УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-476
ORCID: 0009-0002-5448-1869

ФИТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ NEQUICK2, КОМБИНИРОВАННОЙ С МОДЕЛЬЮ СЛОЯ ЧЕПМЕНА, ПО ДАННЫМ ИРНР

Т.А. Чучук, В.А. Ивонин, В.П. Лебедев

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
tamara@chuchuk.ru

PARAMETER FITTING OF THE NEQUICK2 MODEL COMBINED WITH THE CHAPMAN LAYER MODEL, USING IISR DATA

T.A. Chuchuk, V.A. Ivonin, V.P. Lebedev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, tamara@chuchuk.ru

Аннотация. В работе представлен метод обработки данных Иркутского радара некогерентного рассеяния путем фитирования параметров комбинированной модели ионосферы. Комбинированная модель объединяет слои Чепмена и Эпштейна (до и после h_mF2), что позволяет повысить точность и гибкость описания высотного профиля электронной концентрации. Разработан алгоритм, реализующий данную методику и позволяющий автоматически подобрать параметр g для модели Эпштейна. Тестирование на реальных измерениях подтвердило эффективность подхода: комбинированная модель показывает лучшее соответствие результатам наблюдений по сравнению с фитированием одной моделью Чепмена.

Ключевые слова: ионосфера, модель слоя Эпштейна, NeQuick2.

Abstract. This paper presents a method for processing data from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR) through parameter fitting of a combined ionospheric model. The combined model integrates the Chapman and Epstein layers (before and after h_mF2), which enhances the accuracy and flexibility of describing the altitude profile of electron concentration. An algorithm has been developed that implements this methodology, allowing for the automatic selection of the g parameter for the Epstein layer model. Testing on real measurements confirmed the effectiveness of the approach: the combined model demonstrates better agreement with observational results compared to fitting with the Chapman layer model alone.

Keywords: ionosphere, Chapman layer, NeQuick2.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование профиля электронной концентрации N_e в верхней части ионосферы выше максимума слоя F2 остается актуальной научной задачей, поскольку в этой области наблюдаются существенные ограничения по сравнению с нижней частью ионосферы (bottom-side), в верхней части измерения возможны только радарами НР и спутниками. Однако радары НР и спутниковые измерения, из-за своих особенностей, не позволяют обеспечить наблюдения в режиме мониторинга, что приводит к недостатку прямых измерений в верхней ионосфере и затрудняет точное моделирование распределения электронной концентрации.

Современные модели, включая NeQuick2 и IRI, демонстрируют ограниченную точность при описании высотного профиля N_e выше максимума слоя F2. Это обусловлено несколькими факторами: упрощенными аналитическими аппроксимациями, не учитывающими локальные особенности распределения плазмы, а также сложностью учета пространственно-временной изменчивости параметров верхних слоев ионосферы.

В связи с этим целью настоящего исследования является фитирование параметров эмпирической модели NeQuick2 [Матюшин Б.А. и др., 2025] в комбинации с аналитической моделью слоя Чепмена для улучшения описания высотного профиля N_e по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). Ключевой задачей является автоматический подбор параметров r (полутолщина слоя) и g (градиент) с использованием алгоритма минимизации невязки между модельными и экспериментальными данными. Зависимость N_e от этих параметров выражается уравнением для полуэпштейновского слоя выше максимума слоя F2 (h_mF2):

$$N(h) = \frac{4NmF2}{\left(1+\exp(z)\right)^2}\exp(z), z = \frac{h - hmF2}{H},$$

$$H = H_0\left[1 + \frac{rg(h - hmF2)}{rH_0 + g(h - hmF2)}\right]$$

МЕТОД

Модель NeQuick2 была выбрана для исследования по ряду причин: по сравнению с IRI она обладает более удобной параметризацией верхней части профиля N_e, также учитывает региональные особенности распределения N_e, успешно применяется в задачах навигации и связи (включена в рекомендации МСЭ), а также допускает локальную коррекцию параметров по данным КВ-ионозондов и радаров. Успешность подобного подхода с ассимиляцией данных ГНСС и ионозондов подтверждена в работе [Павлов И.А. и др., 2023].

Аналитическая модель слоя Чепмена, несмотря на широкое использование, имеет существенные ограничения при описании убывания N_e в верхней ионосфере. Классическая форма функции не всегда адекватно описывает сложные профили N_e. Кроме того, параметры r и g часто принимаются постоянными, что не всегда соответствует измерениям.

Для подгонки параметров r и g в рамках исследования применяется метод наименьших квадратов (МНК) как частный случай метода максимального правдоподобия. При этом делаются следующие предположения: ошибки измерений считаются некоррелированными (белый шум), распределение ошибок — гауссовским, а функционал невязки имеет вид $S(r,g) = \sum\left(P_{model}\left(N_e(r,g)\right) - P_{obs}\right)^2 \to min$, где $P_{model}\left(N_e(r,g)\right)$ — теоретический расчет по комбинированной модели, а P_{obs} — данные ИРНР.

Экспериментальные данные для фитирования параметров модели получены на ИРНР, который обладает рядом существенных преимуществ для решения поставленной задачи. Во-первых, он способен зондировать ионосферу на высотах в среднем до 600 км, что значительно превышает уровень h_mF2. Во-вторых, радар обеспечивает высокую временную разрешающую способность (минуты) и разрешение по высоте ~1–5 км. В-третьих, длительный ряд непрерывных измерений (десятки лет) позволяет анализировать вариации параметров в различных геофизических условиях.

В качестве примера работы программы далее представлены результаты обработки данных ИРНР за 19 марта 2024 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе выполнения работы было установлено отсутствие значимой зависимости от параметра r, что находится в соответствии с результатами, полученными в исследованиях [Павлов И.А. и др., 2023]. На рис.1 показана кривая ошибок (по МНК) для параметра g. Для конкретного времени (7 UTC) был определен оптимальный параметр g, обеспечивающий наилучшее соответствие модели экспериментальным данным.

Методика расчета набегающей фазы была реализована с учетом физической специфики распределения N_e в ионосфере. В области ниже h_mF2 используется фаза, рассчитанная на основе модели слоя Чепмена [Алсаткин С.С. и др., 2020], которая демонстрирует высокую точность в описании нижней части профиля. В области выше h_mF2 расчет фазы осуществляется с использованием описанной ранее комбинированной модели, где ключевую роль играет найденное оптимальное значение параметра g. Результаты расчета фазы Ω и cos²(Ω) показаны на рис. 2.

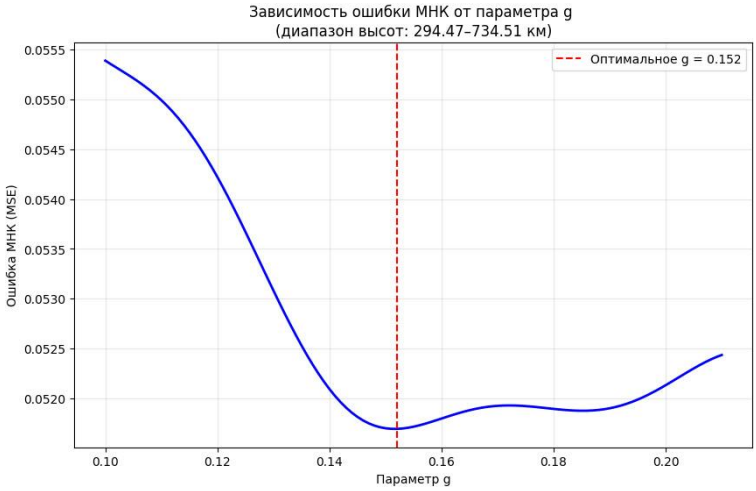

Рис. 1. Поиск оптимального значения параметра g для комбинированной модели в области высот выше h_mF2 для данных за 19.03.2024 г., 7 UTC

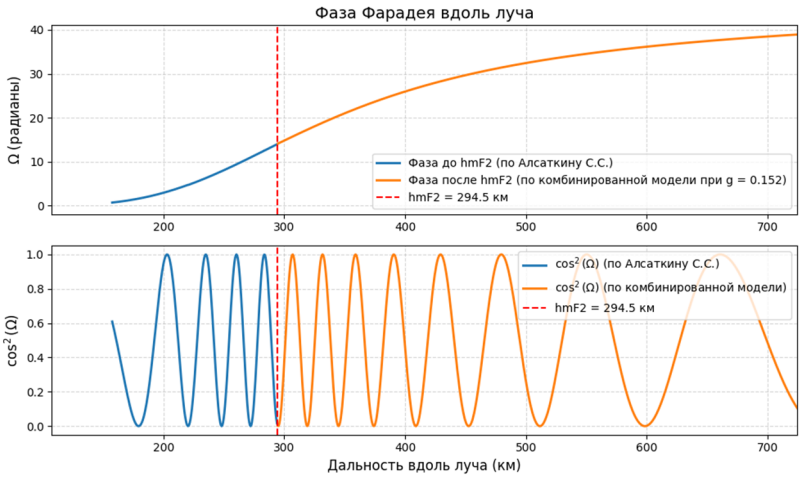

Рис. 2. Фаза Фарадея вдоль луча (до h_mF2 — модель слоя Эпштейна, после h_mF2 — комбинированная модель с найденным наилучшим параметром g)

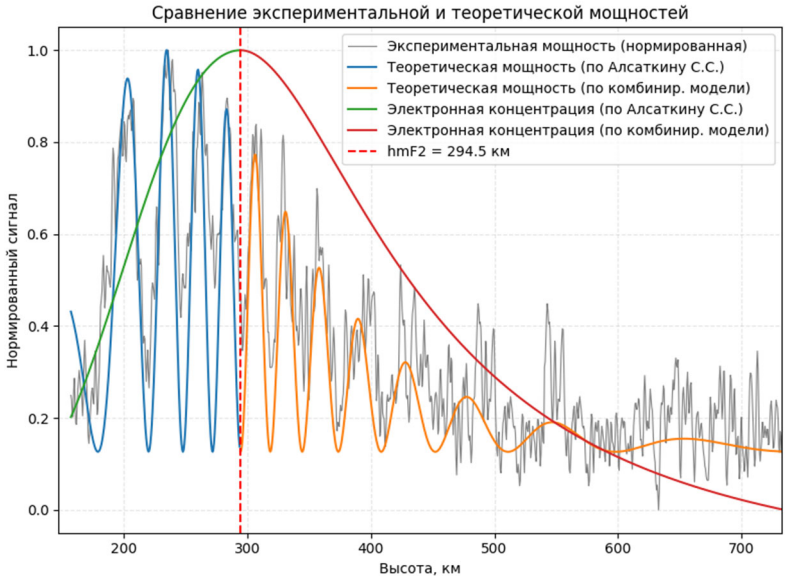

Рис. 3. Результаты построения теоретического профиля мощности в сравнении с экспериментальными данными ИРНР

На рис. 3 дан итоговый профиль мощности для указанного момента времени. Профиль показывает высокую степень соответствия экспериментальным данным ИРНР, что подтверждает эффективность предложенного подхода к моделированию высотного распределения электронной концентрации в верхней ионосфере в сравнении с применением моделей NeQuick2 и слоя Эпштейна по отдельности.

Перспективы данного исследования связаны с расширением базы калибровочных данных для повышения точности модели и ее последующим применением в решении практических задач навигации и связи, где критически важно точное знание пространственного распределения электронной плотности в верхней ионосфере.

Работы по проведению наблюдений и первичной обработке данных выполнены при поддержке Минобрнауки России (проект FWZZ-2026-0051). Результаты получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Павлов И.А., Иванов А.К., Курбатов Г.А., Падохин А.М., Илюшин Я.А. Региональная ассимиляция TEC по данным ГНСС и ионозондов в модель NeQuick2 на примере Европы // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 320. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a.

Матюшин Б.А., Захаров В.И., Сухарева Н.А., Шестаков О.В. Тестирование модели ионосферы NeQuick 2 на данных спутниковых измерений электронной концентрации // ВМУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 80(1), 2510904, 2025. DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2510904.

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности метода восстановления N_e на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 97–110. DOI: 10.12737/szf-61202009.

Хабитуев Д.С., Жеребцов Г.А., Ивонин В.А., Лебедев В.П. Оценка электронного содержания плазмосферы и высоты перехода O^+/H^+ во время геомагнитной бури в феврале 2022 г. по данным Иркутского радара НР // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 4. С. 31–40. DOI: 10.12737/szf-104202404.

Шпынев Б.Г., Жеребцов Г.А., Тащилин А.В. и др. Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным измерений на Иркутском радаре НР // Солнечноземная физика. 2010. № 16. С. 3–8.

Ташлыков В.П., Медведев А.В., Васильев Р.В. Модель сигнала обратного рассеяния для Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 2. С. 55–65. DOI: 10.12737/szf-42201805.