

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.036

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ И ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ-ПЕРО

А.Д. Шелков, Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

E-mails: *alshel@iszf.irk.ru; roman_vasilyev@iszf.irk.ru; artamonov.maksim@mail.iszf.irk.ru*

Аннотация

На сегодняшний день в Восточной Сибири методы изучения заряженной компоненты верхней атмосферы достаточно развиты. Однако, все еще немного инструментов для изучения нейтральной компоненты. С 2016 года, в геофизической обсерватории «Торы» ведется наблюдение нейтральной компоненты с помощью интерферометров Фабри-Перо КЕО Arinae. Они могут измерять температуру и скорость воздуха на высоте 250 км путем анализа спектральных параметров свечения с длиной волны 6300 Å. Получаемые таким образом данные могут говорить и о количестве излучения, но для этого необходимо провести фотометрическую калибровку интерферометров. Возбужденные атомы кислорода $O(^1D)$ спонтанно излучают фотоны с длиной волны 6300 Å. Так как известна цепочка реакций, приводящая к рождению атомов $O(^1D)$, можно вывести соотношение между концентрациями атомов кислорода и электронов с использованием данных Иркутского радара некогерентного рассеяния. Полученную модель интенсивности свечения красной линии кислорода можно сравнить с откликом ИФП.

Получены модельные распределения яркости по времени с использованием данных ИФП и ИРНР, а также моделей IRI и MSIS. Получены соотношения модельных яркостей и отклика интерферометра, коэффициент корреляции составил от 0,731 до 0,769 для случая плоского излучающего слоя и слоя толщиной 50 км. Полученная корреляция показывает, что использование модельных яркостей для фотометрической калибровки интерферометров Фабри-Перо оправдано.

В рамках работы было проведено численное моделирование свечения атмосферы на длине волны 6300 Ангстрем с использованием моделей IRI и MSIS, а также данных Иркутского радара некогерентного рассеяния. Моделирование является одним из этапов фотометрической калибровки интерферометров Фабри-Перо (ИФП) КЕО Arinae, расположенных в ГФО Торы (51,07° с. ш., 103,07° в. д.). ИФП позволяют определить температуру и циркуляцию нейтральной компоненты верхней атмосферы, что, в комбинации с радиотехническими методами, дает комплексную картину атмосферы в динамике и статике. С помощью оптических приборов возможно также определять и концентрацию нейтральной компоненты, но для этого нужна калибровка.

Отправной точкой для создания модели свечения атмосферы стала высокая корреляция между измеряемой Иркутским радаром некогерентного рассеяния (ИРНР) электронной концентрацией на высоте 250 км и наблюдаемой интенсивностью свечения на длине волны 6300 Å (рис. 1).

Свечение красной линии атомарного кислорода на этой длине волны происходит в слое высотой 200-300 км с максимумом на высоте 250 км. Возбужденные атомы кислорода $O(^1D)$ излучают фотоны с длиной волны 6300 Å при переходе в невозбужденное состояние $O(^3P)$. Увеличение количества возбужденных атомов происходит в основном тремя способами:

- диссоциативная рекомбинация ионизированных молекул кислорода $e + O_2^+ \rightarrow O(^3P) + O(^1D)$;
- столкновение с тепловыми электронами $e_t + O(^3P) \rightarrow e_t + O(^1D)$;
- столкновение с фотоэлектронами $e_{ph} + O(^3P) \rightarrow e_{ph} + O(^1D)$.

Как видно, во всех них участвуют электроны.

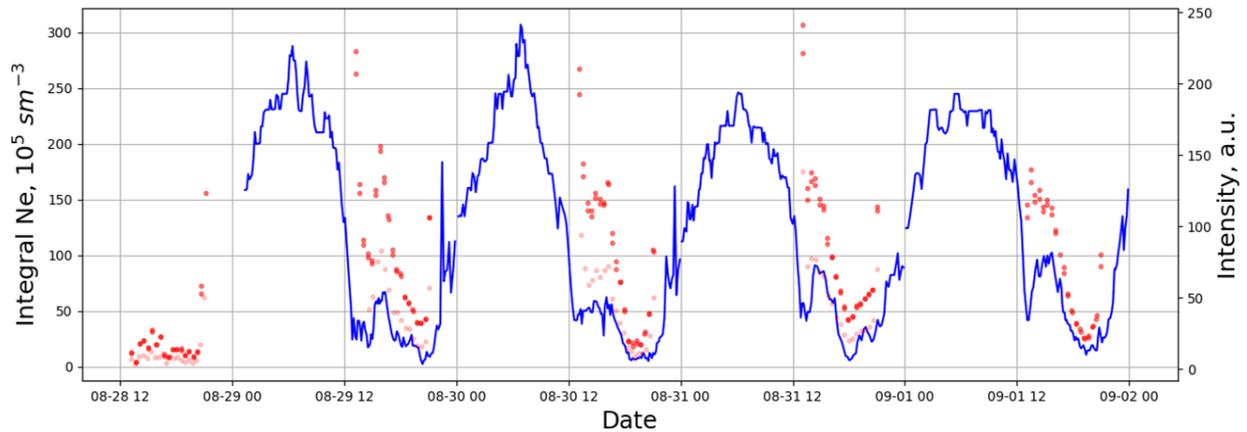


Рисунок 1. Корреляция между электронной концентрацией на высоте 250 ± 25 км (синяя линия) и интенсивностью свечения 6300 \AA (красные точки).

Объемная светимость атмосферы на длине волны 6300 \AA может быть описана как:

$$V_{6300} = \frac{0,76\beta_1 k_1 [O^+][O_2]}{1 + (k_3[N_2] + k_4[O_2] + k_5[e]) / A_{1D}},$$

где k_1, k_3, k_4, k_5 – коэффициенты частоты реакций в $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$, A_{1D} – коэффициент переноса, β_1 – выход $O(^1D)$ из реакции диссоциативной рекомбинации [1]. Значения констант были взяты из [1-5]. Концентрации компонентов реакций были взяты из данных ИРНР и ИФП, а также из моделей IRI и MSIS с некоторыми допущениями. Температуры ионов кислорода O^+ , молекул азота N_2 и кислорода O_2 брались равными. Ионы кислорода на высотах порядка 250 км составляют от 80 до 95% всех ионов (рис. 2), поэтому, можно использовать электронную концентрацию для определения концентрации иона O^+ . Полученные соотношения между смоделированными яркостями атмосферы на длине волны 6300 \AA и измеренными ИФП представлены на рисунке 3. Малые поверхностные яркости объясняются тем, что использовался тонкий излучающий слой. Из-за различия модельных электронных температур и измеренных ИРНР наблюдается разный наклон линий тренда с использованием радарных данных и без.

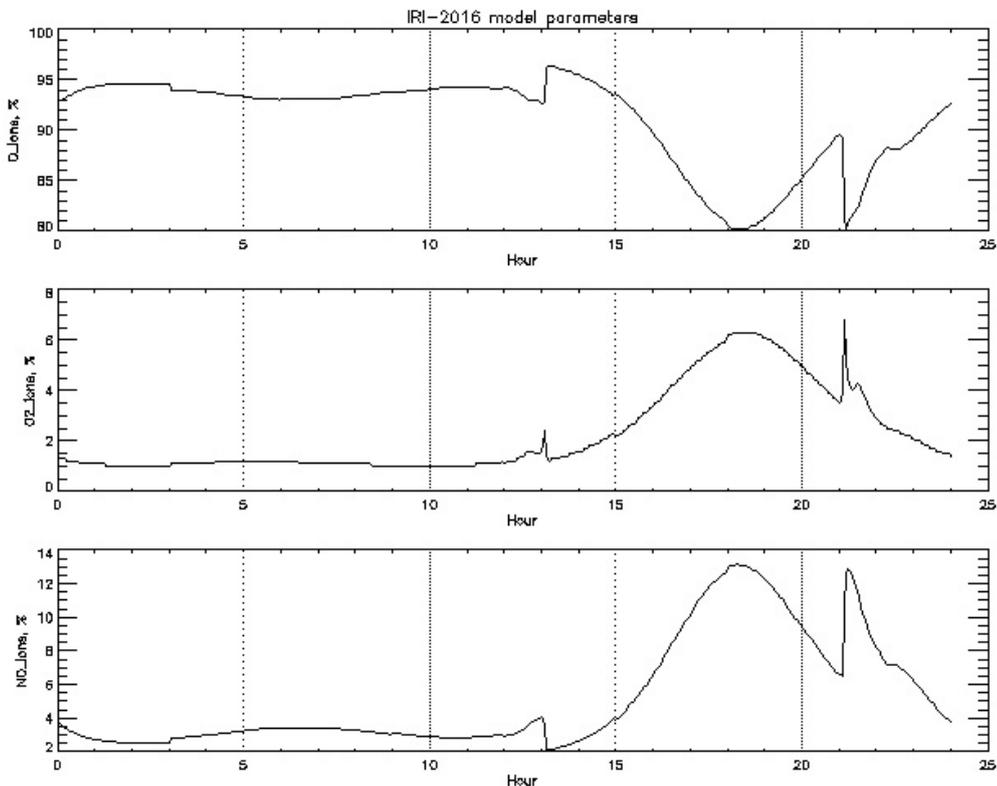


Рисунок 2. Доля ионов атомарного кислорода O^+ (сверху), молекулярного кислорода O_2^+ (по центру) и оксида азота NO^+ согласно модели IRI-2016.

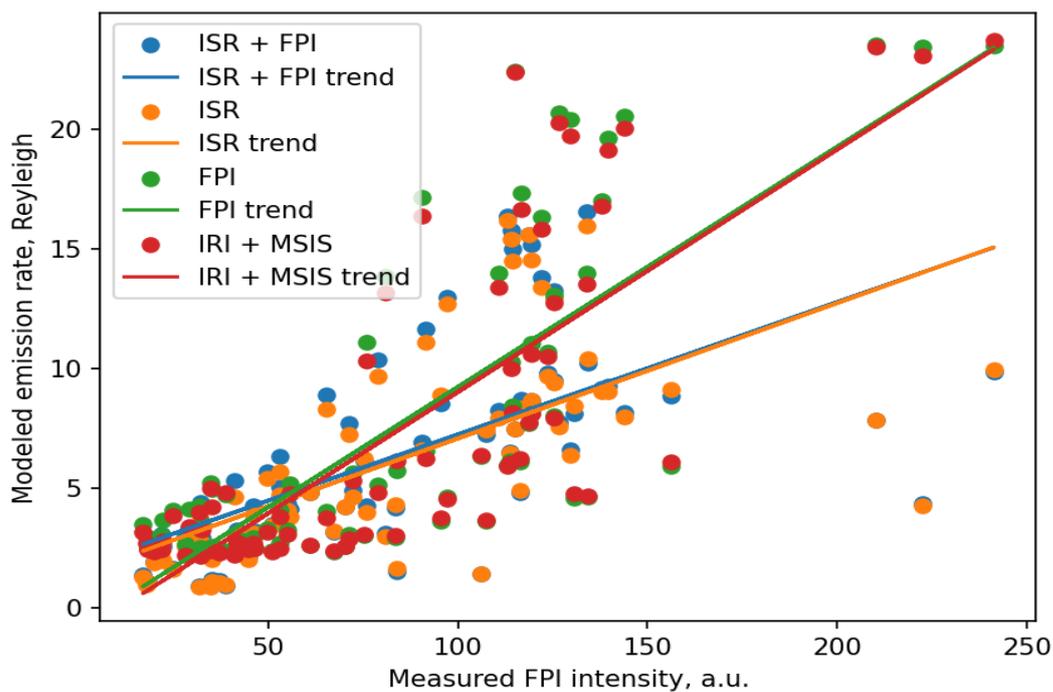


Рисунок 3. Отношение смоделированных яркостей 6300 Å к измеренным интерферометрами Фабри-Перо. Разными цветами помечены модели с использованием исходных параметров из разных источников.

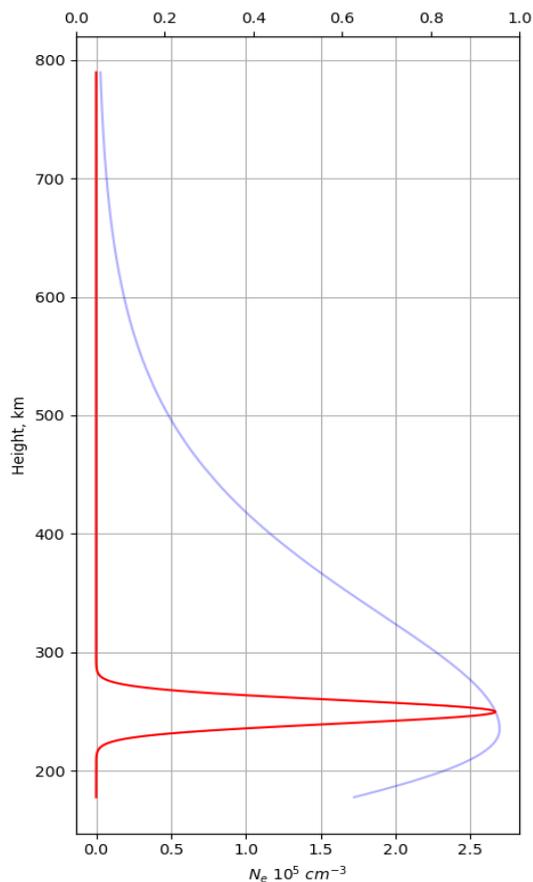


Рисунок 4. Модельное распределение количества электронов с высотой (красным) и измеренное ИРНР (синим).

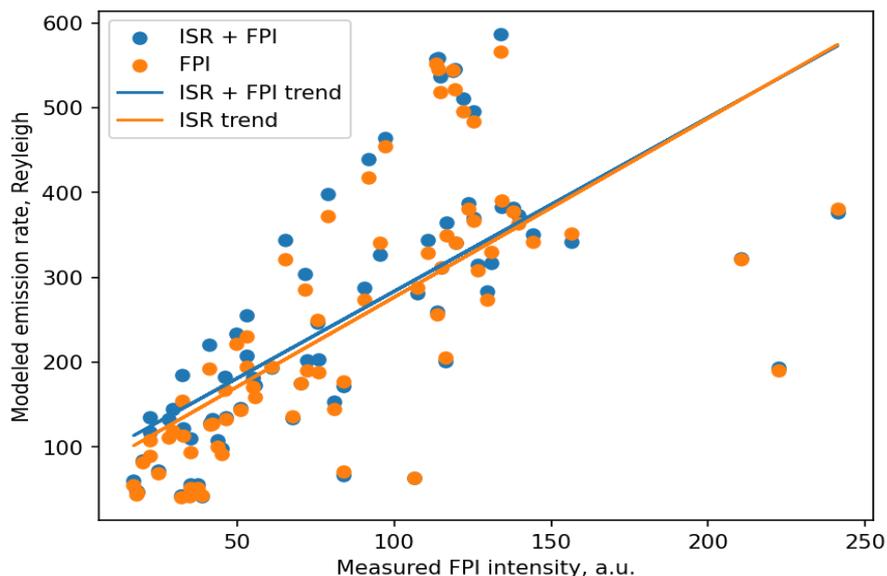


Рисунок 5. Отношение модельной поверхностной яркости 6300 \AA и измеренной интенсивности 6300 \AA ИФП.

Излучающий слой $O(^1D)$ нельзя назвать тонким (толщина порядка десятков километров). Для учета этого брался интеграл по высоте от распределения количества электронов по высоте. Распределение электронов было взято гауссовым с максимумом на высоте 250 км и шириной 50 км (рис. 4). Полученное соотношение измеренной интенсивности свечения красной линии кислорода и смоделированной объемной плотности излучения показано на рисунке 5. Коэффициент Пирсона составил 0,731, что говорит о высокой корреляции модельных и наблюдаемых данных. Выявлена высокая корреляция между модельной поверхностной яркостью и измеренной интерферометрами Фабри-Перо интенсивностью свечения (коэффициент Пирсона 0,731).

Полученные результаты говорят, что моделирование яркости свечения атмосферы на длине волны 6300 \AA с использованием данных Иркутского радара некогерентного рассеяния может быть использовано для фотометрической калибровки интерферометров Фабри-Перо.

Список использованных источников:

1. Link, R., and L. Cogger, A Reexamination of the OI 6300-Angstrom Nightglow, J. Geophys. Res., 93(A9), 9883-9892, 1988.
2. Chen A., R. Johnsen, and M.A. Biondi, Measurements of the $O^+ + N_2$ and $O^+ + O_2$ reaction rates from 300 to 900 K, J. Chem. Phys., 69(6), 2688-2691, 1978.
3. Streit, G.E., C.J. Howard, A.L. Schmeltekopf, J.A. Davidson, and H.I. Schiff, Temperature dependence of $O(^1D)$ rate constants for reactions with O_2 , N_2 , CO_2 , O_3 and H_2O , J. Chem. Phys., 65, 4761, 1976.
4. Berrington, K.A., and P.G. Burke, Effective collision strengths for forbidden transitions in $e - N$ and $e - O$ scattering, Planet. Space Sci., 29, 377, 1981.
5. Kernahan, J.H., and P.H.-L. Pang, Experimental determination of absolute A coefficients for 'forbidden' atomic oxygen lines, Can. J. Phys., 53, 455, 1975.