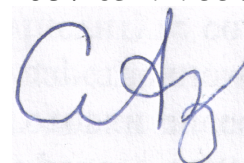


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Медведев Андрей Всеволодович, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Филиппов Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер-аналитик отдела 39/4/1 НТЦ ПАО, Акционерное общество «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»;

Сажин Виктор Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», кафедра радиопизики и радиоэлектроники.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”», г. Москва.

Защита диссертации состоится _____ 20__ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <http://www.iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Ю.В. Ясюкевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Метод некогерентного рассеяния является наиболее информативным методом зондирования ионосферы и позволяет восстанавливать профили 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.

В мире существует одиннадцать исследовательских центров изучения ионосферы, оборудованных радарными некогерентного рассеяния. Каждый радар имеет уникальные технические характеристики и место расположения. Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) 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. Особенностью ИРНР является регистрация линейно поляризованного поля рассеянного ионосферой сигнала, что, с одной стороны, усложняет обработку, а с другой — позволяет проводить абсолютные измерения без дополнительной калибровки.

Постоянное совершенствование методов обработки данных и технического оснащения является неотъемлемой задачей на всех измерительных комплексах радаров некогерентного рассеяния. Результатом является расширение их диагностических возможностей и уменьшение неоднозначности интерпретации результатов наблюдений. Все это способствует получению новых сведений о процессах в ионосфере.

Необходимость повышения пространственного разрешения и устойчивости вычислительных алгоритмов восстановления высотного хода электронной концентрации по измеренному профилю мощности сигнала, имеющему квазипериодические замирания вследствие эффекта Фарадея (далее — фарадеевские замирания), с учетом совершенствования методов оперативной обработки данных на уникальной установке — Иркутском радаре некогерентного рассеяния — **является актуальной задачей, решению которой посвящена настоящая диссертационная работа.**

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 (за период 2007–2014 гг.) 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 высотно-временных 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 ионосферных 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.

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 ДИССЕРТАЦИИ

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

Иркутский радар некогерентного рассеяния представляет собой моностатическую импульсную радиолокационную станцию с частотным сканированием. Изменение рабочей частоты в диапазоне 154–162 МГц приводит к отклонению диаграммы направленности в диапазоне 0° – 30° от нормали к плоскости раскрыва рупора, что позволяет проводить измерения профиля электронной концентрации $N_e(r)$ в разных направлениях. Рабочая частота радара является оптимальной для измерения параметров плазмы, основанного на регистрации профиля мощности сигнала, модулированного квазипериодическими замираниями, обусловленными эффектом Фарадея. С одной стороны, это позволяет восстанавливать абсолютные значения $N_e(r)$ без сторонних источников калибровки, таких как ионозонд, с другой — значительно усложняет процедуры обработки данных.

Радиолокационное уравнение (РУ), описывающее наблюдаемые фарадеевские замирания в профиле мощности сигнала, впервые было получено Шпыневым Борисом Геннадьевичем [Shpynev, 2004] и представляет собой свертку истинного профиля фарадеевских замираний с огибающей зондирующего сигнала:

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

Здесь A — радиолокационная константа; $a(\tau)$ — огибающая зондирующего импульса; $Q(\tau)$ — шумы; $\Omega(r)$ — угол поворота вектора поляризации электромагнитной

ВОЛНЫ:

$$\Omega(r) = \frac{e^3}{2\varepsilon_0 m_e^2 \omega_0^2 c} \int_0^{r_0} N_e(z) B(z) \cos \alpha dz,$$

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

На этапе становления ИРНР в силу технических ограничений использовался сигнал прямоугольной формы, без фазовой манипуляции. На основе полученного РУ был реализован дифференциальный метод восстановления профиля $N_e(r)$ [Shrynev, 2004], в котором последовательно решаются три основные задачи: 1) устранение влияния зондирующего сигнала, 2) восстановление высотного профиля фазы фарадеевского вращения, 3) восстановление высотного профиля электронной концентрации.

1. Устранение влияния зондирующего сигнала.

Влияние конечной длительности ЗС — как правило, она составляет 200 мкс (разрешение по дальности 30 км) — на измеряемый профиль мощности сигнала («исходный профиль» на рис. 1) заключается в уширении наблюдаемых минимумов и подъеме их выше уровня шума, что хорошо видно на рисунке 1.

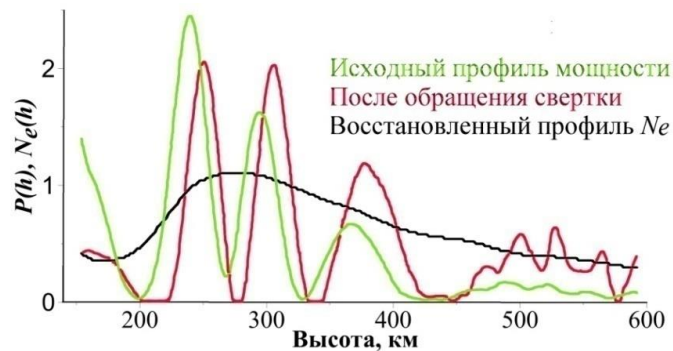


Рисунок 1. Процесс восстановления профиля $N_e(r)$

Для устранения влияния зондирующего сигнала применяется обращение свертки. Данная задача относится к классу некорректных задач, требующих специальных мер регуляризации, и ее решение характеризуется значительной неустойчи-

востью, усиливающейся в шумах. После обращения свертки РУ имеет вид

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

Профиль мощности, полученный с помощью данного РУ, показан на рис. 1 темно-розовым цветом.

2. После устранения влияния ЗС решается задача относительно фазы фарадеевского вращения $\Omega(r)$:

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

3. Дифференцированием высотного хода рассчитанной фазы восстанавливается профиль $N_e(r)$, показанный на рис. 1 черным цветом:

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

Преимущество рассмотренного метода состоит в возможности определять произвольный высотный ход $N_e(r)$. Однако дифференциальный метод чувствителен к уровню шума, что приводит к неустойчивости решения дифференциального уравнения разностным методом при расчете высотного хода $N_e(r)$, особенно при низких её значениях. Для минимизации случаев неустойчивости разностного метода требуется ручное определение минимумов фарадеевских замираний в профиле мощности сигнала, вследствие чего невозможна полная автоматизация алгоритма.

В данной работе решаются следующие задачи: устранение влияния зондирующего сигнала посредством использования оптимального зондирующего сигнала и разработка устойчивого метода восстановления профиля $N_e(r)$ в полностью автоматическом режиме.

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 зондирующих сигналов и способах их обработки. Основное внимание уделено методике определения оптимальных параметров (длительности и ширины спектра) сложных ЗС, обеспечи-

вающих одновременно наилучшие показатели соотношения сигнал/шум и разрешающей способности и тем самым уменьшающих неопределенность восстанавливаемого высотного профиля электронной концентрации.

Главная цель внедрения сложных схем модуляции ЗС и обработки принятых сигналов состоит в достижении высокого высотного разрешения и в эффективном использовании потенциала радара. Существует большое разнообразие модуляционных схем, например модуляция несущей частоты с помощью кодов Баркера, М-последовательностей, альтернативных кодов [Lehtinen, Haggstrom, 1987; Lehtinen et al., 2004] и т.д.

Радиолокационное уравнение для случая некогерентного рассеяния имеет следующий вид [Shpynev, 2004; Nygren, 1996]:

$$P_{\text{изм}}(t) = C \int \frac{dr}{r^2} \cos^2(\Omega(r)) \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{\rho(\tau, r)}_2 \underbrace{F_{t_r}(t, \tau)}_1 d\tau + \underbrace{\sigma_{\text{шум}}(t)}_3. \quad (1)$$

Здесь $\Omega(r)$ — угол поворота плоскости поляризации; $\rho(\tau, r)$ — корреляционная функция ионосферной плазмы; $F_{t_r}(t, \tau)$ — двумерная функция неопределенности, зависящая от вида излучаемого сигнала:

$$F_{t_r}(t, \tau) = \int_{-T}^T a(t_1 - t_r) b(t_1 - t - t_r) a(t_1 - t_r + \tau) b(t_1 - t - t_r + \tau) dt_1,$$

где $b(t)$ — импульсная характеристика согласованного фильтра; $a(t)$ — огибающая сигнала, отраженного от слоя на дальности r ; T — длительность зондирующего сигнала.

Из уравнения (1) видны факторы, приводящие к неоднозначности измеряемых значений профиля мощности сигнала с замираниями вследствие эффекта Фарадея:

1. Двумерная функция неопределенности сигнала $F_{t_r}(t, \tau)$.
2. Время корреляции среды, поскольку от него зависит степень искажения автокорреляционной функции сигнала.
3. Отношение сигнал/шум $\sigma_{\text{шум}}(t)$ зависит от длительности ЗС, его полосы и значений $N_e(r)$. При отсутствии шума выбор смещается в сторону более широко-

полосных сигналов, чтобы обеспечить как можно более узкий главный лепесток. При наличии шума неопределенность измерений будет зависеть как от шума, так и от искажений, вызванных конечной длительностью сигнала.

4. От количества наблюдаемых фарадеевских замираний в измеряемом профиле мощности. Чем их больше, тем более широкополосный сигнал требуется.

Существенные изменения времени корреляции среды и количества наблюдаемых фарадеевских замираний в течение суток делают невозможным выбор одной оптимальной кодовой последовательности. При выборе параметров ЗС (длительность и полоса) необходимо учитывать вышеприведенные факторы.

В представленной работе задача определения оптимальных параметров ЗС решается с помощью моделирования. Для этого разработана радиофизическая модель, имитирующая реакцию ионосферы на ЗС, основанная на дискретном представлении РУ. В модели ионосфера представляется в виде тонких слоев, распределенных по высоте с задаваемым шагом. Такой подход позволяет каждому слою сопоставить значение на профиле мощности, модулированном замираниями вследствие эффекта Фарадея. Свойства слоя определяются дискретным набором рассеивателей. Каждый рассеиватель описывается доплеровским смещением, рассеиваемой мощностью и начальной фазой рассеиваемого сигнала. Количество рассеивателей в слое, отражающих сигнал, зависит от числа доплеровских смещений, определяемых функцией $S(r, \nu)$ распределения спектра мощности сигнала некогерентного рассеяния. Переход от корреляционной функции к спектральной обусловлен теоремой Винера — Хинчина. В модели для имитации шумовой природы сигнала случайный характер носит только фаза рассеянного сигнала. В реальном эксперименте всегда присутствует шум, который учитывается в модели. Входными параметрами модели являются профиль мощности фарадеевских замираний, спектр мощности, уровень шумов и ЗС, меняя параметры которого получаем на выходе модели набор профилей мощности. Сравнивая их с исходным профилем фарадеевских замираний, выбираем наилучший профиль, тем самым находим оптимальные параметры ЗС. Структура модели представлена на рисунке 2.

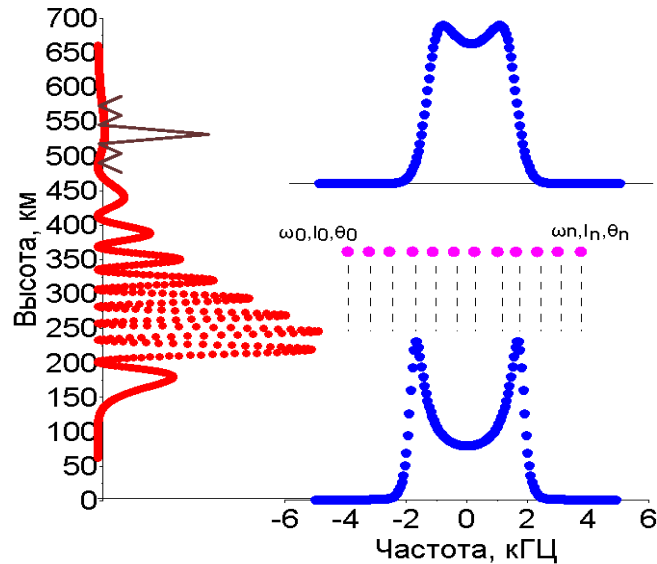


Рисунок 2. Радиофизическая модель, имитирующая отклик ионосферы на зондирующий сигнал

Степень сходства между полученным в результате моделирования профилем мощности фарадеевских замираний с исходным определяется методом наименьших квадратов:

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

В данной работе моделирование рассматривается на примере 5-, 7-, 11- и 13-элементных кодов Баркера. Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением значений $N_e(r)$ необходимо расширять полосу ЗС, при этом её верхняя граница определяется уровнем шума: чем он выше, тем ниже верхняя граница полосы ЗС. Данная зависимость наиболее выражена для низких значений $N_e(r)$. Такое поведение объясняется тем, что после согласованной обработки сигнала с более узкой полосой в выходном сигнале дисперсия шума 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 минимумами мощности сигнала составляет ~100 км, поэтому разрешающая способность имеет второстепенное значение по сравнению с достижением минимальной дисперсии шума.

При выборе параметров ЗС для ИРНР можно следовать рекомендациям,

приведенным в таблице 1.

Таблица 1. Выбор оптимальной последовательности

$N_m F2$ (N_e в максимуме слоя F2), см ⁻³	Фазовая манипуляция (ФМ)
$N_m F2 < 5 \cdot 10^5$	5
$5 \cdot 10^5 < N_m F2 < 10 \cdot 10^5$	7
$10^6 < N_m F2 < 15 \cdot 10^5$	11
$N_m F2 > 15 \cdot 10^5$	13

Данные выводы справедливы для стандартного режима измерения, при котором последовательно излучаются 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.

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, описываются методика учета магнитного поля и методы, позволяющие значительно уменьшить время обработки данных.

Процедура восстановления параметров ионосферной плазмы является очень сложной и требует учета технических факторов, способов обработки принимаемого сигнала и специальных мер стабилизации решения. Как показывает опыт применения современных методов обработки к данным, получаемым на радарх некогерентного рассеяния, перспективными являются методы определения параметров плазмы не на отдельных высотных интервалах, а одновременно во всем исследуемом диапазоне высот. Для повышения устойчивости определения высотного хода параметров плазмы их поведение описывается параметрическими моделями. Данная идеология лежит и в основе приведенного ниже алгоритма восстановления высотного профиля $N_e(r)$.

Прежде чем приступить к подробному описанию новой методики, перепишем РУ (1) виде

$$P_{\text{изм}}(t) = C \int \frac{N_e(r) \cos^2(\Omega(r))}{(1 + T_e(r)/T_i(r)) r^2} K^2(r) dr, \quad (2)$$

где $K(r)$ — одномерная функция неопределенности. Предполагается слабая зависимость $\rho(\tau, r)$ от τ , где $F_{t_r}(t, \tau) \neq 0$, т. е. $\rho(\tau, r) \approx \rho(t_1 - t_2, r)$ и $\rho(r) = \pi r_e^2 N_e(r) / (1 + T_e(r)/T_i(r))$ согласно [Farley, 1966]. Кратко рассмотрим используемые приближения. Достигнутое пространственное разрешение за счет использования сложных сигналов позволило в первом приближении в выражении (2) функцию неопределенности заменить на дельта-функцию Дирака и тем самым исключить операцию учета свертки. В данной работе на всех высотах предполагается равенство температур электронов и ионов. Используемые допущения значительно упрощают РУ (2):

$$\tilde{P}(r) = \pi r_e^2 A \frac{N_e(r) \cos^2(\Omega(r))}{r^2}.$$

В качестве модели высотного хода $N_e(r)$ используется слой Чепмена с различными масштабными высотами выше и ниже максимума $N_e(r)$. Параметризация именно высотного профиля $N_e(r)$ объясняется двумя причинами. Во-первых, непосредственно параметризовать профиль мощности фарадеевских замираний не представляется возможным, тем не менее можно сделать это косвенно, учитывая его сложную зависимость от $N_e(r)$. Во-вторых, решение задачи приводит сразу к получению высотной зависимости $N_e(r)$. Аналитическое выражение для используемой модели имеет вид

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

где z — высота; $N_m F2$ — максимум электронной концентрации F2-слоя; $h_m F2$ — высота максимума F2-слоя; H_B и H_T — масштабные высоты соответственно внутренней (ниже $h_m F2$) и внешней (выше $h_m F2$) ионосферы. На рисунке 3 представлен высотный ход $N_e(r)$, описываемый слоем Чепмена, с обозначением основных его параметров.

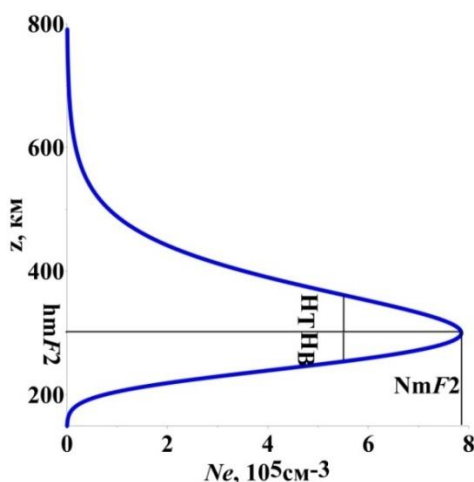


Рисунок 3. Высотный ход $N_e(r)$, описываемый слоем Чепмена

Достоинством выбранной модели является гладкость, что способствует минимизации числа дополнительных ограничений, необходимых для решения нелинейных задач, однако модель не описывает мелкомасштабные вариации.

Оптимальные параметры модели определяются методом наименьших квадратов:

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

Здесь $Y_3(r_i)$ — экспериментальные данные; $P_0(r_i, \vec{x})$ — параметрическая модель; r_i — дальность вдоль луча радара; вектор \vec{x} содержит параметры модели, которые необходимо определить; A — коэффициент усиления; C — уровень шумов.

Работу алгоритма можно разбить на несколько стадий. На первой стадии формируется набор высотных профилей $N_e(r)$, рассчитанных по модели слоя Чепмена для заданных диапазонов значений N_mF2 , h_mF2 , H_V , H_T . На следующей стадии для каждого профиля $N_e(r)$ вычисляется соответствующий высотный ход профиля мощности фарадеевских замираний. На заключительной стадии осуществляется сравнение полученного модельного профиля замираний сигнала, 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 мощности фарадеевских замираний, так и соответствующий ему высотный ход $N_e(r)$.

На рисунке 4 представлены профили мощности фарадеевских замираний — экспериментальный (черный) и восстановленный из модельного профиля $N_e(r)$ (красный), а также модельный профиль $N_e(r)$. Максимумы фарадеевских замираний отмечены цифрами в кружках.

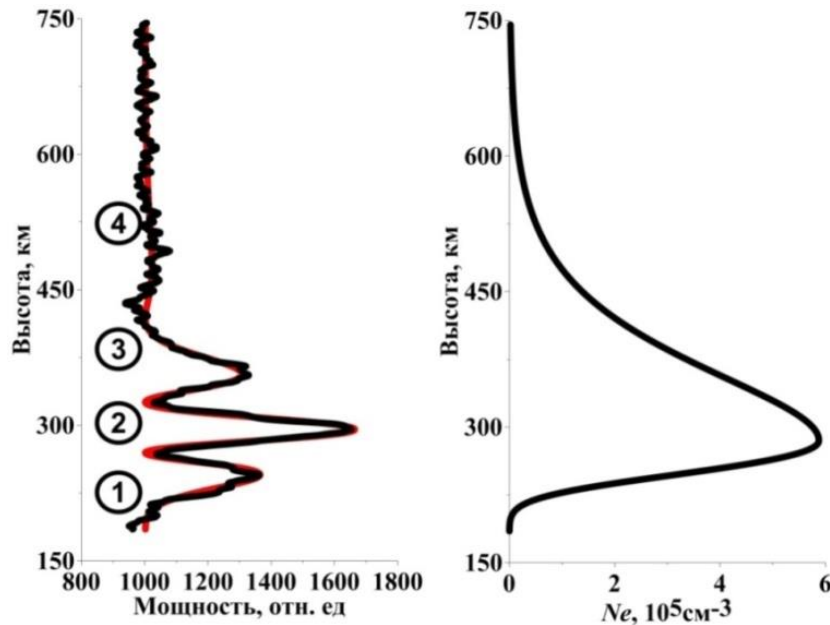


Рисунок 4. Слева — профили мощности фарадеевских замираний: черная кривая — наблюдаемый в эксперименте, красная кривая — восстановленный из модельного профиля $N_e(r)$; цифры в кружках — номера максимумов фарадеевских замираний. Справа — модельный профиль $N_e(r)$

На рисунке 5 в качестве примера приведены результаты обработки экспериментальных данных, полученных 17.10.2014. Рисунок демонстрирует устойчивую работу алгоритма в большом диапазоне значений $N_e(r)$ в максимуме слоя F2 — от $\sim 1 \cdot 10^5$ до $\sim 15 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. На верхних панелях слева представлен высотнo-временной экспериментально измеренный профиль мощности фарадеевских замираний, справа — рассчитанный по модели профиль $N_e(r)$. На средних панелях: слева — восстановленный профиль мощности фарадеевских замираний на основе рассчитанного профиля $N_e(r)$; справа приведен для сравнения профиль $N_e(r)$ за этот же день, полученный с помощью Иркутского ионозонда. На нижних панелях: слева — временной ход высот максимума $h_m F2$; справа — временной ход критических частот $f_o F2$, полученный по данным ИРНР (красный) и Иркутского ионозонда (черный).

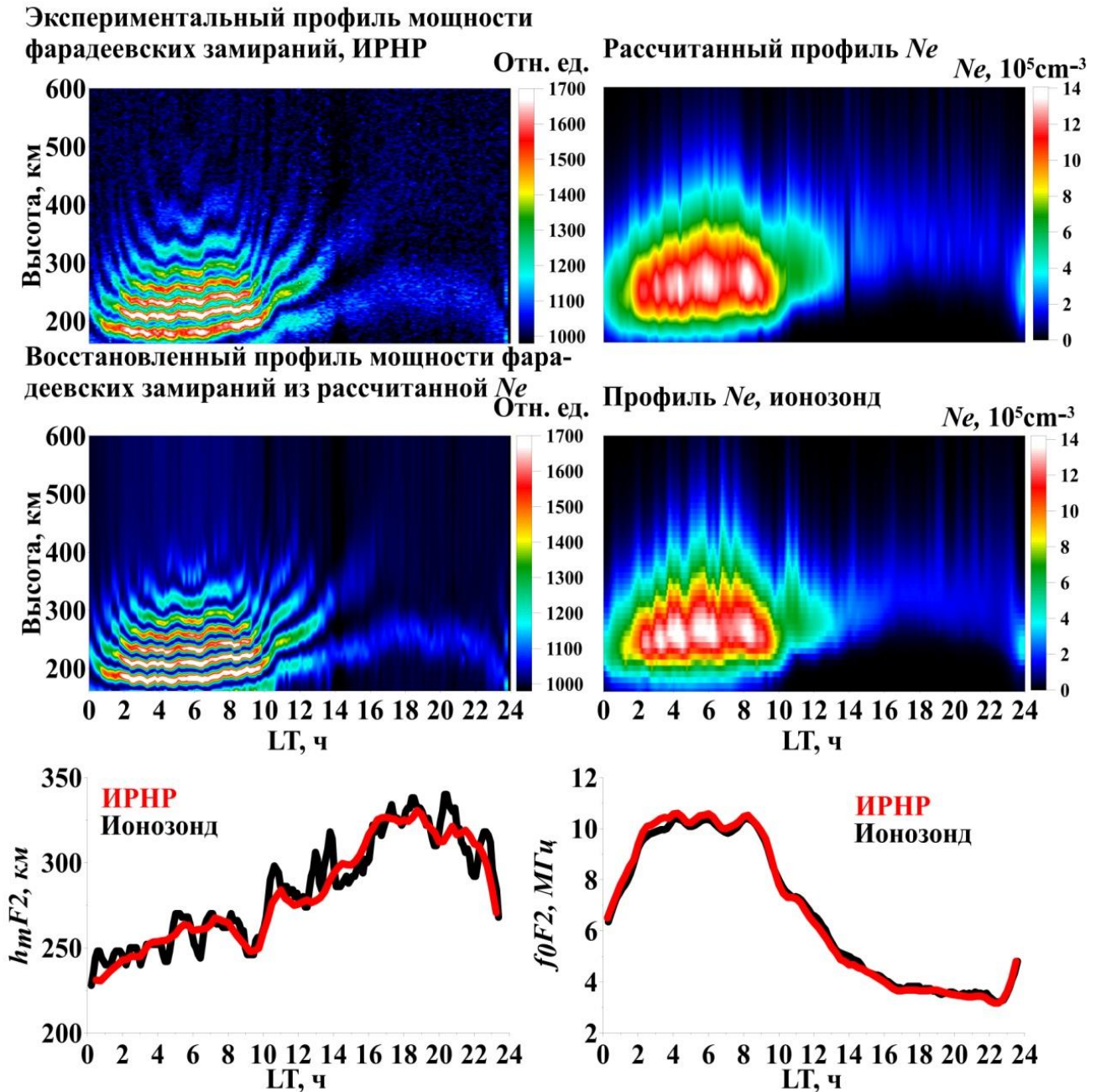


Рисунок 5. На верхних панелях: слева — высотно-временной профиль мощности фарадеевских замираний, измеренный на ИРНР 17.10.2014; справа — рассчитанный по нему профиль $N_e(r)$. На средних панелях: слева — профиль мощности фарадеевских замираний, восстановленный из рассчитанного профиля $N_e(r)$; справа — профиль $N_e(r)$, полученный по данным Иркутского ионозонда за то же число. На нижних панелях: слева — временной ход высот максимума $h_m F2$; справа — временной ход критических частот $f_0 F2$, полученный по данным ИРНР (красный цвет) и Иркутского ионозонда (черный цвет) за 17.10.2014

Результаты, представленные на рисунке 5, показывают хорошую степень соответствия восстановленного и измеренного экспериментально высотных профилей мощности фарадеевских замираний. Высотно-временное поведение $N_e(r)$, восстановленное по данным ИРНР, имеет схожую структуру с поведением $N_e(r)$, полученным с помощью ионозонда. Результаты сравнения временных вариаций высоты максимума h_mF2 и критической частоты f_0F2 , полученных вышеизложенным методом, с данными Иркутского ионозонда также показывают их хорошее согласие.

На радаре в стандартном режиме осуществляются измерения высотных профилей рассеянных сигналов на двух частотах поочередно, что соответствует изменению параметров ионосферной плазмы в двух различных направлениях. Вместе с данными Иркутского ионозонда получают три независимых профиля $N_e(r)$, измеренных в пространственно-разнесенных точках.

На рисунке 6 показана схема расположения инструментов. Луч 1 соответствует первой частоте (как правило, 154 МГц), луч 2 — второй (158 МГц). Взаимное расположение инструментов образует базу порядка 100 км и обеспечивает возможность измерения динамических характеристик перемещающихся ионосферных возмущений.

Несмотря на использование простой модели высотного хода $N_e(r)$, разработанный метод обеспечивает точность расчета, необходимую для создания метода идентификации волновых возмущений, основанного на разнице значений $N_e(r)$, полученных на двух лучах ИРНР и с помощью ионозонда вертикального зондирования.

Изложенный выше алгоритм определения высотного хода $N_e(r)$ по фарадеевским замираниям используется для обработки данных регулярных наблюдений на ИРНР в реальном времени. С его помощью в полностью автоматизированном режиме обработаны длинные ряды данных с 2007 г., что составило в общей сложности более 4000 часов регулярных наблюдений.

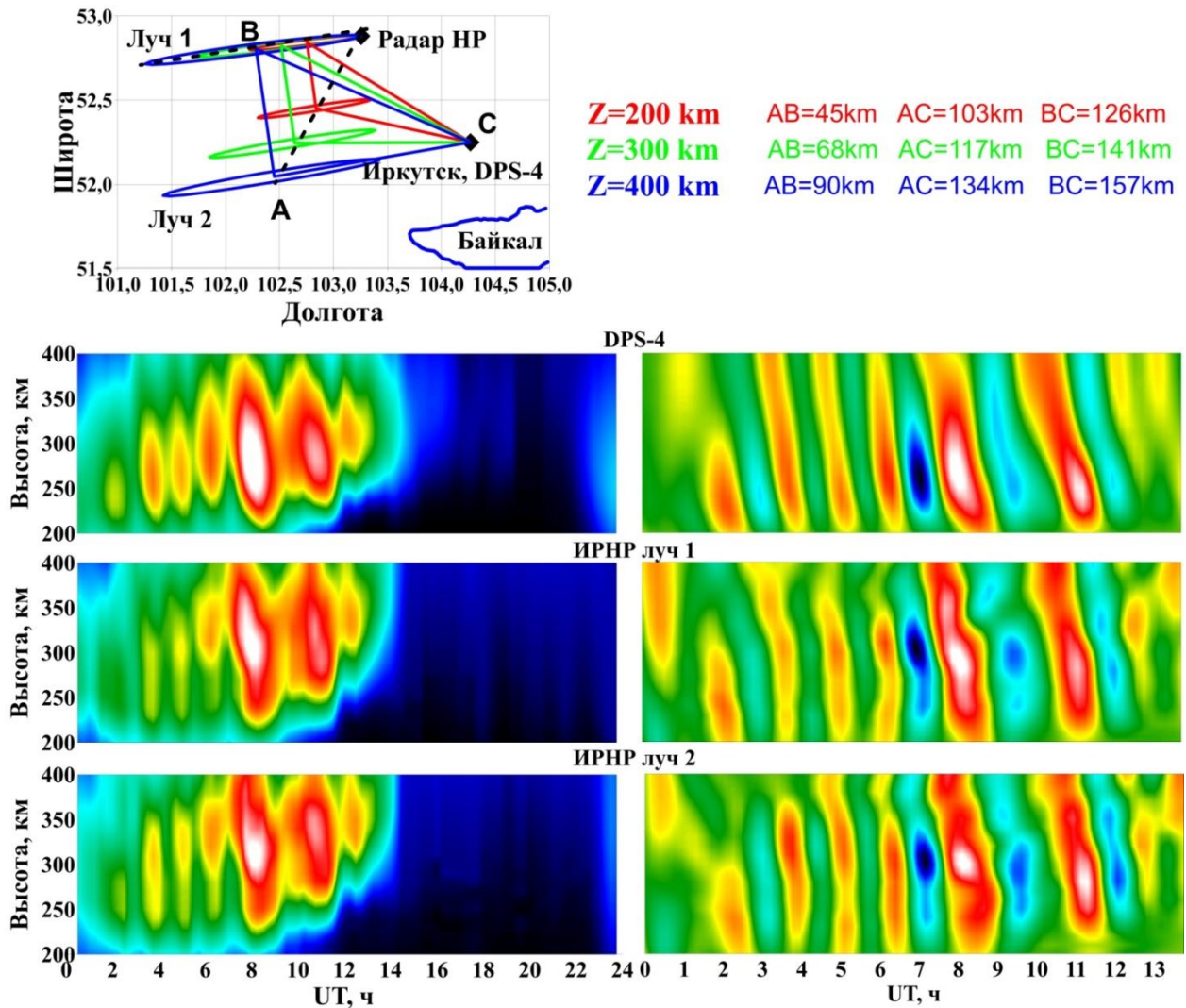


Рисунок 6. Схема расположения инструментов ИСЗФ СО РАН (вверху) и динамические характеристики перемещающихся ионосферных возмущений, измеренные с их помощью (внизу)

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 IRI-2012.

На рисунке 7 представлены результаты, полученные для условий низкой солнечной активности. Ряд **a** соответствует суточному поведению $N_e(r)$ на трех

высотах: 200 км (синяя линия), 300 км (красная линия), 400 км (зеленая линия) по данным ИРНР, ряд **b** — пространственно-временным изменениям усредненных значений $N_e(r)$ по данным ИРНР, нормированных на суточно-высотный максимум. В рядах **c** и **d** приведены пространственно-временные изменения $N_e(r)$ согласно ГСМ ТИП [Namgaladze, 1988] и IRI-2012 [Bilitza, 2014] соответственно. Во всех четырех рядах столбец **1** соответствует зимнему сезону, **2** — летнему, **3** — весеннему и **4** — осеннему сезону.

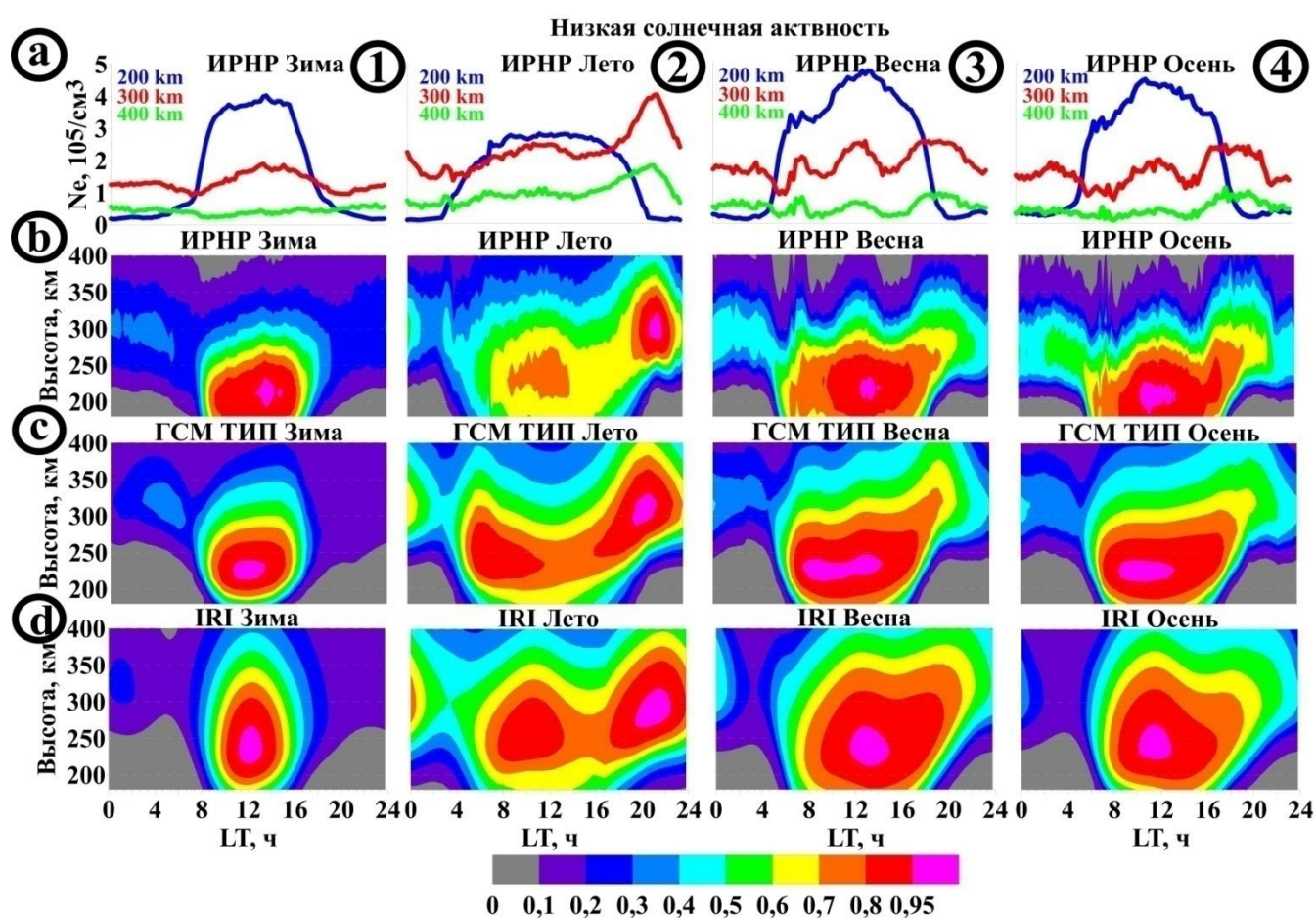


Рисунок 7. Низкая солнечная активность. Ряд **a** — суточное поведение $N_e(r)$ на высотах 200 км (синяя линия), 300 км (красная линия), 400 км (зеленая линия) по данным ИРНР. Ряд **b** — пространственно-временные изменения усредненных значений $N_e(r)$ по данным ИРНР, нормированных на суточно-высотный максимум. Ряды **c** и **d** — пространственно-временные изменения $N_e(r)$ согласно ГСМ ТИП и IRI-2012 соответственно. Столбец **1** соответствует зимнему сезону, **2** — летнему, **3** — весеннему и **4** — осеннему сезону

На рисунке 8 изображены результаты измерений для условий умеренной солнечной активности. Положение панелей полностью соответствует рисунку 7.

Суточный ход $N_e(r)$ для всех сезонов и уровней солнечной активности на высотах ~ 200 км согласуется с изменением зенитного угла Солнца и имеет выраженный максимум днем и минимум ночью. Начиная с высоты 280 км, в суточном ходе $N_e(r)$ появляются новые квазипериодические структуры, не зависящие от вариаций зенитного угла Солнца.

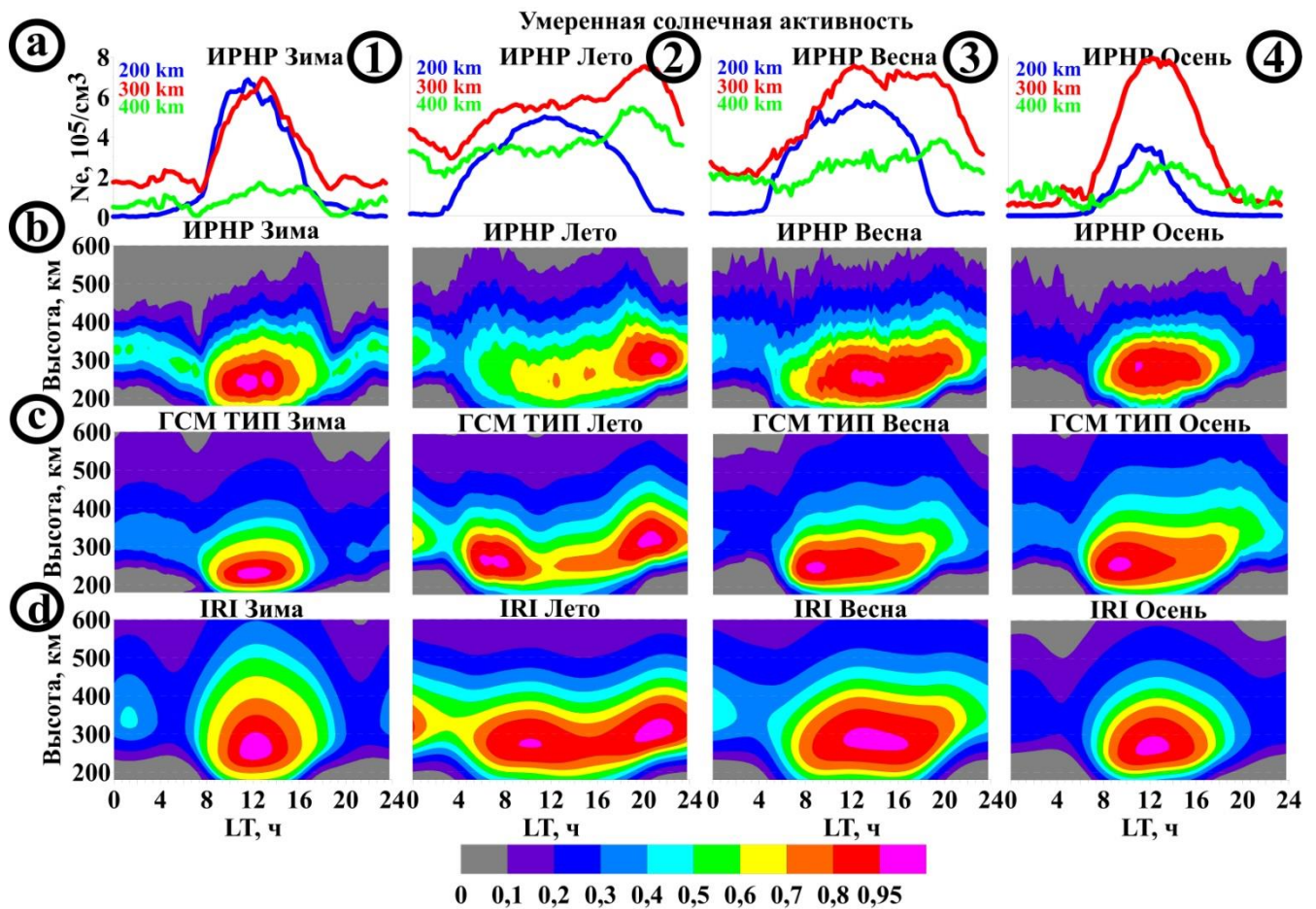


Рисунок 8. То же, что и на рисунке 7, при умеренной солнечной активности

Рассмотрим индивидуальные особенности поведения $N_e(r)$ в различные сезоны. Зимой в период низкой солнечной активности, начиная с высот более 340 км, ночные значения $N_e(r)$ превышают дневные. При умеренной солнечной активности $N_e(r)$ характеризуется ночными значениями намного меньшими, чем дневные. На высотах 280–350 км в суточном ходе N_e наблюдаются ночной и днев-

ной максимумы. На данных высотах дневной максимум больше ночного в ~ 1.5 раза при низкой солнечной активности и в ~ 3.5 раза при умеренной.

Летом, независимо от уровня солнечной активности, наблюдается вечернее возрастание электронной концентрации, начиная с высоты ~ 280 км. Вечерний максимум превалирует над полуденным значением N_e . Наибольшие различия наблюдаются на высоте ~ 300 км при низкой и умеренной солнечной активности и составляют 1.6 и 1.4 раза соответственно.

В весенний сезон внимания заслуживает суточный ход $N_e(r)$ в условиях низкой солнечной активности, представляющий собой квазипериодическую структуру с ночным, утренним, дневным и вечерним максимумами, тогда как при умеренной активности в суточном ходе $N_e(r)$ наблюдаются доминирующий дневной максимум на высоте 300 км и вечерний максимум на высоте 400 км.

Суточный ход $N_e(r)$ в осенний сезон при низкой солнечной активности имеет квазипериодическую структуру, сопоставимую с таковой в весенний сезон. Различие состоит только в отсутствии утреннего максимума в осенний сезон. При умеренной солнечной активности доминирующим максимумом $N_e(r)$ на всех высотах является дневной.

Сравнение с моделями показало, что некоторые особенности поведения $N_e(r)$ лучше согласуются с данными ГСМ ТИП, чем с данными IRI. К ним относятся близость дневных и ночных значений $N_e(r)$ в зимний период на высоких высотах при низкой солнечной активности и наличие утреннего максимума $N_e(r)$ в летний период на высоте 400 км и более при умеренной солнечной активности. При этом ни одна модель не способна детально воспроизвести квазипериодическую структуру с несколькими максимумами в суточных вариациях $N_e(r)$ на высотах 300 км и выше в весенний и осенний сезоны. Однако ГСМ ТИП пытается воспроизвести утренние и дневные максимумы, присутствующие в данных ИРНР для весеннего сезона, и даже в то же местное время.

Проведено сравнение усредненных суточных вариаций электронного содержания, полученных с помощью ИРНР и Иркутского ионозонда DPS-4, в нижней (180–250 км) и верхней (250–600 км) ионосфере. В первом случае целью сравне-

ния была взаимная калибровка инструментов, во втором — тестирование методики экстраполяции профиля, используемой на ионозонде [Reinisch, Huang, 2001]. Результаты представлены на рисунке 9, красной кривой обозначены суточные вариации электронного содержания по данным ИРНР, синей — по данным Иркутского ионозонда DPS-4.

Для нижней ионосферы различия между данными двух инструментов меньше при умеренной солнечной активности, чем при низкой солнечной активности. Это объясняется тем, что при умеренной солнечной активности высоты максимума превышают 250 км, тогда как при низкой активности высоты максимума в основном меньше 250 км.

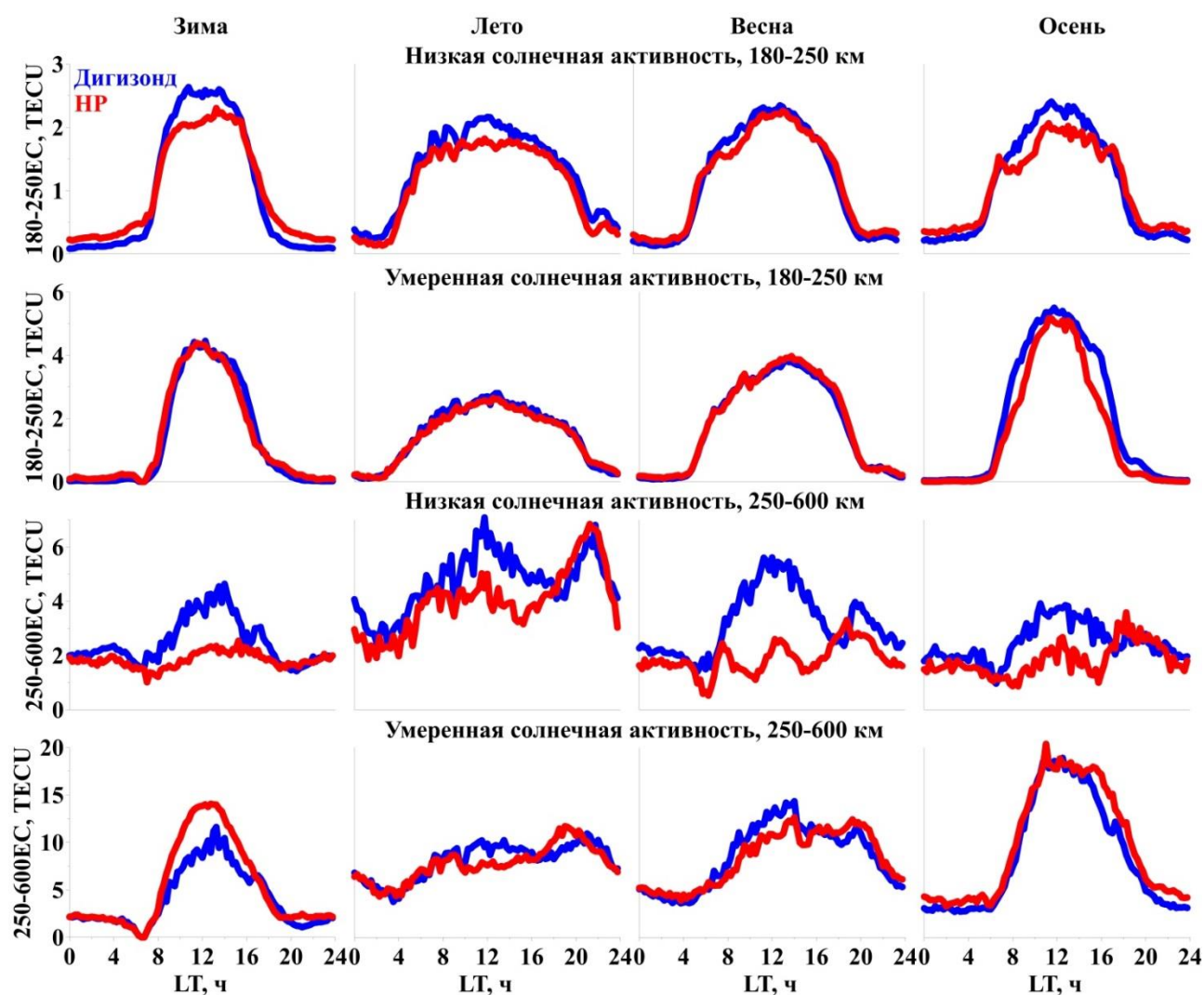


Рисунок 9. Суточные вариации электронного содержания по данным ИРНР (красная кривая) и Иркутского ионозонда DPS-4 (синяя кривая)

Для верхней ионосферы наибольшие различия в электронном содержании проявляются в минимуме солнечной активности в зимний, весенний и осенний периоды. Следует заметить, что в суточных вариациях электронного содержания верхней ионосферы в весенний период по данным ионозонда (в отличие от данных радара) отсутствует трехпиковая структура, при этом в осенний период данные двух инструментов показывают схожие суточные вариации электронного содержания.

На рисунке 10 представлены зависимости интенсивностей относительных амплитуд суточной (красная линия), полусуточной (зеленая линия) и третьесуточной (синяя линия) гармоник от высоты для всех сезонов в условиях низкой и умеренной солнечной активности, а также высотно-суточное поведение фазы суточной гармоники (красная линия). Графики демонстрируют вклад каждой гармоники на различных высотах.

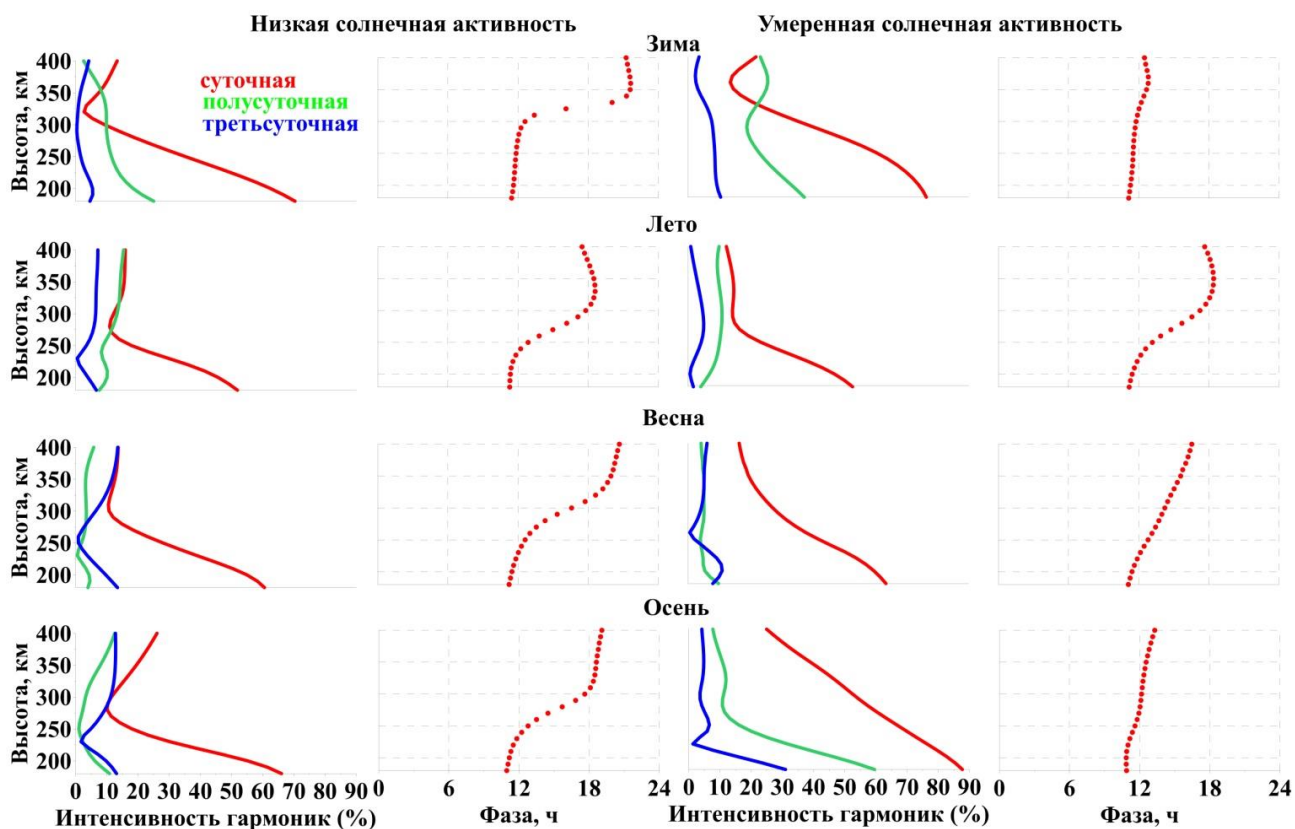


Рисунок 10. Высотные зависимости интенсивности суточной (красная линия), полусуточной (зеленая линия) и третьесуточной (синяя линия) гармоник и высотно-суточное поведение фазы суточной гармоники (красная линия) в различные сезоны в условиях низкой и умеренной солнечной активности

Анализ представленных данных показал, что в период умеренной солнечной активности суточная гармоника является доминирующей, за исключением зимнего периода, когда доминирующей становится полусуточная гармоника в диапазоне высот 330–380 км. При низкой солнечной активности суточная гармоника перестает доминировать в следующих случаях: зимой на высотах 310–340 км начинает преобладать полусуточная гармоника; летом на высотах 280–400 км амплитуды полусуточной и суточной гармоник становятся сопоставимыми; весной на высотах 350–400 км и осенью на высотах 280–320 км амплитуды третьсуточной и суточной гармоники становятся сопоставимыми.

Разработанные методы являются частью программного комплекса вторичной обработки данных ИРНР, позволяющего в режиме реального времени и в полностью автоматическом режиме получать данные о динамике $N_e(r)$. Полученные данные востребованы в сфере как фундаментальных, так и прикладных исследований состояния ионосферы Земли.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан метод определения характеристик зондирующего сигнала, обеспечивающих наилучшую точность восстановления профиля мощности фарадеевских замираний, 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации в изданиях, входящих в перечень ВАК или в международные реферативные базы:

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 radiophysical 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. 10851–10863. — 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. Alsatkin**, 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.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // Pure Appl. Geophys. — 1988. — Vol. 127, no. 2/3. — P. 219–254.
3. Nygren T. Introduction to Incoherent Scatter Measurements. — Sodankylä: Invers, 1996. — 140 p.
4. Farley D.T. A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma: 4. The effect of unequal ion and electron temperatures // J. Geophys. Res. — 1966. — Vol. 71, no.17. — P. 4091–4098.
5. Lehtinen M.S., Haggstrom I.A. A new modulation principle for incoherent scatter measurements // Radio Sci. — 1987. — Vol. 22, no. 4. — P. 625–634. — doi: 10.1029/RS022i004p00625.
6. Lehtinen M.S., Dantie B., Nygren T. Optimal binary phase codes and sidelobe-free decoding filters with application to incoherent scatter radar // Ann. Geophys. — 2004. — Vol. 22, no. 5. — P. 1623–1632. — doi: 10.5194/angeo-22-1623-2004.
7. Reinisch B.W., Huang X. Vertical electron content from ionograms in real time // Radio Sci. — 2001. — Vol. 36, no. 2. — P. 335–342.
8. 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.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН

Заказ № от 2023 г.

Объем 28 с. Тираж 150 экз.