УДК 550.388.8
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-392
ORCID: 0009-0008-9992-1032

ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОГО СОПРЯЖЕНИЯ В ПАРАМЕТРАХ ИОНИЗОВАННОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ АТМОСФЕРЫ СРЕДНИХ ШИРОТ

А.Д. Шелков, Р.В. Васильев, И.К. Едемский, А.В. Михалев, М.Ф. Артамонов, К.Г. Ратовский

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, alshel@iszf.irk.ru

MAGNETICALLY CONJUGATED EFFECTS IN NEUTRAL AND CHARGED COMPONENTS OF THE MIDLATITUDE UPPER ATMOSPHERE

A.D. Shelkov, R.V. Vasilyev, I.K. Edemskiy, A.V. Mikhalev, M.F. Artamonov, K.G. Ratovsky

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, alshel@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа ночного свечения атмосферы на длине волны 630 нм за период 2022–2023 гг. Определен вклад магнитосопряженной ионосферы в свечение красной линии атомарного кислорода над Восточной Сибирью. В процессе работы была выявлена и компенсирована методологическая ошибка расчета концентрации O_2^+ ионным калькулятором модели IRI-2020, а также проведена фотометрическая калибровка аэрономического интерферометра Фабри — Перо Национального гелиогеофизического комплекса РАН.

Ключевые слова: ночное свечение, нейтральная компонента верхней атмосферы, предутреннее усиление, магнитное сопряжение, ионосфера.

Abstract. This paper presents the results of analysis of the atmospheric nightglow at a wavelength of 630 nm over the period 2022–2023. The contribution of the magnetically conjugated ionosphere to atomic oxygen line airglow over Eastern Siberia has been revealed. We identified and compensated for a methodological error in the O_2^+ concentration calculation by the ionospheric calculator of the IRI-2020 model; besides, we conducted a photometric calibration of the aeronomical Fabry — Perot interferometer of the National Heliogeophysical Complex of RAS.

Keywords: nightglow, neutral component of the upper atmosphere, predawn enhancement, magnetic conjugation, ionosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Свечение атомарного кислорода на длине волны 630 нм является одним из основных инструментов диагностики нейтральной атмосферы на термосферных высотах. Именно на высоте высвечивания красной линии находится максимум F-слоя ионосферы. На этих высотах находятся орбиты множества спутников дистанционного зондирования Земли и двух существующих орбитальных станций — МКС и Тяньгун. Поэтому понимание процессов, влияющих на характеристики термосферы, крайне важно.

Высоты высвечивания красной линии лежат в диапазоне 200–400 км. Источником фотонов 630 нм являются возбужденные атомы кислорода O(1D), переходящие в основное состояние O(3P) [Шефов и др., 2006]. Можно выделить три ветви генерации возбужденных состояний [Тащилин, Леонович, 2016]:

— диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов O_2^+

$$[O(1D)] = f(1D) \cdot 1.95 \cdot 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.7} \cdot \frac{[O_2^+]n_e}{L_{630}};$$

— ударное возбуждение атомов O тепловыми электронами

$$[O(1D)] = 0.596 \cdot \frac{9329+T_e}{(51813+T_e)^3} \cdot \sqrt{T_e}$$
$$exp\ exp\ \left(-\frac{22576}{T_e}\right) \frac{[O]n_e}{L_{630}};$$

— ударное возбуждение атомов O сверхтепловыми электронами

$$[O(1D)] = 4\pi \frac{[O]}{L_{630}} \cdot \int_{E_{1D}}^{\infty} I_O^{(1D)}(E)\Phi_0(E)dE\ .$$

Время жизни возбужденного состояния O(1D) составляет порядка 110 с. За это время после столкновения с другой частицей возбуждение может быть снято безызлучательно. Следовательно, необходимо учитывать эти потери возбужденных состояний:

$$L_{630} = A_{1D} + 10^{-11} \cdot \left(0.16 \cdot T_e^{0.91} n_e + 0.8[O] + 2.9 \cdot e^{\frac{68}{T_e}}[O_2] + 2e^{\frac{108}{T_n}}[N_2]\right).$$

В геомагнитно-спокойные периоды ночное свечение красной линии описывается практически исключительно вкладом диссоциативной рекомбинации. Однако зимой в средних широтах за несколько часов до рассвета наблюдается аномальный рост интенсивности свечения на длине волны 630 нм, или, другими словами, предрассветное усиление свечения красной линии атомарного кислорода. Это явление было впервые описано Барбье в 1959 г. [Barbier, 1959]. Последующие многолетние наблюдения, в частности в обсерватории Абастумани, подтвердили регулярность этого эффекта в спокойных геомагнитных условиях и определили оптимальные условия его регистрации: высота апогея магнитной силовой линии L=1.1–3.0 и угол места Солнца около –16° [Fishkova, Mateshvili, 1972; Фишкова, 1983]. Диссоциативной рекомбинацией такое усиление свечения объяснить нельзя. На сегодняшний день основное объяснение явления звучит так: на другом конце магнитной линии, в магнитосопряженной (МС) точке, начинается рассвет. Солнечное излучение

приводит к генерации большого количества фотоэлектронов, часть из которых вылетает из ионосферы в магнитосферу. Там вдоль магнитной силовой линии электроны попадают в зимнее полушарие. Часть этих фотоэлектронов попадает в уже зимнюю ионосферу, что приводит к всплеску темпов ударного возбуждения атомов кислорода. Эти атомы затем высвечивают.

Комбинированное использование оптических и радиофизических инструментов позволяет разделить вклады различных компонент в свечение. Это, в свою очередь, позволит определить количество пришедших в предрассветные часы фотоэлектронов. Полученные в работе количественные оценки вклада диссоциативной рекомбинации, возбуждения тепловыми и сверхтепловыми электронами в свечение позволят разработать методику диагностики магнитосферы с помощью наземных инструментов.

ИНСТРУМЕНТЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для проведения исследования использовались данные за 2022–2023 гг. следующих наземных инструментов ИСЗФ СО РАН и моделей:

1. Аэрономический интерферометр Фабри — Перо (ИФП) KEO Scientific «Arinae» (входит в состав УНУ «Оптические инструменты» ИСЗФ СО РАН). Использовались данные прибора по интегральной интенсивности свечения линии 630 нм и температуре компоненты в слое ~200–400 км [Васильев и др., 2017].
2. Цифровой ионозонд DPS-4. Использовались данные о высотном профиле электронной концентрации.
3. MSIS 2.1 использовалась для получения данных о высотных профилях концентрации нейтральных компонент атмосферы [Emmert et al., 2022].
4. IRI-2020 использовалась для получения данных о высотных профилях концентрации ионов и электронной температуры [Bilitza et al., 2022].
5. Плазмосферно-ионосферная модель (ПИМ) ИСЗФ использовалась как источник данных об электронных температурах и интенсивности компонент свечения красной линии [Кринберг, Тащилин, 1984].

Рассматривались ночи с низкой геомагнитной активностью ($Dst > -50$ нТл и $Kp <= 4$) и малой облачностью. Облачность определялась с помощью камеры ФИЛИН [Подлесный и др., 2020]

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

При моделировании интенсивности свечения 630 нм с использованием модели IRI-2020 была выявлена критическая методологическая проблема. Алгоритм ионного калькулятора модели делит ионосферу на два диапазона: нижний (60–300 км, модель RBV10) и верхний (300–2000 км, модель TBT15). В точке сшивки (300 км) происходит резкая смена приближений, что приводит к скачкообразному исчезновению тяжелых ионов O_2^+ выше этой высоты, являющихся основным источником возбужденных атомов O(1D). Это занижает интегральную интенсивность свечения на ~5 Рл (50–80 % от зимней интенсивности, измеренной около полуночи).

Для компенсации этого артефакта применялась процедура экстраполяции: профиль концентрации O_2^+ аппроксимировался логарифмической функцией по пяти последним точкам (250–290 км) перед обрывом с последующим продолжением до 600 км. Данный метод применим при условии, что глобальный максимум концентрации находится ниже зоны экстраполяции, что подтвердилось для спокойных геомагнитных условий (случаи ухода максимума выше 300 км составляли <0.02 % и были отфильтрованы).

РЕЗУЛЬТАТЫ

После моделирования свечения красной линии атомарного кислорода была проведена фотометрическая калибровка ИФП путем сопоставления модельной абсолютной интенсивности и измеренной относительной интенсивности. Данные ИФП брались для зенитного направления луча зрения. Методом наименьших квадратов был определен линейный тренд между модельными и инструментальными данными. Таким образом, средний калибровочный коэффициент за два года наблюдений составил 0.873 Рл/отн.ед. Фотометрическая калибровка сделала возможным выделение вклада разных процессов в измеренные интенсивности свечения красной линии.

Для оценки влияния МС-точки из измеренной ИФП интенсивности вычиталась смоделированная интенсивность, обусловленная исключительно диссоциативной рекомбинацией. Анализ разностных кривых (рис. 1) показал следующее:

— Вечером большие значения ΔI объясняются остаточной энергией в атмосфере после захода Солнца.

— К полуночи происходит термализация атмосферы и вклад диссоциативной рекомбинации в свечение становится доминирующим.

— Весной и осенью в предутренние часы наблюдается рост свечения, не описываемый механизмом диссоциативной рекомбинации. Рассвет в области наблюдений на высоте 250 км уже произошел, следовательно, это можно объяснить влиянием Солнца.

— Зимой рост интенсивности начинается за 2–3 ч до локального рассвета, почти сразу после рассвета в МС-точке, причем после проверки различных гипотез выяснилось, что рост происходит именно за счет сверхтепловых электронов.

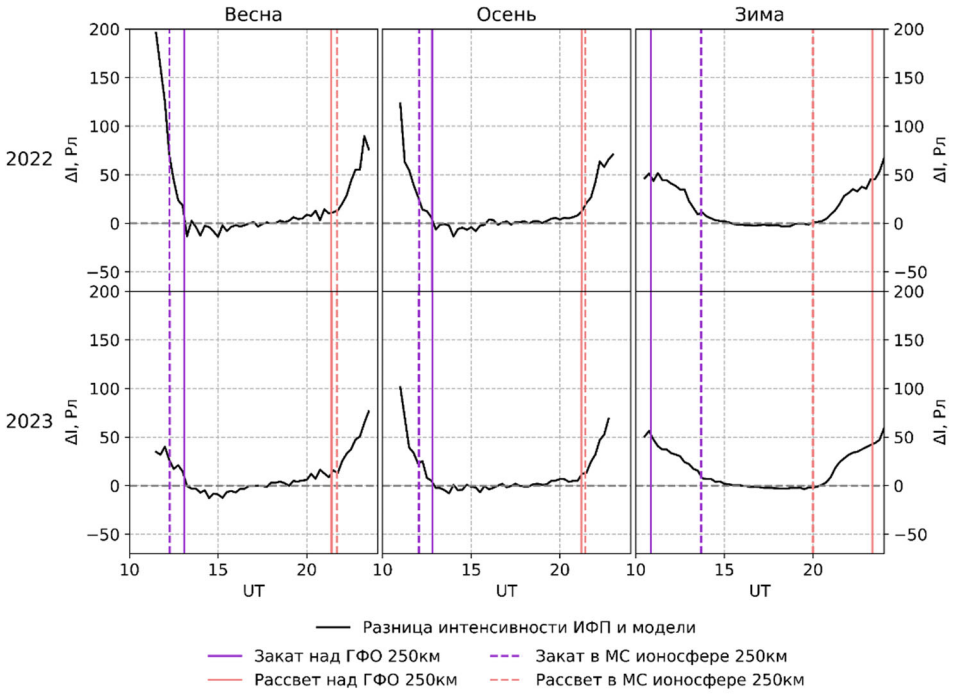

Рис. 1. Разности среднесезонного ночного хода интенсивности свечения линии 630 нм по данным ИФП и модели

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо KEO Scientific «Arinae» // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87. DOI: 10.12737/szf-33201707.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984, 189 с.

Подлесный С.В., Девятова Е.В., Саункин А.В., Васильев Р.В. Сопоставление методов определения облачного покрова над Байкальской природной территорией в декабре 2020 г. // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 4. С. 102–109. DOI: 10.12737/szf-84202210.

Тащилин А.В., Леонович Л.А. Моделирование ночных свечений красной и зеленой линий атомарного кислорода для умеренно возмущенных геомагнитных условий на средних широтах // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 4. С. 76–84. DOI: 10.12737/21491.

Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 271 с.

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

Barbier D. Recherches sur la raie 6300 de la luminescence atmospherique nocturne // Annales de Geophysique. 1959. V. 15. P. 179.

Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., et al. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark // Rev. Geophys. 2022. V. 60, iss. 4. DOI: 10.1029/2022RG000792.

Emmert J.T., Jones Jr. M., Siskind D.E., et al. NRLMSIS 2.1: An empirical model of nitric oxide incorporated into MSIS // JGR: Space Phys. 2022. V. 127, iss. 10. DOI: 10.1029/2022JA030896.

Fishkova L.M., Mateshvili Yu.D. The predawn enhancement of the airglow λλ 6300Å (OI) emission according to observation in Abastumani // Ann. Geophys. 1972. V. 28, iss. 2. P. 497–501.