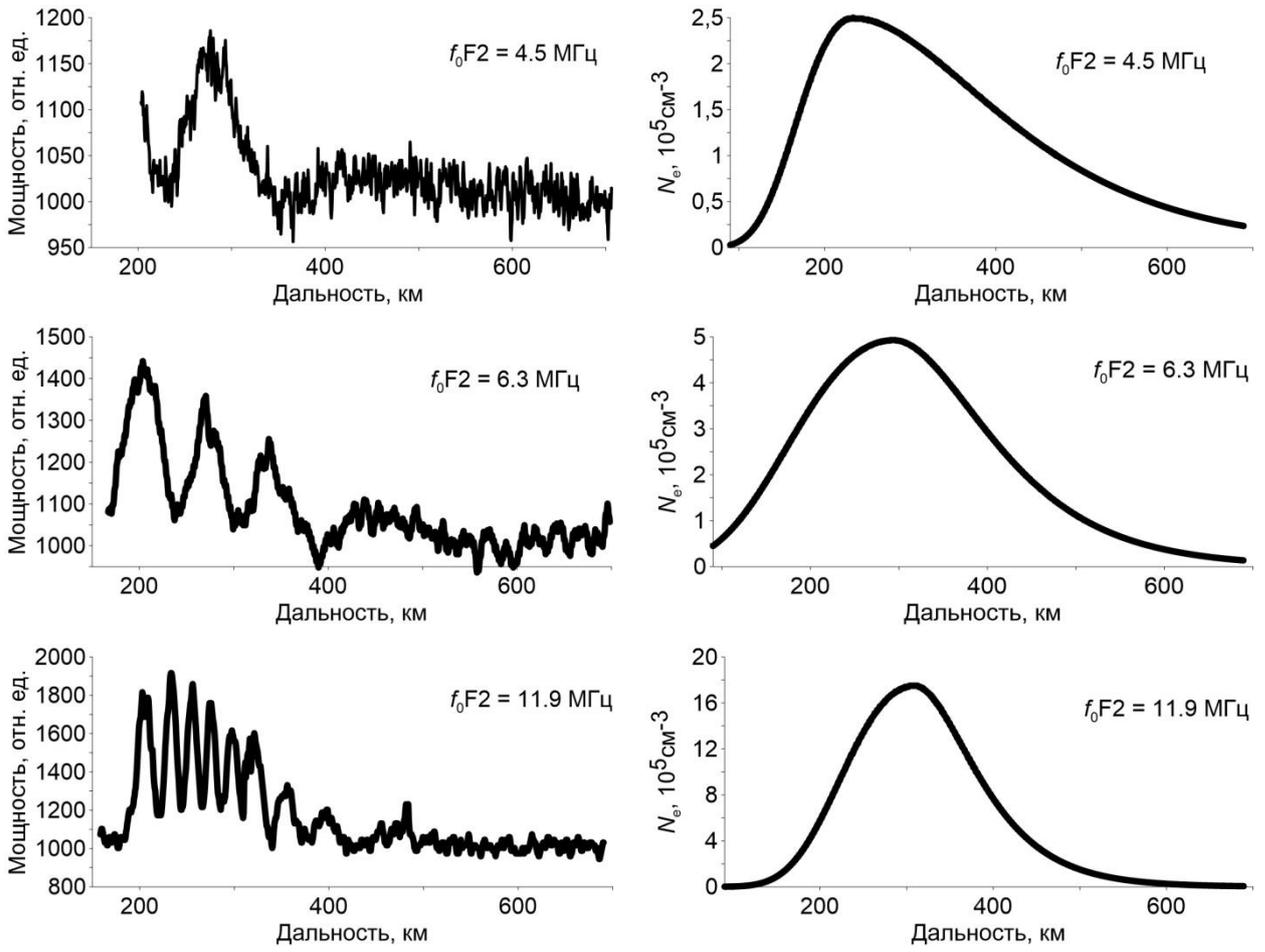


Рисунок 1.13 — Профили фарадеевских замираний (левые панели) и $N_e(r)$ (правые панели) для ночных (верхние панели), утренних или вечерних (средние панели) и дневных (нижние панели) условий

Днем, наоборот, наблюдается наибольшее значение N_e и, как следствие, высокое отношение сигнал/шум и значительно большее число фарадеевских замираний. Расстояние между соседними минимумами уменьшается до десятков километров. В этой ситуации обеспечение высокого разрешения по высоте (порядка 1–6 км) без значительного ухудшения отношения сигнал/шум на выходе фильтра становится основной задачей, решить которую как раз и позволяют различные способы кодирования излучаемого сигнала. Например, сигнал длительностью 200 мкс, кодированный 5-элементным кодом Баркера, имеет в идеальном случае разрешение по высоте 6 км и более широкую полосу, чем сигнал той же длительности с прямоугольной огибающей. При выборе других кодов Баркера разрешение можно повесить до 1 км.

Поиск оптимальных параметров сложных сигналов можно осуществить двумя способами — аналитически и с помощью симулирования. Поскольку на радиолокационной развертке наблюдаются фарадеевские замирания, количество которых изменяется со временем, а, согласно РУ, описывающее эти вариации слабое является нелинейным, аналитическое решение рассматриваемой задачи является трудноосуществимым. В этом случае сравнительно простой способ решить поставленную задачу — создать приближенную модель реакции ионосферы на зондирующий сигнал. Модель позволяет исследовать качество восстановления профиля фарадеевских замираний в зависимости от параметров сигнала (длительность, полоса) и параметров среды (время корреляции), поскольку есть исходный профиль, с которым можно провести сравнение. В модель можно добавить шум. Этим модель отличается от экспериментального исследования, где исходный профиль неизвестен. Основная цель исследования — при заданных параметрах среды и уровне шума определить набор оптимальных параметров зондирующих сигналов (длительности и полосы), при которых искажение профиля фарадеевских замираний будет минимальным. Для этого разработана радиофизическая модель, имитирующая реакцию ионосферы на ЗС, основанная на дискретном представлении РУ. В модели ионосфера рассматривается как тонкие слои, лежащие в заданном диапазоне высот, при этом шаг по высоте, определяющий количество слоев, может быть любым. Приведенный подход предоставляет возможность соотнести каждый слой ионосферы со значением на профиле мощности с замираниями, обусловленными эффектом Фарадея. Набор дискретных рассеивателей задает свойства слоя. Каждый рассеиватель характеризуется следующими параметрами: доплеровским смещением частоты, рассеянной мощностью и начальной фазой рассеиваемого сигнала. Число рассеивателей в слое, участвующих в формировании принимаемого сигнала, определяется количеством доплеровских смещений частоты, которые описываются функцией распределения спектральной мощности НР-сигнала $S(r, \nu)$. Переход от корреляционной функции $\rho(\tau, r)$ к спектральной $S(r, \nu)$ возможен благодаря теореме Винера — Хинчина. В модели для имитации шумовой природы сиг-

нала НР случайный характер носит только фаза рассеянного сигнала. На рисунке 1.14 представлена структура модели.

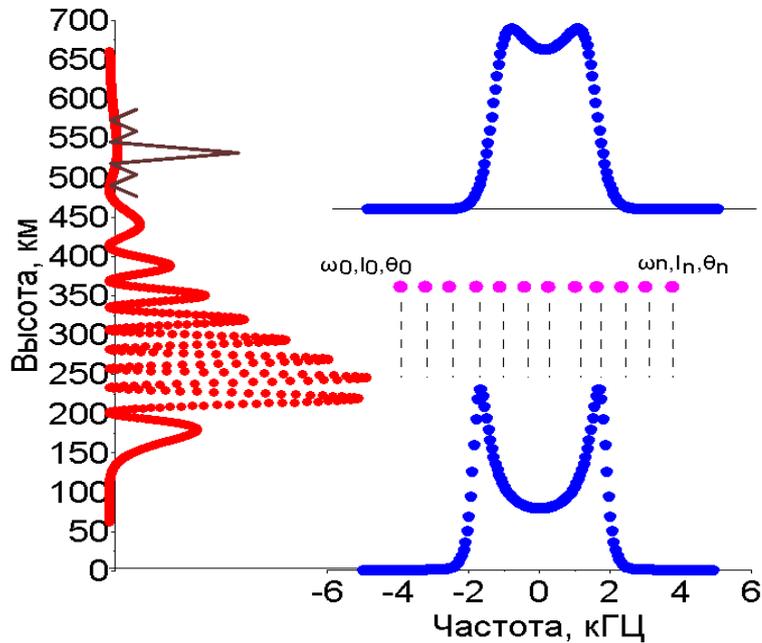


Рисунок 1.14 — Радиофизическая модель, имитирующая отклик ионосферы на зондирующий сигнал

Замирания в профиле мощности, вызванные эффектом Фарадея, показаны на рисунках 1.15 и 1.16.

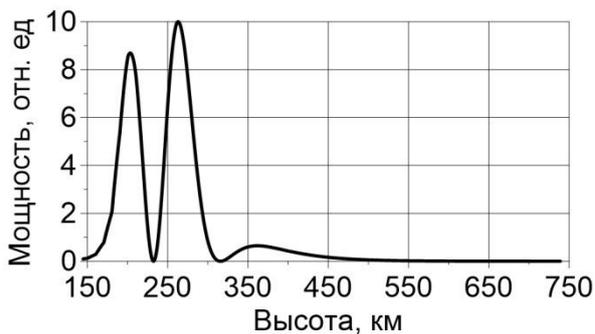


Рисунок 1.15 — Замирания в профиле мощности при $N_m F_2 = 4,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$

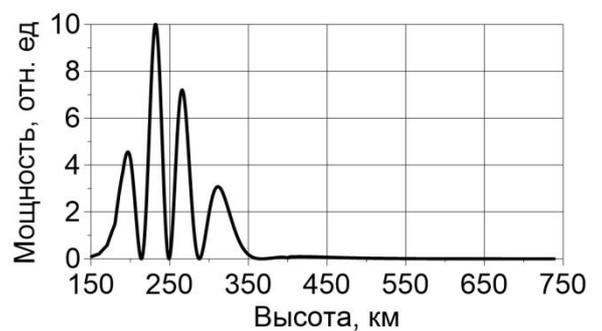


Рисунок 1.16 — Замирания в профиле мощности при $N_m F_2 = 9,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$

Свойства среды в выражении (1.1) описываются членом $\rho(\tau, r)$, являющимся профилем корреляционной функции плотности тепловых флуктуаций. Преобразование Фурье $\rho(\tau, r)$ есть спектральная плотность мощности $S(r, \nu)$, зависящая от высоты. Для плазмы, состоящей из электронов и ионов, $S(r, \nu)$ имеет вид

$$S(r, \nu) = \frac{N_e(r)}{\omega V \sqrt{\pi}} \frac{\Theta_e e^{\Theta_e^2} |1 + a_i^2 Z(\Theta_i)|^2 + \Theta_i e^{\Theta_i^2} |a_e^2 Z(\Theta_e)|^2}{|1 + a_i^2 Z(\Theta_i) + a_e^2 Z(\Theta_e)|^2}.$$

Здесь $\alpha_{e,i} = 4\pi\lambda/D_{e,i}$ — отношение длины излучаемой электромагнитной волны к радиусу Дебая; V — рассеивающий объем; λ — длина излучаемой электромагнитной волны; ω — частота излучаемой волны; $Z(\Theta)$ — интеграл Ландау:

$$Z(\Theta) = 1 - \Theta e^{-\Theta^2} \left(2 \int_0^\Theta e^{p^2} dp + i\sqrt{\pi} \right),$$

где $\Theta_{e,i} = \omega \sqrt{m_{e,i}/(2KT)}/k$ является частотой, нормированной на среднюю тепловую скорость частиц и волновой вектор k излучаемой волны; $m_{e,i}$ — масса электрона или иона; K — постоянная Больцмана; $T_{e,i}$ — температура электронов или ионов. Форма спектра мощности показана на рисунке 1.17 для случая $T_e=2500$ К, $T_i=800$ К и на рисунке 1.18 для случая $T_e=800$ К, $T_i=800$ К. Функция неопределенности $F_{t_r}(t, \tau)$ в уравнении (1.1) зависит от вида излучаемого сигнала. Формы огибающих излучаемого сигнала в случаях 5-, 7-, 11-, 13-элементных кодов Баркера и простого прямоугольного импульса показаны на рисунке 1.19.

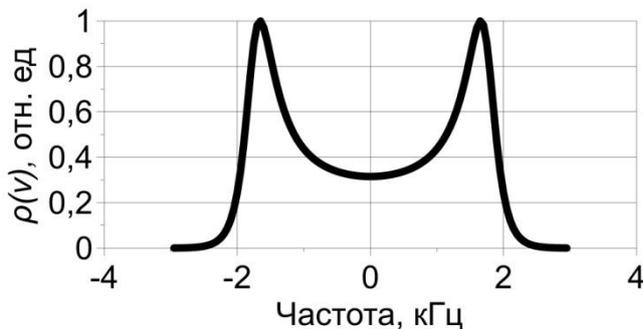


Рисунок 1.17 — Спектр мощности при $T_i=800$ К и $T_e=2500$ К

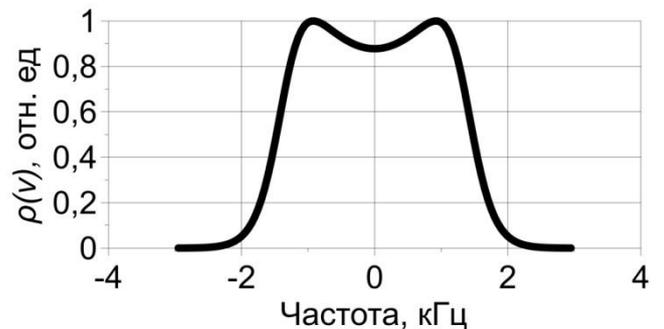
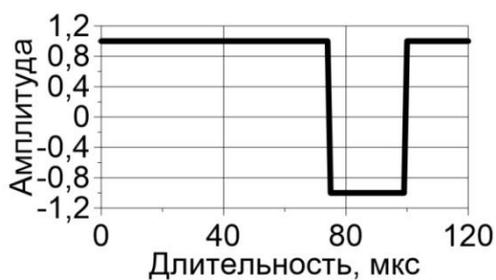
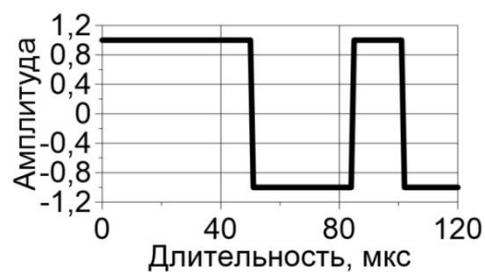


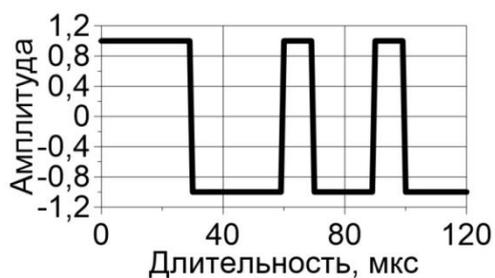
Рисунок 1.18 — Спектр мощности при $T_i=800$ К и $T_e=800$ К



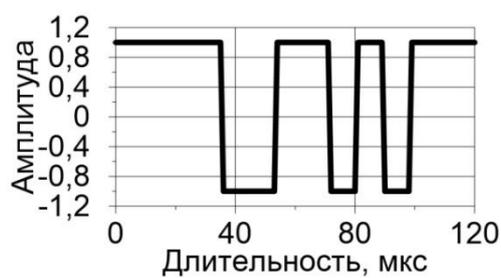
5-элементный код



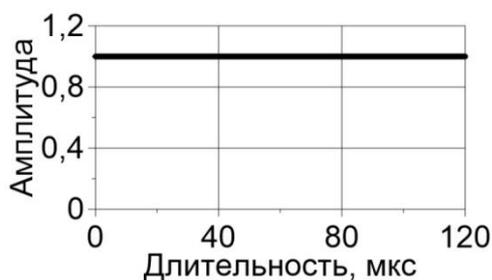
7-элементный код



11-элементный код



13-элементный код



прямоугольный импульс

Рисунок 1.19 — Огибающие излучаемого сигнала в случае использования кодов Баркера: верхние панели — 5-элементного (слева) и 7-элементного (справа); средние панели — 11-элементного (слева) и 13-элементного (справа). Нижняя панель — огибающая прямоугольного сигнала

В реальном эксперименте всегда присутствует шум, который учитывается в модели. Входными параметрами модели являются профиль фарадеевских замираний, спектр мощности, уровень шумов и ЗС, меняя параметры которого, на выходе модели получаем набор профилей мощности. Сравнивая их с исходным профилем, выбираем наилучший и тем самым находим оптимальные параметры ЗС.

Степень сходства между полученным в результате моделирования профилем фарадеевских замираний и исходным определяется методом наименьших квадратов [Фильчаков, 1970]:

$$\delta = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (P_{\text{исх}}(r_i) - A \cdot P_{\text{отк}}(r) - C)^2 dr \rightarrow \min.$$

В данной работе моделирование рассматривается на примере 5-, 7-, 11- и 13-элементных кодов Баркера.

Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением значений N_e необходимо расширять полосу зондирующего сигнала, при этом её верхняя граница определяется уровнем шума: чем он выше, тем ниже верхняя граница полосы сигнала. Данная зависимость наиболее выражена для низких значений N_e . Такое поведение объясняется тем, что после согласованной обработки сигнала с более узкой полосой дисперсия шума в выходном сигнале имеет меньшее значение по сравнению с более широкополосными сигналами. С другой стороны, понижается разрешающая способность (например, для 5-элементного кода Баркера при суммарной длительности ЗС 200 мкс — 6 км). При небольших значениях N_e расстояние между ближайшими фарадеевскими замираниями составляет ~ 100 км, поэтому разрешающая способность имеет второстепенное значение по сравнению с достижением минимальной дисперсии шума.

Это подтверждается высотно-временным поведением экспериментальных профилей мощности фарадеевских замираний, показанных на рисунке 1.20, и высотным поведением профилей мощности фарадеевских замираний для различных кодов Баркера при сопоставимой общей длительности зондирующего сигнала, представленных на рисунке 1.21. Из анализа данных рисунков видно, что при сопоставимых длительностях зондирующих импульсов 5-элементный код Баркера показывает лучшее отношение сигнал/шум по сравнению с другими последовательностями. При низком отношении сигнал/шум искажения профиля мощности, обусловленные использованием сигналов с различной фазовой манипуляцией, становятся меньше, чем искажения, вызванные шумом.

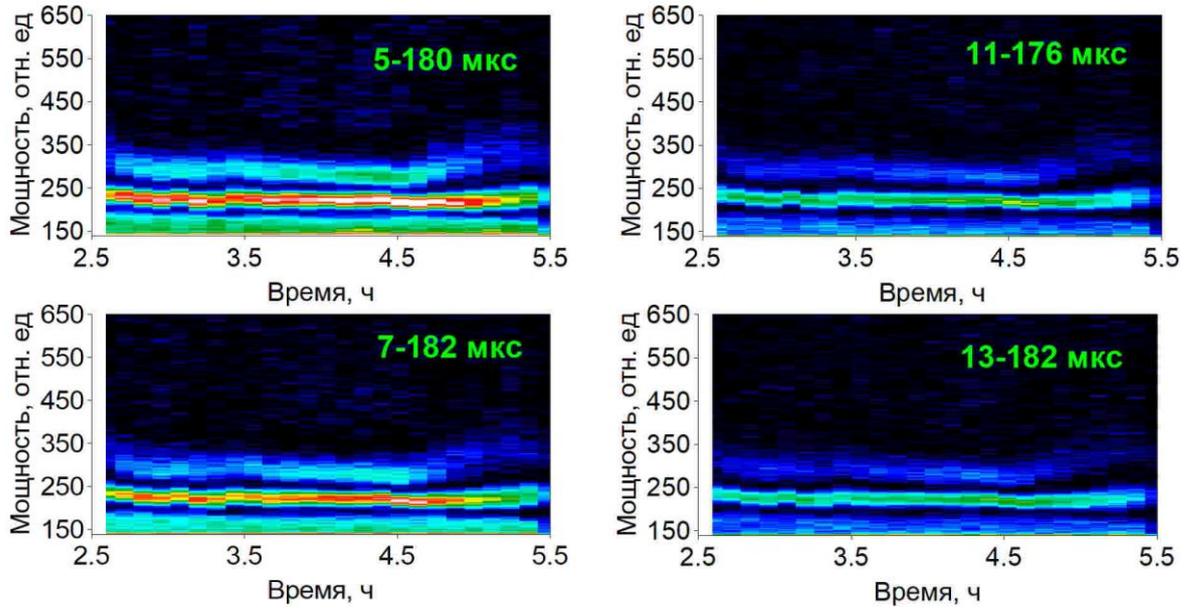


Рисунок 1.20 — Высотно-временное поведение профилей мощности фарадеевских замираний для различных кодов Баркера при сопоставимой общей длительности зондирующего сигнала

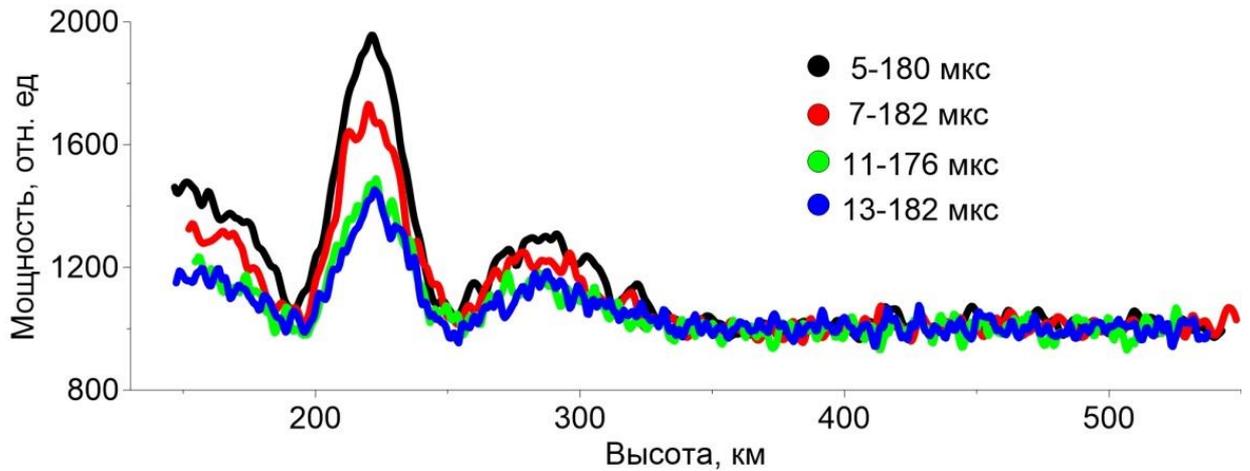


Рисунок 1.21 — Высотное поведение профилей мощности фарадеевских замираний для различных кодов Баркера при сопоставимой общей длительности зондирующего сигнала

При выборе параметров ЗС для ИРНР можно следовать рекомендациям, приведенным в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Выбор оптимальной последовательности

$N_m F2$ (N_e в максимуме слоя F2)	ФМ
$N_m F2 < 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$	5
$5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3} < N_m F2 < 10 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$	7
$10^6 \text{ см}^{-3} < N_m F2 < 15 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$	11
$N_m F2 > 15 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$	13

Данные выводы справедливы для стандартного режима измерения: излучаются последовательно два импульса — короткий (длительностью ~ 200 мкс) для измерения профиля мощности фарадеевских замираний и длинный (длительностью ~ 750 мкс) для спектральных измерений. Результаты моделирования были апробированы экспериментально. Достигнуто разрешение единицы километров.

Необходимо отметить, что положением диаграммы направленности (ДН) ИРНР можно частично управлять путем изменения несущей частоты в пределах 154–162 МГц. Изменение осуществляется в секторе $\pm 30^\circ$ в направлении север–юг. Вследствие этого возникают искажения при использовании модуляции несущей, и влияние модуляции тем сильнее, чем шире полоса излучаемого сигнала. В эксперименте в основном используются коды Баркера 5, 7, 11, 13 при общей длительности импульса от 50 до 200 мкс, т.е. полоса сигнала изменяется в диапазоне 25–250 кГц. В свою очередь, ширина полосы, в пределах которой происходит изменение ДН в секторе $\pm 30^\circ$, составляет 8 МГц. Таким образом, искажения, вносимые за счет ширины полосы зондирующего сигнала, варьируют от 0.3 до 4 %. Более детальная оценка этих искажений проведена в работе [Лебедев, 2015].

В методе НР, согласно работам [Damtie et al., 2004; Nygren, 1996], в уравнении (1.1) предполагается слабая зависимость функции корреляции ионосферной плазмы $\rho(\tau, r)$ от τ , где $F_{tr}(t, \tau) \neq 0$, т.е. $\rho(\tau, r) \approx \rho(t_1 - t_2, r)$, где t_1 и t_2 — измерения в два различных момента времени. Поскольку нас интересует мощность в момент времени t , то $t_1 = t_2 = t$, а следовательно, $t_1 - t_2 = 0$ и $F_{tr}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a\left(t - -\frac{2r}{c}\right) b(t) dt$.

В свою очередь, согласно [Farley, 1966], $\rho(0, r)$ может быть представлена в

виде

$$\rho(0, r) = \pi r_e^2 \frac{N_e(r)}{1 + T_e(r)/T_i(r)}. \quad (1.8)$$

С учетом выражения (1.8) уравнение (1.1) примет следующий окончательный вид:

$$P(t) = C \int \frac{dr}{r} \frac{N_e(r) \cos^2 \Omega(r)}{1 + T_e(r)/T_i(r)} F_{t_r}^2(t) + \sigma_{\text{шум}}(t). \quad (1.9)$$

Поскольку высотный ход $T_e(r)/T_i(r)$ является плавным и не имеет нулей, в дальнейшем данное отношение полагается константой во всем высотном диапазоне.

Достигнутая разрешающая способность по высоте в несколько километров позволяет считать в первом приближении $F_{t_r}(t)$ дельта-функцией.

1.5. Выводы

Разработана радиофизическая модель ионосферы, предназначенная для исследования влияния различных типов зондирующих сигналов на качество восстановления профиля фарадеевских замираний. С помощью нее исследованы 5-, 7-, 11- и 13-элементные коды Баркера и получены следующие результаты:

1. Для обеспечения наилучшего отношения сигнал/шум и наилучшей разрешающей способности по высоте параметры зондирующего сигнала необходимо варьировать в зависимости от ионосферных условий (параметры зондирующего сигнала напрямую зависят от текущих значений N_e и слабо зависят от соотношения T_e/T_i).
2. Во всех случаях максимально возможная длительность сигнала не должна превышать времени корреляции среды (как правило, в эксперименте общая длительность зондирующего сигнала не превышает 200 мкс).

Использование на ИРНР зондирующего сигнала с фазовой манипуляцией на основе кодов Баркера позволило улучшить разрешающую способность по дальности и уменьшить неоднозначность оценки параметров ионосферной плазмы, а также повысить эффективность использования передающей установки.

Глава 2. Методика восстановления профиля электронной концентрации на Иркутском радаре некогерентного рассеяния

Определение параметров ионосферы на основе анализа принятого сигнала является довольно сложной и одновременно важнейшей процедурой в методе НР. С расширением возможностей вычислительной техники наибольшее предпочтение стали отдавать методам, определяющим одновременно весь высотный ход параметров ионосферы [Holt et al., 1992; Lehtinen, Huuskonen, 1996], суть которых заключается в использовании параметрических функций, описывающих высотный профиль ионосферных параметров. Такой подход позволяет повысить устойчивость реализуемых алгоритмов определения высотного хода параметров ионосферы. Тем не менее данным методам присущи и недостатки, например, они требуют введения дополнительной априорной информации с целью устранения физически необоснованных решений. Поскольку модель часто является нелинейной и может давать не единственное точное решение, необходимо введение методов регуляризации [Farley, 1971; Ахиезер и др., 1974; Шеффилд, 1978]. Какой бы точной ни была модель, она ограничивает область возможных решений, тем самым в контексте ионосферных измерений сужая исследуемый класс волновых процессов в ионосфере.

2.1. Структура нового метода

Согласно полученным в главе 1 результатам, значения высотного разрешения, достигнутые в результате применения сложных зондирующих сигналов, позволили в первом приближении в выражении (1.9) функцию неопределенности $F_{t_r}(t)$ считать узкой по сравнению с расстоянием между соседними минимумами фарадеевских замираний. В экспериментах на ИРНР при фазовой манипуляции

сигнала в основном используются коды Баркера с числом элементов в последовательности от 5 до 13, дающие разрешение по высоте 1.5–6 км при общей длительности зондирующего сигнала ~ 200 мкс. Заменяем функцию неопределенности дельта-функцией Дирака и тем самым исключим операцию учета свертки. В главе 1 также отмечалось, что на всех высотах отношение температур электронов и ионов остается константой. Вышеприведенные допущения позволяют значительно упростить РУ (1.9):

$$P(r) = A \frac{N_e(r) \cos^2(\Omega(r))}{r^2} + \sigma_{\text{шум}}(r), \quad (2.1)$$

где $\Omega(r) = \gamma \int_0^r N_e(z) B(z) \cos \alpha dz = \Omega_0(r_0) + \gamma \int_{r_0}^r N_e(z) B(z) \cos \alpha dz$.

Уравнение 2.1 описывает высотный профиль мощности фарадеевских вариаций, наблюдаемый в эксперименте. Поскольку рассеянный сигнал НР очень слабый и его уровень меньше шумов эксперимента, то повышение соотношения сигнал/шум достигается статистическими методами [Bard, 1974; Dennis, Schnabel, 1983]. Предполагается, что шумы имеют нормальное распределение и, согласно центральной предельной теореме, усредняя независимые реализации принятого сигнала, можно получить статистическую оценку мощности рассеянного сигнала.

Рельеф местности создает мощные помехи, маскирующие НР-сигнал [Потехин и др., 2008; Potekhin et al., 2009] в интервале высот от ~ 50 км (высота, соответствующая нижней границе ионосферы) до ~ 160 км. Невозможность принимать сигнал, рассеянный ионосферой, в указанном высотном интервале приводит к необходимости в выражении для $\Omega(r)$ в уравнении (2.1) выделить отдельно параметр Ω_0 , равный интегралу от $N_e(r)$ в диапазоне высот от 50 км до r_0 — высоты, начиная с которой регистрируется рассеянный сигнал от ионосферы (~ 160 км). В настоящее время для ИРНР ведется разработка алгоритма устранения отраженных от рельефа местности сигналов [Tashlykov et al., 2019].

На рисунке 2.1 приведены примеры высотной зависимости мощности рас-

сеянного сигнала, измеренной летом в периоды времени, соответствующие дневной, вечерней и ночной ионосфере, в условиях низкой солнечной активности.

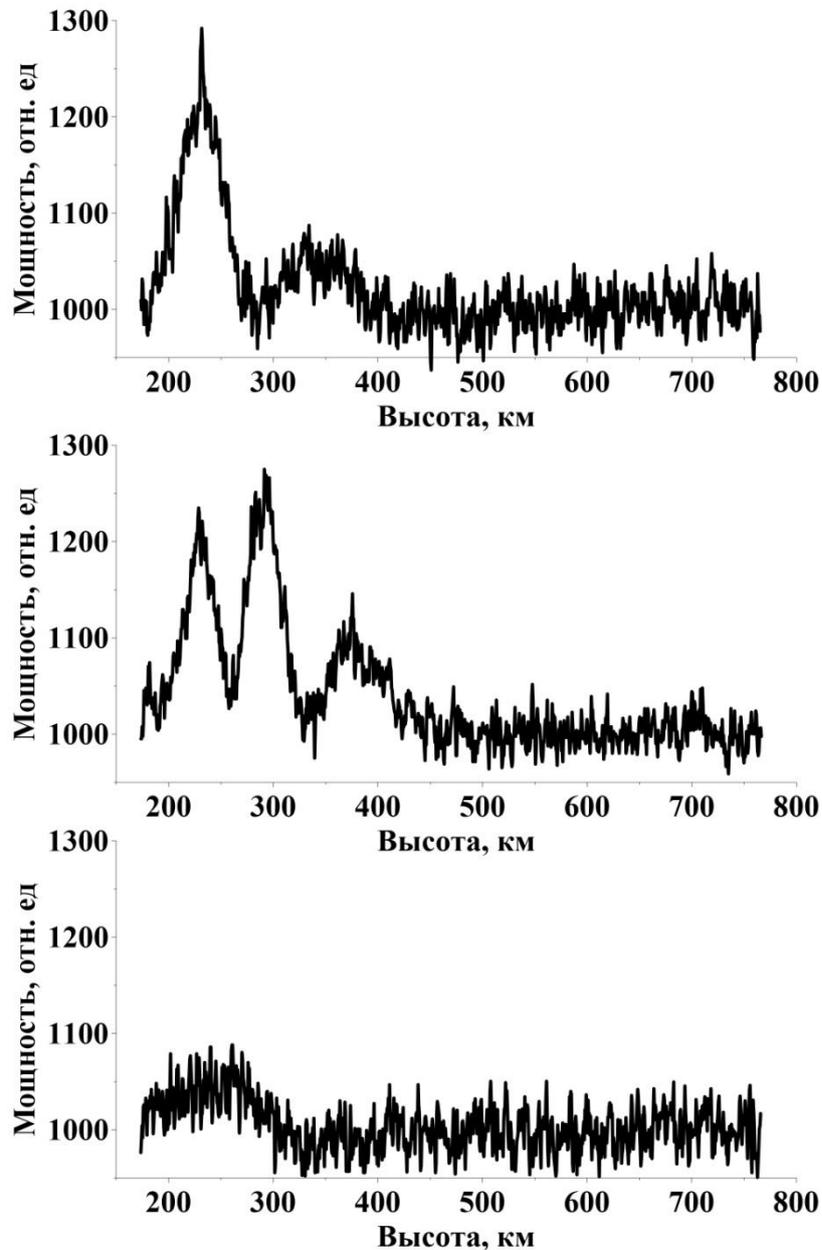


Рисунок 2.1 — Высотные зависимости мощности рассеянного сигнала (сверху вниз), измеренной в дневное, вечернее и ночное время в летний сезон при низкой солнечной активности

На основе полученного РУ (2.1) далее в данной главе решается задача восстановления профиля электронной концентрации с помощью минимизации функционала вида [Tarantola, 1987; Aster, Borchers, Thurber, 2005]

$$\delta = \sum (Y_3(r_i) - A \cdot P_0(r_i, \vec{x}) - C)^2 \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

где $Y_3(r_i)$ — экспериментальные данные, полученные на ИРНР; $P_0(r_i, \vec{x})$ — параметрическая модель, описывающая наблюдаемый на ИРНР профиль мощности фарадеевских замираний; r_i — дальность по лучу радара; вектор \vec{x} содержит восстанавливаемые параметры модели; A — коэффициент усиления; C — уровень шумов.

В данной работе моделью описывается высотный ход $N_e(r)$ в виде слоя Чепмена с различными масштабными высотами выше и ниже максимума $N_e(r)$. Достоинство модели — гладкость, важная при решении нелинейных задач, однако модель не отражает мелкомасштабные вариации.

Параметризация именно высотного профиля N_e объясняется несколькими причинами. Непосредственно параметризовать профиль фарадеевских замираний не представляется возможным, тем не менее, учитывая его сложную зависимость от N_e , можно сделать это косвенно. Решение задачи приводит сразу к получению высотной зависимости N_e . Данная модель позволяет сделать упор на создание методов и алгоритмов, полностью автоматизирующих процесс расчета высотного профиля N_e , учитывающих высотную зависимость геомагнитного поля и контролирующих в автоматическом режиме положение первого нуля в экспериментально измеренном профиле мощности фарадеевских вариаций. К достоинствам данной модели также относится явное задание высоты максимума электронной концентрации, что, совместно с информацией о первом минимуме фарадеевского замирания и полученном высотном профиле N_e , может служить в качестве первого приближения для более сложных моделей поведения высотного профиля N_e , учитывающих мелкомасштабные вариации, например, с использованием B -сплайнов.

Аналитическое выражение для используемой модели имеет вид

$$N_e(z) = N_m F2 \exp(1 - x - \exp(x)) \begin{cases} x = \frac{z - h_m F2}{H_B} & \text{при } z < h_m F2, \\ x = \frac{z - h_m F2}{H_T} & \text{при } z \geq h_m F2, \end{cases}$$

где z — высота; $N_m F2$ — максимум N_e ; $h_m F2$ — высота максимума; H_B и H_T —

масштабная высота внутренней (ниже h_mF2) и внешней (выше h_mF2) ионосферы соответственно. На рисунке 2.2 изображен модельный профиль N_e с обозначением основных его параметров.

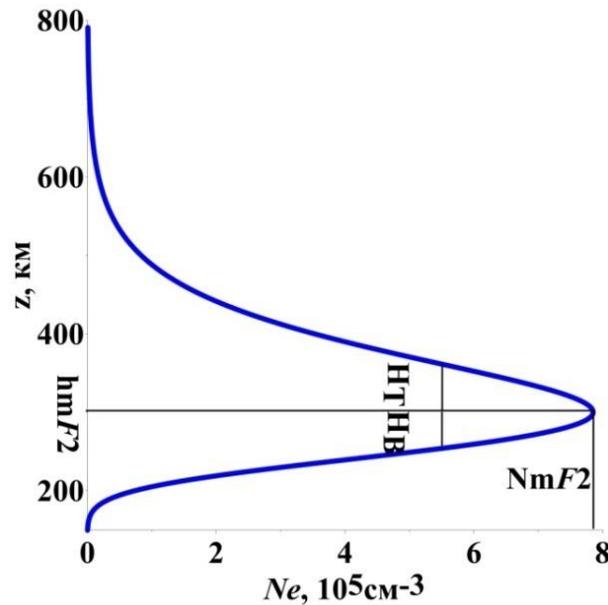


Рисунок 2.2 — Высотный ход N_e , описываемый слоем Чепмена

В новом алгоритме высотная зависимость геомагнитного поля описывается моделью IGRF [Tsyganenko, 2002a, b], в отличие от работы [Shpynev, 2004], где поле считается постоянным.

Всего в данной задаче используются семь параметров: N_mF2 , h_mF2 , H_B и H_T , A — коэффициент усиления, C — уровень шумов и Ω_0 — интеграл от $N_e(r)$ в высотном интервале от 50 км до r_0 , которые являются неизвестными и требуют определения. С этой целью строится система линейных уравнений исходя из условия равенства нулю частных производных по переменным A и C в выражении (2.2), решение которой позволяет определить данные переменные. Остальные параметры входят в модель нелинейно, для их определения используется метод прямого перебора. Обсуждение алгоритма начнем с рассмотрения априорной информации, необходимой для автоматизации алгоритма. Области изменения параметров модели следующие: N_mF2 — $[0,5...32] \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ с шагом $0,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$; h_mF2 — от 200 до 450 км с шагом 5 км; H_B и H_T — от 20 до 160 км с шагом 5 км.

Интервал и шаг можно варьировать для каждой переменной в отдельности. Для решения поставленной выше задачи задаются следующие регуляризирующие условия: значение $N_e(r)$ на высоте 50 км равно 0; одновременное выполнение условий $H_B - 10 \text{ км} < H_T < H_B + 30 \text{ км}$ и $\Omega_0 < 0.05$ в ночное время. Использование вышеприведенных условий является ключом к созданию автоматического алгоритма получения высотного хода $N_e(r)$.

Выражение (2.1) нелинейно зависит от параметра Ω_0 . Нахождение значений Ω_0 осуществляется методом перебора, поэтому для получения единственного устойчивого решения требуется задать диапазон допустимых значений. Мощность принятого сигнала на ИРНР, согласно РУ (2.1), пропорциональна квадрату косинуса от $\Omega(r)$. Нулевые значения (минимумы в профиле замираний мощности вследствие эффекта Фарадея) косинус принимает, когда $\Omega(r) = \pi/2 + \pi n$, при этом в измеряемой мощности $\Omega(r) = \pi/2$ соответствует первому минимуму. Используя экспериментальные данные, оценим вариации высоты первого минимума в течение суток в зависимости от сезона года.

На рисунке 2.3 показаны высотно-временные вариации мощности сигнала НР за 01.01.2014. Во временном диапазоне 0–1 UT (по местному времени соответствует рассвету) высота первого минимума составляет ~350 км, в 02–07 UT (день) — около 160 км.

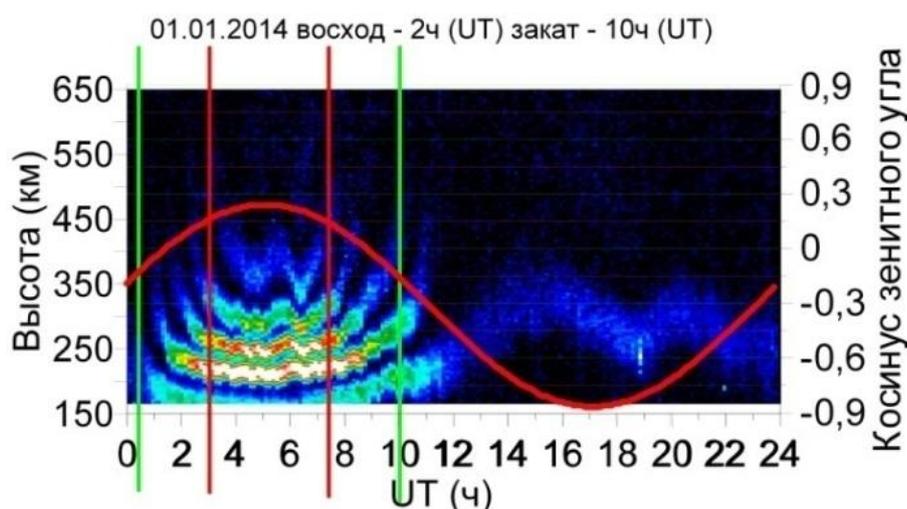


Рисунок 2.3 — Высотно-временное поведение фарадеевских замираний 01.01.2014 (LT=UT+7)

С 08 UT высота первого минимума начинает увеличиваться, достигая 400 км и более в ночное время (14–22 UT). После 22 UT (рассвет) поведение первого минимума повторяется.

На рисунке 2.4 показаны высотно-временные профили фарадеевских замираний, полученные для четырех дней разных сезонов, и соответствующий этим дням суточный ход косинуса зенитного угла Солнца (красная кривая) [Даффет-Смит, 1982].

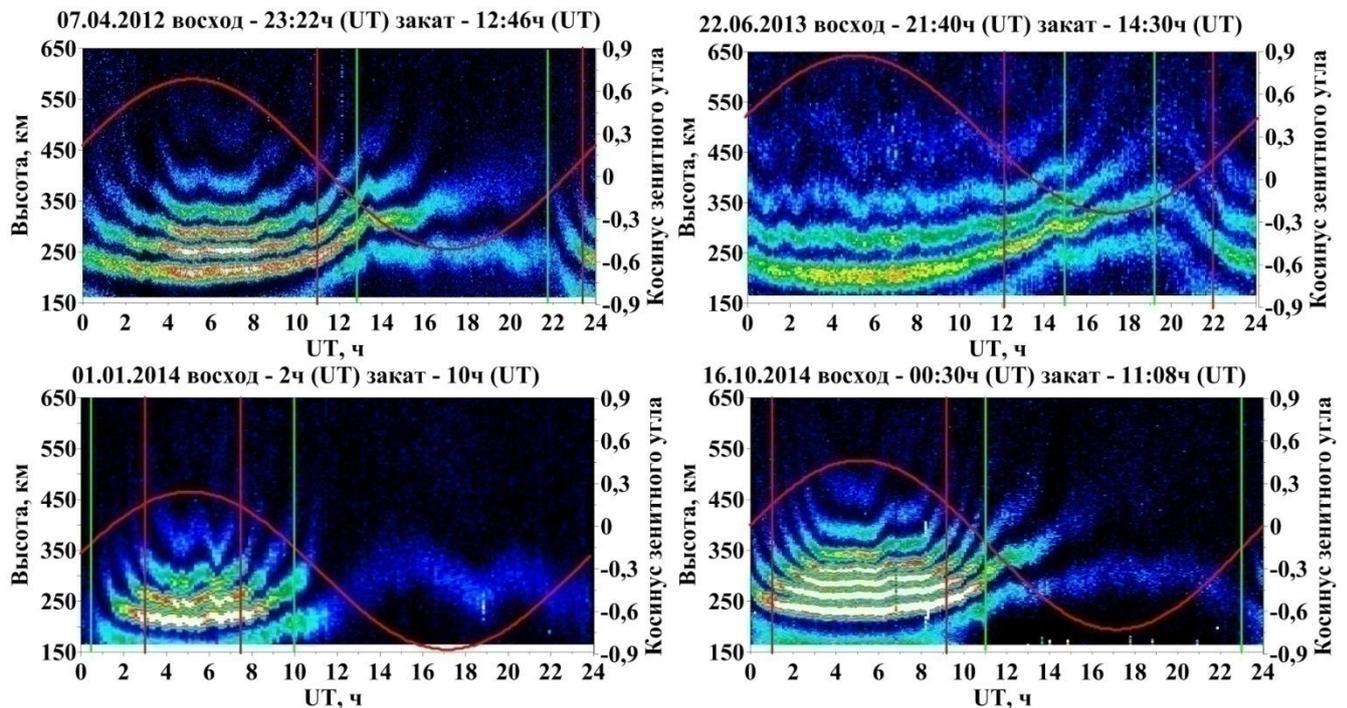


Рисунок 2.4 — Высотно-временные профили мощности принятого сигнала, модулированного фарадеевскими замираниями, соответствующие весеннему и летнему периодам (вверху) и зимнему и осеннему периодам (внизу): красная кривая — суточный ход косинуса зенитного угла Солнца; вертикальные красные линии отмечают начало дня и его окончание; зеленые — времена заката и рассвета, $LT=UT+7$

Из рисунка 2.4 видно, что высотный ход первого минимума мощности сигнала зависит главным образом от времени суток. Поэтому удобно ассоциировать суточный ход первого минимума мощности с временным ходом зенитного угла

Солнца. Для привязки высот расположения первого нуля к зенитному углу выделены временные промежутки: ночь, рассвет, день, закат. Интервалы суток, соответствующие дню и ночи, разделены рассветом и закатом. Закат — интервал времени, в котором растёт высота первого минимума и косинус зенитного угла Солнца изменяется от 0,15 до $-0,15$. Рассвет — интервал времени, соответствующий уменьшению высоты первого минимума и значениям косинуса зенитного угла Солнца в диапазоне $[-0,15 \dots 0,15]$.

На рисунке 2.4 вертикальные красные линии отделяют день от заката и рассвет от дня, зелёные линии — закат от ночи и ночь от рассвета. Благодаря обработке большого набора данных с каждым временным отрезком удалось соотнести диапазоны изменения высоты первого нуля. Результаты представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Зависимость от времени суток диапазона высот расположения первого минимума фарадеевских замираний

Время суток	день	закат	ночь	рассвет
Диапазон высот, км	160–240	190–300	250–450	230–400

Значение высоты расположения первого минимума фарадеевских замираний, согласно рисунку 2.4, не опускается ниже 160 км. Данный факт подтвержден визуальной инспекцией большого массива высотно-временных профилей мощности, рассчитанных по данным, измеренным на Иркутском радаре некогерентного рассеяния, — как новым, так и полученным ранее для различных сезонов и уровней солнечной активности. Согласно полученным результатам, Ω_0 лежит в пределах от 0 до $\pi/2$. Однако для учета случаев, когда первый минимум уходит ниже 160 км, верхняя граница была расширена до $\pi/2 + \pi/10$. При поиске Ω_0 остаются те ее значения, для которых высота первого нуля лежит в пределах, указанных в таблице 2.1.

Работу алгоритма можно разбить на несколько стадий. На первой стадии формируется набор высотных профилей N_e , рассчитанных по модели слоя Чепмена для всех возможных значений $N_m F2$, $h_m F2$, H_B , H_T и Ω_0 . На следующей стадии

для каждого профиля N_e с учетом высотной зависимости магнитного поля вычисляется соответствующий высотный ход фарадеевских замираний. Как говорилось выше, высотная зависимость геомагнитного поля определяется по модели IGRF.

На заключительной стадии осуществляется сравнение полученного модельного профиля замираний мощности, обусловленных эффектом Фарадея, с профилем, измеренным в эксперименте. Сравнение осуществляется, пока не будет определен модельный профиль с минимальной невязкой. Таким образом, в процессе работы алгоритма определяется как наилучший профиль фарадеевских замираний, так и соответствующий ему высотный ход N_e .

На рисунке 2.5 на левой панели изображены экспериментальный профиль фарадеевских замираний и рассчитанный из модельного профиля N_e профиль фарадеевских замираний, на правой панели показан модельный профиль N_e . Номера максимумов фарадеевских замираний обозначены цифрами в кружках.

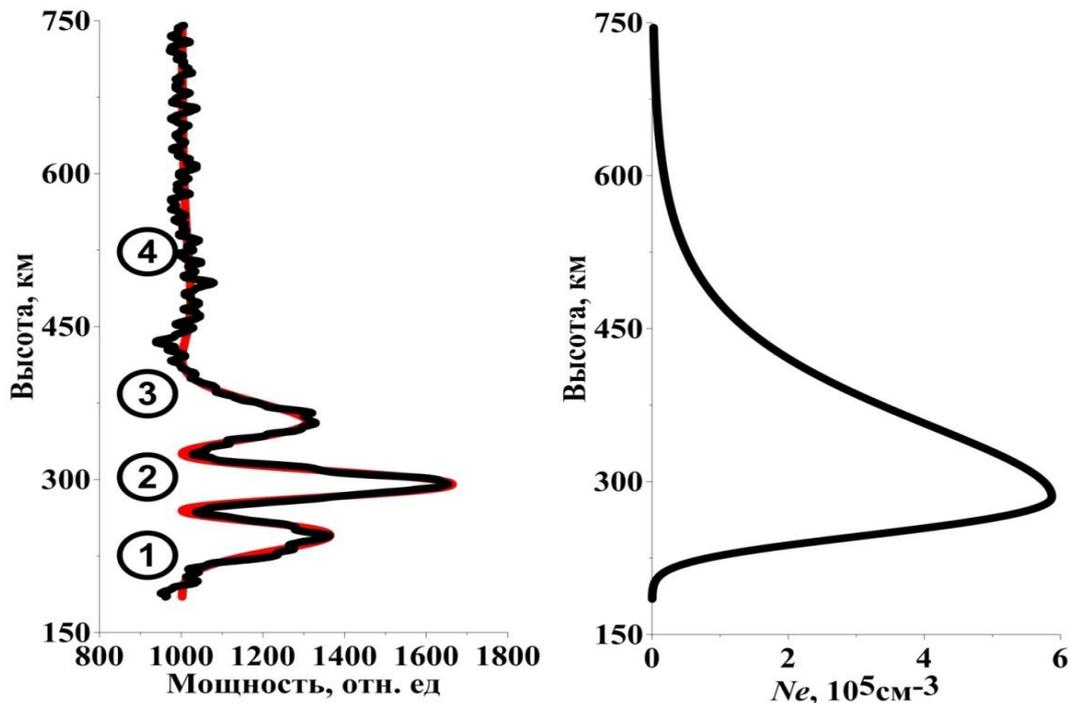


Рисунок 2.5 — Слева — профили фарадеевских замираний: черная кривая — наблюдаемый в эксперименте; красная кривая — восстановленный из модельного профиля N_e ; справа — модельный профиль N_e . Цифры в кружках — номера максимумов фарадеевских замираний

Из-за достаточно высокой вычислительной сложности алгоритма потребовалось провести оптимизацию [Hamming, 1987], чтобы использовать его в вычислениях высотного хода N_e в реальном времени. Для чего экспоненциальной функцией аппроксимировались высотные изменения геомагнитного поля, рассчитанные по модели IGRF:

$$B_{0 \text{ mod}}(z) = ae^{-bz},$$

где b — коэффициент затухания; a — величина геомагнитного поля на минимальной высоте r_0 . Результат аппроксимации и модельный профиль геомагнитного поля показаны на рисунке 2.6.

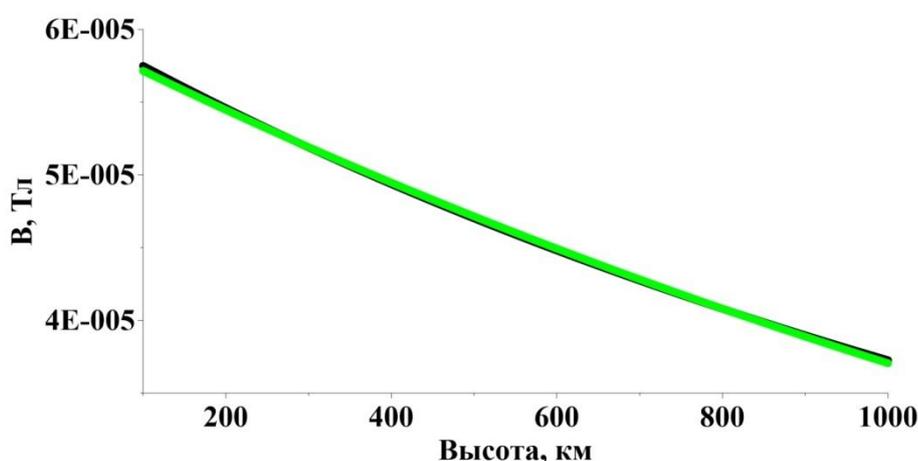


Рисунок 2.6 — Полученный по модели IGRF высотный профиль геомагнитного поля (черная линия) и его аппроксимация экспоненциальной функцией (зеленая линия)

Слой Чепмена представляет собой набор экспонент, поэтому предложенная аппроксимация упрощает выражение для фазы $\Omega(r)$ и уменьшает вычислительную сложность алгоритма. С учетом полученного аналитического выражения для магнитного поля, выражение для $\Omega(r)$ примет вид

$$\Omega(r) = aN_m F_2 H a e^{-br_0} \int_{e^{-(r-h_m F_2)/H}}^{e^{-(r_0-h_m F_2)/H}} t^{bH} e^{-t} dt.$$

Рассмотрим диапазоны изменения подынтегрального выражения и пределов интеграла. Верхний предел имеет максимальное значение, когда значение $h_m F_2$

является также максимальным, а H и r , наоборот, минимальны, т. е. $r = r_0$:

$$e^{-(r_0 - h_m F_2)/H} = e^{-(480 - 140)/20} = e^{17} \approx 2.5 \cdot 10^9.$$

Соответственно, при минимальной $h_m F_2$ и максимальных H и r (1200 км) нижний предел будет иметь минимальное значение:

$$e^{-(r - h_m F_2)/H} = e^{-(1200 - 200)/160} = e^{-6.25} \approx 2 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, пределы интегрирования находятся в интервале $[0 \dots e^{17}]$.

На рисунке 2.7 видно, что функция e^{-t} (показана черным цветом) при $t > 5$ стремится к 0. Рассмотрим функцию t^{bH} , где $b < 8 \cdot 10^{-4}$. Максимальное значение $bH = 0.13$ примет при $H = 160$ км. При данном значении показателя и изменениях аргумента t в интервале $[10 \dots e^{17}]$ значения рассматриваемой функции лежат в пределах от 1.34 до 9. Примем, что значения t находятся в интервале $[0 \dots 10]$, а при $t > 10$ $t^{bH} e^{-t} = 0$.

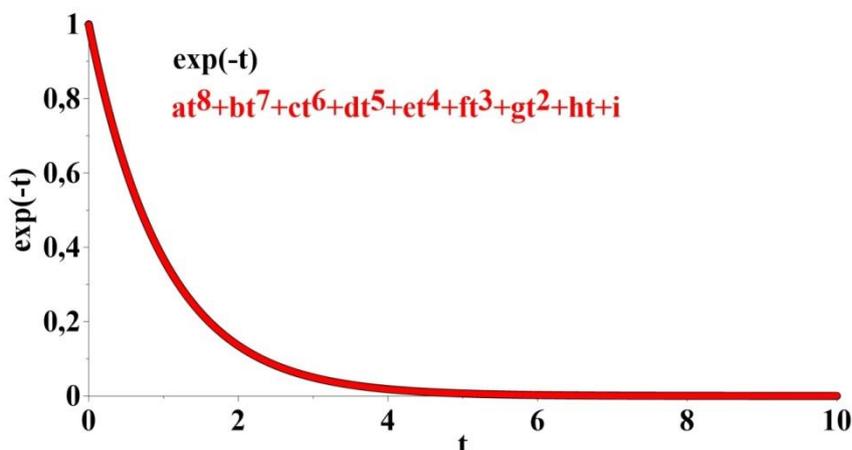


Рисунок 2.7 — Поведение экспоненты с отрицательным аргументом (черная линия) и ее аппроксимация полиномом 8-й степени (красная линия)

Определив границы изменения t , можно получить аналитическое выражение для интеграла фазы, для чего функцию e^{-t} аппроксимируем полиномом восьмой степени:

$$e^{-t}: at^8 + bt^7 + ct^6 + dt^5 + et^4 + ft^3 + gt^2 + ht + i.$$

Данная степень является минимальной, при которой обеспечивается, с одной стороны, максимальное соответствие исходным данным (минимальное сред-

неквадратичное отклонение) и, с другой стороны, наименьшая избыточность дальнейших вычислений. На рисунке 2.7 красным цветом показан полином восьмой степени.

В результате задача сводится к рассмотрению трех случаев. В первом случае оба предела интеграла менее 10. Второй случай — нижний предел менее 10, верхний предел не менее 10; третий случай — оба предела не менее 10 и интеграл равен 0. Выражения для фазы, соответствующие первым двум вариантам, имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega(r) = aN_m F2 H a e^{-br_0} \sum_{i=0}^8 \frac{a_i}{bH + 1 + i} \left(e^{-\frac{r_0 - h_m F2}{H}(bH+1+i)} - e^{-\frac{r - h_m F2}{H}(bH+1+i)} \right), \\ \text{если } h_m F2 < r_0 + H \ln(10); \\ \Omega(r) = aN_m F2 H a e^{-br_0} \sum_{i=0}^8 \frac{a_i}{bH + 1 + i} \left(e^{-\frac{r_0 - h_m F2}{H}(bH+1+i)} - e^{-\frac{r - h_m F2}{H}(bH+1+i)} \right). \\ \text{если } h_m F2 \geq r_0 + H \ln(10); \end{array} \right.$$

Полученные аналитические выражения для $\Omega(r)$ существенно упрощают вычисления, а предложенный подход позволяет контролировать ошибку вычисления.

2.2. Обсуждение результатов

На рисунке 2.8 в качестве примера приведены результаты обработки экспериментальных данных, полученных 17.10.2014. Они наглядно показывают устойчивую работу алгоритма в большом диапазоне значений N_e в максимуме слоя F2 — от $\sim 1 \cdot 10^5$ до $\sim 15 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. На верхних панелях представлены высотно-суточные изменения экспериментально измеренной мощности фарадеевских замираний (слева) и временные профили N_e , вычисленные по модели (справа). На средних панелях представлены высотно-суточные изменения мощности фарадеевских замираний (слева), рассчитанные из модельного профиля N_e , а также, для сравнения, временные профили N_e (справа), рассчитанные по данным Иркутского ионозонда за этот же день. На нижних панелях: слева — временной ход высот максимума $h_m F2$, справа — временной ход критических частот $f_0 F2$, полученный по

данным ИРНР (красный) и Иркутского ионозонда (черный).

Следует обратить внимание на особенности измерений на ионозонде. Он способен проводить измерения только до высоты максимума ионизации. Выше ее проводится экстраполяция N_e на основе методов, приведенных в статье [Reinisch, Huang, 2001]. Ионозонд не в состоянии регистрировать отражения от F-слоя ионосферы в случаях сильного поглощения либо полной экранировки спорадическим E-слоем. В отличие от ионозонда, радар ИР способен проводить диагностику ионосферы выше максимума электронной концентрации. На работу радара не оказывают заметного влияния спорадический E-слой и сильное поглощение в КВ-диапазоне ионозонда.

Результаты, представленные на рисунке 2.8, показывают хорошее соответствие восстановленного и измеренного экспериментально высотного хода фарадеевских замираний мощности сигнала. Высотно-временное поведение N_e , восстановленное по данным ИРНР, имеет схожую структуру с поведением N_e , полученным по данным ионозонда. Сравнение временных вариаций высоты максимума $h_m F2$ и критической частоты $f_0 F2$, полученных вышеизложенным методом, с данными Иркутского ионозонда также показывает их хорошее согласие.

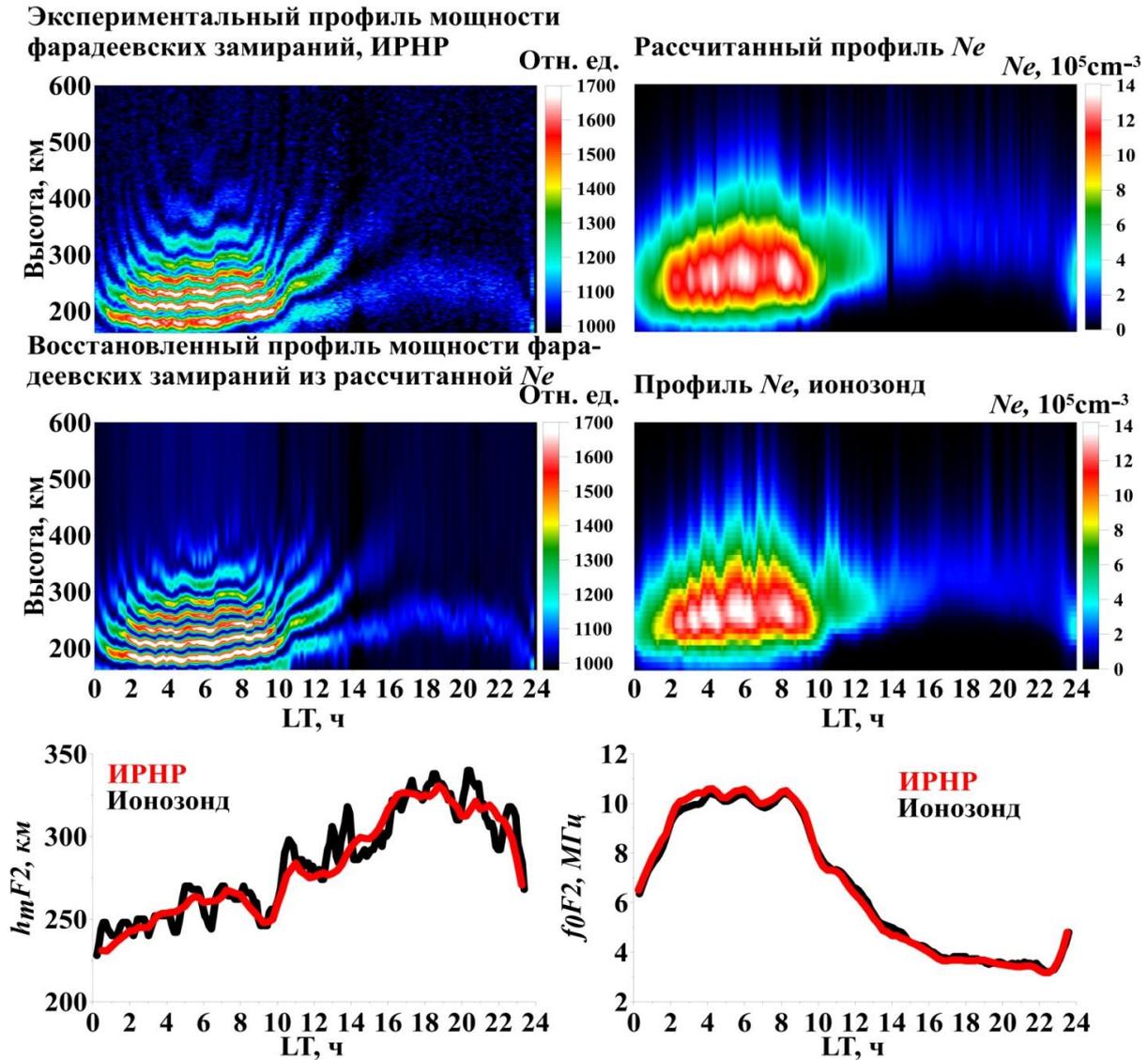


Рисунок 2.8 — На верхних панелях: слева — высотно-временной экспериментально измеренный профиль фарадеевских замираний 17.10.2014; справа — рассчитанный по нему профиль N_e . На средних панелях: слева — профиль фарадеевских замираний, восстановленный из рассчитанного профиля N_e ; справа — профиль N_e , полученный по данным Иркутского ионозонда за то же число. На нижних панелях: слева — временной ход высот максимума $h_m F_2$; справа — временной ход критических частот $f_0 F_2$, полученный по данным ИРНР (красный) и Иркутского ионозонда (черный) для 17.10.2014

В стандартном режиме радар регистрирует высотные профили рассеянных сигналов на двух частотах поочередно, что соответствует измерению параметров ионосферной плазмы в двух различных направлениях. Вместе с данными Иркут-

ского ионозонда получаются три независимых профиля N_e , измеренных в пространственно-разнесенных точках. Схема расположения инструментов показана на верхней панели рисунка 2.9.

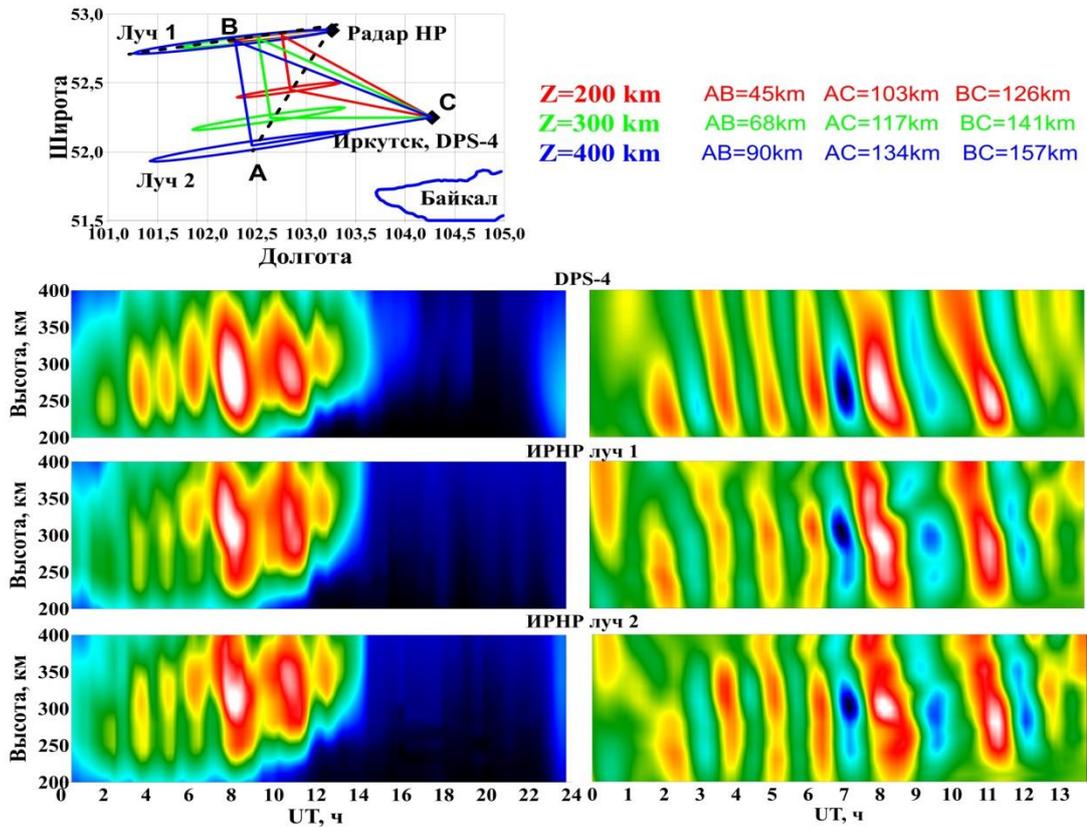


Рисунок 2.9 — Схема расположения инструментов ИСЗФ СО РАН (вверху) и измеренные с их помощью динамические характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (внизу)

Луч 1 (рисунок 2.9) соответствует первой частоте (как правило, 154 МГц), луч 2 — второй (158 МГц). Взаимное расположение инструментов образует базу с характерным масштабом порядка 100 км и позволяет определять динамические характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

Несмотря на то, что изменения N_e с высотой описываются простой моделью, точность расчетов, проведенных с помощью созданного автором метода, оказалась достаточной для разработки алгоритма идентификации волновых возмущений, основанного на разнице значений N_e , полученных на двух лучах ИРНР и ионозонде вертикального зондирования.

С помощью приведенного выше алгоритма определения высотного хода N_e по фарадеевским замираниям данные регулярных наблюдений на ИРНР обрабатываются в режиме реального времени. Данный алгоритм использовался также для обработки в автоматизированном режиме длинных рядов данных суммарной длительностью свыше 8000 часов регулярных наблюдений (с 2007 г.). Большой массив обработанных данных использовался различными исследовательскими командами для решения таких научных задач, как статистический анализ характеристик ПИВ [Medvedev et al., 2013, 2015, 2017], поиск особенностей поведения $N_e(r)$ среднеширотной ионосферы [Алсаткин, Медведев, Ратовский, 2015], расчет скорости меридионального ветра с использованием двулучевой методики [Shcherbakov et al., 2015].

Анализ характеристик ПИВ показал, что параметры и поведение ПИВ, зарегистрированных в 23-м и 24-м цикле солнечной активности, в основном согласуются с представлениями о распространении внутренних гравитационных волн (ВГВ) в верхней атмосфере. Благодаря тому, что значения N_e , полученные с помощью ионозонда DPS-4 и ИРНР, хорошо согласованы, стало возможно создание алгоритмов вычисления разности фаз, фазовой скорости и трехмерного вектора скорости ПИВ, наблюдаемых на ионозонде DPS-4 и двух лучах радара [Medvedev et al., 2009; Ratovsky et al., 2008]. С помощью созданных алгоритмов удалось получить значимую статистику характеристик ПИВ, разработать алгоритм вычисления скорости нейтрального ветра, подтвердить фильтрацию ВГВ нейтральным ветром [Medvedev et al., 2015, 2017]. Как можно видеть из работы [Medvedev et al., 2013], распределение длин волн ПИВ резко обрывается на длине волны ~ 50 км. Можно сделать вывод, что предложенная параметрическая модель позволяет детектировать ПИВ с длиной волны от 50 км.

Полученные по новому алгоритму данные N_e использовались в качестве входных параметров при вычислении скорости меридионального ветра по двулучевой методике. Это дало возможность впервые сделать расчет ветров по данным ИРНР и описать морфологические особенности поведения меридионального нейтрального ветра. Проведено сравнение данных полуэмпирических моделей с

вычисленными направлениями и скоростями ветров, которое показало, что между ними наблюдается хорошее соответствие. Аналогичные результаты получены при сравнении нейтральных меридиональных ветров с суточным ходом $h_m F2$ [Shcherbakov et al., 2015].

На основе обработанных длинных непрерывных рядов данных для четырех сезонов получены высотно-суточные вариации усредненной за месяц N_e в высотном интервале 180–700 км в условиях низкой и умеренной солнечной активности. Полученные усредненные значения N_e использовались в качестве эталона спокойной ионосферы при сравнительном анализе с данными моделирования по Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1988; Намгаладзе и др., 1990; Korenkov et al., 1998; Klimenko, Klimenko, Bryukhanov, 2006] и International Reference Ionosphere (IRI) [Bilitza, Reinisch, 2008, Bilitza, 2014]. Обнаружено, что выявленные по данным ИРНР особенности поведения N_e лучше согласуются с ГСМ ТИП, чем с IRI. Наблюдавшаяся на ИРНР структура поведения N_e на высотах 300 км и более для осеннего (три пика: дневной, вечерний, утренний) и весеннего сезонов (четыре пика: ночной, утренний, дневной и вечерний) в период низкой солнечной активности детально не воспроизводится ни одной моделью. Для весеннего сезона ГСМ ТИП частично показывает утренний и дневной пики [Zherebtsov et al., 2017].

Триста тридцать семь профилей из полученного массива высотно-суточных вариаций N_e были отобраны для сравнения с данными модели IRI, спутника COSMIC (радиозатменные измерения) и ионозонда [Ratovsky et al., 2017].

Сопоставление параметров внутренней ионосферы ($N_m F2$ и интегральная электронная концентрация до высоты максимума для различных сезонов и уровней солнечной активности), полученных с использованием метода некогерентного рассеяния и радиозатменного метода, показало, что различие между данными может рассматриваться как ошибка радиозатменного метода. При этом систематическая ошибка намного меньше среднеквадратичного отклонения, которое, в свою очередь, в ~ 1.5 раза меньше среднеквадратичной ошибки эмпирической модели

IRI. Сопоставление параметров внешней ионосферы (интегральная электронная концентрация выше высоты максимума) показало, что данные радиозатменного метода превышают данные метода некогерентного рассеяния, а данные эмпирической модели IRI превышают данные радиозатменного метода. Среднеквадратичная ошибка эмпирической модели IRI больше, чем среднеквадратичное отклонение между данными радиозатменного метода и метода некогерентного рассеяния.

2.3. Выводы

Разработан и успешно опробован новый алгоритм получения высотного хода N_e по данным ИРНР. Алгоритм обладает следующими достоинствами:

- 1) работа без участия оператора;
- 2) устойчивость в диапазоне значений $N_m F2$ от $2 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$ см⁻³;
- 3) работа в реальном времени;
- 4) учет высотной зависимости магнитного поля Земли;
- 5) описанный метод оптимизации вычисления позволил получить аналитические выражения для $\Omega(r)$ и контролировать ошибку его вычисления.

**Глава 3. Особенности поведения ионосферы
над Восточно-Сибирским регионом
по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния
при низкой и умеренной солнечной активности**

Для решения задачи прогнозирования и предсказания, помимо экспериментальных данных, широко применяются разнообразные эмпирические, полуэмпирические и теоретические модели ионосферы. Несмотря на их способность воспроизводить с приемлемой точностью поведение основных ионосферных параметров, им свойственны систематические ошибки, которые вызваны упрощениями, вносимыми в модель из-за отсутствия полных знаний о природе процесса.

Экспериментальные исследования ионосферы являются важной составляющей в решении современных как теоретических, так и прикладных задач. Получаемые фундаментальные знания служат основой теоретических работ, способствуют совершенствованию существующих и построению новых моделей (эмпирических, ассимиляционных и физических) [Huba et al., 2014], позволяющих прогнозировать состояние ионосферы в различных гелиогеофизических условиях [Иванов-Холодный, Михайлов, 1980; Daniell et al., 1995; Bilitza, 2001; Huba et al., 2014; Zolesi, Cander, 2014].

С позиции научного исследования ионосфера является сложным объектом с большим количеством разнообразных внутренних физических и химических процессов [Акасофу, Чепмен, 1975; Schunk, Nagy, 2009; Brekke, 2013], обусловленных потоком энергии, поступающей как снизу, от атмосферы, в виде приливов, планетарных и внутренних гравитационных волн, так и сверху, со стороны Солнца и околоземного космического пространства, в виде электромагнитного и корпускулярного излучения [Бауэр, 1976; Rees, 1989; Kelley, Heelis, 2009]. Данные процессы подвержены сильным пространственно-временным вариациям, приво-

дующим к значительным изменениям параметров ионосферы с высотой, в зависимости от гелиогеофизических условий.

Как было сказано выше, новый алгоритм восстановления высотного профиля N_e впервые позволил обработать в автоматическом режиме большой объем данных, измеренных на ИРНР начиная с 2007 г. В общей сложности обработано более 4000 часов регулярных наблюдений, включавших все сезоны при низкой и умеренной солнечной активности. Накопленный материал позволил впервые исследовать сезонные особенности поведения фоновой ионосферы над Восточно-Сибирским регионом, которые не так хорошо освещены в литературе, на основе статистического анализа долговременных наблюдений высотного хода $N_e(r)$. Стоит уточнить, что исследования особенностей указанного региона на основе длительных наблюдений проводились и ранее. Одной из первых таких работ является [Ratovsky, Oinats, 2011]. В ней исследовалось временное поведение среднемесячных значений следующих параметров слоя F2: максимума электронной концентрации N_mF2 (по данным Иркутского ионозонда), высоты максима h_mF2 и толщины нижней части B_0 . По результатам исследования создана локальная эмпирическая модель $N_e(r)$ в ионосфере для Иркутска — LEM1. Модель призвана дополнить среднемесячные климатологические характеристики ионосферы, предоставляемые глобальными моделями, например IRI-2007 [Bilitza, Reinisch, 2008], за счет учета региональных особенностей распределения ионосферной плазмы, которые невозможно детально воспроизвести в глобальной модели.

Непосредственно исследование поведения высотно-временных значений параметров ионосферы по данным ИРНР проведено в работе [Shpynev et al., 2006], которая посвящена сравнению данных за период 1998–2003 гг., полученных на ИРНР и по модели IRI-2001. Главной особенностью работы является анализ только одного спокойного дня в каждом сезоне ввиду ограниченного числа измерений.

Небольшая статистика измерений параметров ионосферы над Восточно-Сибирским регионом, особенно внешней ее части, на которой основывались предыдущие исследования, подчеркивает актуальность настоящей диссертацион-

ной работы, поскольку за последнее время удалось собрать объем данных, который дает возможность анализировать данные продолжительностью до месяца для каждого сезона.

Данные, полученные в ходе долговременных наблюдений на РНР, играют ключевую роль в исследованиях поведения параметров ионосферной плазмы по сезонам и уровням солнечной активности [Zhang et al., 2005], в выявлении трендов параметров в зависимости от гелиогеофизических условий на основе усредненных по сезону данных [Zhang et al., 2004; Lei et al., 2006; Cai et al., 2007; Sojka et al., 2009]. Благодаря длинным рядам данных, полученных на РНР, были исследованы особенности поведения полярной ионосферы [Cai et al., 2007]. О важности исследований данного региона говорит создание специальной программы, нацеленной на продолжительные измерения на РНР,—IPY [Sojka et al., 2009]. На основе данных НР были изучены экваториальная аномалия и главный ионосферный провал [Abdu et al., 1990; Hedin et al., 2000; Voiculescu et al., 2006], а также апробировались модели, например, было исследовано влияние на описываемый слоем Чепмена высотный ход N_e [Luan et al., 2006] фактора формы слоя Чепмена. Сделан вывод, что фактор формы варьирует в зависимости от местного времени, времени года, активности Солнца и широты. Кроме того, фактор формы демонстрирует отход от широко используемой величины 0,5, за исключением ночного времени. Данные выводы будут актуальными при исследовании областей, для моделирования которых используется слой Чепмена, например, с помощью ионозондов.

Как видно из приведенного краткого перечня работ, непрерывные исследования ионосферы методом НР не только не теряют актуальности, но и, наоборот, приобретают еще большую значимость, поскольку позволяют решать фундаментальные и прикладные задачи. Данные измерений на РНР представляют незаменимую основу как для совершенствования существующих моделей ионосферы, так и для создания новых [Zhang, Holt, 2004; Zhang et al., 2005; Lei et al., 2006; Shpynev et al., 2006; Zolesi, Cander, 2014]. Несмотря на существенное повышение качества информации, предоставляемой моделями ионосферы, они имеют систематические погрешности, связанные либо с введенными в модель упрощениями,

либо с не наблюдавшимися ранее в этом регионе явлениями. Для улучшения качества моделей необходимы новые экспериментальные данные. В качестве примера можно привести модель IRI, постоянно обновляемую и улучшаемую [Lei et al., 2007]. Не менее важным направлением является текущее предсказание состояния ионосферы, необходимое различным службам, например, для расчета ионосферных поправок при определении радиолокационной дальности до космических объектов и т.д.

В данной главе представлены результаты исследования морфологических особенностей поведения N_e для различных сезонов (лето, осень, зима и весна) и двух уровней солнечной активности (низкая и умеренная) по данным ИРНР за период с 2007 по 2014 г. Представлены результаты сравнения с данными Иркутского ионозонда DPS-4, а также с моделями ГСМ ТИП и IRI-2012. Для Восточно-Сибирского региона исследование морфологических особенностей электронной концентрации выше высоты максимума впервые проведено на большом ряде данных, что обеспечивает его научную ценность и новизну.

3.1. Анализируемые данные

В таблице 3.1 представлены временные периоды получения данных, послуживших основой для исследования морфологических особенностей поведения N_e . Индексы $F10.7$ и A_p соответствуют средним за период измерений значениям.

В ионосферных исследованиях данные, измеренные в условиях низкой солнечной активности, представляют отдельный интерес. В этом случае минимизируется воздействие внешних факторов на ионосферу, предоставляя возможность проверить с большей точностью существующие представления о регулярных суточных и сезонных вариациях высотной структуры параметров ионосферы. С 2007 по 2009 г. значения индекса $F10.7$ не превышали 75 с.е.п. (солнечная единица потока радиоизлучения). В истории ионосферных измерений указанный период считается уникальным, поскольку крайне низкая активность Солнца распространялась на все сезоны.

Таблица 3.1. Периоды непрерывных измерений на ИРНР

Низкая солнечная активность				Умеренная солнечная активность			
Сезон	Период	$F_{10.7}$	A_p	Сезон	Период	$F_{10.7}$	A_p
зима	16.01–16.02.2011	80	5,94	зима	01.01–12.01.2014	180	7,2
лето	05.06–24.06.2007	74	6,5	лето	22.06–01.07.2013 28.06–01.07.2014	132	12,5
весна	01.04–14.04.2009	70	5,2	весна	05.04–22.04.2012	110	8,1
осень	18.09–25.09.2008 27.09–30.09.2008	68	7,5	осень	15.10–30.10.2014	180	11

3.2. Результаты исследования высотно-временного поведения электронной концентрации в период низкой и средней солнечной активности 2007–2014 годов

На рисунках 3.1–3.4 представлены результаты исследования высотно-временного поведения N_e для всех сезонов. На всех рисунках приведены данные, полученные усреднением по дням в пределах одного сезона. Левая колонка соответствует низкой солнечной активности, правая — умеренной. Верхняя панель показывает суточные вариации N_e на высотах 200, 300 и 400 км, нижняя панель — суточно-высотные вариации N_e , нормированные на максимум суточно-высотных вариаций.

Результаты для зимнего сезона представлены на рисунке 3.1. Зимой в период низкой солнечной активности ночные значения N_e превышают дневные, начиная с высот более 340 км. На высотах 280–350 км в суточном ходе N_e наблюдаются ночной и дневной максимумы. На данных высотах дневной максимум в ~ 1.5 раза больше ночного при низкой солнечной активности и в ~ 3.5 раза при умеренной. Выше 350 км оба максимума N_e становятся сопоставимыми. Заметим, что зимний ночной максимум наблюдается также в суточных вариациях $N_m F_2$ [Ratovsky, Oinats, 2011]. В работах [Potekhin, 2002; Mikhailov et al., 2000] данный эффект связывается с взаимодействием ночной ионосферы с нейтральным ветром и

магнитосопреженными точками ионосферы. Нейтральный ветер южного направления не дает опуститься ионосферной плазме в нижние слои ионосферы и рекомбинировать там. При этом в сопряженной ионосфере происходят нагрев плазмы и перетекание ее части через магнитосферный канал. Оба этих процесса ведут к повышению N_e .

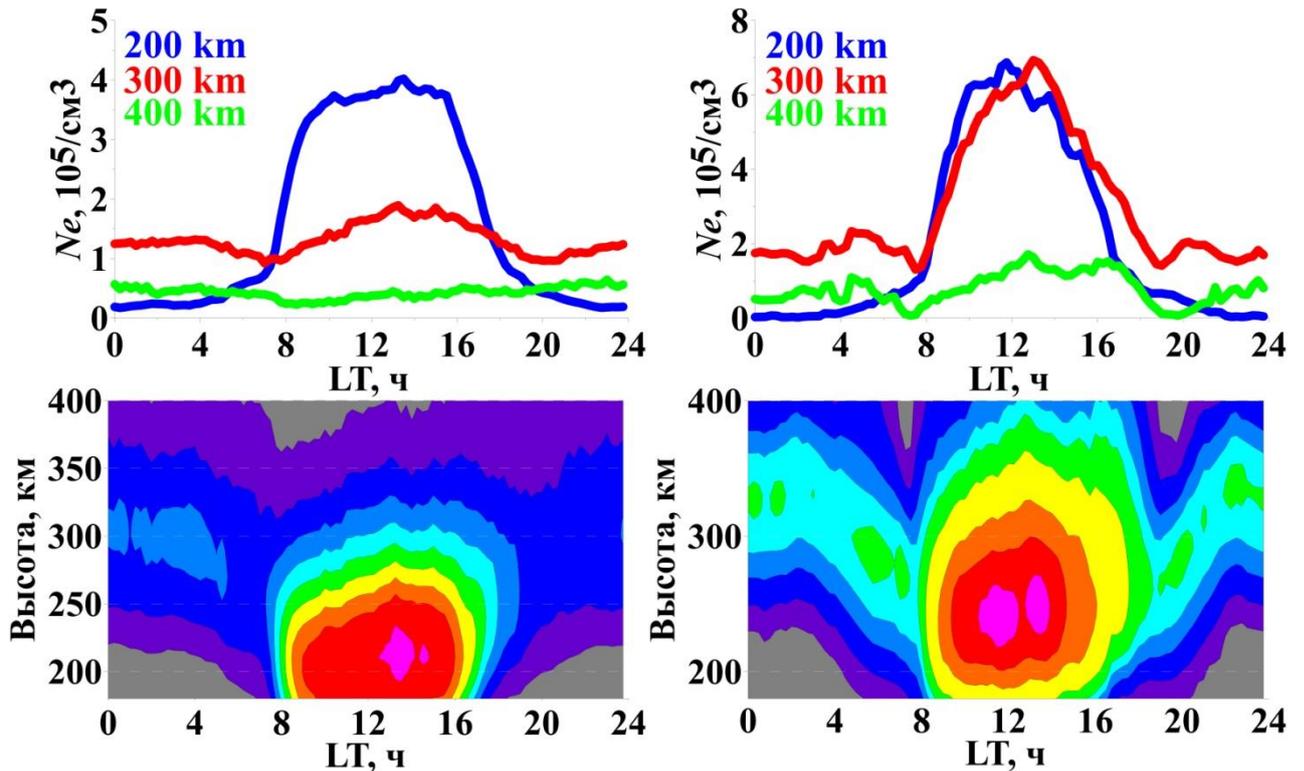


Рисунок 3.1 — Зимний сезон. Слева — данные для условий низкой солнечной активности, справа — для умеренной. Верхние панели — суточные вариации N_e на высотах 200, 300 и 400 км; нижние панели — суточно-высотные вариации N_e , нормированные на максимум суточно-высотных значений N_e

Результаты для летнего сезона представлены на рисунке 3.2. Независимо от уровня солнечной активности, во временном ходе N_e наблюдается вечернее возрастание электронной концентрации, начиная с высоты ~ 280 км. Наибольшее отношение вечернего максимума N_e к дневному на высоте ~ 300 км составляет 1.6 при низкой солнечной активности и 1.4 при умеренной. При умеренной солнечной активности вечерний максимум N_e первоначально наблюдается на больших

высотах (~ 400 км), а затем смещается на более низкие высоты за период времени ~ 30 мин. Данная особенность слабо выражена в условиях низкой солнечной активности. Летний вечерний максимум наблюдается также в суточных вариациях $N_m F2$, измеренных на Иркутском ионозонде [Ratovsky, Oinats, 2011].

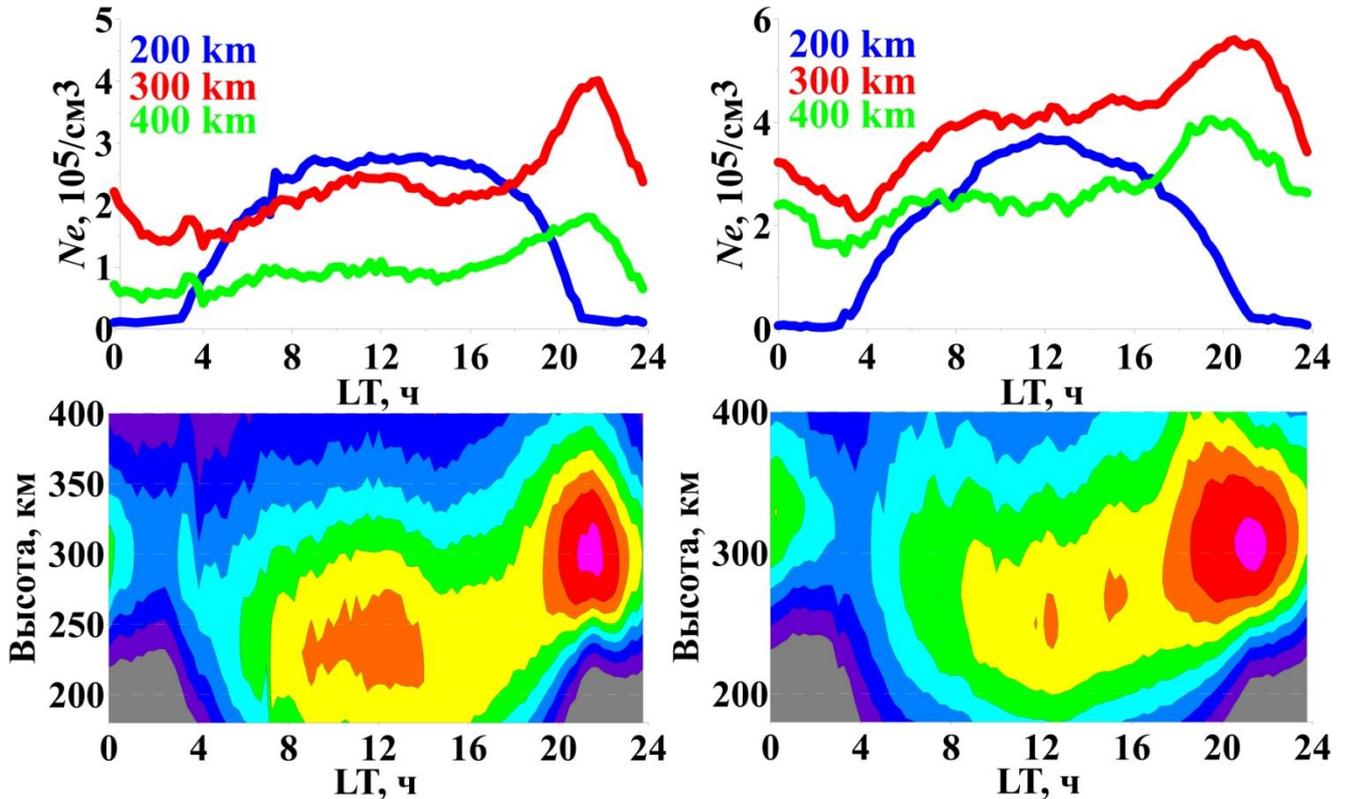


Рисунок 3.2 — Летний сезон. Положение панелей то же, что на рисунке 3.1

Результаты наблюдений в весенний период представлены на рисунке 3.3. Наибольшего внимания заслуживает временной ход N_e в весенний сезон в условиях низкой солнечной активности, представляющий собой квазипериодическую структуру с ночным, утренним, дневным и вечерним максимумами, тогда как при умеренной солнечной активности во временном ходе N_e наблюдаются доминирующий дневной максимум на высоте 300 км и вечерний максимум на высоте 400 км.

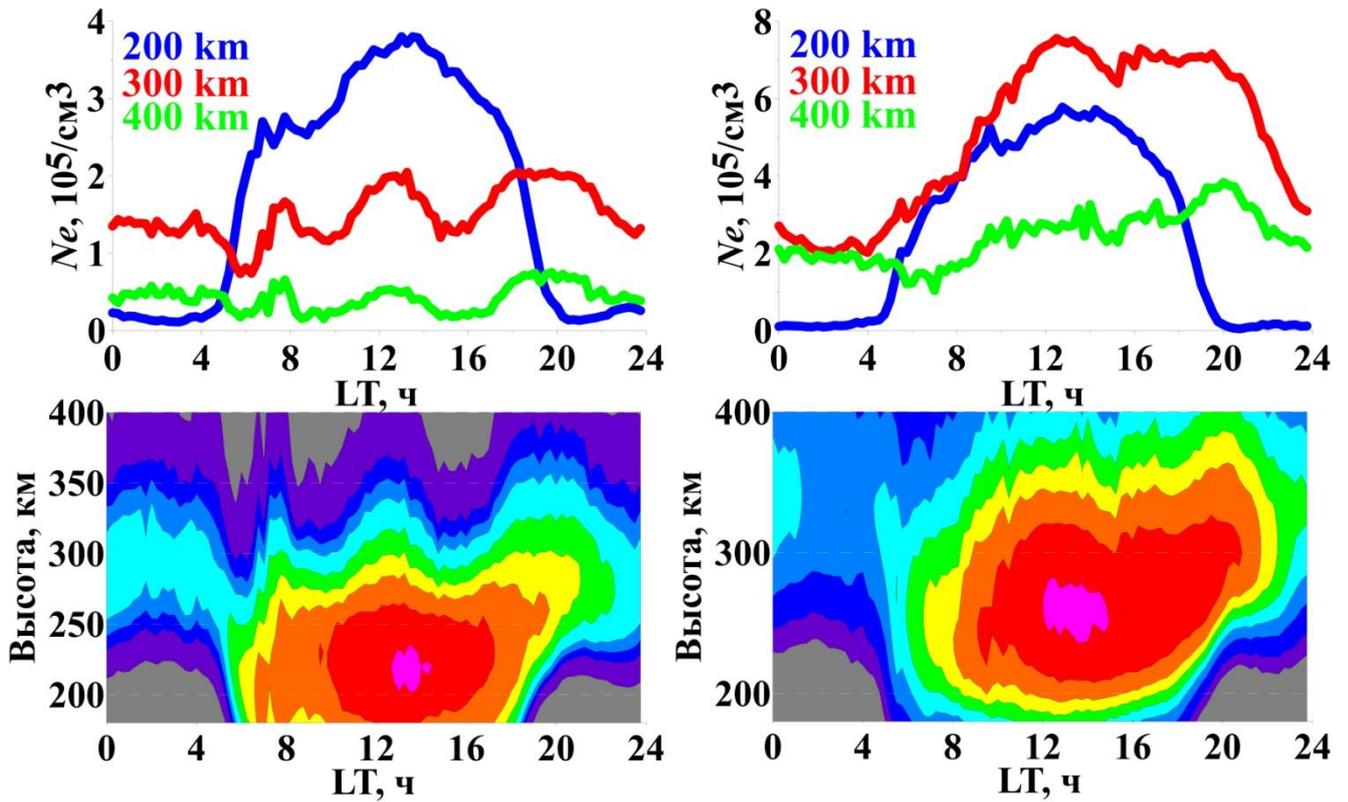


Рисунок 3.3 — Весенний сезон. Положение панелей то же, что на рисунке 3.1

На рисунке 3.4 представлены результаты наблюдений, проведенных в осенний период. При низкой солнечной активности квазипериодические структуры во временном ходе N_e в осенний и в весенний периоды сопоставимы. Различие состоит только в отсутствии утреннего максимума в осенний период. В условиях умеренной солнечной активности преобладающим максимумом N_e на всех высотах является дневной.

В данной работе механизм образования квазипериодической структуры с более чем двумя максимумами N_e не рассматривается. Тем не менее стоит указать, что причинами образования подобных структур могут быть ветер либо вариации магнитного поля [Huba, 2003].

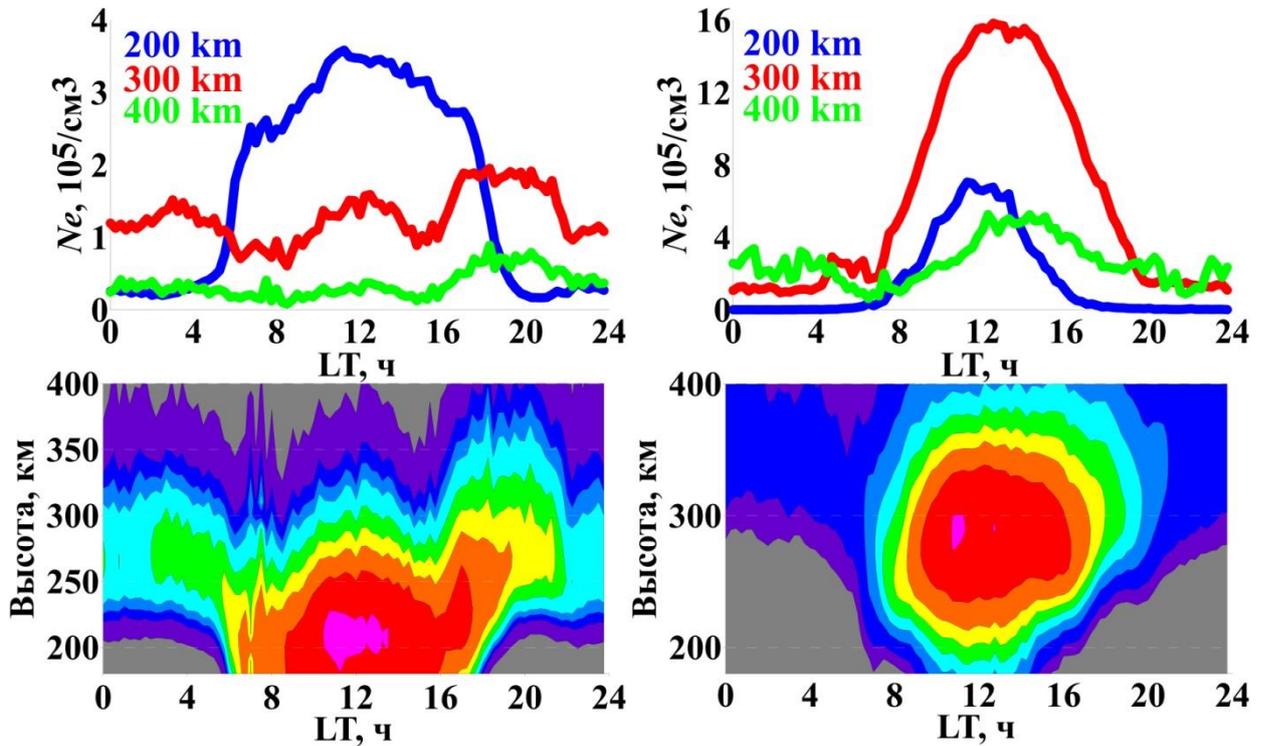


Рисунок 3.4 — Осенний сезон. Положение панелей то же, что на рисунке 3.1

На рисунке 3.5 показаны высотные зависимости амплитуд гармоник с периодами 24 часа, 12 часов и 8 часов (четыре сезона и два уровня солнечной активности). Амплитуда гармоники представлена в процентах относительно среднего значения электронной концентрации. Амплитуда гармоники с периодом 24 часа является наибольшей при умеренной солнечной активности для всех рассмотренных сезонов, кроме зимы, когда амплитуда гармоники с периодом 12 часов является наибольшей для высот от 330 до 380 км. При низкой солнечной активности наблюдается другая ситуация: зимой на высотах 310–340 км начинает преобладать полусуточная гармоника; летом на высотах 280–400 км амплитуды полусуточной и суточной гармоники становятся сопоставимыми; весной на высотах 350–400 км и осенью на высотах 280–320 км амплитуды третьсуточной и суточной гармоники сопоставимы.

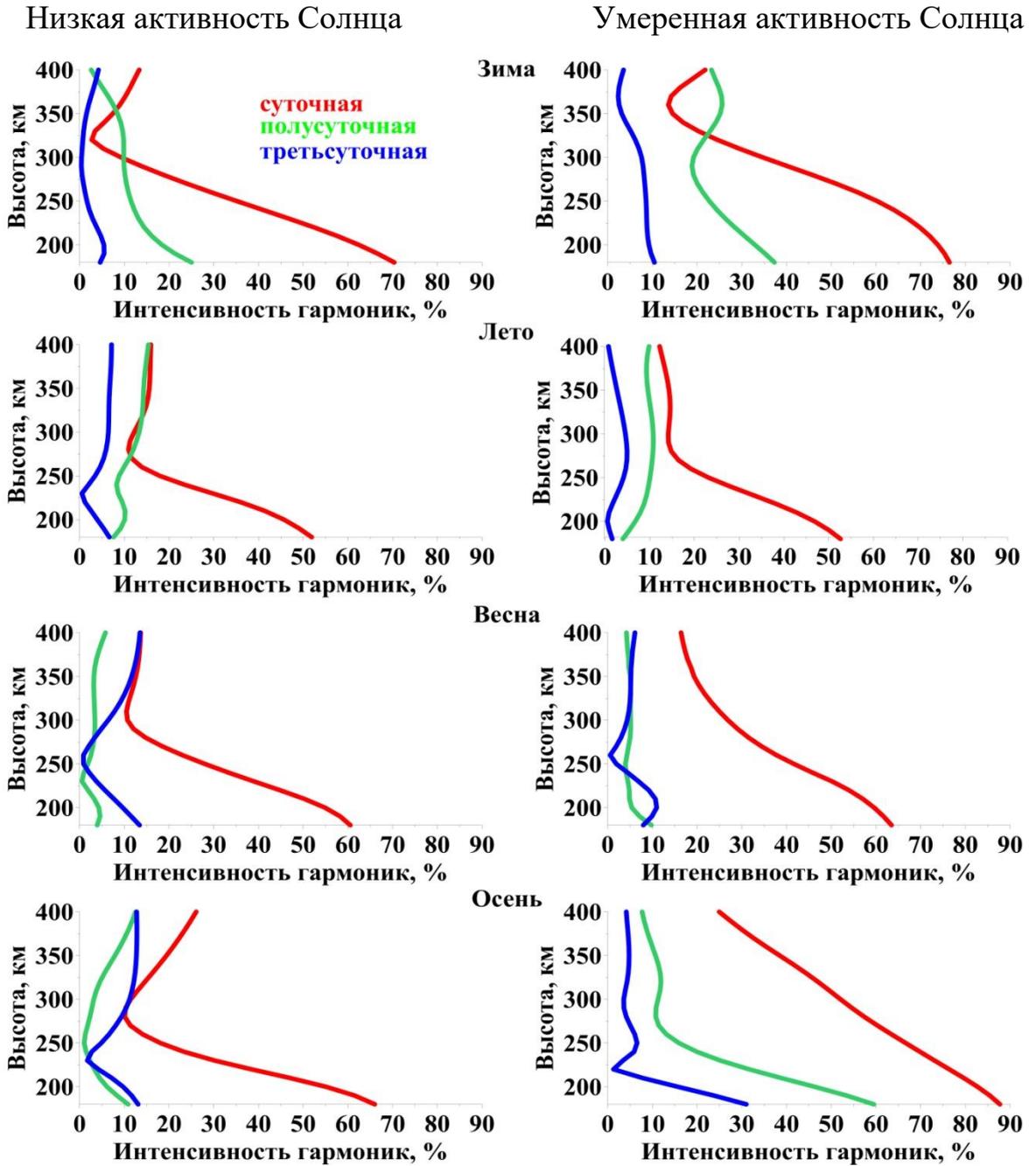


Рисунок 3.5 — Высотный ход относительных амплитуд суточной, полусуточной и третьесуточной гармоник

На рисунке 3.6 представлено высотно-суточное поведение фазы суточной гармоник для всех сезонов в условиях низкой и умеренной солнечной активности.

Низкая активность Солнца

Умеренная активность Солнца

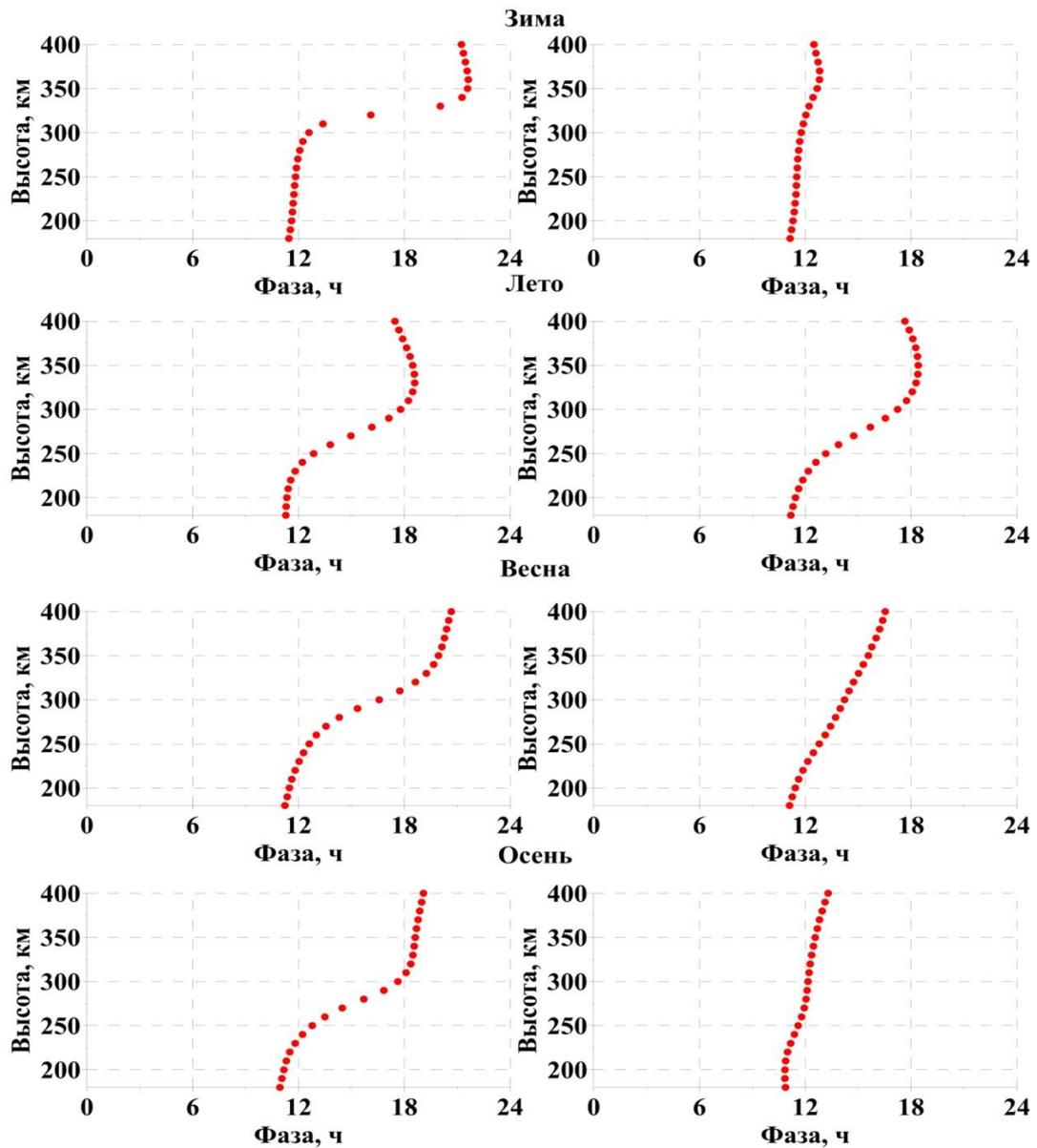


Рисунок 3.6 — Высотно-суточное поведение фазы суточной гармоника для различных сезонов в условиях низкой (слева) и умеренной (справа) солнечной активности

Анализ высотно-суточного поведения фазы суточной гармоника показал следующее. На высотах ниже 250 км фаза суточной гармоника соответствует ~12 LT (дневной максимум). При умеренной солнечной активности смена фазы суточной гармоника с высотой наблюдается только в летний период. Для этого периода характерна смена дневного максима N_e на вечерний максимум в 18 LT на высотах более 330 км. При низкой солнечной активности смена фазы суточной

гармоники с высотой наблюдается во все сезоны. Зимой происходит смена фазы на ~ 22 LT на высотах более 310 км, характеризующая появление ночного максимума N_e . Смена фазы на 18 LT на высотах более 330 км в летний сезон вызвана появлением вечернего максимума N_e , так же как и при умеренной солнечной активности. Появление вечернего максимума N_e приводит к изменению фазы весной на 19 LT на высотах выше 320 км, а осенью на ~ 18 LT на высотах больше 300 км.

3.3. Сравнение с данными Иркутского ионозонда DPS-4

Суточные вариации электронного содержания, полученные усреднением по дням в пределах одного сезона по данным ИРНР (красная кривая) и ионозонда (синяя кривая), для четырех сезонов при низкой солнечной активности приведены на рисунке 3.7: на верхних панелях — суточные вариации электронного содержания в диапазоне высот 180–250 км (нижняя ионосфера); на нижних панелях — суточные вариации электронного содержания в диапазоне высот 250–600 км (верхняя ионосфера).

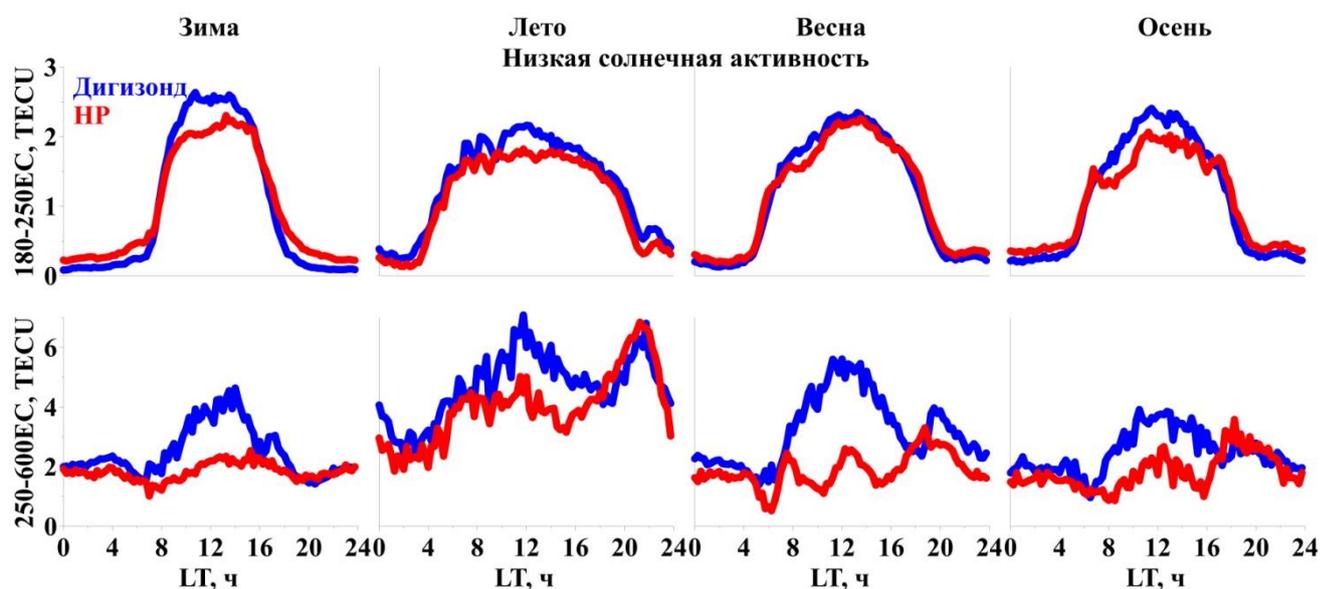


Рисунок 3.7 — Суточные вариации электронного содержания при низкой солнечной активности для зимнего, летнего, весеннего и осеннего сезонов: вверху — интервал высот 180–250 км, внизу — интервал высот 250–600 км; данные ИРНР — красная кривая; данные ионозонда — синяя

Суточные вариации электронного содержания, полученные по данным ИРНР и ионозонда, для условий умеренной солнечной активности приведены на рисунке 3.8. Панели расположены аналогично панелям рисунка 3.7.

Зимний сезон. Суточный ход электронного содержания в нижней ионосфере имеет один дневной максимум. В то же время в суточном ходе электронного содержания в верхней ионосфере наблюдаются дневной и ночной максимумы, которые сопоставимы при низкой солнечной активности, тогда как при умеренной солнечной активности дневной максимум значительно превосходит ночной. Сравнение данных двух инструментов показало, что наилучшее согласие наблюдается для внутренней ионосферы при умеренной солнечной активности, когда высота максимума больше либо равна 250 км. При низкой активности высота максимума существенно ниже 250 км, что приводит к различиям в интегральной электронной концентрации, полученной различными методами. Для внешней ионосферы интегральная электронная концентрация выше по измерениям на ионозонде, чем по измерениям на радаре, при низкой солнечной активности. При умеренной солнечной активности имеет место обратное соотношение.

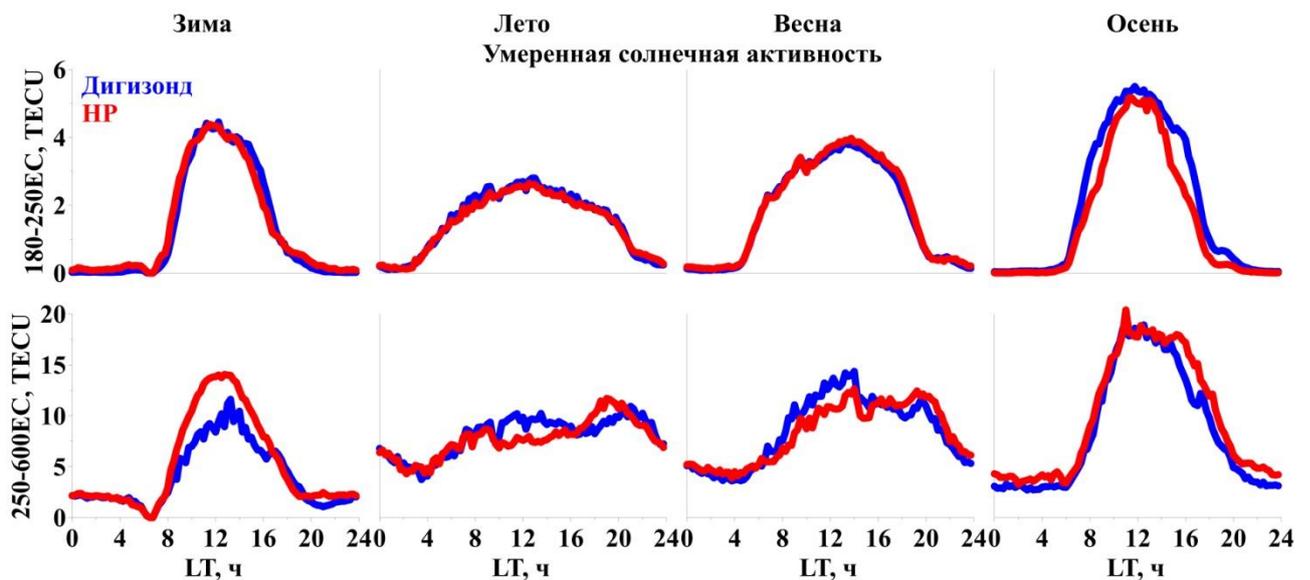


Рисунок 3.8 — Умеренная солнечная активность. Положение панелей то же, что на рисунке 3.7

Летний период. В суточном ходе электронного содержания присутствует дневной максимум в нижней ионосфере и вечерний в верхней ионосфере. В летний период поведение электронного содержания нижней ионосферы аналогично по данным двух инструментов и сходно с отмеченным для зимнего периода. По сравнению с зимним периодом, летом вариации электронного содержания верхней ионосферы по данным двух инструментов лучше согласуются при умеренной солнечной активности.

Весенний период. При низкой солнечной активности суточный ход электронного содержания верхней ионосферы имеет многопиковую структуру, в отличие от суточного хода электронного содержания нижней ионосферы, в котором наблюдается только дневной максимум. Из рисунка 3.8 можно видеть хорошее согласие указанных параметров, полученных радаром и ионозондом, для внутренней ионосферы и удовлетворительное согласие для внешней ионосферы при умеренной солнечной активности. Существенное расхождение параметров, полученных радаром и ионозондом, имеет место для внешней ионосферы при низкой солнечной активности, когда данные ионозонда не демонстрируют суточных вариаций с несколькими максимумами, наблюдаемых по данным радара.

Осенний период. Поведение электронного содержания в осенний и весенний периоды схоже. Различие заключается в наличии трех пиков в суточном ходе электронного содержания верхней ионосферы при низкой солнечной активности в осенний период. При этом в осенний период данные двух инструментов показывают схожие суточные вариации N_e .

3.4. Сравнение с Глобальной самосогласованной моделью термосферы, ионосферы и протоносферы и Международной справочной моделью ионосферы IRI

Прежде чем перейти к сравнению полученных нами результатов с ГСМ ТИП и IRI, отметим, что обе модели показывают, что на высотах ниже 230 км суточный ход N_e согласуется с суточным ходом косинуса зенитного угла Солнца для

всех сезонов и уровней солнечной активности. Суточный ход N_e , полученный на ИРНР, находится в хорошем качественном согласии с данными моделей.

На рисунке 3.9 представлены результаты, полученные при низкой солнечной активности. В ряду **a** приведены пространственно-временные изменения усредненных значений $N_e(r)$, нормированных на суточно-высотный максимум, в рядах **b** и **c** — пространственно-временные изменения $N_e(r)$ соответственно для моделей ГСМ ТИП и IRI-2012. Столбец **1** соответствует зимнему сезону, **2** — летнему, **3** — весеннему и **4** — осеннему.

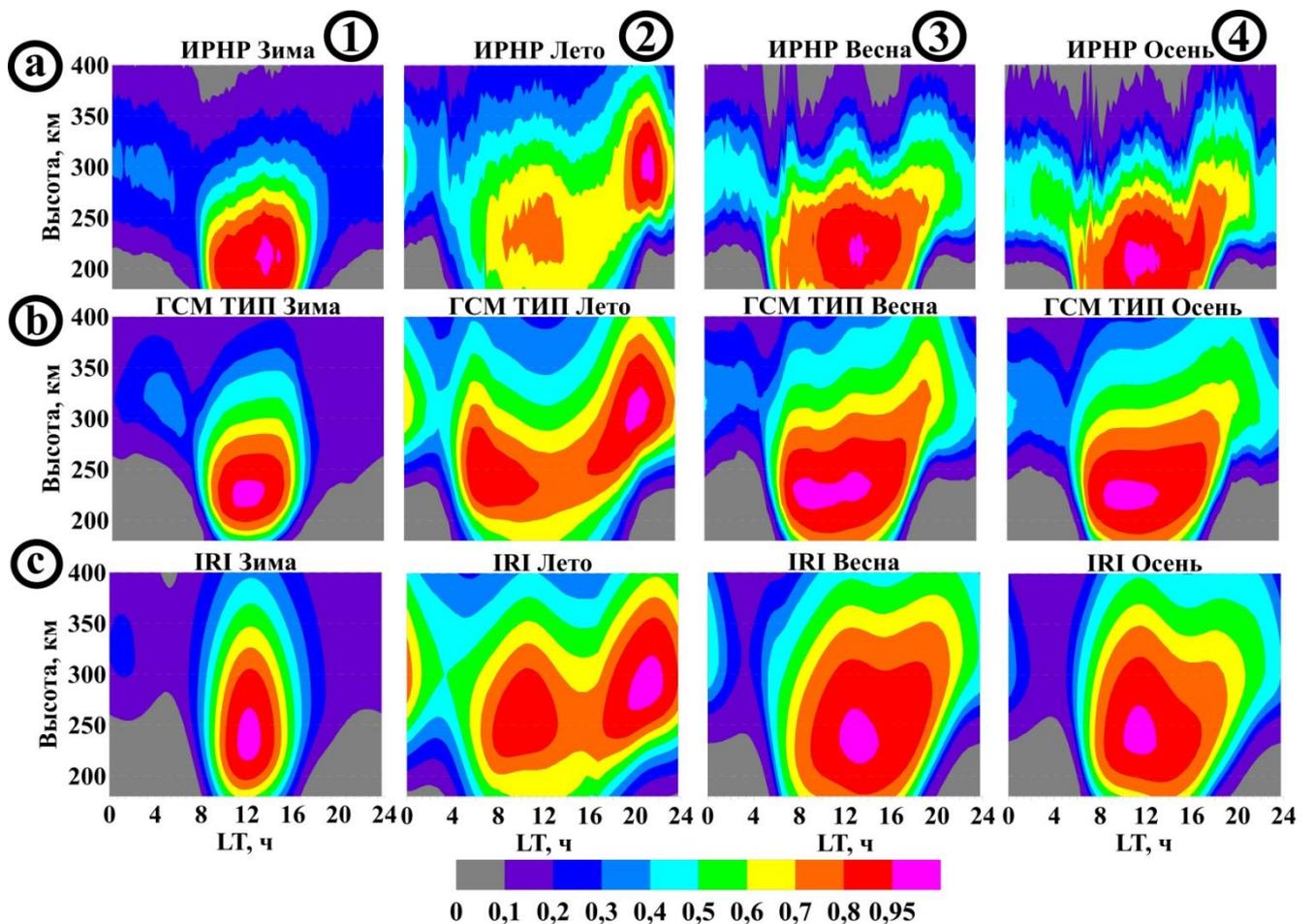


Рисунок 3.9 — Суточно-высотные вариации N_e , нормированные на максимум суточно-высотных вариаций по данным ИРНР (ряд **a**), ГСМ ТИП (ряд **b**) и IRI-2012 (ряд **c**). Столбцы 1, 2, 3 и 4 соответствуют зимнему, весеннему, летнему и осеннему сезонам

Анализ свидетельствует, что обе рассматриваемые модели показывают дополнительный максимум N_e в зимний период в послеполуночные часы на высоте 300 км. Высотно-суточный ход N_e по данным ИРНР показывает близость дневных значений N_e к ночным на высотах 350 км и выше. IRI прогнозирует, что дневные значения N_e на высоте 350 км примерно в три раза больше ночных. Результаты моделирования ГСМ ТИП с большей точностью воспроизводят структуру N_e на высотах более 300 км, наблюдаемую по данным ИРНР. В частности, N_e на высоте 350 км около полудня всего в 1,2 раза больше, чем в 03:00 LT.

Летом обе модели воспроизводят вечерний максимум N_e (21:00–21:45 LT) на высоте 290–300 км — так называемую среднеширотную летнюю вечернюю аномалию.

Для весеннего и осеннего сезонов актуальной является проверка возможности воспроизведения многопиковой структуры временного хода N_e на высотах более 300 км.

Модель ГСМ ТИП для рассматриваемых сезонов на высотах 300 км и выше показывает доминирующий вечерний пик N_e (18:00 LT), тогда как модель IRI дает близкие значения для всего периода 12:00–18:00 LT весной и доминирующий дневной максимум осенью. Ни одна модель не воспроизводит точно многопиковую структуру N_e , наблюдаемую на ИРНР, но для весеннего периода ГСМ ТИП показывает утренние и дневные максимумы N_e в то же местное время, что и данные ИРНР.

Результаты для условий умеренной солнечной активности представлены на рисунке 3.10.

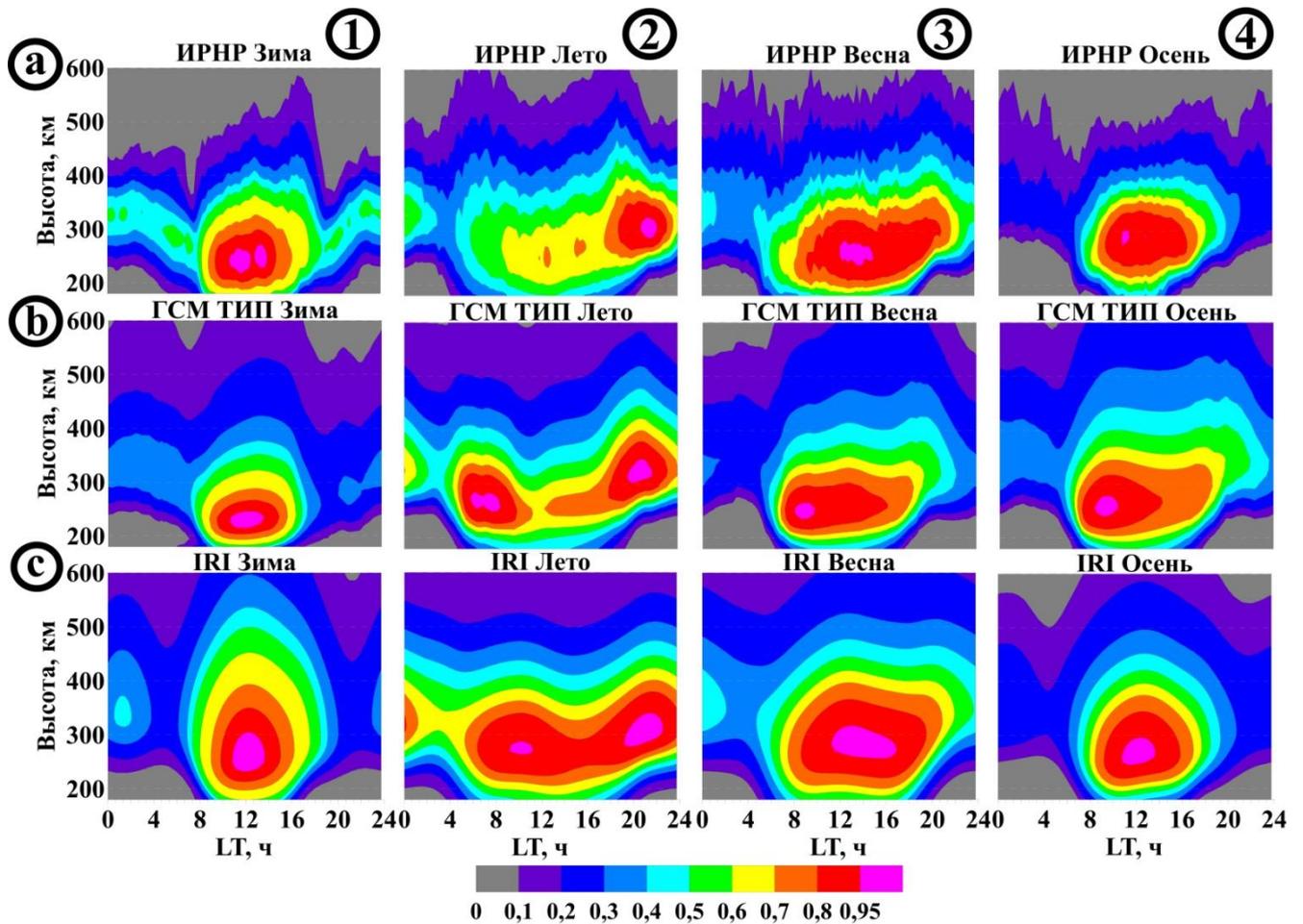


Рисунок 3.10 — То же, что и на рисунке 3.9, при умеренной солнечной активности

Рассмотрим особенности суточного высотного поведения N_e в зимний и летний сезоны при умеренной солнечной активности. Наибольшего внимания заслуживает летний период. Для него обе модели предсказывают, что максимум N_e , наблюдаемый ниже 300 км до полудня (10:00 LT по модели IRI и 07:00 LT по GSM TIIP), близок по амплитуде к главному вечернему максимуму N_e , тогда как по данным ИРНР подобной особенности не обнаруживается. В то же время данные ИРНР показали утренний максимум N_e на высотах 400 км и выше, что качественно согласуется с результатами GSM TIIP для диапазона 400–500 км.

Для весны и осени при умеренной солнечной активности, по сравнению с периодом низкой солнечной активности, многопиковая структура хода N_e , полу-

ченная по измеренным на ИРНР данным, не выражена и в целом согласуется с ходом N_e по ГСМ ТИП.

Большой объем экспериментальных данных, полученных на ИРНР, позволил построить усредненные высотно-суточные профили N_e и осуществить сравнение с предсказаниями ГСМ ТИП и IRI. Сравнительный анализ показал, что обе модели надежно воспроизводят следующие особенности, выявленные при измерениях на ИРНР:

- 1) контролируемое зенитным углом Солнца поведение N_e на высотах ниже 230 км;
- 2) наступление зимнего ночного максимума N_e и его зависимость от уровня солнечной активности;
- 3) так называемую среднеширотную летнюю вечернюю аномалию, т.е. появление вечернего максимума N_e .

Ряд особенностей поведения электронного содержания ионосферы, выявленных над Восточно-Сибирским регионом при измерениях на ИРНР, лучше согласуется с ГСМ ТИП, чем с IRI. К ним относятся близкие значения дневного и ночного максимумов ионизации зимой на высотах более 300 км при низкой солнечной активности, а при умеренной активности — летний утренний максимум ионизации на высотах более 400 км. Ни одна модель для весеннего и осеннего сезонов при низкой солнечной активности не воссоздает детально многопиковую структуру N_e на высотах более 300 км, однако ГСМ ТИП пытается воспроизвести для весеннего периода утренние и дневные максимумы ионизации.

3.5. Выводы

На основе большого объема данных непрерывных измерений на ИРНР получены основные региональные особенности суточного хода N_e в диапазоне высот 200–400 км для всех сезонов при низкой и умеренной солнечной активности.

Временной ход N_e на высотах ~200 км согласуется с ходом зенитного угла Солнца, с выраженным максимумом днем и минимумом ночью. Начиная с высо-

ты 280 км, во временном ходе N_e появляются новые квазипериодические структуры, не подчиняющиеся ходу зенитного угла.

Зимой в период низкой солнечной активности наблюдается превышение ночных значений N_e над дневными, начиная с высоты 340 км. Ночной максимум N_e проявляется и в условиях умеренной солнечной активности, но с намного меньшими значениями, чем дневной.

Летом, независимо от солнечной активности, во временном ходе N_e наблюдаются два максимума, в полдень и вечером, вечерний максимум превалирует над полуденным. Наибольшие различия в значениях между ними составляют 1.6 и 1.4 раза при низкой и умеренной активности Солнца соответственно на высоте ~300 км.

Наибольшего внимания заслуживает временной ход N_e в период низкой солнечной активности, представляющий собой квазипериодическую структуру с ночным, утренним, дневным и вечерним максимумами, тогда как при умеренной активности во временном ходе N_e наблюдаются доминирующий дневной максимум на высоте 300 км и вечерний максимум на высоте 400 км.

В условиях низкой солнечной активности квазипериодические структуры во временном ходе N_e , наблюдаемые в осенний и в весенний периоды, сопоставимы. Различие состоит только в отсутствии утреннего максимума в осенний период. При умеренной солнечной активности превалирующим максимумом N_e на всех высотах является дневной.

Последние два результата, касающиеся квазипериодических вариаций N_e с числом максимумов, варьирующимся от 3 до 4, являются новыми в исследовании особенностей поведения ионосферы над Восточно-Сибирским регионом и ранее нигде не приводились. В данной работе уделено внимание только морфологическим особенностям поведения N_e , полученным с помощью ИРНР для Восточно-Сибирского региона. Описание механизмов образования наблюдаемых особенностей, в частности вновь выявленных, является темой отдельного исследования, выходящего за рамки данной работы.

Заключение

В сфере фундаментальных и прикладных исследований приоритетной задачей является диагностика состояния ионосферы Земли. Настоящая диссертационная работа соответствует современным тенденциям в области совершенствования установок некогерентного рассеяния и посвящена методам повышения устойчивости восстановления высотно-временного хода электронной концентрации по данным, получаемым на единственном в России радаре некогерентного рассеяния — Иркутском.

В данной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод определения характеристик зондирующего сигнала, обеспечивающих наилучшую точность восстановления профиля мощности, в зависимости от текущего состояния ионосферы и входного уровня шума.
2. Разработан новый устойчивый, полностью автоматизированный, работающий в реальном времени метод определения параметров высотного профиля электронной концентрации. Обработан большой массив данных электронной концентрации начиная с 2007 г.
3. Получены и проанализированы суточно-сезонные зависимости электронной концентрации внешней ионосферы Восточно-Сибирского региона при разных уровнях солнечной активности на основе длинных рядов данных Иркутского радара некогерентного рассеяния. Проведено сравнение полученных результатов с Глобальной самосогласованной моделью термосферы, ионосферы и протоносферы и Международной справочной моделью ионосферы IRI.
4. Создан большой массив обработанных данных, который неоднократно использовался различными исследовательскими командами для решения научных задач.

Список основных обозначений и сокращений

- АКФ — автокорреляционная функция
- БПФ — быстрое преобразование Фурье
- ГСМ ТИП — Глобальная самосогласованная модель термосферы, ионосферы и протоносферы
- ЗС — зондирующий сигнал
- ИРНР — Иркутский радар некогерентного рассеяния
- ИСЗФ — Институт солнечно-земной физики
- НР — некогерентное рассеяние
- НФ — функция неопределенности
- ПИБ — перемещающиеся ионосферные возмущения
- РНР — радар некогерентного рассеяния
- РУ — радиолокационное уравнение
- с.е.п. — солнечная единица потока радиоизлучения, 10^{-22} Вт/(м²·Гц).
- ФМ — фазоманипулированный
- ФМС — фазоманипулированный сигнал
- DPS-4 — digisonde portable sounder (цифровой ионозонд)
- f_0F2 — критическая частота слоя F2
- h_mF2 — высота максимума слоя F2
- IRI — International Reference Ionosphere, Международная справочная модель ионосферы
- LT — местное время
- N_e — электронная концентрация
- N_mF2 — электронная концентрация в максимуме слоя F2
- TECU — total electron content unit (единица полного содержания электронов, 10^{16} м⁻²)
- UT — всемирное время

Список литературы

1. Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности поведения ионосферы вблизи максимума ионизации по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния для низкой и умеренной солнечной активности // Солнечно-земная физика. — 2015.— Т. 1, № 3. — С. 28–36. — DOI: 10.12737/11450.
2. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. — М.: Мир, 1975. — 512 с.
3. Ахиезер А.И., Ахиезер И.А., Половин Р.В. и др. Электродинамика плазмы. — М.: Наука, 1974. — 719 с.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника». 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2000. — 462 с.
5. Бауэр Э. Физика планетных ионосфер / Пер. с англ. Т.К. Бреус, Э.К. Соломатиной. Под ред. К.И. Грингауза. — М.: Мир, 1976. — 251 с.
6. Бернгардт О.И. Радиолокационные уравнения в задаче однократного обратного рассеяния радиоволн: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03.— Иркутск, 2000. — 148 с.
7. Брюнелли Б.Е., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. — Л.: Наука, 1979. — 188 с.
8. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
9. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967. — 684 с.
10. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Советское радио, 1971. — 672 с.
11. Григоренко Е.И. Исследования ионосферы по наблюдениям эффекта Фарадея при некогерентном рассеянии радиоволн // Ионосферные исследования. — 1979. — Т. 27. — С. 60–73.

12. Даффет-Смит П. Практическая астрономия с калькулятором: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 176 с.
13. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., Носов В.Е., Потехин А.П., Шпынев Б.Г. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, N11. С. 1339—1345.
14. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 190 с.
15. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. — М.: Связь. 1971. — 440 с.
16. Лебедев В.П. Развитие диагностических возможностей иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. — Иркутск, 2000. — 142 с.
17. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., и др. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. — 1990. — Т. 30, № 4. — С. 612–619.
18. Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В., и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования. — 2008. — Т. 46, № 4. — С. 356–362.
19. Пуляев В.А. Повышение эффективности определения параметров ионосферы при дистанционном мониторинге методом некогерентного рассеяния: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.12. — Харьков, 2006. — 371 с.
20. Рогожкин Е.В. Сложные зондирующие сигналы для исследований структуры и динамики ионосферы методом некогерентного рассеяния: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03. — Харьков, 1992. — 316 с.
21. Свистов В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка. — М.: Советское радио, 1977. — 448 с.
22. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. — М.: Эко-Трендз, 2000. — 270 с.

23. Суни А.Л., Терещенко В.Д., Терещенко Е.Д., Худукон Б.З. Некогерентное рассеяние радиоволн в высокоширотной ионосфере. — Апатиты: Кольский НЦ АН СССР, 1989. — 183 с.
24. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. — М.: Радио и связь, 1983. — 320 с
25. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1974. — 223с.
26. Ткачев Г.Н., Розуменко В.Т. Эффект Фарадея некогерентного рассеяния радиолокационных сигналов // Геомагнетизм и аэрономия. — 1972. — Т. 12, № 4. — С. 657–661.
27. Фильчаков П.Ф. Численные и графические методы прикладной математики: справочник. — Киев: Наукова думка, 1970. — 800 с.
28. Худсон Д. Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике: Пер. с англ. — 2-е изд. — М.: Мир, 1970. — 295 с.
29. Хэгфорс Т., Терещенко Е.Д., Куницын В.Е. Диагностика параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния с использованием линейно-частотно-модулированных сигналов // Геомагнетизм и аэрономия. — 1992. — Т. 32, № 1. — С. 91–94.
30. Шеффилд Дж. Рассеяние электромагнитного излучения в плазме. — М.: Атомиздат, 1978. — 289 с
31. Шпынев Б.Г. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния с учетом эффекта Фарадея: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. — Иркутск, 2000. — 142 с.
32. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. — 1969. — Т. 57, № 4. — С. 139–175.
33. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. — М.: Горячая Линия – Телеком, 2005. — 272 с.

34. Abdu M.A., Walker G.O., Reddy B.M., Sobral J.H., Fejer B.G., Kikuchi T., Trivedi N.B., Szuszczewicz E.P. Electric field versus neutral wind control of the equatorial anomaly under quiet and disturbed conditions: A global perspective from SUNDIAL 86 // *Annales Geophysicae*. — 1990. — Vol. 8. — P. 419–430.
35. Akbari H., Bhatt A., La Hoz C., & Semeter, J. L. Incoherent Scatter Plasma Lines: Observations and Applications // *Space Science Reviews*. — 2017. — Vol. 212. — P. 249–294. — doi:10.1007/s11214-017-0355-7
36. Alcayde D. Incoherent scatter theory: Practice, and science // *Technical Report 97/53*. — EISCAT Scientific Association, 1997. — 314 p.
37. Aster R.C., Borchers B., and Thurber C. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier Academic Press, 2005. — 320 p.
38. Baker D.N., Allen J.H., Kanekal S.G., et al. Disturbed space environment may have been related to pager satellite failure // *EOS Trans. AGU*. — 1998. — V. 79, no. 40. — P. 477–483.
39. Barbieri L.P., Mahmot R.E. October — November 2003's space weather and operation lessons learned // *Space Weather*. — 2004. — Vol. 2, no. 9. — P. S09002-1–S09002-12. — DOI:10.1029/2004SW000064.
40. Bard Y. *Nonlinear Parameter Estimation*. — New York: Academic Press, 1974. — 340 p.
41. Belehaki A., Cander Lj., Zolesi B., et al. The European Server for Ionospheric Specification and Forecasting: Final results from DIAS Project // *Characterising the Ionosphere. RTO Meeting Proceedings : RTO-MP-IST-056*. — 2006. — Paper 22. — P. 22-1—22-8.
42. Beynon W.J.G., Williams P.J.S. Incoherent scatter of radio waves from the ionosphere // *Reports on Progress in Physics*. — 1975. — Vol. 41, no. 6. — P. 909–956.
43. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // *Radio Science*. — 2001. — Vol. 36, no. 2. — P. 261—275.
44. Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Advances in Space Research*. — 2008. — Vol. 42, no. 4. — P. 599–609. — DOI:10.1016/j.asr.2007.07.048.

45. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // *J. Space Weather Space Clim.* — 2014.— Vol. 4, A07. — 12 p.
46. Brekke A. *Physics of the Upper Polar Atmosphere.* — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. — 384 p. — DOI 10.1007/978-3-642-27401-5.
47. Cai H.T., Ma S.Y., Fan Y., et al. Climatological features of electron density in the polar ionosphere from long-term observations of EISCAT/ESR radar // *Annales Geophysicae.* — 2007. — Vol. 25. — P. 2561–2569. — doi:10.5194/angeo-25-2561-2007
48. Dantie B., Lehtinen M.S., Nygrén T. Decoding of Barker-coded incoherent scatter measurements by means of mathematical inversion. // *Annales Geophysicae.*— 2004.— Vol. 22(1). — P. 3–13. — doi:10.5194/angeo-22-3-2004
49. Daniell R.E., Brown L.D., Anderson D.N., et al. Parameterized ionospheric model: A global ionospheric parameterization based on first principles models // *Radio Science.* — 1995. — Vol. 30, no. 5. — P. 1499–1510. — doi:10.1029/95RS01826.
50. Dennis J.E., Schnabel R.B. *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equation.* — Prentice-Hall, 1983. — 378 p.
51. Evans J.V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson Scatter Radar // *Proceedings of the IEEE.* — 1969. — Vol. 57. — P. 496–530.
52. Farley D.T. A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma // *J. Geophys. Res.* — 1966. — Vol.71, no.17. — P. 4091-4098
53. Farley D.T. Incoherent scatter correlation function measurement // *Radio Science.* — 1969. — Vol. 4, no. 10. — P. 935–953
54. Farley D.T. Radio wave scattering from the ionosphere // *Plasma Phys.* — 1971. — Vol. B9. — P. 139–186.
55. Farley D. T. Faraday Rotation Measurements Using Incoherent Scatter. *Radio Science* // *Radio Scienc.* —1969— Vol. 4, no. 2, —P. 143–152.— doi:10.1029/rs004i002p00143

56. Foster J.C., Tetenbaum D. High-resolution backscatter power observations of 440-MHz E region coherent echoes at Millstone Hill // *Journal of Geophysical Research*. — 1991. — Vol. 96, no. A2. — P. 1251–1261.
57. Gray R.W., Farley D.T. Theory of incoherent-scatter measurements using compressed pulses // *Radio Science*. — 1973. — Vol. 8, no. 2. — P. 123–131.
58. Hamming R.W. *Numerical methods for scientists and engineers: 2nd revised edition*. — Dover Publications, 1987. — 752 p.
59. Hargreaves J.K. *The Solar-Terrestrial Environment*. — Cambridge University Press, 1992. — 436 p.
60. Hedin M., Häggström I., Pellinen-Wannberg A., et al. 3-D extent of the main ionospheric trough – a case study // *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*. — 2000. — Vol. 14. — P. 157–162.
61. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. — Springer-Verlag Wien, 2001. — 405 p.
62. Holt J.M., Rhoda D.A., Tetenbaum D., van Eyken A.P. Optimal analysis of incoherent scatter radar data // *Radio Science*. — 1992. — Vol. 27, no. 03. — P. 435–447. — doi: 10.1029/91RS02922.
63. Huba J.D., Schunk R.W., Khazanov G.V. *Modeling the Ionosphere – Thermosphere*. — American Geophysical Union, 2014. — 360 p.
64. Huba J.D., Joyce G., Fedder J.A. Simulation study of mid-latitude ionosphere fluctuations observed at Millstone Hill // *Geophysical Research Letters*. — 2003. — Vol. 30, no. 18, 1943. — doi: 10.1029/2003GL018018.
65. Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // *Space Weather*. — 2005. — Vol. 3, no. 1. — P. S01001-1–S01001-16. — doi:10.1029/2003SW000056.
66. Kelley M.C., Heelis R.A. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. — Elsevier, 2009. — 556 p.
67. Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. An amplitude scintillation test pattern standard for evaluating GPS receiver performance // *Space Weather*. — 2005. — Vol. 3, S03002. — doi: 10.1029/2003SW000025.

68. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bryukhanov V.V. Numerical simulation of the electric field and zonal current in the Earth's ionosphere: the dynamo field and equatorial electrojet // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2006 — Vol. 46, no. 4. — P. 457–466.
69. Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Forster M., et al. Calculated and observed ionospheric parameters for Magion-2 passage above EISCAT on July 31 1990 // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — Vol. 103, no. A7. — P. 14697–14710. — doi:10.1029/98JA00210.
70. Lei J., Liu L., Wan W., et al. Comparison of the first long-duration IS experiment measurements over Millstone Hill and EISCAT Svalbard radar with IRI2001 // *Advances in Space Research*. — 2006. — Vol. 37, no. 5. — P. 1102–1107. — doi:10.1016/j.asr.2005.01.061.
71. Lei J., Roble R.G., Wang W., et al. Electron temperature climatology at Millstone Hill and Arecibo // *Journal of Geophysical Research*. — 2007.— Vol. 112, A02302. — doi:10.1029/2006JA012041.
72. Lehtinen M.S., Haggstrom I.A. A new modulation principle for incoherent scatter measurements // *Radio Science*. — 1987. — Vol. 22, no. 4. — P. 625–634. — doi:10.1029/RS022i004p00625.
73. Lehtinen M.S., Huuskonen A. General incoherent scatter analysis and GUIDAP // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1996. — Vol. 58, no. 1-4. — P. 435–452. — doi: 10.1016/0021-9169(95)00047-X.
74. Lehtinen M.S., Huuskonen A., Thuillier G. Randomization of alternation codes: improving incoherent scatter measurements by reducing correlations of gated-autocorrelation function estimates // *Radio Science*. — 1997. — Vol. 32, no. 6. — P. 2271–2282.
75. Lehtinen M.S., Dantie B., Nygren T. Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar // *Annales Geophysicae*. — 2004. — Vol. 22, no. 5. — P. 1623–1632. — doi: 10.5194/angeo-22-1623-2004.

76. Luan X., Liu L., Wan W., et al. A study of the shape of topside electron density profile derived from incoherent scatter radar measurements over Arecibo and Millstone Hill // *Radio Science*. — 2006. — Vol. 41, no. 4, RS4006. — doi: 10.1029/2005RS003367.
77. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., and Kushnarev D.S. Method for studying the spatial-temporal structure of wave-like disturbances in the ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2009. — Vol. 49, no. 6. — P. 775–785.
78. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2013. — Vol. 105–106. — P. 350–357. — doi: 10.1016/j.jastp.2013.09.001.
79. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2015. — Vol. 132. — P. 13–21. — doi: 10.1016/j.jastp.2015.06.012.
80. Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122, no. 7. — P. 7567–7580. — doi: 10.1002/2017JA024103
81. Mikhailov A.V. Ionospheric F2-layer storms // *Fisica de la Tierra*. — 2000. — Vol. 12. — P. 223–262.
82. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure Appl. Geophys. (PAGEOPH)*. — 1988. — Vol. 127, no. 2/3. — P. 219–254.
83. Nygren T. *Introduction to Incoherent Scatter Measurements*. — Sodankylä: Invers, 1996. — 140 p.
84. Nygren T., Markkaken M. Long alternating codes // *Radio Science*. — 1997. — Vol. 32, no. 1. — P. 1–18.

85. Potekhin A.P., Berngardt O.I., Zavorin A.V., Shpynev B.G., Tashchilin A.V. Comparison of data from Irkutsk incoherent scatter radar with international reference ionosphere IRI-95 // *Proceeding of SPIE*. 2002.—Vol. 4678. —P. 560–566.
86. Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Recording and control digital systems of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2009. — Vol. 49, no. 7. — P. 1011–1021. — doi: 10.1134/S0016793209070299.
87. Ratovsky K.G., Dmitriev A.V., Suvorova A.V., et al. Comparative study of COSMIC/FORMOSAT-3, Irkutsk incoherent scatter radar, Irkutsk Digisonde and IRI model electron density vertical profiles // *Advances in Space Research*. — 2017.— Vol. 60. — P. 452–460. — doi: 10.1016/j.asr.2016.12.026.
88. Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. and Kushnarev D.S. Case studies of height structure of TID propagation characteristics using cross-correlation analysis of incoherent scatter radar and DPS-4 ionosonde data // *Advances in Space Research*. — 2008. — Vol. 41. — P. 1453–1457. — doi: 10.1016/j.asr.2007.03.008.
89. Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from Digisonde measurements at Irkutsk // *Earth Planets Space*. — 2011. — Vol. 63, no. 4. — P. 351–357.— doi: 10.5047/eps.2011.03.002.
90. Rees M.H. *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*. — Cambridge: Cambridge University Press, 1989. — 289 p.
91. Reinisch B.W., Huang X. Vertical electron content from ionograms in real time // *Radio Science*. — 2001. — Vol. 36, no. 2— P. 335–342.
92. Robinson R. New techniques and result from incoherent scatter radars // *Radio Science Bulletin*. — 2004. — No. 311. — P. 79–94.
93. Rottger J. The instrumental principles of MST radars and incoherent scatter radars and the configuration of radar system hardware // *Handbook for MAP*. 1989. — Vol. 30. — P. 54–113.

94. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / Second edition. — Cambridge University Press, 2009. — 554 p. — (Atmospheric and Space Science Series).
95. Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk incoherent scatter radar // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2015. — Vol. 120, no. 12. — P. 10851–10863. — doi:10.1002/2015JA021678.
96. Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // *Radio Science*. — 2004. — Vol. 39, no. 3, RS3001. — doi: 10.1029/2001RS002523.
97. Shpynev B.G., Potekhin A.P., Tashchilin A.V., et al. The comparison of incoherent scatter data with IRI-2001 in East-Siberian region // *Advances in Space Research*. — 2006. — Vol. 37, no. 5. — P. 1108–1112.
98. Sojka J.J., Nicolls M.J., Heinselman C.J., Kelly J.D. The PFISR IPY observations of ionospheric climate and weather // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* — 2009. — Vol. 71. — P. 771–785. — doi:10.1016/j.jastp.2009.01.00.
99. Tashlykov V.P., Setov A.G., Medvedev A.V., et al. Ground clutter deducting technique for Irkutsk Incoherent Scatter Radar // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), Kazan, Russia. — 2019. — P. 175–178. — doi: 10.1109/RWP.2019.8810369.
100. Tarantola A. Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. — Amsterdam; New York : Elsevier Science, 1987. — 644 p.
101. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *Journal of Geophysical Research*. — 2002a. — Vol. 107, no. A8. — P. SMP 12-1–SMP 12-15. — doi: 10.1029/2001JA000219.
102. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // *Journal of Geophysical Research*. — 2002b. — Vol. 107, no. A8. — P. SMP 10-1–SMP 10-17. — doi:10.1029/2001JA000220.

103. Vierinen J., Lehtinen M., Orispaa M., Damtie B. General radar transmission codes that minimize measurement error of a static target // *IEEE Transactions on Information Theory*. — 2007. — Vol. 1, no. 11. — P. 1–7.
104. Virtanen I. *Multi-purpose Methods for Ionospheric Radar Measurements*. — Oulu: University of Oulu, 2009. — 53 p. — (Report Series in Physical Sciences. Report № 59).
105. Voiculescu M., Virtanen I., Nygrén T. The F-region trough: seasonal morphology and relation to interplanetary magnetic field // *Annales Geophysicae*. — 2006. — Vol. 24. — P. 173–185. — doi: 10.5194/angeo-24-173-2006.
106. Voronov A.L., Shpynev B.G. Excluding of convolution with sounding impulse in experimental incoherent scatter power profile // *Proceedings of SPIE*. — 1998. — Vol. 3583. — P. 414–418.
107. Woodman R.F., Hagfors T. Method for the measurement of vertical ionospheric motions near the magnetic equator by incoherent scatter // *Journal of Geophysical Research*. — 1969. — Vol. 74, no. 5. — P. 1205–1212.
108. Woodman R.F. A general statistical instrument theory of atmospheric and ionospheric radars // *Journal of Geophysical Research*. — 1991. — Vol. 96, no. A5. — P. 7911–7928.
109. Zhang S., Holt J.M. Ionospheric plasma temperatures during 1976–2001 over Millstone Hill // *Advances in Space Research*. — 2004. — Vol. 33, no. 6. — P. 963–969. — doi: 10.1016/j.asr.2003.07.012.
110. Zhang S.R., Holt J.M., Zalucha A.M., and Amory-Mazaudier C. Mid-latitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987 // *Journal of Geophysical Research*. — 2004. — Vol. 109, A11311. — doi: 10.1029/2004JA010709.
111. Zhang S., Holt J.M., van Eyken A.P., et al. Ionospheric local model and climatology from long-term databases of multiple incoherent scatter radars // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, L20102. — doi: 10.1029/2005GL023603.

112. Zherebtsov G.A., Ratovsky K.G., Klimenko M.V., et al. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions // *Advances in Space Research*. — 2017. — Vol. 60. — P. 444–451. — doi: 10.1016/j.asr.2016.12.008.

113. Zolesi B., Cander Lj. *Ionospheric Prediction and Forecasting*. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. — 240 p. — doi: 10.1007/978-3-642-38430-1.