

**РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ
ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ—ПЕРО КЕО SCIENTIFIC «ARINAE»****REGISTERING UPPER ATMOSPHERE PARAMETERS IN EAST SIBERIA
WITH FABRY—PEROT INTERFEROMETER KEO SCIENTIFIC “ARINAE”****Р.В. Васильев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, roman_vasilyev@iszf.irk.ru***М.Ф. Артамонов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artamonov.maksim@iszf.irk.ru***А.Б. Белецкий***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, beletsky@iszf.irk.ru***Г.А. Жеребцов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, gaz@iszf.irk.ru***И.В. Медведева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru***А.В. Михалев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru***Т.Е. Сыренова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, angata@iszf.irk.ru***R.V. Vasilyev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, roman_vasilyev@iszf.irk.ru***M.F. Artamonov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artamonov.maksim@iszf.irk.ru***A.B. Beletsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, beletsky@iszf.irk.ru***G.A. Zherebtsov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, gaz@iszf.irk.ru***I.V. Medvedeva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivmed@iszf.irk.ru***A.V. Mikhalev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mikhalev@iszf.irk.ru***T.E. Syrenova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, angata@iszf.irk.ru*

Аннотация. Описывается интерферометр Фабри—Перо, предназначенный для исследования излучения верхней атмосферы Земли. Предлагается модификация существующего способа обработки данных интерферометра для получения доплеровского сдвига и уширения наблюдаемой линии, разделения интенсивности наблюдаемой линии и интенсивности фона. Демонстрируется независимость определения температуры по линии кислорода 630.0 нм от присутствующего в наблюдаемых интерференционных картинах сигнала гидроксидов. Полученные температура и скорость ветра сравниваются с моделями верхней атмосферы (NRLMSISE-00, HWM14). Показано, что интерферометр способен измерять значения температуры по линии 557.7 нм с условием проведения дополнительной калибровки прибора. Результаты наблюдения ветра в целом совпадают с модельными представлениями. Ночной ход интенсивности по красной и зеленой линиям и температуры по линии 557.7 нм достаточно хорошо совпадает с ночным ходом этих параметров, наблюдаемых на устройствах, установленных в непосредственной близости от интерферометра.

Ключевые слова: интерферометрия Фабри—Перо, излучение атмосферы, ветер в верхней атмосфере, температура верхней атмосферы.

Abstract. We describe the Fabry—Perot interferometer designed to study Earth’s upper atmosphere. We propose a modification of the existing data processing method for determining the Doppler shift and Doppler widening and also for separating the observed line intensity and the background intensity. The temperature and wind velocity derived from these parameters are compared with physical characteristics obtained from modeling (NRLMSISE-00, HWM14). We demonstrate that the temperature is determined from the oxygen 630 nm line irrespective of the hydroxyl signal existing in interference pictures. We show that the interferometer can obtain temperature from the oxygen 557.7 nm line in case of additional calibration of the device. The observed wind velocity mainly agrees with model data. Night time variations in the red and green oxygen lines quite well coincide with those in intensities obtained by devices installed nearby the interferometer.

Keywords: Fabry—Perot interferometry, Earth’s atmosphere airglow, upper atmosphere wind, upper atmosphere temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Спектрофотометрические исследования свечения ночного неба являются одним из основных ин-

струментов исследования верхней атмосферы Земли [Шефов и др., 2006]. Специфика генерации оптического излучения в верхней атмосфере, а именно его линейчатый спектр и стратификация свечения

для определенных длин волн по высотам, позволяет получать информацию о движении и температуре воздушных масс в различных слоях атмосферы. Физическим явлением, позволяющим определить скорость перемещения и температуру атмосферного газа, является доплеровский сдвиг длины волны регистрируемого излучения, возникающий вследствие коллективного (ветер) или хаотического (температура) движения излучающих частиц. Используя известные выражения (например [Ландау, Лифшиц, 1988])

$$\frac{\lambda_c}{\lambda_0} = \left(1 - \frac{v}{c}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} \quad (2)$$

(λ_0 — длина волны неподвижного излучающего вещества; λ_c — центральная длина волны регистрируемой спектральной линии; $\Delta\lambda$ — регистрируемое уширение спектральной линии; v , T , m — скорость, температура и масса частиц светящегося вещества; k — постоянная Больцмана; c — скорость света в вакууме), можно оценить чувствительность, необходимую для успешного применения метода:

$$\delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_c = \frac{\lambda_0 v}{c}, \quad (3)$$

$$\delta\Delta\lambda = \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 = \lambda_0 \left(\sqrt{\frac{kT_2}{mc^2}} - \sqrt{\frac{kT_1}{mc^2}} \right). \quad (4)$$

Для того чтобы аппаратура регистрировала изменения скорости ветра на уровне 10 м/с и температуры на уровне 10 К для длины волны 630 нм, ее чувствительность должна быть такова, чтобы исследователь смог наблюдать изменения положения и ширины спектральной линии на уровне 10^{-5} и 10^{-4} нм соответственно.

Одним из известных на сегодняшнее время доступных методов регистрации спектрального состава оптического излучения, обладающим указанной чувствительностью, является метод наблюдения интерференции в параллельных пучках в интерферометре Фабри—Перо [Борн, Вольф 1973]. Существует значительное количество научных установок (например [Wu et al., 2004; Shiokawa et al., 2012; Anderson et al., 2009; Игнатъев и др., 1998]), использующих его для исследования оптического свечения верхней атмосферы Земли. Поле зрения этих установок, за исключением устройства, описанного в [Anderson et al., 2009], составляет единицы градусов, поэтому в однократном сеансе наблюдения можно получить характеристики только некоторой локальной области небесной сферы. Поэтому для расширения функциональных возможностей некоторые из этих установок сканируют небесную сферу при помощи автоматизированных перископических входных окон. Регистрация результатов наблюдений в интерферометрах ведется с использованием цифровых видеокамер, что позволяет хранить интерференционную картину целиком

в цифровом виде и обрабатывать результаты измерений уже после проведения сеанса наблюдений. Ключевым вопросом при проведении наблюдений на указанном уровне чувствительности является стабильность параметров наблюдательной системы. Современные интерферометры Фабри—Перо для наблюдения верхней атмосферы Земли оснащаются системами термостабилизации и лазерными калибровочными источниками света, при помощи которых производится мониторинг стабильности работы установки.

В работе описывается одно из таких устройств, установленное в Геофизической обсерватории (ГФО) Института солнечно-земной физики СО РАН (с. Торы, 52° N, 103° E). Описываются конструкция устройства и методика обработки результатов наблюдений. Приводятся суточные вариации некоторых характеристик верхней атмосферы, полученные при помощи интерферометра, и сравниваются с аналогичными параметрами, зарегистрированными на других установках. Проведено сравнение с параметрами верхней атмосферы, полученными по моделям NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] и HWM14 [Drob et al., 2015]. В работе использовались данные наблюдений ГФО ИСЗФ СО РАН с июня 2016 по февраль 2017 г.

КОНСТРУКЦИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Интерферометр Фабри—Перо, установленный в ГФО, изготовлен в организации KEO Scientific (Канада) и называется KEO Scientific “Arinae”. Детальное описание конструкции подобного прибора изложено в работе [Shiokawa et al., 2012], здесь приводятся только некоторые характерные особенности, важные для дальнейшего изложения. Схематически инструмент показан на рис. 1 слева. Один из основных специфических узлов инструмента — перископическое входное окно, состоящее из двух зеркал, которые при помощи шаговых двигателей могут независимо вращаться в перпендикулярных плоскостях (рис. 1, справа). Управление шаговыми двигателями осуществляется автоматически, поэтому существует возможность гибкого управления процессом наблюдений и направления входного окна в любую точку небесной сферы. После входного окна излучение проходит через полосовой интерференционный светофильтр диаметром 70 мм. Диаметр светофильтра определяет диаметр зрачка апертуры устройства. Интерферометр оснащен набором из шести одинаковых по размеру светофильтров с шириной полосы пропускания ~1 нм каждый и центральными длинами волн полосы пропускания 630.0, 557.7, 427.8, 589.3, 732.0, 843.0 нм. Светофильтры размещены в кассете револьверного типа, при вращении которой на определенный угол происходит смена светофильтра. Так же как и входное окно, кассета светофильтров управляется шаговым двигателем с возможностью автоматического управления и смены светофильтров по заранее составленной программе. Кассета оснащена системой термостабилизации, автоматически поддер-

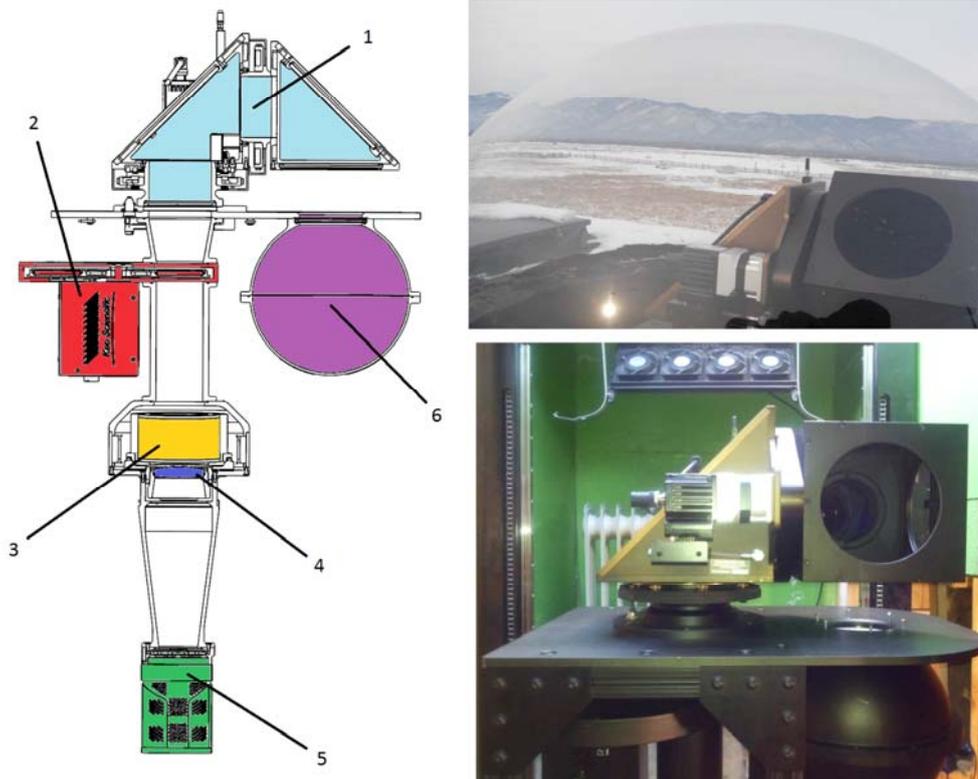


Рис. 1. Общая схема и фотографии перископического входного окна интерферометра: 1 — перископическое входное окно; 2 — кассета со светофильтрами; 3 — эталон (резонатор) Фабри—Перо; 4 — фокусирующая линза; 5 — камера; 6 — светорассеивающая сфера для обеспечения процедуры калибровки. Входное окно ориентировано таким образом, чтобы интерферометр регистрировал рассеянное в сфере излучение гелий-неонового лазера

живающей необходимую постоянную температуру светофильтров. После светофильтра входной световой поток приходит на эталон Фабри—Перо, выполненный в виде двух круглых отражающих поверхностей диаметром 70 мм с воздушным промежутком высотой 15 мм. Воздушный промежуток герметично закрыт от окружающей среды. Отражающие поверхности выполнены из материала с низким коэффициентом теплового расширения ($0 \pm 0.007 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне $0\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$) и покрыты специализированным светоотражающим составом, оптимизированным для работы с излучением на длинах волн 630.0 и 557.7 нм (коэффициент отражения 0.7–0.9). Плоскостность обработки поверхностей пластин эталона составляет $\lambda/100$. Интерференционная картина наблюдается в проходящем свете. Эталон, так же как и кассета светофильтров, обладает системой термостабилизации, автоматически поддерживающей необходимую для работы температуру. Интерференционная картина, формирующаяся на нижней пластине эталона, фокусируется собирающей линзой на матрице видеокамеры. Фокусное расстояние составляет порядка 30 см, размер матрицы — $1.3 \times 1.3 \text{ см}^2$. Таким образом, поле зрения устройства $\sim 2.5^\circ$. В устройстве используется камера PIXIS 1024B CCD. Разрешение матрицы камеры 1024×1024 пикселей, для снижения шумов используется охлаждение матрицы при помощи элемента Пельтье до рабочей температуры $-70 \text{ }^\circ\text{C}$. На данном этапе исследований указанное разрешение матрицы не требуется, поэтому для снижения затрат на обработку информа-

ции, поступающей с камеры, и повышения чувствительности изображение с камеры подвергается процедуре так называемого биннинга. Фактическое разрешение при этом снижается до величины 512×512 пикселей. Для дополнительной калибровки интерферометр оснащен гелий-неоновым лазером, излучение которого по световоду подается в специальную светорассеивающую сферу. Выходное окно сферы присоединено к площадке, на которой установлено перископическое входное окно интерферометра. Входное окно может быть ориентировано таким образом, чтобы лазерное излучение из рассеивающей сферы попадало на вход интерферометра и в процессе измерений можно было автоматически осуществлять калибровку прибора. Выход лазера оснащен автоматически управляемым затвором для предотвращения попадания лазерного излучения на входное окно интерферометра при наблюдении небесной сферы. Управление прибором осуществляется посредством персонального компьютера, связанного с узлами интерферометра (двигатели перископического входного окна; двигатель кассеты светофильтров; нагреватели и термодатчики светофильтров и эталона; управление затвором, системой передачи данных и системой термостабилизации камеры; управление затвором лазера) через специализированные интерфейсные устройства. Персональный компьютер оснащен специализированным программным обеспечением, синхронно управляющим всеми системами интерферометра по заранее заданной программе. Интерферометр установлен на электромеханическом

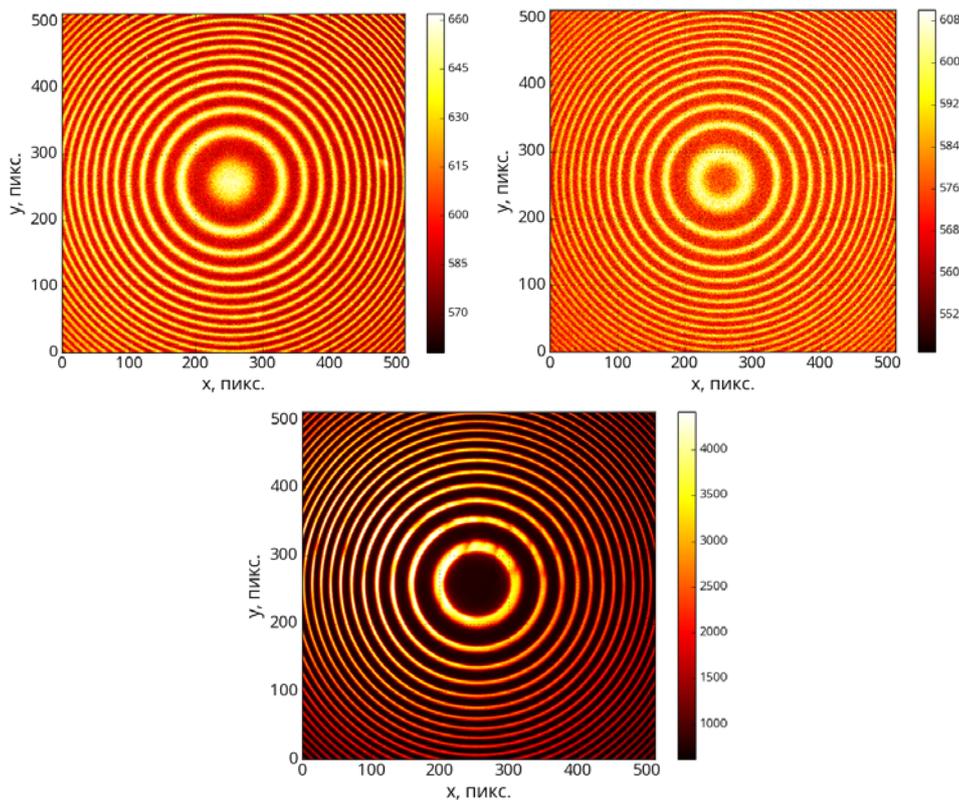


Рис. 2. Примеры регистрируемых интерферограмм, сформированных в результате наблюдения излучения ночного неба на длине волны 630.0 нм (вверху слева) и 557.7 нм (вверху справа). Внизу — интерферограмма, сформированная в результате наблюдения излучения гелий-неонового лазера (632.8 нм). Цветовая шкала интенсивности маркирована в относительных единицах

подъемнике в помещении, оснащено прозрачным куполом диаметром 1 м. В помещении поддерживается постоянная положительная температура, купол оснащен системой обдува теплым воздухом для предотвращения осаждения конденсата. Фотографии интерферометра в рабочем помещении приведены на рис. 1 справа.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ И ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Примеры интерференционных картин (интерферограмм), формирующихся в интерферометре при наблюдении ночного неба, и калибровочного лазерного излучения показаны на рис. 2. Существует значительное количество методик, позволяющих получать скорость ветра и температуру из интерференционных картин, формирующихся резонатором Фабри—Перо (см., например, [Игнатъев, Югов, 1995]), однако использование двумерных ПЗС-матриц для регистрации интерференционных картин и вычислительные возможности современных ЭВМ открывают несколько большие возможности обработки изображений. Поэтому основой при обработке данных, полученных в наблюдениях, является методика, изложенная в [Harding et al., 2014]. Для ее применения необходимо представить двумерную интерферограмму в виде одномерной посредством

кольцевого интегрирования имеющегося двумерного массива данных способом, изложенным в [Makela et al., 2011]. В результате двумерная интерферограмма представляется одномерной, отражающей зависимость интенсивности от расстояния, которое измеряется от центра интерференционной картины. Для успешного кольцевого интегрирования интерферограмм, получающихся в результате наблюдения собственного излучения атмосферы (особенно в условиях переменной интенсивности регистрируемого излучения), требуется периодическая регистрация калибровочных лазерных интерферограмм. При помощи этих калибровочных данных определяются текущие параметры измерительной системы, такие как центр интерференционной картины и аппаратная функция прибора. Аппаратная функция прибора, которая по сути является модифицированной функцией Эйри [Борн, Вольф, 1973], содержит дополнительную информацию о неоднородностях оптической системы интерферометра. В дальнейшем аппаратная функция используется для описания интерферограмм, полученных в результате наблюдения ночного неба. Эта модель представляется некой интегральной функцией, составленной из набора модифицированных функций Эйри, входящих в интеграл со значениями интенсивности и длины волны, соответствующими некой предполагаемой форме спектральной линии регистрируемого излучения. Очевидно, что определение параметров аппаратной функции и модель-

ной функции, описывающей регистрируемый сигнал, требует применения процедуры «подгонки» модельных функций к наблюдаемым экспериментальным данным. Для этой цели используется минимизация по методу наименьших квадратов при помощи алгоритма Левенберга—Марквардта [Marquardt, 1963].

В работе [Harding et al., 2014] последовательно изложены моменты приведения функции Эйри, описывающей интерференционную картину от монохроматического излучения на выходе идеального эталона Фабри—Перо, к модифицированному виду, поэтому подробно останавливаться на этих действиях здесь не имеет смысла. Приведем только конечный результат и опишем некоторые модификации, существенные в данной работе. Модифицированная функция Эйри имеет вид

$$\bar{A}(r, \lambda) = \int_0^{r_m} b(s, r) A(s, \lambda) ds + B, \quad (5)$$

где λ — длина волны излучения, r — расстояние от центра интерференционной картины, r_m — радиус границы интерференционной картины. По сути, (5) — это свертка функции Эйри, обладающей переменной интенсивностью, зависящей от r , необходимой для учета виньетирования оптической системы,

$$A(s, \lambda) = \frac{I_0 \left(1 + I_1 \frac{s}{r_m} + I_2 \frac{s^2}{r_m^2} \right)}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi n t}{\lambda} \cos \alpha s \right)} \quad (6)$$

с некоторым ядром, отражающим дефекты оптической системы, размывающие изображение на матрице,

$$b(s, r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(r)}} \exp \left\{ -\frac{(s-r)^2}{\sigma^2(r)} \right\} \quad (7)$$

плюс некоторое значение фона B , естественным образом возникающего вследствие тепловых шумов пикселей и проникновения через входной светофильтр и эталон фонового, равномерно распределенного по длинам волн оптического излучения.

В выражениях выше R — коэффициент отражения поверхностей эталона Фабри—Перо, n — показатель преломления среды между отражающими поверхностями эталона, t — расстояние между поверхностями эталона, α — коэффициент увеличения; I_0, I_1, I_2 — постоянные коэффициенты.

Зависимость ширины размывающего гауссова ядра от расстояния на матрице камеры представляется следующим образом:

$$\sigma(r) = \left(\sigma_0 + \sigma_1 \sin \left(\pi \frac{r}{r_m} \right) + \sigma_2 \cos \left(\pi \frac{r}{r_m} \right) \right), \quad (8)$$

где $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ — постоянные коэффициенты.

Выражение (5) в работе [Harding et al., 2014] используется в качестве аппаратной функции, и при минимизации разницы этой модели с одномерными лазерными интерферограммами определяются текущие значения постоянных коэффициентов в вы-

ражениях (6)–(8), коэффициента отражения, промежутка эталона и коэффициента увеличения. Полученные в результате минимизации величины используются в качестве неварьирующихся параметров в модели интерферограмм ночного неба:

$$S(r) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{A}(r, \lambda) Y(\lambda) d\lambda + B, \quad (9)$$

где $Y(\lambda)$ отражает форму спектральной линии излучения:

$$Y(\lambda) = Y_0 + Y_1 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda} \right)^2 \right\}. \quad (10)$$

Пределы интегрирования в (9) выбираются исходя из характеристик входного светофильтра. Величины, отражающие фон B , интенсивность линии I_0 , ее положение λ_c и ширину $\Delta\lambda$ определяются в результате минимизации разницы наблюдаемых данных и модели интерферограмм ночного неба. После минимизации (9) с результатами наблюдения ночного неба полученные λ_c и $\Delta\lambda$ с использованием (1) и (2) определяют температуру и скорость перемещения излучающей среды вдоль луча зрения интерферометра.

Для повышения устойчивости метода обработки интерферограмм, предложенного в работе [Harding et al., 2014] была проведена модификация выражений, описывающих интерференционные картины. Существенными изменениями моделей калибровочного лазерного и небесного излучения можно считать следующие:

- 1) замена полиномиальной зависимости интенсивности (числитель в (6)) на первые члены фурье-разложения, в результате чего эта зависимость выглядит так же, как и выражение для ширины гауссова ядра (8);
- 2) замена коэффициента увеличения α на прямое вычисление угла наклона входного излучения, регистрирующегося в определенной координате матрицы камеры r : $\alpha r = \arctg(r/F)$;
- 3) введение квадратичной зависимости фона от расстояния на матрице $B = B_0 + B_1 r^2$;
- 4) симметричное отражение одномерной интерферограммы на отрицательную шкалу r .

Последнее действие в два раза увеличивает число точек в имеющемся массиве данных, что на первый взгляд приводит только к бесполезному увеличению машинного времени при выполнении процедур минимизации. Однако такой подход, по нашему мнению, оправдан, поскольку приводит к более устойчивой работе алгоритма минимизации, в частности, это автоматически удовлетворяет естественному требованию нулевой производной для интенсивности в центре интерференционной картины. Примеры одномерных интерферограмм и результатов минимизации моделей к данным наблюдений, используемым в данной работе, приведены на рис. 3. Как будет видно в дальнейшем, несмотря на некоторые отклонения результирующих модельных функций от экспериментальных данных, достоверность получаемых параметров верхней атмосферы находится на приемлемом уровне.

Следует отметить, что организация методик обработки данных интерферограмм и процедур миними-

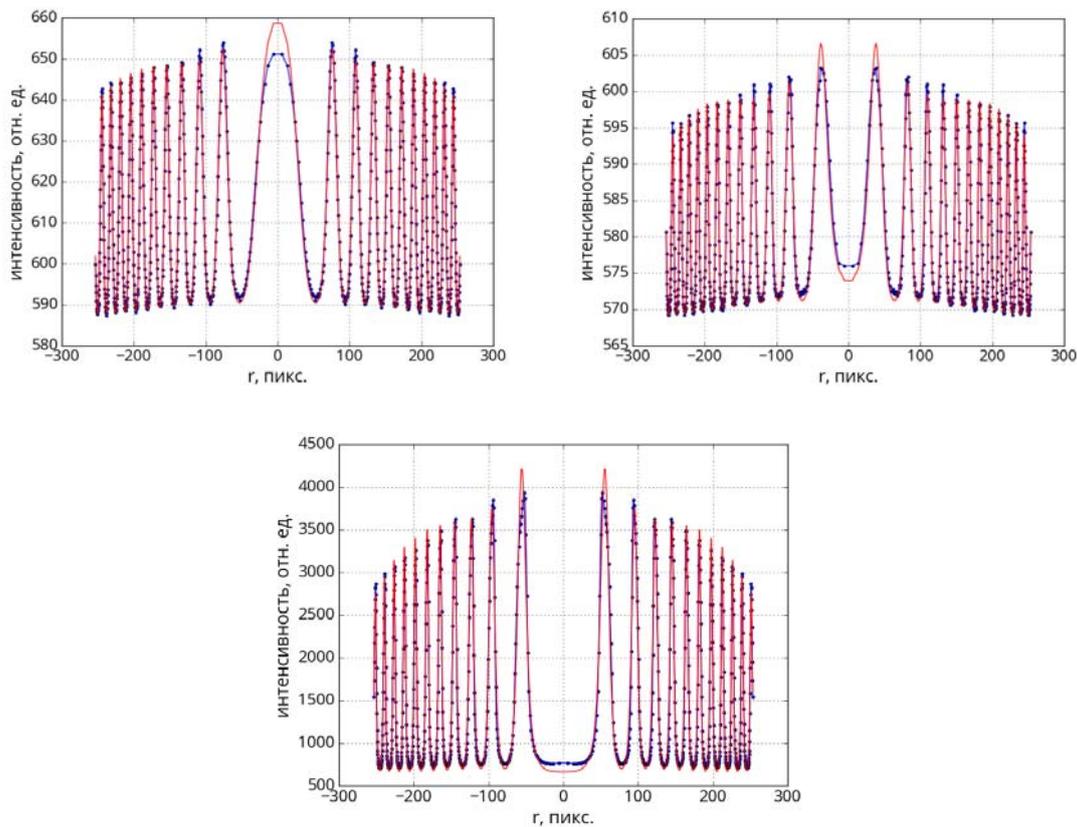


Рис. 3. Примеры одномерных интерферограмм (синие кривые) и функций с подобранными параметрами, описывающих эти интерферограммы (красные кривые). Показаны интерферограммы, сформированные в результате наблюдения излучения ночного неба на длине волны 630.0 нм (вверху слева) и 557.7 нм (вверху справа). Внизу — интерферограмма, сформированная в результате наблюдения излучения гелий-неонового лазера (632.8 нм)

зации выполнялась с использованием языка Python [van Rossum, 1995], а также пакетов Mahotas [Coelho, 2013] обработки изображений для формирования одномерных интерферограмм и Lmfit [Newville et al., 2014] для выполнения процедур подгонки модельных функций к результатам наблюдений.

Упомянутая возможность описываемого интерферометра оперативно в автоматическом режиме изменять направление наблюдения в совокупности с предположением о некоем времени стационарности среды в наблюдаемой области определяет методику проведения наблюдений для определения скорости ветра. Предположим, что на высотах, соответствующих максимуму интенсивности свечения атомарного кислорода, в области с характерным размером порядка нескольких сотен километров ветер сохраняет свое направление на протяжении 15 мин. Тогда, если в течение этого времени провести наблюдения в направлении на север, юг, запад и восток под некоторым углом к горизонту, полученные интерферограммы будут сформированы излучением, длина волны которого сдвинута на некоторую величину, зависящую от направления наблюдения. Этот сдвиг будет обусловлен так называемой лучевой скоростью — проекцией скорости ветра на направление наблюдения, сложной с возможным систематическим сдвигом, возникающим вследствие неидеальности модели, описывающей интерферограмму. Из-за стационарности

скорости ветра на протяжении серии наблюдений в различных направлениях полученные лучевые скорости будут однозначно взаимосвязаны (рис. 4):

$$L_N = L_0 + H \sin \theta + V \cos \theta, \quad (11)$$

$$L_S = L_0 + H \sin \theta - V \cos \theta, \quad (12)$$

$$L_E = L_0 + H \sin \theta + U \cos \theta, \quad (13)$$

$$L_W = L_0 + H \sin \theta - U \cos \theta, \quad (14)$$

где L_N, L_S, L_E, L_W — лучевые скорости в направлениях на север, юг, восток и запад соответственно; L_0 — возможный систематический сдвиг из-за неточности модели, описывающей интерферограмму; H — вертикальная скорость ветра; U, V — зональная и меридиональная компоненты горизонтальной скорости ветра; θ — угол места, под которым ведется наблюдение. Из выражений (11)–(14) видно, что для получения значений зонального и меридионального ветра необходимо вычесть лучевые скорости противоположных направлений:

$$L_N - L_S = 2V \cos \theta, \quad (15)$$

$$L_E - L_W = 2U \cos \theta. \quad (16)$$

Это действие устраняет также возможную систематическую ошибку измерительной системы и влияние вертикального ветра.

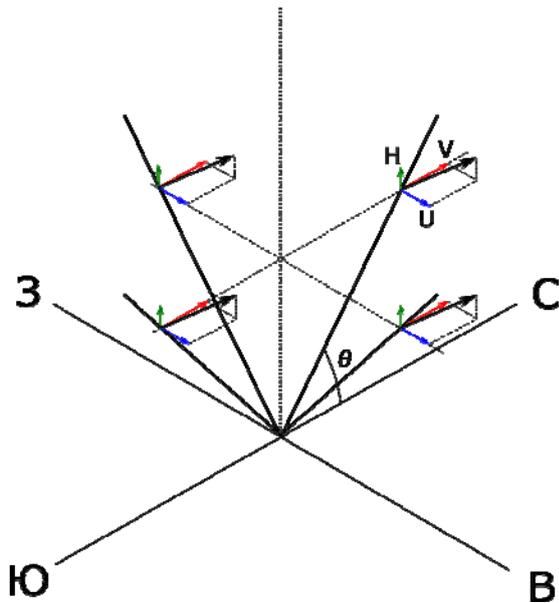


Рис. 4. Направления наблюдений и проекции скорости ветра. Черная стрелка — полная скорость ветра, зеленая стрелка — вертикальная скорость ветра, красная и синяя стрелки — меридиональная и зональная компоненты горизонтальной скорости ветра

Температура как скалярная величина не требует смены направлений для своего определения. Конечно, в модели могут присутствовать также некие систематические ошибки для этого параметра, но, к сожалению, смена направлений в этом случае не может их устранить, поскольку стационарность температуры в области наблюдения по времени не означает отсутствия пространственных температурных градиентов. Поэтому нет особых требований к измерению температуры, кроме достаточности времени экспозиции для формирования интерференционной картины.

Таким образом, последовательность выполняемых наблюдений в течение ночи выглядит как набор меняющихся со временем направлений (см. таблицу).

Последовательность наблюдений, выполняемых на интерферометре в течение ночи

Направление	Длина волны	Экспозиция
север	630.0	120 с
север	557.7	60 с
восток	630.0	120 с
восток	557.7	60 с
юг	630.0	120 с
юг	557.7	60 с
запад	630.0	120 с
запад	557.7	60 с
зенит	630.0	120 с
зенит	557.7	60 с
лазер	630.0	30 с

Типовые интерферограммы для указанных времен экспозиции уже были показаны на рис. 2, 3. Вариации интенсивности линии I_0 , фонового оптического излучения вблизи эмиссии 630 нм B_0 , температуры и скорости горизонтального ветра для

ночи 26–27 января 2017 г., полученные при помощи описанного метода наблюдений и обработки результатов, показаны на рис. 5. Выбор даты 26 января 2017 г. обусловлен тем, что в эту ночь в определенные часы наблюдений отмечались аномально низкие значения температуры (~200–300 К), полученные по эмиссии 630 нм (T_{630}). При этом следует отметить, что минимальные среднемесячные значения T_{630} для зимних месяцев составили ~400–450 К, для летних месяцев ~600–750 К. Максимальные значения T_{630} отмечаются в сумеречные периоды наблюдений и составляют ~800–900 К для летних месяцев и ~700 К для зимних. Поведение параметров модели аппаратной функции, наиболее критичных к определению ветра (произведение толщины промежутка эталона и показателя преломления nt , фокусное расстояние F), и температуры (коэффициент отражения поверхностей эталона R и ширина гауссова ядра, описывающего размытие изображения S_0), полученных на протяжении ночи в результате периодической калибровки прибора, приведено на рис. 6. Отсутствие согласия в поведении постоянных прибора и характеристик регистрируемого излучения указывает на то, что модель выбрана, по всей видимости, верно и может быть использована для дальнейших исследований.

Особенности поведения регистрируемой интенсивности свечения, температуры и ветра будут обсуждаться ниже, здесь хочется указать на поведение фонового оптического излучения. Как видно, во вторую половину ночи для большинства просматриваемых направлений среднее значение фона выше и его вариации значительны. Это обусловлено наличием дополнительного источника света с широким спектром в поле зрения прибора. Таким дополнительным источником света в этом диапазоне спектра может быть континуум собственного излучения верхней атмосферы, свет от звезд, планет, Луны и других естественных и искусственных источников. При наличии облачности в поле зрения интерферометра интенсивность этого дополнительного источника света будет усиливаться и значительно варьировать во времени. Таким образом, параметр B_0 может использоваться для косвенной оценки наличия облачности в момент проведения наблюдений. В данном случае по поведению этого параметра можно сказать, что с начала сеанса наблюдений 26 января 2017 г. в ~18:00 небо было чистым, а облачность возникла в ~00:00 27 января 2017 г. Это подтверждается снимками широкоугольных обзорных камер, установленных в месте расположения интерферометра. Несмотря на возникновение облачности, степень облачного покрова такова, что она практически не влияет на поведение наблюдаемой интенсивности. Сказать об отсутствии влияния облачности на получаемую скорость и направление ветра нельзя. Регистрируемое в конкретном направлении рассеянное в слое облачности излучение является результатом смешения излучения, пришедшего с различных направлений, над слоем облачности, что может значительно исказить данные о ветре. Таким же образом могла быть подвержена влиянию рассеяния света наблюдаемая

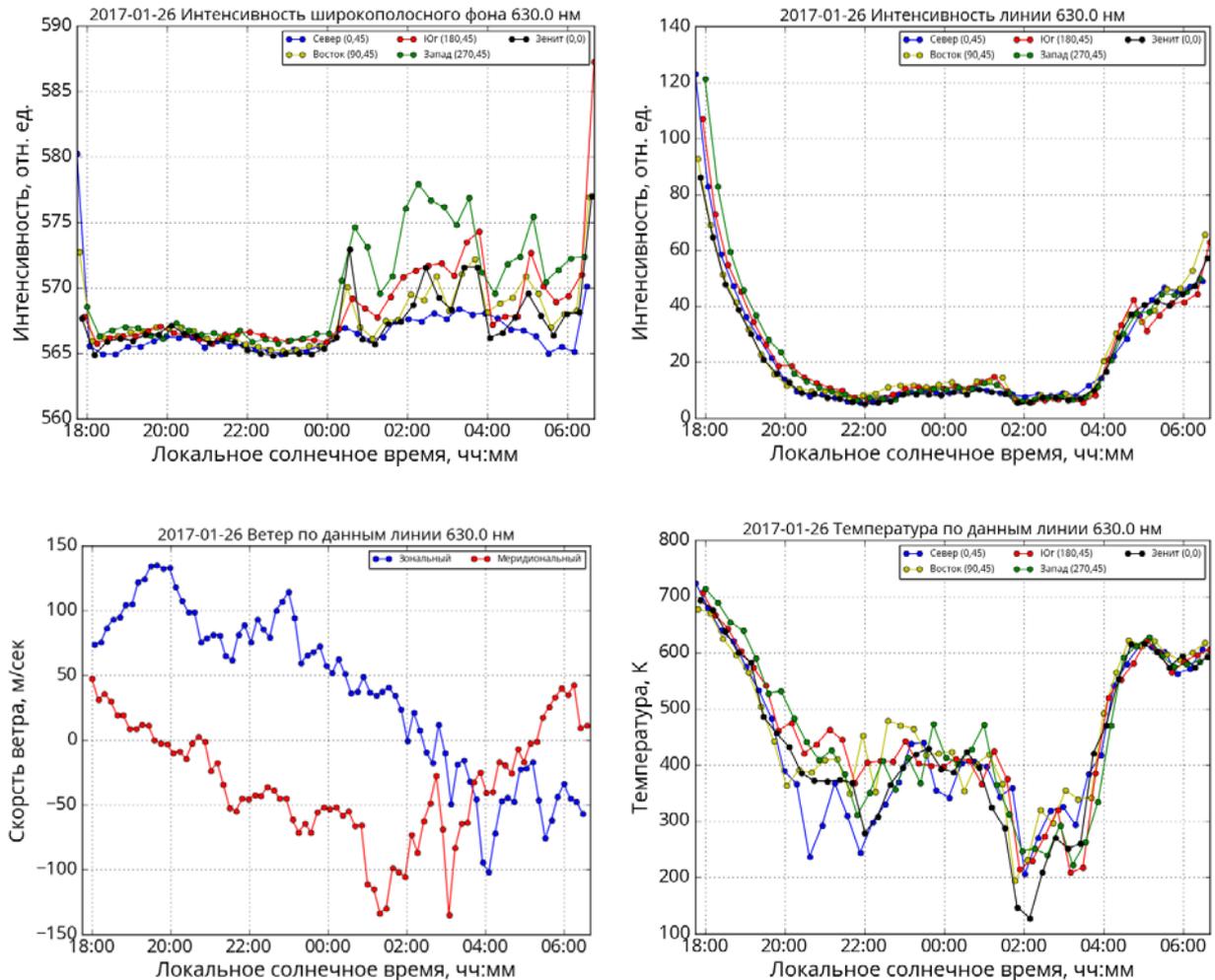


Рис. 5. Интенсивность фонового излучения (слева сверху), интенсивность линии (справа сверху), скорость зонального и меридионального ветра (положительные направления скорости ветра на север и на восток) (слева внизу), температура (справа внизу), полученные по данным наблюдения линии свечения атомарного кислорода на длине волны 630.0 нм на протяжении одной ночи наблюдения 26–27 января 2017 г. Цветом обозначены данные для разных направлений наблюдения

температура, но зарегистрированное значительное понижение температуры (интервал с 01:30 по 03:30 27 января 2017 г.) не совпадает по времени с приходом облачности. В дополнение следует сказать, что рассеяние в облачности будет приводить к наблюдаемому повышению температуры, поскольку в облачности будет «смешиваться» излучение линий, сдвинутых вследствие наличия ветра в разные стороны, что даст уширение наблюдаемой линии.

В непосредственной близости от интерферометра установлен ряд оптических приборов, регистрирующих излучение верхней атмосферы. Далее проводится сравнение некоторых результатов наблюдений, полученных на интерферометре, с данными, полученными при помощи камеры всего неба, работающей на длине волны 630.0 нм, спектрометре, регистрирующем интенсивности излучения эмиссий атомарного кислорода 630.0 и 557.7 нм, и инфракрасном спектрометре, регистрирующем излучение гидроксила (полоса (6–2), 834.0 нм) в области мезопаузы.

НОЧНОЙ ХОД ИНТЕНСИВНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЙ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА, И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ СПЕКТРОФОТОМЕТРА

Ночное поведение интенсивностей эмиссий атомарного кислорода 630 и 557.7 нм показано на рис. 7. Зимний период в данном случае выбран вследствие того, что временной интервал наблюдений в это время года максимален. Ход интенсивности линии 630.0 нм характеризуется вечерним снижением, связанным с закатом Солнца, небольшим полуночным повышением интенсивности из-за увеличения электронной концентрации на высоте высвечивания [Акасофу, Чепмен, 1974] и утренним увеличением интенсивности, обусловленным восходом Солнца. Вертикальными линиями отмечены моменты заката и восхода Солнца для высоты 250 км над местом расположения интерферометра и в магнитосопряженной точке. Сумеречное излучение эмис-

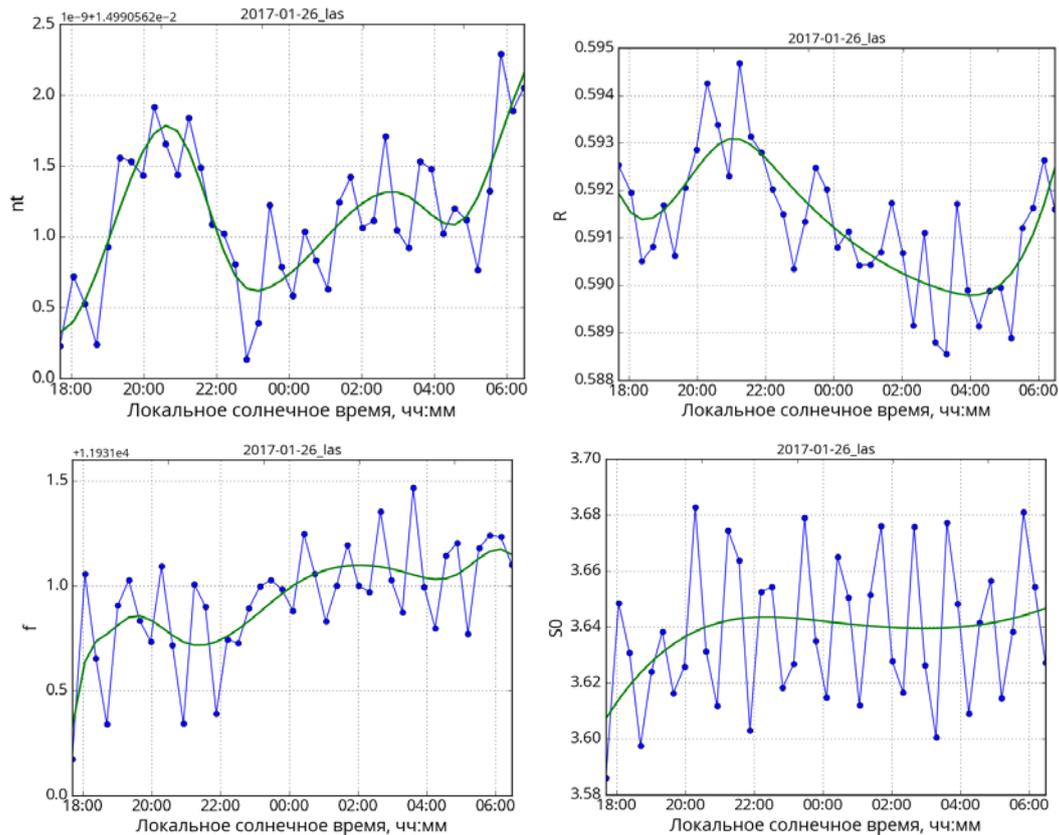


Рис. 6. Слева сверху — произведение величины промежутка эталона на показатель преломления (метры), справа сверху — коэффициент отражения поверхностей эталона, слева внизу — фокусное расстояние (в пикселях матрицы), справа внизу — ширина гауссового ядра, размывающего изображение (в пикселях матрицы). Зеленая линия — сглаженные данные, использующиеся в модели интерферограмм ночного неба

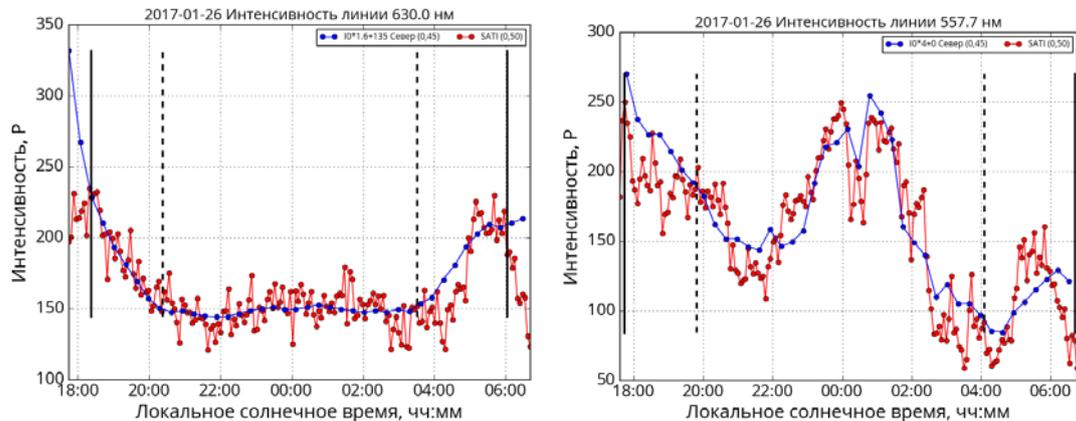


Рис. 7. Слева — ночной ход интенсивности эмиссии 630.0 нм по данным интерферометра (синим) и спектрофотометра (красным), справа — ночной ход интенсивности эмиссии 557.7 нм по данным интерферометра (синим) и спектрофотометра (красным). Вертикальные линии — закат и восход Солнца на высотах 250 и 90 км над местом расположения интерферометра (сплошные линии) и в магнитосопряженной точке (штриховые линии)

сии 630 нм в большей степени может быть обусловлено фотодиссоциацией молекулярного кислорода в континууме Шумана—Рунге, в ночной период излучение эмиссии 630 нм связывают с диссоциативной рекомбинацией с ионами O^+ , NO^+ , а в предутренние часы заметный вклад в излучение 630 нм могут вносить фотоэлектроны из магнитосопряженных областей [Семенов, 1975; Krassovsky et al., 1976; Торошелидзе, 1991, Кононов, Тащилин, 2001]. Поскольку высота максимума излучения эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм (~97 км)

существенно ниже высоты максимума излучения эмиссии атомарного кислорода 630 нм (~250 км), времена локального восхода и заката для высоты 97 км находятся на границе интервала наблюдений. Характерной наблюдаемой особенностью ночного хода интенсивности зеленой линии в зимние месяцы является полуночный максимум [Фишкова, 1983], возникающий вследствие приливной активности. На рис. 7 показан ночной ход интенсивностей эмиссий 630 и 557.7 нм по данным спектрофотометра САТИ-1 [[78](http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-</p>
</div>
<div data-bbox=)

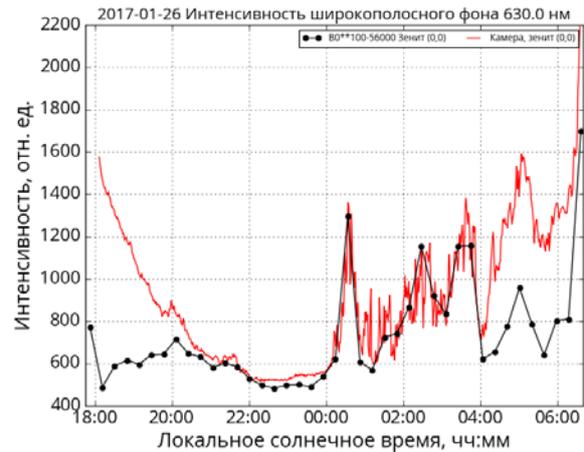
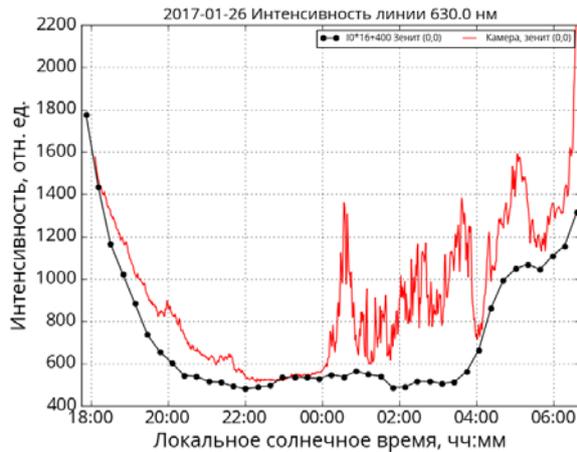


Рис. 8. Справа — ночной ход интенсивности линии 630.0 нм по данным интерферометра (черная кривая) и камеры всего неба (красная кривая), слева — ночной ход интенсивности фона для линии 630.0 нм по данным интерферометра (черная кривая) и интегральной интенсивности, полученной с помощью камеры всего неба (красная кривая)

based/spectr], расположенного вблизи интерферометра. Данные интерферометра взяты для области неба, максимально приближенной к полю зрения спектрофотометра. Ночные вариации интенсивности эмиссий по данным различных инструментов хорошо согласуются, поэтому представление интенсивности свечения ночного неба в модели интерферограмм, по всей видимости, сделано корректно. На данном этапе можно, используя данные спектрофотометра, провести простую калибровку интенсивности, регистрируемой интерферометром, предположив линейную взаимосвязь между входящим световым потоком и относительными единицами интенсивности интерферометра. Для зеленой линии поправочный коэффициент равен 4, для красной линии, помимо мультипликативной части 1.6, существует аддитивная составляющая, равная 135. Это может быть обусловлено наличием дополнительной фоновой засветки для линии 630.0 нм.

Было проведено сопоставление данных интерферометра с данными, полученными широкоугольной камерой, оснащенной фильтром 630.0 нм [<http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/keo>]. Для сравнения на изображениях камеры были выделены области, соответствующие полю зрения интерферометра. Поведение интегральной интенсивности, регистрируемое в этих областях изображений, показано на рис. 8. В данном случае с результатами, полученными при помощи камеры, уместно сравнивать поведение не только интенсивности красной линии, но и фонового излучения, поскольку в широкоугольной камере в данном случае нет разделения интенсивности линии и интенсивности фона. Одновременное наблюдение камерой и интерферометром показывает, что достаточно хорошее согласие регистрируемых интенсивностей происходит в отсутствие облачности (с начала наблюдений до полуночи, см. выше), в то время как при возникновении облачности (от полуночи до конца наблюдений) лучшее согласие наблюдается между интегральной интенсивностью, регистрируемой камерой, и фоном, регистрируемым интерферометром.

НОЧНОЙ ХОД ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ЛИНИИ 630.0 нм И ПРОБЛЕМА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Поведение температуры, полученное по наблюдению линии 630.0 нм в течение ночи, в основном носит ожидаемый характер (рис. 9). Присутствуют вечернее снижение и утреннее повышение температуры, обусловленные закатом и восходом Солнца. Как показывают модели нейтральной атмосферы и данные наблюдений [Fisher et al., 2015], максимальная вариация газокинетической температуры на высоте порядка 250 км на протяжении ночи составляет около 150 К. Наблюдаемые в данном случае ночные вариации доплеровской температуры T_{630} ~400–500 К значительно расходятся с модельными представлениями NRLMSISE-00. Рассчитанные по эмпирической модели [Шефов и др., 2007] для ночи 26 января 2017 г. значения T_{630} изменяются от ~750 К в начале ночи и до ~514 К в предрассветные часы в районе местной полуночи, что также существенно

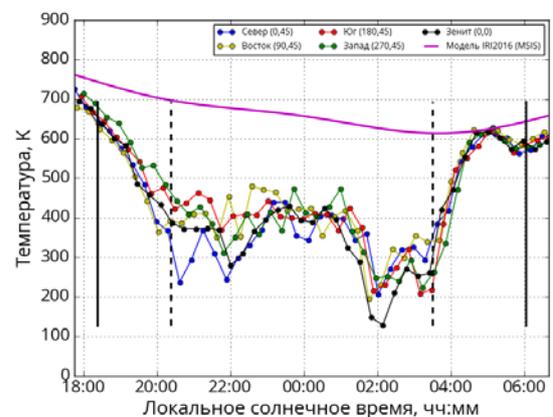


Рис. 9. Ночной ход температуры по линии 630.0 нм и по данным модели NRLMSISE-00. Красная, синяя, зеленая и желтая кривые — значения температуры для различных направлений наблюдения, фиолетовая кривая — данные модели. Черные вертикальные линии обозначают закат и восход Солнца над интерферометром (сплошные) и в магнитосопряженной точке (штриховые)

выше температуры, полученной при помощи интерферометра.

Следует отметить быстрое, порядка одного часа, снижение наблюдаемой доплеровской температуры на величину около 200 К в 02:00. Такое значительное снижение температуры не может быть обусловлено вариациями параметров наблюдательной системы, поскольку поведение параметров R и S_0 (рис. 5, 6) не коррелирует с поведением наблюдаемой температуры. Другим фактором, способным вызвать снижение температуры до таких аномально низких значений, может быть наличие паразитного сигнала, например излучение гидроксила в полосе (9-3), которая перекрывает длину волны 630.0 нм. Как показано в [Hernandez, 1974] такая гипотетическая возможность существует.

Следует заметить, что в работе [Nakamura et al., 2017] приводятся результаты определения температуры по линии 630 нм и показано, что периодически значения температуры, получаемые при помощи интерферометра Фабри—Перо, значительно ниже температуры атмосферы на высоте эмиссионного слоя. Авторы работы объясняют данную проблему занижения определяемой температуры «загрязнением» (искажением) регистрируемого интерферометром сигнала вследствие излучения гидроксила (полоса (9-3)) на длине волны, практически совпадающей с эмиссией атомарного кислорода 630 нм. Таким образом, проблема систематического занижения температуры по данным интерферометрических измерений присутствует и у других научных групп и требует дальнейшего изучения. Провести некоторые предварительные исследования этого вопроса можно с использованием оборудования ГФО «Горы», которая оборудована интерферометром Фабри—Перо и спектрометром, позволяющим исследовать поведение интенсивности излучения гидроксила.

Рассмотрим более подробно несколько интерферограмм, полученных в различное время ночи с 26 на 27 января 2017 г. для 18:00, 00:00, и 02:00 локального солнечного времени (рис. 10). По мере снижения интенсивности линии 630.0 в одномерной интерференционной картине более четко проявляется вторая система колец. Она не видна на двумерных интерферограммах вследствие сильно зашумленного сигнала. Если построить модельные одномерные интерферограммы для длин волн, соответствующих линиям излучения гидроксила $P_1(2)$ 628.75, $P_2(3)$ 629.79, и $P_1(3)$ 630.7 нм [Hernandez, 1974], на одном графике с экспериментальными данными, можно сопоставить вторую систему колец с одной из этих линий. На рис. 11 изображены две интерферограммы для 18:00 и 02:00 локального солнечного времени. Разным цветом на них нанесены экспериментальные данные, наиболее хорошо подобранная модель и модель с длинами волн, соответствующими излучению гидроксила и точному значению линии кислорода $^3P_2-^1D_2$ 630.0308 нм [Hernandez, 1974]. Модель для точного значения линии кислорода в данном случае необходима вследствие того, что в

наблюдательной системе на рассматриваемом уровне точности может существовать некий постоянный систематический сдвиг. Поэтому для идентификации второй линии необходимо сдвинуть вправо на одинаковую величину все модели систем колец гидроксила и кислорода, чтобы модель, описывающая систему колец кислорода, совместилась с данными наблюдений. Видно, что при этом линия гидроксила $P_1(3)$ совместится со второй наблюдаемой системой колец. Согласно [Hernandez, 1974], эта линия является наиболее яркой в указанном триплете, что согласуется с результатами наблюдений, приводимыми в данной работе. Таким образом, из данных на рис. 11 следует, что при значительном снижении интенсивности линии кислорода $^3P_2-^1D_2$ начинает разрешаться линия гидроксила $P_1(3)$, однако модель в результате проведения процедуры минимизации все еще описывает наиболее яркую кислородную линию. Следовательно, получаемая в результате минимизации температура в действительности является температурой, полученной по наблюдению линии 630.0 нм.

Как уже отмечалось, наличие облачности может исказить параметры наблюдаемого оптического излучения и, как следствие, приводить к искажению определяемых характеристик ветра и температуры. Значительное снижение температуры, более чем на 100 К, наступало практически сразу после заката, а дополнительное снижение температуры до ~150 К начиналось в 02:00, что не коррелирует с наблюдаемым поведением облачности. К тому же наиболее низкая температура в эту ночь наблюдалась в зените, в то время как максимальная интенсивность фона, гипотетически способная исказить результаты, наблюдалась в западном направлении.

На рис. 12 приведено поведение интенсивности гидроксильного излучения, возникающего на высотах мезопаузы (полоса (6-2), ~87 км), и ионосферных параметров: концентрации в максимуме ионизации N_mF2 и высоты максимума ионизации H_mF2 в сравнении с усредненными по направлениям интенсивностью и доплеровской температурой для линии 630.0 нм. Наблюдения выполнены при помощи расположенного в непосредственной близости инфракрасного спектрометра [Медведева и др., 2012] и ионозонда DPS-4. Данные приведены для 26 января 2017 г. Можно сказать, что поведение интенсивности линии 630 нм коррелирует с поведением доплеровской температуры, особенно хорошо это видно во время возникновения температурной аномалии. Поведение интенсивности излучения гидроксила антикоррелирует с поведением наблюдаемой температуры, но эта антикорреляция в некоторых случаях может быть задержана на некоторый интервал времени, а в некоторых случаях может отсутствовать (рис. 13), несмотря на аномально низкое падение наблюдаемой температуры. Следует отметить, что поведение температуры в период аномалии 26 января 2017 г. хорошо совпадает с поведением заряженной компоненты верхней атмосферы (рис. 12, справа).

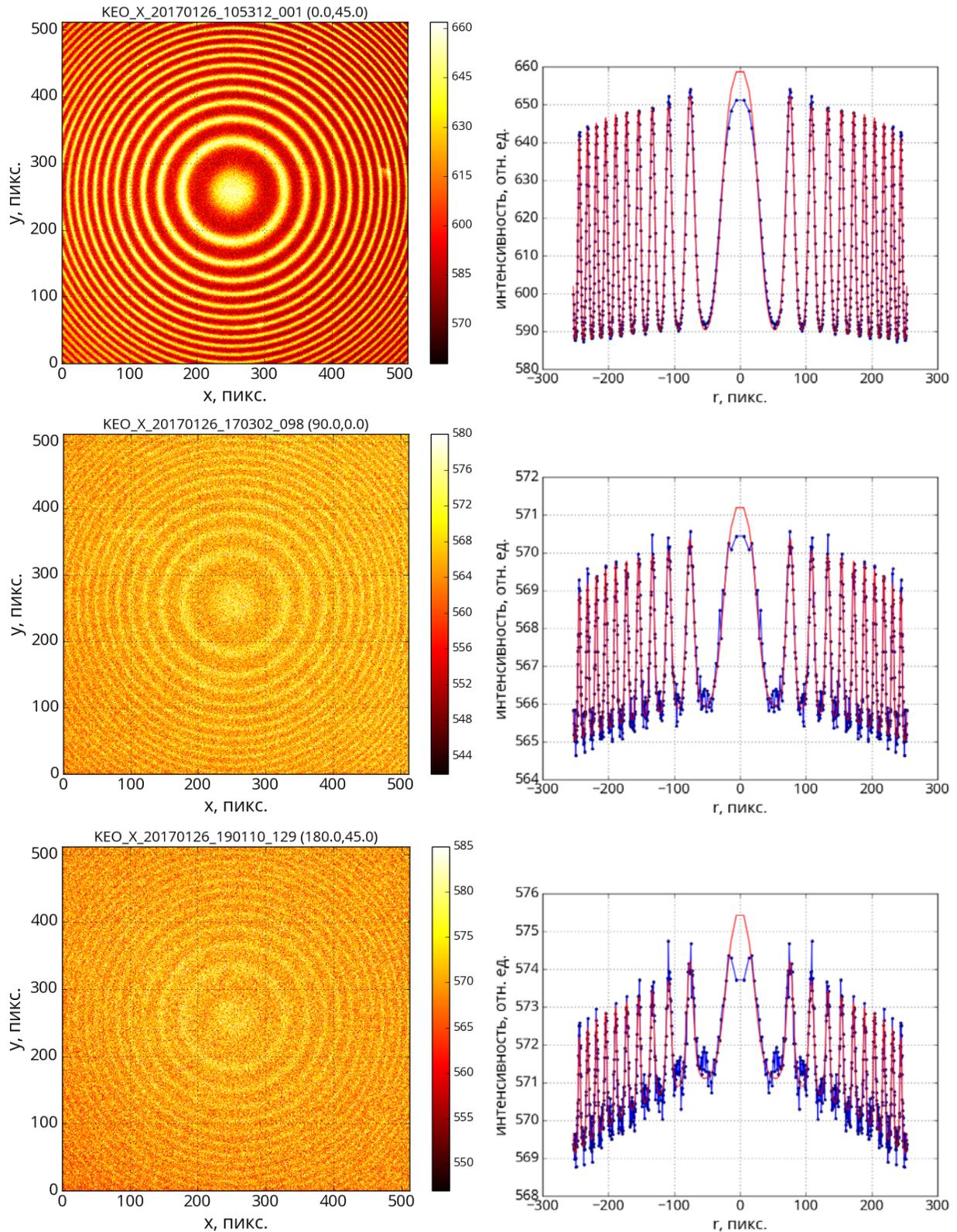


Рис. 10. Слева — двумерные интерферограммы, полученные в 18:00, 00:00, и 02:00 локального солнечного времени (сверху вниз). Справа — одномерные интерферограммы, полученные в те же периоды времени (сверху вниз). Синие кривые — данные наблюдений, красная кривая — модель, подобранная по данным наблюдений

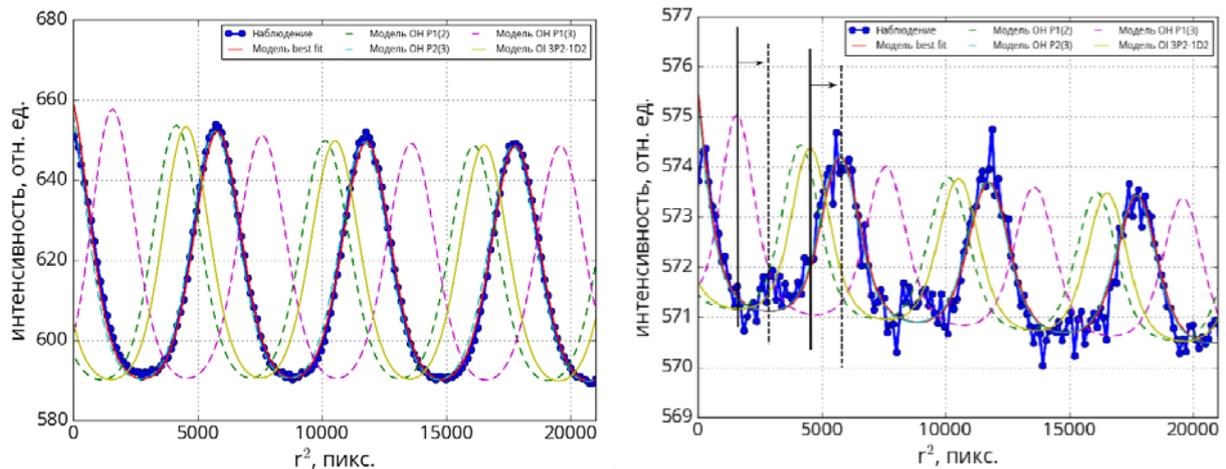


Рис. 11. Слева — часть интерферограммы для 18:00 локального солнечного времени. Синяя кривая — данные наблюдений, красная — модель, подобранная по данным наблюдений, желтая — модель, подобранная по данным наблюдений, но с длиной волны 630.0308 нм. Штриховые кривые — модели, подобранные по данным наблюдений, но с длинами волн, соответствующими трем ближайшим линиям излучения гидроксила по данным [Hernandez, 1974]. Стрелки и вертикальные линии показывают направление и величину смещения, необходимого для учета систематического сдвига в результатах наблюдений

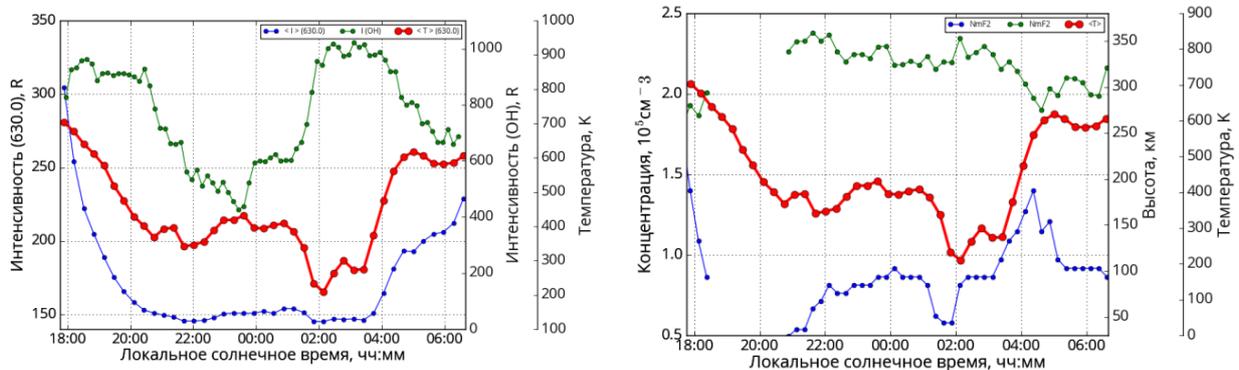


Рис. 12. Слева — поведение доплеровской температуры (красная кривая) и интенсивности (синяя кривая) по линии 630.0 нм для ночи 26–27 января 2017 г. Зеленым — поведение интенсивности излучения гидроксила, полоса (6-2). Справа — поведение температуры (красная кривая) по линии 630.0 нм и поведение ионосферных параметров: высоты максимума F2 слоя (зеленая кривая) и электронной концентрации в максимуме F2 слоя (синяя кривая)

Это событие представляет особый интерес и детально будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

НОЧНОЙ ХОД ТЕМПЕРАТУРЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ПО ЛИНИИ 557.7 нм. ПРОБЛЕМА КАЛИБРОВКИ. СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МОЛЕКУЛЫ ГИДРОКСИЛА

Использование гелий-неонового лазера для калибровки с использованием светофильтра 557.7 нм нецелесообразно, поскольку сигнал в этом случае будет чрезвычайно слаб. Параметром модели, для которого существует значительная зависимость от длины волны излучения и который имеет ключевое значение в определении температуры, является коэффициент отражения R . Для того чтобы работать в зеленой области спектра, от производителей интерферометра была получена лабораторно изме-

ренная зависимость коэффициента отражения поверхностей эталона от длины волны, которая использовалась для масштабирования этого параметра в аппаратной функции при выполнении минимизации для данных, полученных на длине волны 557.7 нм. Ночной ход температуры по наблюдениям зеленой линии атомарного кислорода для двух различных ночей представлен на рис. 14. Абсолютное значение температуры по данным интерферометра вследствие недостаточной точности представленного значения R получилось существенно выше ожидаемого, поэтому на рисунках используется некоторая искусственным образом масштабированная величина.

Для приблизительной калибровки интерферометрических измерений температуры в данном случае можно использовать данные о вращательной температуре молекулы гидроксила, полученные из спектральных наблюдений эмиссии молекулы ОН (полоса (6-2), 834 нм) при помощи расположенного в непосредственной близости инфракрасного спектрометра [Медведева и др., 2012]. Излучающий слой гидроксила имеет максимум интенсивности

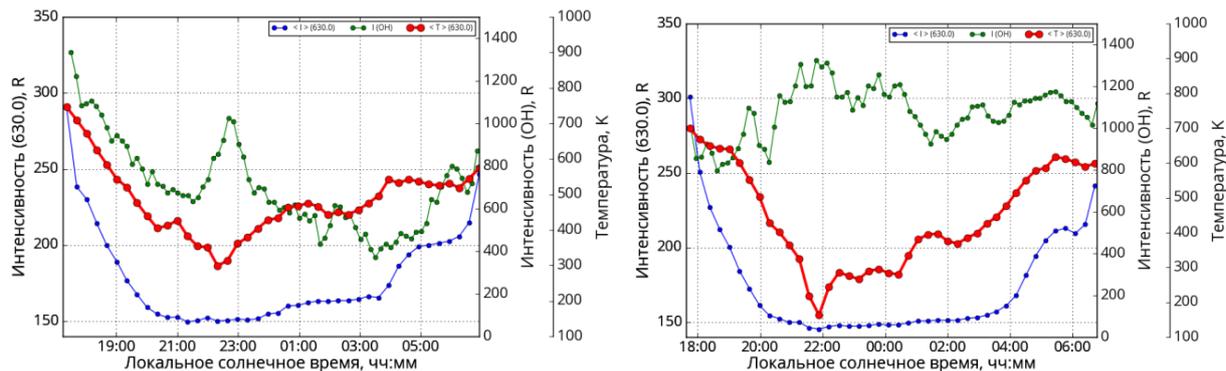


Рис. 13. Поведение доплеровской температуры (красные кривые) и интенсивности (синие кривые) по линии 630.0 нм. Зеленые кривые — вариации интенсивности эмиссии гидроксила (6-2). Слева — вариации для ночи 2 января 2017 г., когда наблюдалась задержанная антикорреляция доплеровской температуры линии 630 нм и интенсивностью эмиссии гидроксила. Справа — вариации для ночи 21 января 2017 г., когда антикорреляция между доплеровской температурой линии 630 нм и интенсивностью эмиссии гидроксила (6-2) отсутствовала

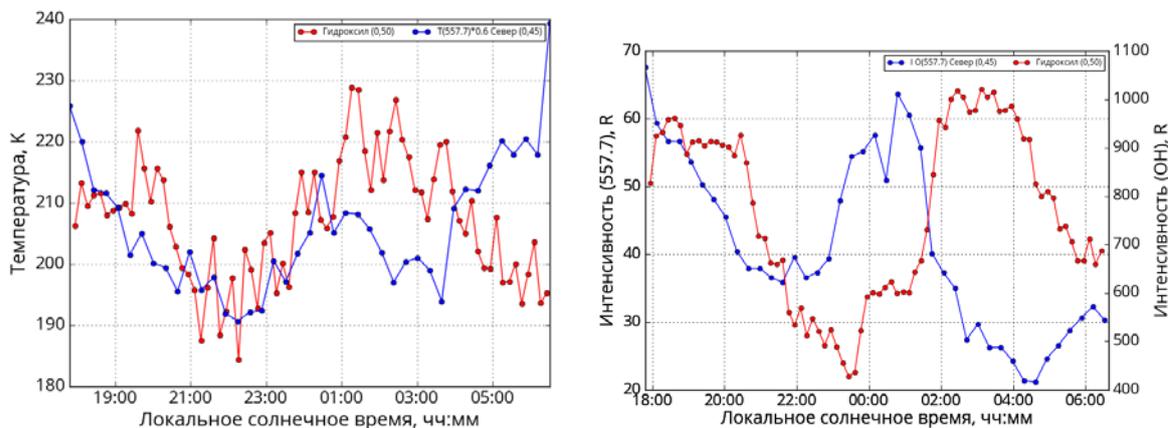


Рис. 14. Слева — ночной ход температуры, полученный по данным наблюдений эмиссии ОН (6-2) (красная кривая) и зеленой линии кислорода (синяя кривая). Справа — ночной ход интенсивности эмиссии ОН (6-2) (красная кривая) и зеленой линии кислорода (синяя кривая) для 26 января 2017 г.

на высоте ~ 87 км и толщину ~ 9 км; вращательная температура молекулы ОН соответствует температуре атмосферы на высоте излучения [Шефов и др., 2006]. Поскольку максимум излучения эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм (~ 97 км) находится относительно недалеко от высоты максимума излучения гидроксила (~ 87 км), можно сопоставить полученные значения температуры и в некотором приближении определить величину поправочного коэффициента для температуры, определяемой по интерферометрическим наблюдениям эмиссии 557.7 нм. Для того чтобы максимально совместить наблюдаемые температуры, для данных интерферометра использовался поправочный коэффициент 0.6. Видно, что для двух ночей использование этого коэффициента дает хорошее согласие температурного хода приблизительно до 00:00, после чего значения температуры, полученные по наблюдениям излучения гидроксила и атомарного кислорода, начинают различаться. Возможной причиной этого может быть изменение режима ветра на высоте 90–100 км. Как показано на рис. 15, именно в это время параметры ветра, полученные с использованием зеленой линии кислорода, изменяются.

НОЧНОЙ ХОД ВЕТРА ПО ДАННЫМ ЭМИССИЙ 630.0 И 557.7 НМ

Направление ветра и его скорость, определяемые по обеим линиям 557.7 и 630.0 нм, приведены на рис. 15. Показан также ход ветра, полученный с использованием модели HWM14. Данные наблюдений в целом находятся в соответствии с модельными представлениями.

Абсолютные значения скорости ветра и характерные моменты времени, отражающие максимальные и минимальные суточные значения ветра, приблизительно совпадают. Различия, по всей видимости, обусловлены особенностями состояния верхней атмосферы и условий наблюдений в конкретный день. Волновая активность, специфические условия в геомагнитном поле, перенос энергии, запасенной в тропосфере, снизу вверх, облачность и прочие факторы, не учитываемые в модели HWM14, могут значительно искажать картину ветра. Кроме того, в модели HWM14 не учитывается солнечная активность, что может приводить к значительным расхождениям в амплитуде ветра. Для корректного сравнения характеристик ветра,

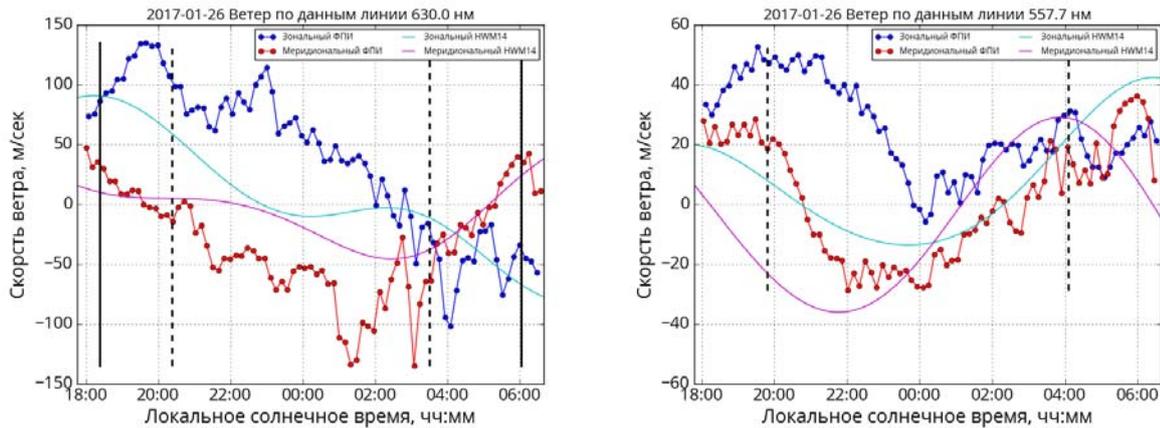


Рис. 15. Ночной ход зонального и меридионального ветра (слева), полученный по данным наблюдений красной линии кислорода (синие и красные кривые) 26 января 2017 г. Справа — то же для зеленой линии кислорода. Голубая и фиолетовая кривые — зональный и меридиональный ветер по модели HWM14

полученных с использованием интерферометра, с модельными представлениями (HWM14) в дальнейших исследованиях необходимо проводить усреднения наблюдаемых характеристик или учитывать конкретное состояние верхней атмосферы во входных параметрах модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Запущен в эксплуатацию новый прибор для определения спектральных характеристик оптического излучения ночной верхней атмосферы Земли в средних широтах. Проведены наблюдения характеристик спектральных линий кислорода с длинами волн 557.7 и 630 нм. С использованием полученных характеристик определены поведение интенсивностей линий и фона в течение ночи, а также поведение температуры и скорости ветра для различных высот в атмосфере Земли. Сделано сопоставление полученных результатов с данными, полученными при помощи других устройств, и результатами моделирования.

Выполнен анализ некоторых факторов и геофизических условий, потенциально влияющих на точность определения измеряемых величин. В частности, показано, что для рассматриваемой ночи 26 января 2017 г. гидроксильное излучение (полоса (9-3)), линии которого попадают в полосу пропускания интерференционного фильтра 630 нм, не могло оказать существенного влияния на определение температуры T_{630} . В некоторые ночи отмечается характерная антикорреляция поведения интенсивности эмиссии гидроксила (полоса (6-2)) и температуры T_{630} , которая могла бы быть дополнительным фактором, показывающим влияние сигнала гидроксила на определяемую температуру. Однако часто эта антикорреляция имеет характер задержки (порядка получаса) и в некоторых случаях при значительном снижении T_{630} наблюдается отсутствие антикорреляции. Эти факты могут указывать на то, что связь между наблюдаемой температурой T_{630} и интенсивностью гидроксильного излучения образуется вследствие процессов в верхней атмосфере, а не

является ошибкой наблюдений или обработки результатов.

Отмечены характер и степень влияния фонового излучения, обусловленного атмосферной подсветкой рассеянного излучения от внешних естественных источников. Проведено сопоставление интенсивностей эмиссий 557.7 и 630 нм, температуры (по эмиссии 557.7 нм) с данными камеры всего неба в эмиссии 630 нм, спектрометра САТИ-1 (эмиссии 557.7 и 630 нм) и инфракрасного спектрометра (вращательная температура гидроксила ОН полоса (6-2)). Выполнен расчет и приведен результат модельных значений (модели NRLMSISE-00, HWM14) кинетических температур и ветров для высот максимума эмиссий 557.7 и 630 нм в месте проведения наблюдений интерферометром Фабри—Перо. Достаточно хорошее согласие получено для модельных и экспериментально наблюдаемых значений скорости ветра. Для данных же температур T_{630} в отдельные интервалы времени отмечаются значительные расхождения с модельными значениями. Наибольшее согласие температур наблюдается в околозвездные часы. Наиболее острым и до конца не решенным вопросом в приведенных результатах является экстремально низкие ~ 200 К (в период 01:30–03:30 LT) значения наблюдаемой температуры, определяемой по эмиссии 630 нм. Достаточно высокая корреляция T_{630} в этот временной интервал с ионосферным параметром f_oF2 , относящимся к области высвечивания эмиссии 630 нм, не позволяет в настоящее время однозначно связать этот результат только с неточностью интерферометрической методики определения T_{630} или влиянием метеоусловий и требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований и, возможно, уточнения методики обработки интерферометрических наблюдений.

Следует отметить, что возможным объяснением наблюдаемых экстремально низких температур, сопоставимых с температурами на высотах верхней мезосферы — нижней термосферы в области высвечивания эмиссии 557.7 нм (~ 85 – 115 км), мог быть один из известных каналов заселения уровня

^1D атомарного кислорода, связанный с высвечиванием эмиссии 557.7 нм при переходе с уровня ^1S на уровень ^1D . В этом случае каждый акт излучения эмиссии 557.7 нм порождает один возбужденный атом $\text{O}(^1\text{D})$. При гипотетических экстремальных снижениях интенсивности эмиссии 630 нм из области F2 ионосферы, образуемой в результате диссоциативной рекомбинации, свой определенный вклад в интегральную по высоте интенсивность эмиссии 630 нм (и соответственно температуру) могло вносить и излучение с этой длиной волны с высоты высвечивания эмиссии 557.7 нм. Однако общепризнано, что из-за большого времени жизни метастабильного уровня ^1D и высоких скоростей процессов столкновительной дезактивации его на этих высотах излучение эмиссии 630 нм на высотах верхней мезосферы — нижней термосферы не наблюдается. Более детальное рассмотрение вопросов соотношения кинетических температур, получаемых по атмосферным моделям, и доплеровских температур, получаемых с помощью интерферометрических наблюдений в эмиссии 630 нм, предполагается в последующих работах.

Сопоставление температуры, полученной по данным наблюдений эмиссии $\text{OH}(6-2)$ и данным наблюдений линии кислорода 557.7 нм, показывает существенное расхождение этих характеристик, несмотря на то, что источники излучения размещены по высоте на ~ 10 км. Таким образом, использование излучения гидроксидов как средства калибровки интерферометра, регистрирующего излучение на длине волны 557.7 нм, неприемлемо. Поэтому для линии 557.7 нм необходимо изыскивать дополнительные средства калибровки описываемого устройства. В данном случае может быть оправдано использование ртутной лампы низкого давления в качестве источника линейчатого оптического излучения, имеющего линию в зеленой области спектра.

В целом приведенные результаты, полученные с использованием интерферометра Фабри—Перо, наблюдающего свечение ночного неба в двух линиях атомарного кислорода 557.7 и 630.0 нм, показывают состоятельность установки и ее достаточно высокий потенциал для проведения дальнейших исследований термодинамических характеристик мезосферы — нижней термосферы.

В работе использовались данные интерферометра Фабри—Перо входящего в оптический комплекс ЦКП «Ангара».

Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту «Изучение динамических процессов в системе нейтральная атмосфера — ионосфера — магнитосфера Земли» (уникальный номер 0344-2014-0006) и гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 1. М.: Мир, 1974. 384 с.

Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Издание 2-е, исправленное. М.: Наука, 1973. С. 297–313.

Игнатьев В.М., Югов В.А. Интерферометрия крупномасштабной динамики высокоширотной термосферы. Якутский научный центр. Якутск, 1995. 208 с.

Игнатьев В.М., Николашкин С.В., Югов В.А. и др. Светосильный спектрометр Фабри—Перо // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 4. С. 107–110.

Кононов Р.А., Тащилин А.В. Влияние сезонных и циклических вариаций термосферных параметров на ночную интенсивность красной линии атомарного кислорода // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14, № 10. С. 979–982.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Издание 7-е, исправленное. М.: Наука, 1988. С. 158–159.

Медведева И.В., Семенов А.И., Перминов В.И. и др. Сравнительный анализ данных наземных измерений температуры мезопаузы на средних широтах со спутниковыми данными MLS Aura, v3.3. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 133–139.

Семенов А.И. Предрассветные вариации температуры и интенсивности эмиссии 6300 Å // Астрономический циркуляр. 1975. № 882. С. 6–7.

Торошелидзе Т.И. Анализ проблем аэронавтики по излучению верхней атмосферы. Тбилиси: Мецниереба, 1991. 216 с.

Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Тбилиси: Мецниереба. 1983. 272 с.

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

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Юрченко О.Т., Сушков А.В. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 630.0 нм. 2. Температура // Геомагнетизм и аэронавтика. 2007. Т. 47, № 5. С. 692–701.

Anderson C., Conde M., Dyson P., et al. Thermospheric winds and temperatures above Mawson, Antarctica observed with an all-sky imaging Fabry—Perot spectrometer // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 2225–2235. DOI: 10.5194/angeo-27-2225-2009.

Coelho L.P. Mahotas. Open source software for scriptable computer vision // J. Open Res. Software. 2013. 1:e3. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.ac>

Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere // Earth and Space Sci. 2015. V. 2. P. 301–319. DOI: 10.1002/2014EA000089.

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. V. 53. P. 666–673. DOI: 10.1364/AO.53.000666.

Hernandez G. Contamination of the $\text{O I}(^3\text{P } 2-^1\text{D } 2)$ emission line by the (9-3) band of $\text{OH X}^2\text{II}$ in high-resolution measurements of the night sky // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, N 7. P. 1119–1123. DOI: 10.1029/JA079i007p01119.

Fisher D.J., Makela J.J., Meriwether J.W., et al. Climatologies of nighttime thermospheric winds and temperatures from Fabry—Perot interferometer measurements: From solar minimum to solar maximum // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 6679–6693. DOI: 10.1002/2015JA021170.

Krassovsky V.I., Semenov A.I., Shefov N.N. Predawn emission at 6300 Å and super-thermal ions from conjugate points // J. Atm. Terr. Phys. 1976. V. 38, N 9-10. P. 999–1001.

Makela J.J., Meriwether J.W., Huang Y., et al. Simulation and analysis of a multi-order imaging Fabry—Perot interferometer for the study of thermospheric winds and temperatures // Appl. Optics. 2011. V. 50. P. 4403–4416. DOI: 10.1364/AO.50.004403.

Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // J. Soc. Industrial and Applied

Mathematics. 1963. V. 11, N 2. P. 431–441. DOI: 10.1137/0111030.

Nakamura Y., Shiokawa K., Otsuka Y., et al. Measurement of thermospheric temperatures using OMTI Fabry-Perot interferometers with 70-mm etalon // *Earth, Planets and Space*. 2017. V. 69, iss. 1, article id. 57. DOI: 10.1186/s40623-017-0643-1.

Newville M., Stensitzki T., Allen D.B., Ingargiola A. LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python [Data set]. Zenodo, 2014. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.11813> (дата обращения 14 апреля 2017 г.).

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. V. 107, N A12. P. 1468. DOI: 10.1029/2002JA009430.

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S. Development of low-cost sky-scanning Fabry-Perot interferometers for airglow and auroral studies // *Earth, Planets and Space*. 2012. V. 64. P. 1033. DOI: 10.5047/eps.2012.05.004.

van Rossum G. Python Tutorial, Technical Report CS-R9526. Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI). Amsterdam, May 1995.

Wu Q., Gablehouse R.D., Solomon S.C., et al. A new NCAR Fabry-Perot interferometer for upper atmospheric research. Proc. SPIE. 2004. V. 5660. P. 218–227.

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr> (дата обращения 14 апреля 2017 г.).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/keo> (дата обращения 14 апреля 2017 г.).

REFERENCES

Akasofu S.I., Chepman S. *Solar-Terrestrial Physics*. Part 1. Moscow, Mir Publ., 1974. 384 p. (In Russian).

Anderson C., Conde M., Dyson P., Davies T., Kosch M.J. Thermospheric winds and temperatures above Mawson, Antarctica observed with an all-sky imaging Fabry-Perot spectrometer. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 2225–2235. DOI: 10.5194/angeo-27-2225-2009.

Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Principles of Optics. 2nd Ed.]. Moscow: Nauka Publ., 1973, pp. 297–313. (In Russian).

Coelho L.P. Mahotas. Open source software for scriptable computer vision. *J. Open Res. Software*. 2013, 1:e3. DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.ac>

Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., Makela J.J., Doombos E.N., Conde M., Hernandez G., Noto J., Zawdie K.A., McDonald S.E., Huba J.D., Klenzing J.H. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere. *Earth and Space Sci.* 2015, vol. 2, pp. 301–319. DOI: 10.1002/2014EA000089.

Fisher D.J., Makela J.J., Meriwether J.W., Fisher D.J., Makela J.J., Meriwether J.W., Buriti R.A., Benkhaldoun Z., Kaab M., Lagheryeh A. Climatologies of nighttime thermospheric winds and temperatures from Fabry-Perot interferometer measurements: From solar minimum to solar maximum. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 6679–6693. DOI: 10.1002/2015JA021170.

Fishkova L.M. *Nochnoe izluchenie sredneshirotnoi verkhnei atmosfery Zemli* [Night Emission of the Earth's Mid-Latitude Upper Atmosphere]. Tbilisi: Metsniereba Publ., 1983, 272 p. (In Russian).

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, pp. 666–673. DOI: 10.1364/AO.53.000666.

Hernandez G. Contamination of the O I (³P 2–¹D 2) emission line by the (9–3) band of OH X²I in high-resolution measurements of the night sky. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. 7, pp. 1119–1123. DOI: 10.1029/JA079i007p01119.

Ignatyev V.M., Yugov V.A. *Interferometriya krupnomasshtabnoi dinamiki vysokoshirotnoi termosfery* [Interferometry of Large-Scale Dynamics of High-Latitude Thermo-

sphere]. Yakutsk Scientific Center. Yakutsk, 1995, 208 p. (In Russian).

Ignatyev V.M., Nikolashkin S.V., Yugov V.A., Askentyev A.G., Ammosov P.P. Fabry-Perot high-transmission spectrometer. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques]. 1998, no. 4, pp. 107–110. (In Russian).

Kononov R.A., Tashchilin A.V. Effect of seasonal and cyclic variations of thermosphere parameters on night intensity of atomic oxygen red line. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics]. 2001, vol. 14, no. 10, pp. 979–982.

Krassovsky V.I., Semenov A.I., Shefov N.N. Predawn emission at 6300 Å and super-thermal ions from conjugate points. *J. Atm. Terr. Phys.* 1976, vol. 38, no. 9–10, pp. 999–1001.

Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya polya* [Theory of Fields. 7th Ed.]. Moscow: Nauka Publ., 1988, pp. 158–159. (In Russian).

Makela J.J., Meriwether J.W., Huang Y., Sherwood P.J. Simulation and analysis of a multi-order imaging Fabry-Perot interferometer for the study of thermospheric winds and temperatures. *App. Optics*. 2011, vol. 50, pp. 4403–4416. DOI: 10.1364/AO.50.004403.

Marquardt D.W. An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Industrial and Applied Mathematics*. 1963, vol. 11, no. 2, pp. 431–441. DOI: 10.1137/0111030.

Medvedeva I.V., Semenov A.I., Perminov V.I., Tatarnikov A.V., Beletsky A.B. Comparative analysis between data of ground-based measurements of mesopause temperature at midlatitudes and satellite data MLS Aura, v3.3. *Sovremennyye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2012, vol. 9, no. 4, pp. 133–139. (In Russian).

Nakamura Y., Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S., Nozawa S., Komolmis T., Komonjida S., Neudegg D., Yuile C., Meriwether J., Shinagawa H., Jin H. Measurement of thermospheric temperatures using OMTI Fabry-Perot interferometers with 70-mm etalon. *Earth, Planets and Space*. 2017, vol. 69, iss. 1, article id.57. DOI: 10.1186/s40623-017-0643-1.

Newville M., Stensitzki T., Allen D.B., Ingargiola A. LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python [Data set]. Zenodo, 2014. URL: <http://doi.org/10.5281/zenodo.11813> (accessed July 14, 2017).

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, no. A12, p. 1468. DOI: 10.1029/2002JA009430.

Semenov A.I. Predawn temperature and intensity variations of 6300 Å emission. *Astronomicheskii tsirkulyar* [Astronomical Circular]. 1975, no. 882, pp. 6–7. (In Russian).

Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Yu. Izluchenie verkhnei atmosfery — indikator ee struktury i dinamiki [Upper Atmosphere Emission as Indicator of Its Structure and Dynamics]. Moscow: Geos, 2006, 741 p. (In Russian).

Shefov N.N., Semenov A.I., Yurchenko O.T., Sushkov A.V. Empirical model of variations of 630.0 nm atomic oxygen emission. 2. Temperature. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2007, vol. 47, no. 5, pp. 692–701. (In Russian).

Shiokawa K., Otsuka Y., Oyama S. Development of low-cost sky-scanning Fabry-Perot interferometers for airglow and auroral studies. *Earth, Planets and Space*. 2012, vol. 64, p. 1033. DOI: 10.5047/eps.2012.05.004.

Toroshelidze T.I. *Analiz problem aeronomii po izlucheniyyu verkhnei atmosfery* [Analysis of Aeronomy Problems from Upper Atmosphere Emission]. Tbilisi: Metsniereba Publ., 1991, 216 p. (In Russian).

van Rossum G. Python Tutorial, Technical Report CS-R9526. Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI). Amsterdam, May 1995.

*Р.В. Васильев, М.Ф. Артамонов, А.Б. Белецкий,
Г.А. Жеребцов, И.В. Медведева, А.В. Михалев, Т.Е. Сыренова*

Wu Q., Gablehouse R.D., Solomon S.C., Killeen T.L., Chiao-Yao She. A new NCAR Fabry—Perot interferometer for upper atmospheric research. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5660, pp. 218–227.

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/spectr> (accessed July 14, 2017).

URL: <http://atmos.iszf.irk.ru/ru/ground-based/keo> (accessed July 14, 2017).

*R.V. Vasilyev, M.F. Artamonov, A.B. Beletsky,
G.A. Zherebtsov, I.V. Medvedeva, A.V. Mikhalev, T.E. Syrenova*

Как цитировать эту статью

Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Белецкий А.Б., Жеребцов Г.А., Медведева И.В., Михалев А.В., Сыренова Т.Е. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо КЕО Scientific «Arinae». *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 70–87.

How to cite this article

Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., Zherebtsov G.A., Medvedeva I.V., Mikhalev A.V., Syrenova T.E. Registering upper atmosphere parameters in East Siberia with Fabry-Perot interferometer KEO Scientific “Arinae”. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 70–87.