

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И СВЕЧЕНИЯ I_{630} СРЕДНЕШИРОТНОЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РАДАРА НР И ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ—ПЕРО

ANALYZING THE BEHAVIOR OF MID-LATITUDE UPPER ATMOSPHERE IONOSPHERIC PLASMA AND AIRGLOW I_{630} FROM IS RADAR AND FABRY—PEROT INTERFEROMETER DATA

Р.В. Васильев 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru

И.К. Едемский 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ilya@iszf.irk.ru

А.Д. Шелков 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, alshel@iszf.irk.ru

М.Ф. Артамонов

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artamonov.maksim@mail.iszf.irk.ru

С.С. Алсаткин

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, alss@iszf.irk.ru

У.Н. Евсеев 

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, Evseev@ikfia.ysn.ru

В.П. Лебедев 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, lebedev@iszf.irk.ru

В.П. Ташлыков

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vtashlykov@iszf.irk.ru

А.В. Ташилин

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, avt@iszf.irk.ru

А.В. Тимченко 

Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН,
Калининград, Россия, aleksandr.timchenko77@gmail.com

R.V. Vasiliev

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

I.K. Edemskiy

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

A.D. Shelkov

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

M.F. Artamonov

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

S.S. Alsatkin

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

U.N. Evseev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, Evseev@ikfia.ysn.ru

V.P. Lebedev

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

V.P. Tashlykov

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

A.V. Tashchilin

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

A.V. Timchenko

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kalininingrad, Russia, aleksandr.timchenko77@gmail.com

Аннотация. Проведены исследования динамики параметров ионизированной и нейтральной компонент верхней атмосферы Земли средних широт вблизи равноденствия в течение нескольких суток в спокойных геомагнитных условиях. Параметры ионосферы получены радаром некогерентного рассеяния, параметры нейтральной атмосферы на ионосферных высотах получены из характеристик свечения атомарного кислорода на длине волны 630 нм при помощи интерферометра Фабри—Перо. Обнаружены сходные по относительной амплитуде синхронные вариации интенсивности свечения и концентрации плазмы, природа которых была объяснена с привлечением

Abstract. The dynamics of the parameters of ionized and neutral components of Earth's upper atmosphere at midlatitudes near the equinox was studied for several days under quiet geomagnetic conditions. The ionospheric parameters were obtained by an incoherent scatter radar; the parameters of the neutral atmosphere at ionospheric altitudes, from characteristics of the atomic oxygen glow at a wavelength of 630 nm with a Fabry—Perot interferometer. Synchronous variations similar in relative amplitudes were detected in the glow intensity and plasma concentration, the nature of which was explained using numerical modeling, as well as a combination of model and empirical data. It is shown that

численного моделирования, а также комбинации модельных и эмпирических сведений. Показано, что действие вертикального ветра имеет решающее значение для вертикального переноса плазмы и усиления свечения атомарного кислорода в рассматриваемый период времени. Исследуемое явление было ассоциировано с полуночным температурным максимумом, который впервые наблюдался на широте 52° N. Представлен метод калибровки оптических измерений с использованием радиофизических данных в приближении доминирующей роли вариаций параметров плазмы над вариациями параметров нейтральной атмосферы.

Ключевые слова: ионосфера, термосфера, хемилюминесценция атмосферы, электронная концентрация, интерферометр Фабри—Перо, радар некогерентного рассеяния, численное моделирование, нейтральный ветер, полуночный максимум температуры.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в Восточной Сибири достаточно хорошо развита инструментальная радиофизическая инфраструктура для изучения ионизированной компоненты верхней атмосферы — ионосферы и ее вариаций под влиянием Солнца и атмосферы Земли. Успешно функционируют сети ионозондов [Щедрик и др., 2022], ГНСС приемников [Афраймович и др., 2012], радар некогерентного рассеяния [Жеребцов и др., 2002]. Нейтральная компонента верхней атмосферы, ее состав, температура и динамика играют важную роль в процессах, контролирующих состояние ионосферной плазмы [Van Zandt, 1967; Rishbeth, 1988]. Поэтому для более глубокого понимания ионосферной динамики представляется целесообразным одновременно с радиофизическими инструментами развивать наблюдения хемилюминесценции верхней атмосферы, которые дают информацию о физико-химических параметрах нейтральной компоненты [Weinstock, 1975; Shepherd et al., 1997; Garcia et al., 2000; Васильев и др., 2020].

Исследование процессов в ионосфере и одновременный анализ радиофизических и оптических проявлений можно осуществлять методами численного моделирования [Намгаладзе и др., 1981; Watanabe et al., 1986; Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Григорьев, Латышев, 1989; Korenkov et al., 1996]. Разработанная в ИСЗФ СО РАН плазмосферно-ионосферная модель (ПИМ ИСЗФ) [Кринберг, Тацкин, 1984] позволяет рассчитывать не только концентрации электронов N_e и основных ионосферных ионов вдоль заданной геомагнитной силовой линии в указываемых геомагнитных условиях, но и высотные профили объемного свечения атмосферы. Сопоставление вариаций высотных профилей N_e и объемного свечения под воздействием вариаций входных управляемых параметров модели позволяет оценивать физико-химические взаимосвязи этих величин. Обратной связью, по которой можно задавать вариации входных параметров, может быть сопоставление мо-

the vertical wind effect is of decisive importance for the vertical transport of plasma and the enhancement of the atomic oxygen glow in the period of time considered. The phenomenon under study was associated with the midnight temperature maximum, which was first observed at 52° N. A method for calibrating optical measurements using radiophysical data is presented in the approximation of the dominant role of plasma parameter variations over neutral atmosphere parameter variations.

Keywords: ionosphere, thermosphere, airglow, electron density, Fabry—Perot interferometer, incoherent scatter radar, numerical modeling, neutral wind, midnight temperature maximum.

дельных характеристик с данными, полученными в результате натурных наблюдений.

Синтез сведений о динамике интенсивности свечения атомарного кислорода среднеширотной верхней атмосферы на длине волны 630 нм, регистрируемой оптическим спектрометром [Михалев, 2018], и профиля N_e , полученного при помощи ионозонда [Ratovsky, Oinats, 2011], дал возможность разработать фотохимическую модель восстановления профиля ионов атомарного кислорода, позволяющую исследовать новые аспекты динамики ионосферы [Duann et al., 2024]. В настоящее время эти модели не содержат параметризаций, связанных с особенностями динамики верхней атмосферы, приливными и волновыми явлениями, а также геомагнитными событиями, поэтому имеет смысл продолжать исследования (с целью их дальнейшего развития с привлечением более широкого круга инструментов) совместной динамики ионизированной и нейтральной компонент верхней атмосферы.

Помимо ионозонда и спектрометра к исследованиям можно привлечь радары некогерентного рассеяния, определяющие вертикальный профиль концентрации плазмы как ниже, так и выше ее максимума, а также камеры всего неба и интерферометры Фабри—Перо (ИФП), по данным которых можно определить пространственные вариации свечения, температуру и скорость горизонтального ветра нейтральной компоненты. Анализ результатов наблюдения динамики пространственных вариаций свечения 630 нм и горизонтального ветра в этом слое свечения совместно с результатами наблюдения динамики пространственных вариаций профиля N_e проводился в работе [Otsuka et al., 2003]. Крупномасштабная волна яркости свечения, наблюдавшаяся в приэкваториальных широтах, была связана с опускающейся вниз ионосферной плазмой под действием меридионального ветра, направленного на полюс. Авторы высказали предположение, что это явление связано с полуночным температурным мак-

сimumом (midnight temperature maximum или MTM) в приэкваториальной термосфере.

Полуночный максимум температуры обычно наблюдается в верхней атмосфере экваториальных широт [Colerico, Mendillo, 2002]. Он сопровождается увеличением давления и определяется ослаблением или изменением направления меридионального ветра на полярное, он распространяется в сторону полюса и имеет два вторичных максимума вблизи широты $\pm 15^\circ$. Распространяясь, MTM достигает средних широт. Так, в работе [Colerico, Mendillo, 2002] авторы сообщают о наблюдении его прохождения камерами всего неба в обсерватории El Leoncito (31.8° S, 69.0° W), отмечая, что эту широту не следует считать пределом распространения максимума. Авторы указывают также, что эффективность меридионального ветра в вертикальном переносе плазмы падает с ростом широты и их наблюдения в Миллстоун-Хилл демонстрируют значительно менее выраженное проявление MTM в оптических наблюдениях.

В более свежей работе [Mesquita et al., 2018] авторы анализируют данные сети ИФП, расположенной в США в диапазоне широт $35\text{--}45^\circ$ N. Аппроксимируя фоновые значения температуры комбинацией гармоник с периодами 24, 12 и 8 ч и применяя алгоритм двумерной инверсии, они получают двумерные карты вариаций температуры с шагом 30 мин и на их основе дают представление о пространственной и временной структуре MTM. Так, сообщается, что основному пику MTM часто предшествует дополнительный вечерний пик с опережением 4.5 ч, хотя особенности этой двухпикововой структуры изменяются от ночи к ночи. Приводя сезонную статистику наблюдений, авторы, не давая оценок на ограничение по широте, заключают, что MTM может наблюдаться, как минимум, до 44.4° N.

Настоящая работа описывает результаты наблюдений оптическими и радиофизическими инструментами изменений высотной структуры характеристик верхней атмосферы и ионосферы. Наблюдения проводились в рамках научно-образовательного интенсива Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (БШФ) «Физические процессы в космосе и околоземной среде» и XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, 5–10 сентября 2022 г.). Участники интенсива проводили работы на уникальных научных установках ИСЗФ СО РАН, таких как Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [Жеребцов и др., 2002] и «Оптические инструменты» Национального гелиогеофизического комплекса РАН (НГК РАН) [Жеребцов, 2020].

ИНСТРУМЕНТЫ И ДАННЫЕ

Иркутский радар некогерентного рассеяния радиоволны

Ионизирующее излучение Солнца вызывает образование в нейтральной среде атмосферы заряженных частиц: ионов и электронов. Наибольшее их количество наблюдается на высотах 50–1000 км в слое, называемом ионосферой. Определение вариаций кон-

центраций и температур заряженных частиц по высоте и во времени позволяет исследовать динамику ионосферы и ведется различными (преимущественно радиофизическими) инструментами по всему земному шару. Максимум N_e наблюдается на высотах 200–400 км (слой F2), где основным ионизируемым компонентом является атомарный кислород [Харгривс, 1982].

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) Обсерватории радиофизической диагностики атмосферы ИСЗФ СО РАН (52.9° N, 103.3° E) является единственным в России радиофизическим комплексом, позволяющим определять параметры всей толщи ионосферы методом НР [Жеребцов и др., 2002]. Метод основан на анализе эффектов рассеяния высокочастотной электромагнитной волны (частота больше плазменной) слабыми флуктуациями диэлектрической проницаемости плазмы на ионосферных высотах и позволяет восстановить такие ее параметры, как концентрация и температура электронов T_e и ионов T_i [Алсаткин и др., 2015]. Вращение плоско-поляризованной зондирующей электромагнитной волны ИРНР в ионосферной плазме (эффект Фарадея) приводит к замираниям принятого радиолокационного сигнала, что позволяет получить абсолютное значение N_e . Для этого методом наименьших квадратов подбираются параметры функции, описывающей вертикальный профиль мощности принятого радиолокационного сигнала. Параметрами функции являются вертикальный профиль N_e , зенитный угол, высотный ход фазы фарадеевского вращения, гирочастота электронов, рабочая частота радара и угол между лучом радара и вектором магнитного поля Земли.

Интерферометры Фабри — Пере НГК РАН

Свечение атомарного кислорода в красной линии 630 нм образуется на высотах порядка 200–400 км за счет перехода атомов из возбужденного состояния O(1D) в основное состояние O(3P) [Шефов и др., 2006]. Возбужденные атомы рождаются преимущественно в результате реакции диссоциативной рекомбинации и столкновений атомов кислорода с тепловыми и сверхтепловыми электронами [Таццилин, Леонович, 2016]. Таким образом, интенсивность свечения 630 нм I_{630} несет информацию о количестве возбужденных атомов кислорода, которое зависит от N_e на высоте свечения.

На территории Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (ГФО ИСЗФ) в с. Торы ($51^\circ 48' N$, $103^\circ 04' E$) посредством астрономических ИФП НГК РАН ведется наблюдение различных характеристик естественного ночного свечения атмосферы [Васильев и др., 2020]. Наблюдений свечения красной линии 630 нм позволяют получать данные о вариациях температуры атмосферы и скорости ветра на высоте ~ 250 км. Ключевой особенностью ИФП является использование принципа многолучевой интерференции, позволяющего определять доплеровские смещение и уширение наблюданной линии, на основе которых определяются температура (с точностью до 5–15 K) и скорость движения (с точностью до 2–4 м/с) светящейся нейтральной компоненты верхней

атмосферы. Адаптация метода [Harding et al., 2014] к первичным данным, получаемым интерферометрами [Васильев и др., 2017] позволила, помимо скорости горизонтального ветра и температуры, определять интегральную (по высоте) интенсивность свечения наблюдаемой линии и вариацию скорости вертикального перемещения светящейся нейтральной компоненты. Однако предложенный новый метод анализа данных наблюдений не позволяет напрямую получать абсолютное значение интенсивности как некую объемную (volume emission rate, VER) или внесистемную (рэлей, Рл) характеристики свечения. Кроме того, вариация скорости вертикального перемещения также не является абсолютной величиной. Поэтому для полноценных исследований верхней атмосферы при помощи таких характеристик требуется проведение фотометрической калибровки этих инструментов и привлечение дополнительных сведений о вертикальном перемещении воздуха верхней атмосферы.

Интервал и условия наблюдений

Научно-образовательный интенсив проводился непосредственно перед основными мероприятиями БШФФ 29 августа – 1 сентября 2022 г. Именно в этот промежуток времени радиофизические и оптические инструменты вели одновременные наблюдения. Геомагнитная обстановка на данном интервале времени была спокойной ($K_p \sim 2$, $Dst \sim \pm 15$), слабая буря ($Dst \sim -70$) началась только 3 сентября. Для оптических наблюдений условия определялись по количеству звезд в поле зрения обзорной камеры [Подлесный и др., 2022]. По этому критерию наблюдения в течение ночей 29–30 и 30–31 августа велись в условиях переменной облачности.

Интерферометр проводит измерения в зенит и по направлениям сторон света под углом 45° над горизонтом. ИРНР ведет наблюдения с отклонением от вертикали 16° к западу и $\sim 25^\circ$ к югу, юго-западу. Обсерватории с радаром и интерферометром разнесены вдоль меридиана на ~ 130 км, причем ИРНР расположен на север, северо-восток от ИФП. Таким образом, вертикальное направление наблюдений ИФП и наклонное южное направление наблюдений ИРНР примерно можно считать наблюдениями одной и той же области атмосферы. Кроме того, с некоторыми допущениями (~ 100 км), можно считать, что квазивертикальное направление (16°) наблюдений ИРНР и северное направление наблюдений ИФП обеспечивают такие же условия наблюдений.

На рис. 1 показаны вариации N_e (синяя кривая) на высоте 265 км (по данным ИРНР, квазивертикальное направление, 16°) и интегральной интенсивности свечения (красная кривая) в линии I_{630} (по данным ИФП, северное направление) за рассматриваемый период. Серая область — диапазон изменений N_e на высотах 250–280 км. Выбор высот обусловлен тем, что свечение атомарного кислорода для рассматриваемых временем года и уровня геомагнитной активности по данным ПИМ ИСЗФ происходит в слое, расположенному в этом диапазоне, что

в целом соответствует характеристикам слоя свечения [Шефов и др., 2006]. В периоды одновременных наблюдений показывают подобие вариаций, что может указывать (локальная ночь) кривые N_e и I_{630} на наличие связи между ними.

Целью настоящей работы является определение причины наблюдаемых синхронных вариаций, определение причин синхронной динамики N_e и I_{630} и оценка возможности фотометрической калибровки ИФП с использованием сведений радиофизических инструментов.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Численная ПИМ ИСЗФ позволяет определять высотные профили концентрации и температуры основных заряженных компонент ионосферы вдоль дипольной геомагнитной силовой линии выше 100 км [Кринберг, Тацкин, 1984]. Результаты моделирования позволяют рассчитывать концентрацию возбужденных атомов кислорода и, следовательно, определять объемную и интегральную интенсивности свечения атмосферы. Такие расчеты были выполнены для периода 29 августа – 1 сентября 2022 г. На рис. 2 показаны высотные профили N_e в интервале высот 150–600 км, рассчитанные с помощью ПИМ ИСЗФ (а) и измеренные радаром НР (б), а также динамика компонент нейтрального ветра (в) согласно модели HWM07 (штриховые линии) и данных ИФП (узловые линии): зональной компоненты (синие кривые), меридиональной (оранжевые) и вертикальной (зеленые). Серые прямоугольники — интервалы времени с облачностью над ГФО ИСЗФ. Вследствие рассеяния излучения нижней термосферы с длиной волны 630 нм на тропосферной облачности наблюдения этого рассеянного света в каком-то конкретном направлении будут сложным образом отражать интегрированные (неравномерность плотности облаков) характеристики термосферного излучения над облачностью. Таким образом, содержащиеся в полученных данных доплеровские смещения центральной линии будут иметь квазислучайные составляющие разного знака. В таких условиях горизонтальная скорость ветра по методу вычитания доплеровских смещений излучения противоположных направлений чистого неба [Васильев и др., 2017] будет определяться некорректно. Следует отметить, что рассчитанные скорости ветра (см. рис. 2) с высокой вероятностью могут быть неверны в периоды, отмеченные серыми прямоугольниками.

Различия в суточной динамике высотных профилей N_e по данным ИРНР и модели могут быть связаны, в первую очередь, с использованием MSIS00 [Picone et al., 2002] и HWM07 [Alken et al., 2008] как моделей параметров нейтральной атмосферы, закладываемых в ПИМ ИСЗФ. Качество предсказания климатологических параметров моделями HWM и MSIS имеет для исследуемого региона известные проблемы [Щербаков и др., 2015].

Характер наблюдаемых профилей N_e дает возможность предположить, что ночные особенности их

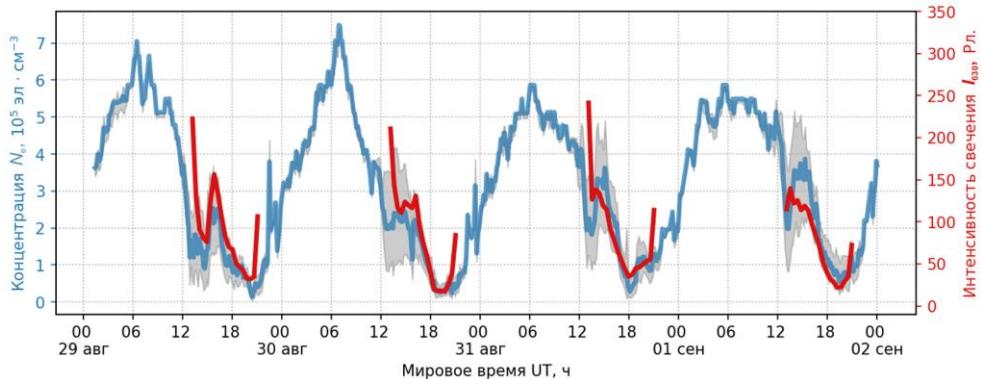


Рис. 1. Вариации концентрации электронов N_e по данным ИРНР на высоте 265 км (синяя кривая) и интенсивности свечения красной линии I_{630} (красная кривая) по данным ИФП за период 29 августа – 1 сентября 2022 г. Диапазон вариаций N_e на высотах 250–280 км показан серым

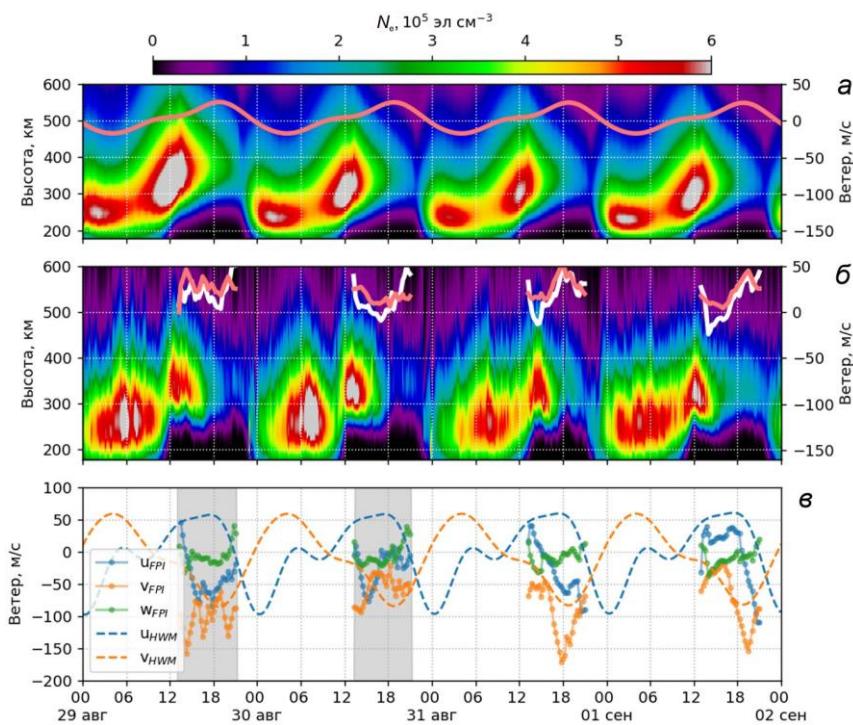


Рис. 2. Вариации электронной концентрации по модели ИСЗФ (а) и данным ИРНР (б). Розовая линия — скорость вертикального дрейфа по модели HWM (а) и данным ИФП (б). Белая линия — вертикальный дрейф с учетом вертикального переноса вещества (W_{FPI}). Панель в — вариации зональной (U_{FPI}), меридиональной (V_{FPI}) и вертикальной (W_{FPI}) компонент нейтрального ветра по данным ИФП (линии с узлами), а также зональной (U_{HWM}) и меридиональной (V_{HWM}) компонент по модели HWM (штриховые линии). Серые прямоугольники — периоды облачности (большая погрешность в определении ветра) над ГФО ИСЗФ (Торы)

динамики определяются меридиональным ветром и вертикальным переносом нейтральной компоненты. Оценку вертикального дрейфа плазмы, обусловленного ветром в верхней атмосфере, можно получить из условия равновесия плазмы под действием силы Лоренца, соударений ионизованных частиц с нейтральными и электрического поля E :

$$\begin{aligned} e\vec{V}_i \times \vec{B} - m_i v (\vec{V}_i - \vec{U}_n) + e\vec{E} &= 0, \\ \vec{B} &= (0, B_0 \cos I, B_0 \sin I). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь e — заряд электрона; m_i — масса иона сорта i ; V_i — скорость дрейфа плазмы (ионов сорта i); U_n — скорость нейтрального ветра; v — частота соударений ионов с нейтралами. При этом значимыми пола-

гаются только меридиональная $B_0 \cos I$ и вертикальная $B_0 \sin I$ компоненты магнитного поля B , что позволяет однозначно определить их через магнитную индукцию B_0 и наклонение I . Пренебрегая действием электрического поля ($E=0$), (1) можно упростить до системы уравнений и выразить вертикальную компоненту скорости дрейфа электронов

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{1}{1+r^2} \times \\ &\times \left(r \cos I \cdot U + \sin I \cos I \cdot V + (r^2 + \sin^2 I) W \right), \\ r &= \frac{v}{\omega} = v \frac{m_i}{eB_0}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь U , V , W — зональная, меридиональная и вертикальная компоненты нейтрального ветра, параметр r определяется отношением сечения взаимодействия заряженных частиц с нейтральными к скорости их дрейфа под действием магнитного поля.

При помощи (2) можно оценить скорость дрейфа ионосферной плазмы с использованием модельных и эмпирических сведений о динамике нейтральной компоненты. Розовая линия (см. рис. 2) — изменение скорости вертикального дрейфа, полученное по данным горизонтального ветра из модели HWM07 с нулевым вертикальным перемещением (*a*), и на основе измерений FPI (*b*). Белая линия — поведение дрейфа плазмы по (2) под действием полученных интерферометром двух компонент горизонтального ветра и вариации вертикального перемещения в качестве вертикальной скорости ветра W . Предварительно можно сказать, что полученный на основе данных интерферометра вертикальный дрейф плазмы ночью 31 августа и 2 сентября достаточно хорошо коррелирует с вертикальной динамикой ионосферной плазмы, полученной ИРНР. Минимум вариации дрейфа в ~15 UT совпадает с минимумом высоты слоя, а максимум вариации дрейфа в ~18–19 UT совпадает с максимальной высотой слоя в эти ночи. Следует отметить, что увеличение интенсивности свечения происходит одновременно с увеличением N_e в ~15 UT при минимальной скорости вертикального дрейфа. По всей видимости, именно движение нейтральной компоненты вниз вызывает соответственно движение ионосферной плазмы и приводит к увеличению числа возбужденных атомов кислорода (см. рис. 1.), что отражается на росте интенсивности свечения.

Концентрация электронов выступает управляющим параметром во всех реакциях генерации возбужденных атомов кислорода, испускающих при переходе в базовое состояние свечение 630 nm [Doering, 1992; Mantas, 1994; Тацилин, Леонович, 2016]:

- столкновения с тепловыми электронами:

$$\begin{aligned} [\text{O}(1\text{D})] = & 0.596 \frac{9329 + T_e}{(51813 + T_e)^3} \times \\ & \times \sqrt{T_e} \exp\left(-\frac{22576}{T_e}\right) \frac{[\text{O}] N_e}{L_{630}}; \end{aligned} \quad (3)$$

- диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов O_2^+ :

$$[\text{O}(1\text{D})] = f(\text{1D}) 1.95 \cdot 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0.7} \frac{[\text{O}_2^+] N_e}{L_{630}}; \quad (4)$$

- столкновения атомов О со сверхтепловыми электронами

$$[\text{O}(1\text{D})] = 4\pi \frac{[\text{O}]}{L_{630}} \int_{E_{\text{ID}}}^{\infty} I_{\text{O}}^{(1\text{D})}(E) \Phi_0(E) dE. \quad (5)$$

Здесь концентрации электронов N_e , ионов атомов [O] и молекул кислорода $[\text{O}_2^+]$ даны в cm^{-3} ; температуры электронов T_e и нейтральных частиц T_n — в K; $I_{\text{O}}^{(1\text{D})}$ — дифференциальное сечение возбуждения

уровня 1D электронным ударом (cm^2); $\Phi_0(E)$ — изотропная часть потока сверхтепловых электронов с энергиями от E до $E+dE$. Коэффициент $f(1\text{D})=1.2$ определяет эффективность образования возбужденных атомов O(1D) в реакции диссоциативной рекомбинации [Link, Cogger, 1988; Тацилин, Леонович, 2016].

Входящая в знаменатель величина L_{630} описывает безызлучательное гашение уровня O(1D) в столкновениях с нейтральными частицами O, O_2 , N_2 ($A_{1\text{D}}=0.00745 \text{ cm}^{-1}$) [Kernahan, Pang, 1975; Berrington, Burke, 1981]:

$$L_{630} = A_{1\text{D}} + 10^{-11} \times \left(0.16 T_e^{0.91} n_e + 0.8 [\text{O}] + 2.9 e^{\frac{68}{T_e}} [\text{O}_2] + 2 e^{\frac{108}{T_n}} [\text{N}_2] \right). \quad (6)$$

Интенсивность свечения 630 nm (Рл) определяется как интеграл суммарной концентрации возбужденных атомов, содержащихся в заданном слое высот h_1-h_2 :

$$\begin{aligned} I_{630} = & 10^{-6} A_{630} \int_{h_1}^{h_2} [\text{O}(1\text{D})] dh, \\ A_{630} = & 0.00563 \text{ cm}^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Доля каждого из процессов в общей интегральной величине варьирует в течение суток. Численный расчет концентрации заряженных и нейтральных компонент ионосферы вместе с уравнениями (3)–(7) позволяет наблюдать эту суточную динамику. На рис. 3 показаны вариации интегральной светимости 630 nm, полученные с помощью (3)–(7) на основе результатов моделирования ПИМ ИСЗФ за рассматриваемый период наблюдений. Закрашенные блоки отмечают ночное время для ГФО ИСЗФ на поверхности Земли (светло-синий) и на 100 km над ней (темно-синий). С наступлением ночи, вклад свечения от диссоциативной рекомбинации (желтый штрих-пунктир) полностью определяет интегральную интенсивность (жирная красная кривая) и коррелирует с N_e на высоте 250 km (синяя кривая).

Если сравнить ночной ход интенсивности линии 630 nm, измеренный ИФП (см. рис. 1) и смоделированный ПИМ ИСЗФ (см. рис. 3), заметно отсутствие локального максимума интенсивности в районе полуночи (~16 UT). Вероятно, это расхождение является следствием обсуждаемого выше несоответствия параметров наблюдаемой и моделируемой ионосферной плазмы, вызванного использованием HWM07 в ПИМ ИСЗФ для получения вертикальных профилей N_e . Из анализа рис. 2 следует, что отсутствие учета вертикального перемещения воздуха в модели приводит к отсутствию максимума N_e вблизи локальной полночи в рассматриваемые даты. Поэтому, можно предложить использовать эмпирические данные о параметрах верхней атмосферы для моделирования свечения и последующего сравнения его с результатами оптических наблюдений.

Рисунок 3 показывает, что вклад тепловых и сверхтепловых электронов в ночной свечение 630 nm во время проведения наблюдений, анализируемых в ра-

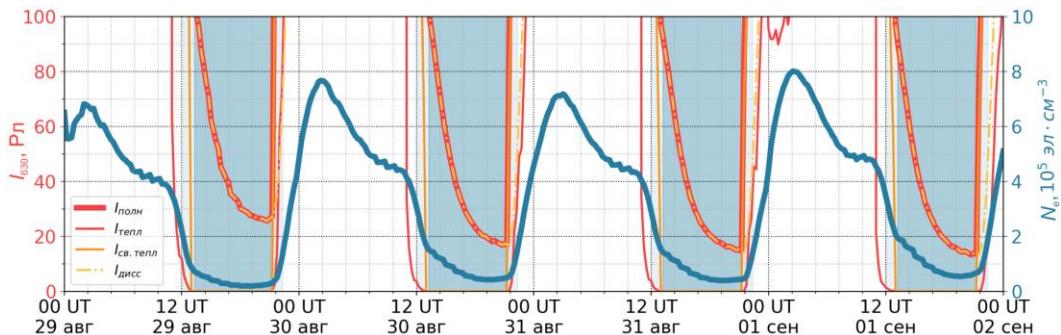


Рис. 3. Интенсивность свечения линии атомарного кислорода 630 нм (жирная красная кривая) и N_e на высоте 250 км (синяя кривая) согласно ПИМ ИСЗФ. Тонкие линии показывают вклады реакций [O] с тепловыми (тонкая красная) и сверхтепловыми электронами (тонкая желтая) и реакции диссоциативной рекомбинации (желтый штрих-пунктир). Наступление ночи (солнечный терминатор на высоте 100 км) показано синими прямоугольниками

боте, практически отсутствует. Следовательно, в процессе моделирования достаточно учитывать лишь вклад диссоциативной рекомбинации ионов молекулярного кислорода. Среди необходимых для моделирования параметров (уравнения (4), (6)) наибольшую амплитуду вариаций имеет N_e , а значит, ее следует рассматривать как основной драйвер вариативности свечения. Ее относительная вариация составляет 50–60 %, в то время как остальные компоненты (N_n , N_i , T_n , T_i) молекулярного кислорода изменяются на 10–25 %. Таким образом, для вычисления интенсивности свечения атомарного кислорода 630 нм целесообразно использовать наблюдаемую радиофизическими методами N_e .

Вертикальные профили N_e и T_e доступны по данным ИРНР, а высотные распределения других необходимых параметров можно получить из моделей. Вертикальный профиль N_i молекулярного кислорода предоставляет модель IRI-2020 [Bilitza et al., 2022], N_n кислорода, а также его молекул и молекул азота доступны из модели MSIS 2.1 [Emmert et al., 2022]. Профиль T_n также может быть рассчитан в модели MSIS, однако ИФП позволяет определить среднее значение температуры излучающего слоя. Так как для проведения сравнений модельных и эмпирических данных в конечном итоге будет использоваться интеграл интенсивности по высоте, можно использовать данные температуры, полученные интерферометром. Сравнение вклада профиля температуры и его значения на высоте максимума излучающего слоя (280 км) из модели MSIS 2.1 в интегральную интенсивность не показало существенной разницы. Это говорит о том, что зависимость T_n от высоты не критична для расчета интегральной интенсивности излучения линии 630 нм, что позволяет использовать данные ИФП о T_n в процессе моделирования свечения.

Моделирование проводилось для северного и зенитного направлений. Из рис. 4 видно, что модельный (синие кривые) и эмпирический (красные кривые) ночной ход интенсивности достаточно хорошо коррелируют (таблица). Отличия во временном ходе преимущественно заключаются в смещении по времени локальных максимумов полученных характеристик от десятка минут до нескольких часов. Ночное небо 29 и 30 августа было покрыто облачно-

стью, которая не позволяет использовать результаты наблюдений ИФП для получения горизонтального ветра, однако на интенсивность излучения облачность оказывает значительно меньшее влияние, чем на доплеровское смещение (см. рис. 4 и таблицу). Поэтому весь полученный набор данных может быть использован для фотометрической калибровки интерферометра.

Процедура калибровки предполагает сопоставление смоделированной и измеренной ИФП интегральных интенсивностей свечения. Для этого отобразим полученный набор в виде диаграммы рассеяния (рис. 5), где собраны данные с направлений в зенит и на север. Предполагая линейный характер зависимости моделируемых интенсивностей Y от измеренных ИФП X , можем ввести коэффициенты линейной регрессии как $Y=aX+b$ и определить их значения методом наименьших квадратов. Для этого использовалась библиотека Linregress пакета Scipy [Zwillinger, Kokoska, 2000]. Коэффициент $b=-0.019 \pm 1.515$ мал по сравнению с отсчетами ИФП, поэтому его можно приравнять нулю. Коэффициент $a=0.529 \pm 0.018$ Рл/отн.ед., выражющий наклон линии тренда и есть искомый калибровочный коэффициент.

ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные в настоящей работе ночные повышения N_e (см. рис. 1) неудовлетворительно восстанавливаются численным моделированием, конкретно, применением ПИМ ИСЗФ. Необходимые для работы ПИМ параметры нейтральной составляющей ионосферы определяются с использованием полуэмпирических моделей MSIS и HWM, которые, вероятно, не учитывают ряд серьезных региональных особенностей. Кроме того, текущая версия ПИМ учитывает влияние только рассчитанного в HWM горизонтального ветра, оставляя без внимания вертикальную составляющую перемещения нейтральных частиц. Таким образом, модель нейтрального ветра требует расширения и учета региональных особенностей движения нейтральной атмосферы, а также такого движения по вертикали.

Наблюдаемые в данных ИРНР вариации высотного профиля N_e можно объяснить изменением направления

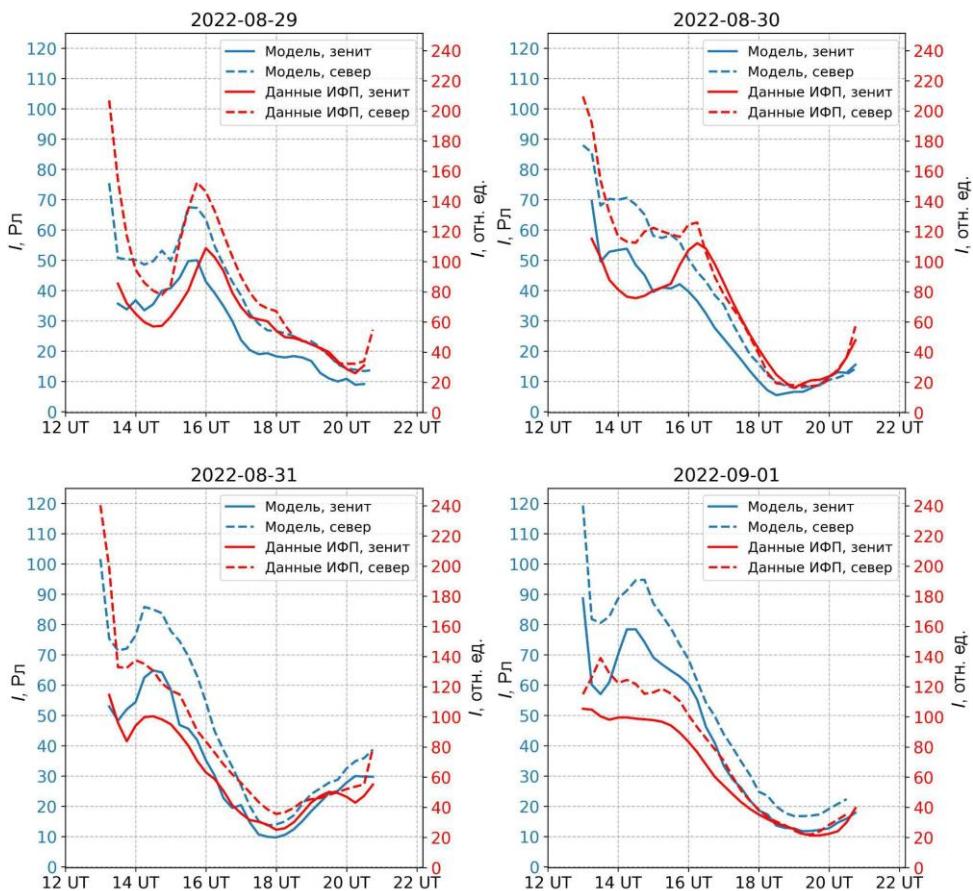


Рис. 4. Сравнение интегральной интенсивности, полученной моделированием на основе данных ИРНР (синие кривые) и интенсивности полученной ИФП (красные кривые). Сплошные кривые соответствуют зенитному направлению, штриховые — северному

Коэффициенты корреляции смоделированного и измеренного ИФП ночных хода интенсивности линии 630 нм

Дата	Коэффициент Пирсона r	Коэффициент Спирмена ρ
29.08.2022	0.869	0.897
30.08.2022	0.901	0.869
31.08.2022	0.942	0.962
01.09.2022	0.969	0.938

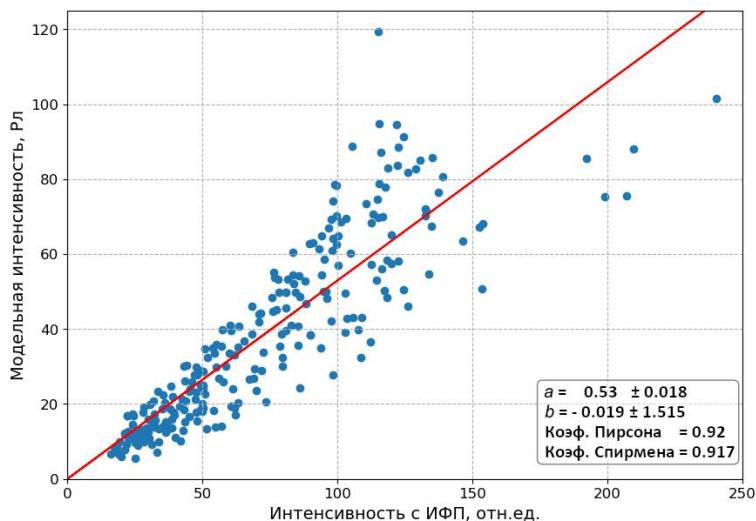


Рис. 5. Отношение модельной интегральной интенсивности линии 630 нм, полученной с использованием данных ИРНР и измеренной интенсивности по данным ИФП (зенитное и северное направления) за 28 августа – 1 сентября 2022 г.

нейтрального ветра. Рассматриваемый случай показывает, что, помимо горизонтального ветра, необходимо учитывать вертикальное перемещение воздуха верхней атмосферы. Наблюданное опускание ионосферной плазмы может обеспечиваться меридиональным ветром, направленным в полярную область и перемещающим заряженные частицы вдоль магнитной силовой линии вниз. Таким образом, полярный меридиональный ветер в ночное время может увеличивать концентрацию заряженных частиц на малых высотах. Рассчитанный меридиональный ветер (см. рис. 2, в, оранжевая штриховая кривая) в ночное время направлен на юг (отрицательные значения) и не позволяет наблюдать эффекты дрейфа плазмы вдоль силовой линии вниз. Наоборот, расчетные концентрации демонстрируют повышение максимума в предутренний период и это согласуется с направлением ветра. Несмотря на то, что измеренный по ИФП меридиональный ветер направлен также на юг в течение всей ночи (см. рис. 2, в, оранжевая сплошная кривая), учет вертикального перемещения слоев атмосферы позволяет объяснить наблюдаемое снижение высоты максимума ионосферы в первую половину ночи. Этот результат прямыми наблюдениями подтверждает ранее полученный вывод о необходимости учета вертикального перемещения воздуха для описания динамики максимума концентрации плазмы, сделанный на основе анализа среднесезонных суточных вариаций ветра, полученных ИФП, и параметров F-слоя ионосферы, полученных ионозондом [Васильев и др., 2020].

При обсуждении природы наблюдаемого явления следует вернуться к упомянутому во вводной части явлению полуночного максимума температуры (MTM, midnight temperature maximum). Исторически MTM зарегистрировали в приэкваториальной ионосфере ($\pm 15^\circ$) и связали с изменением направления меридионального ветра, при этом отмечалось распространение явления до средних широт [Colerico, Mendillo, 2002]. В работе [Mesquita et al., 2018] проявления MTM регистрировались вплоть до 45° N и не давалось ограничений по широте, а значит, для широт оптических и радиофизических обсерваторий ИСЗФ их регистрация остается возможной. Рассматриваемые в работе ночные повышения концентрации и интенсивности свечения хорошо согласуются с ранее описанными проявлениями полуночного максимума температуры. Таким образом, можно предположить, что в данном случае MTM впервые был идентифицирован по данным наблюдений на 52° N. Важно отметить, что основным управляющим параметром в обоих случаях выступает нейтральный ветер, при этом роль вертикального движения нейтралов должна быть внимательным образом учтена при изучении этого явления.

Показанная с использованием численного моделирования доминирующая роль диссоциативной рекомбинации в процессах возбуждения кислорода в ночное время дала нам возможность оценки интенсивности свечения по ионосферным параметрам, определяемым ИРНР. Калибровочный коэффициент, рассчитанный в рамках настоящей работы, в дальнейшем нужно уточнять на более объемной выборке измерений и под-

креплять данными других радиофизических инструментов. Однако даже в текущем виде предложенный простой метод может использоваться для оценки интенсивностей и перевода данных ИФП из относительных единиц в рэлеи, минуя сложную процедуру полного учета всех возможных плазменно-химических процессов [Duann et al., 2024]. Значение коэффициента составляет 0.529 Рл/отн.ед. Дисперсия ± 0.018 Рл/отн.ед составляет $\sim 3\%$ от значения коэффициента, что находится в пределах погрешности измерений ИФП. В дальнейшем это позволит свести наблюдаемые различными оптическими устройствами явления в единую базу, что существенно продвинет инструментальный потенциал ИСЗФ СО РАН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместные наблюдения одной и той же области атмосферы разнородными методами, оптическими и радиофизическими, предоставляет широкие возможности как для расширения поля сбора информации о наблюдаемых явлениях, так и для калибровки отдельных инструментов. Показанное в работе явление ночного увеличения N_e , наблюдаемой ИРНР, хорошо согласуется с наблюдаемыми ИФП НГК РАН вариациями атмосферного свечения 630 нм. В совокупности представленные материалы указывают на определяющую роль нейтрального ветра в развитии наблюдаемого явления и косвенно указывают на работу механизма, ответственного за формирование полуночного максимума температуры, наблюдавшегося другими исследователями в разных регионах Земли. Показана необходимость развития описательных методов динамики нейтральной атмосферы, в частности, уточнения широко используемой в настоящее время модели горизонтального ветра HWM. Кроме того, в подобного рода исследованиях необходим учет вертикального перемещения верхней атмосферы, зачастую оставляемый без должного внимания.

Результаты работы важны для развития инструментальной базы ИСЗФ СО РАН и исследования особенностей ионосферной динамики в Сибирском регионе. Показана важность корректного расчета и учета нейтрального ветра в задачах моделирования, прогноза и анализа вариаций N_e . В дальнейшем предполагается накопление новых и анализ уже полученных материалов, содержащих такие же признаки одновременного усиления интенсивности свечения атомарного кислорода на длине волны 630 нм и повышения N_e в одной и той же области атмосферы. Интересно рассмотреть данные для разных уровней солнечной активности, использовать дополнительные средства наблюдения параметров атмосферы, спутниковые данные, а также другие модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-Г3/Ц3569/278).

Результаты получены с использованием уникальных научных установок «Оптические инструменты» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/>] и «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/77733/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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](https://doi.org/10.12737/11450) / Alsatkin S.S., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Some peculiarities in the ionosphere dynamics near the ionization maximum from Irkutsk incoherent scatter radar data for low and moderate solar activities. *Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 1, no. 3, pp. 28–36. DOI: [10.12737/11450](https://doi.org/10.12737/11450).
- Афраймович Э.Л., Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П. *Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне*. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2012, 304 с.
- Брюнелли Б.Е., Намгладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988, 526 с.
- Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри — Перо KEO Scientific «Arinæ». *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 3, с. 70–87. DOI: [10.12737/szf-33201707](https://doi.org/10.12737/szf-33201707) / Vasiliev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., et al. Registering upper atmosphere parameters in East Siberia with Fabry-Perot interferometer KEO Scientific “Arinæ”. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 3, pp. 61–75. DOI: [10.12737/stp-33201707](https://doi.org/10.12737/stp-33201707).
- Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б. и др. Научные задачи оптических инструментов Национального гелиогеофизического комплекса. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 105–122. DOI: [10.12737/szf-62202008](https://doi.org/10.12737/szf-62202008) / Vasiliev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., et al. Scientific goals of optical instruments of the National heliogeophysical complex. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 84–97. DOI: [10.12737/stp-62202008](https://doi.org/10.12737/stp-62202008).
- Григорьев С.А., Латышев К.С. Нестационарные процессы в геомагнитных силовых трубках. Анализ численных методов. *Математическое моделирование*. 1989, т. 1, № 9, с. 141–150.
- Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 6–18. DOI: [10.12737/szf-62202001](https://doi.org/10.12737/szf-62202001) / Zherebtsov G.A. Complex of heliogeophysical instruments of new generation. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 2, pp. 3–13. DOI: [10.12737/stp-62202001](https://doi.org/10.12737/stp-62202001).
- Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния. *Радиотехника и электроника*. 2002, т. 47, № 11, с. 1339–1345.
- Кринберг И.А., Тацкин А.В. *Ионосфера и плазмосфера*. М.: Наука, 1984, 189 с.
- Михалев А.В. Сезонные и межгодовые вариации атмосферной эмиссии [OI] 630 нм по данным наблюдений в регионе Восточной Сибири в 2011–2017 гг. *Солнечно-земная физика*. 2018, т. 4, № 2, с. 96–101. DOI: [10.12737/szf-42201809](https://doi.org/10.12737/szf-42201809) / Mikhalev A.V. Seasonal and interannual variations in the [OI] 630 nm atmospheric emission as derived from observations over Eastern Siberia in 2011–2017. *Sol.-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, no. 2, pp. 58–62. DOI: [10.12737/stp-42201809](https://doi.org/10.12737/stp-42201809).
- Намгладзе А.А., Захаров Л.П., Намгладзе А.Н. Численное моделирование ионосферных бурь. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1981, т. 21, № 2, с. 259–265.
- 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](https://doi.org/10.12737/szf-84202210) / Podlesny S.V., Devyatova E.V., Saunkin A.V., Vasiliev R.V. Comparing methods to estimate cloud cover over the Baikal natural territory in December 2020. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 8, no. 4, pp. 95–102. DOI: [10.12737/stp-84202210](https://doi.org/10.12737/stp-84202210).
- R.V. Vasiliev, I.K. Edemskiy, A.D. Shelkov,
M.F. Artamonov, S.S. Alsatkin, U.N. Evseev, V.P. Lebedev,
V.P. Tashlykov, A.V. Tashchilin, A.V. Timchenko
- Тацкин 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](https://doi.org/10.12737/21491) / Tashcillin A.V., Leonovich L.A. Modeling nightglow in atomic oxygen red and green lines under moderate disturbed geomagnetic conditions at midlatitudes. *Sol.-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, no. 4, pp. 94–106. DOI: [10.12737/24276](https://doi.org/10.12737/24276).
- Харгривс Дж.К. *Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи: Введение в физику околосземной космической среды*. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1982, 352 с.
- Цедрик М.В., Подлесный А.В., Куркин В.И. Трехпозиционный прием ЛЧМ-сигналов при слабонаклонном зондировании ионосферы. *Труды Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»*, Муром, 2022, с. 223–229. DOI: [10.24412/2304-0297-2022-1-223-229](https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-223-229).
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. *Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики*. М.: ГЕОС, 2006, 741 с.
- Щербаков А.А., Медведев А.В., Кушнарев Д.С. и др. Расчет нейтральных меридиональных ветров в средних широтах с помощью Иркутского радара НР. *Солнечно-земная физика*. 2015, т. 1, № 3, с. 37–48. DOI: [10.12737/10962](https://doi.org/10.12737/10962) / Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in middle latitudes from the Irkutsk incoherent scatter radar data. *Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 1, no. 3, pp. 37–48. DOI: [10.12737/10962](https://doi.org/10.12737/10962).
- Alken P., Maus S., Emmert J., Drob D.P. Improved horizontal wind model HWM07 enables estimation of equatorial ionospheric electric fields from satellite magnetic measurements. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, no. 11. DOI: [10.1029/2008GL033580](https://doi.org/10.1029/2008GL033580).
- Berrington K.A., Burke P.G. Effective collision strengths for forbidden transitions in e – N and e – O scattering, *Planet. Space Sci.* 1981, vol. 29, iss. 3, pp. 377–381. DOI: [10.1016/0032-0633\(81\)90026-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90026-X).
- Bilitza D., Pezzopane M., Truhlik V., et al. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark. *Rev. Geophys.* 2022, vol. 60, iss. 4. DOI: [10.1029/2022RG000792](https://doi.org/10.1029/2022RG000792).
- Colerico M.J., Mendillo M. The current state of investigations regarding the thermospheric midnight temperature maximum (MTM). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, pp. 1361–1369.
- Doering J.P. Absolute differential and integral electron excitation cross sections for atomic oxygen: 9. Improved cross section for the $^3P \rightarrow ^1D$ transition from 4.0 to 30 eV. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, iss. A12, pp. 19531–19534. DOI: [10.1029/92JA02007](https://doi.org/10.1029/92JA02007).
- Duan Y., Chang L.C., Chiu Y.-C., et al. Atomic oxygen ion retrieval from 630.0 nm airglow during geomagnetically quiet periods: a mid-latitude case study near Irkutsk. *Geoscience. Lett.* 2024, vol. 11, no. 55. DOI: [10.1186/s40562-024-00370-6](https://doi.org/10.1186/s40562-024-00370-6).
- Emmert J.T., Jones Jr. M., Siskind D.E., et al. NRLMSIS 2.1: An empirical model of nitric oxide incorporated into MSIS. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022, vol. 127, iss. 10. DOI: [10.1029/2022JA030896](https://doi.org/10.1029/2022JA030896).
- Garcia F.J., Kelley M.C., Makela J.J., Huang C.-S. Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric

- disturbances at midlatitudes. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, iss. A8, pp. 18407–18415. DOI: [10.1029/1999JA000305](https://doi.org/10.1029/1999JA000305).
- Harding B.J., Gehrels T.W., Makela J.J. Nonlinear regression method for estimating neutral wind and temperature from Fabry-Perot interferometer data. *App. Optics.* 2014, vol. 53, iss. 4, pp. 666–673. DOI: [10.1364/AO.53.000666](https://doi.org/10.1364/AO.53.000666).
- Kernahan J.H., Pang P.H.-L. Experimental determination of absolute A coefficients for “forbidden” atomic oxygen lines. *Can. J. Phys.* 1975, vol. 53, iss. 5, pp. 455–458.
- Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M., et al. Global modelling study (GSM TIP) of the ionospheric effects of excited N₂, convection and heat fluxes by comparison with EISCAT and satellite data for 31 July 1990. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, iss. 12, pp. 1362–1374. DOI: [10.1007/s00585-996-1362-2](https://doi.org/10.1007/s00585-996-1362-2).
- Link R., Cogger L. A Reexamination of the OI 6300 Angstrom Nightglow. *J. Geophys. Res.* 1988, vol. 93, iss. A9, pp. 9883–9892.
- Mantas G.P. Large 6300-A airglow intensity enhancements observed in Ionosphere Heating Experiments are excited by thermal electrons. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, iss. A5, pp. 8993–9002. DOI: [10.1029/94JA00347](https://doi.org/10.1029/94JA00347).
- Mesquita R.L.A., Meriwether J.W., Makela J.J., et al. New results on the mid-latitude midnight temperature maximum. *Ann. Geophys.* 2018, vol. 36, iss. 2, pp. 541–553. DOI: [10.5194/angeo-36-541-2018](https://doi.org/10.5194/angeo-36-541-2018).
- Otsuka Y., Kadota T., Shiokawa K., et al. Optical and radio measurements of a 630 nm airglow enhancement over Japan on 9 September 1999. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, iss. A6, p. 1252. DOI: [10.1029/2002JA009594](https://doi.org/10.1029/2002JA009594).
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, iss. A12, p. 1468. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).
- Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from Digisonde measurements at Irkutsk. *Earth, Planets and Space.* 2011, vol. 63, pp. 351–357. DOI: [10.5047/eps.2011.03.002](https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.002).
- Rishbeth H. Basic physics of the ionosphere: a tutorial review. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers.* 1988, vol. 58, iss. 6S, pp. 207–223. DOI: [10.1049/jiere.1988.0060](https://doi.org/10.1049/jiere.1988.0060).
- Shepherd G.G., Siddiqi N.J., Wiens R.H., Zhang S. Airglow measurements of possible changes in the ionosphere and middle atmosphere. *Adv. Space Res.* 1997, vol. 20, iss. 11, pp. 2127–2135. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00605-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00605-4).
- Van Zadt T.E. III-3 - The Neutral Atmosphere and the Quiet Ionosphere. *International Geophysics.* 1967, vol. 11, iss. 1, pp. 509–559. DOI: [10.1016/B978-0-12-480301-5.50015-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-480301-5.50015-X).
- Watanabe K., Ashour-Abdalla M., Sato T. A numerical model of magnetosphere-ionosphere coupling: Preliminary results. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, iss. A6, pp. 6973–6978. DOI: [10.1029/JA091iA06p06973](https://doi.org/10.1029/JA091iA06p06973).
- Weinstock J. Theory of enhanced airglow during ionospheric modifications. *J. Geophys. Res.* 1975, vol. 80, iss. 31, pp. 4331–4345. DOI: [10.1029/JA080i031p04331](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04331).
- Zwillinger D., Kokoska S. *CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae.* New York, Chapman & Hall, 2000, 537 p.
URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/> (дата обращения 2 октября 2025 г.).
URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/77733/> (дата обращения 2 октября 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Васильев Р.В., Едемский И.К., Шелков А.Д., Артамонов М.Ф., Алсаткин С.С., Евсеев У.Н., Лебедев В.П., Ташлыков В.П., Тацлин А.В., Тимченко А.В.. Анализ поведения ионосферной плазмы и свечения 1630 среднеширотной верхней атмосферы с использованием данных радара НР и интерферометра Фабри—Перо. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 4, с. 33–43. DOI: [10.12737/szf-114202502](https://doi.org/10.12737/szf-114202502).