

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВАРИАЦИЙ НОЧНОГО СВЕЧЕНИЯ ГИДРОКСИЛА В АЛМА-АТЕ

INTERANNUAL DYNAMICS IN INTENSITY OF MESOSCALE HYDROXYL NIGHTGLOW VARIATIONS OVER ALMATY

А.А. Попов

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия, Andrew.Popovix@mail.ru*

Н.М. Гаврилов

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия, n.gavrilov@spbu.ru*

А.Б. Андреев

*Институт ионосферы,
Алма-Ата, Казахстан, alexey.andreyev@rambler.ru*

А.И. Погорельцев

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Российский государственный гидрометеорологический
университет, Санкт-Петербург, Россия, apogor@rshu.ru*

A.A. Popov

*Saint-Petersburg State University,
Saint-Petersburg, Russia, Andrew.Popovix@mail.ru*

N.M. Gavrilo

*Saint-Petersburg State University,
Saint-Petersburg, Russia, n.gavrilov@spbu.ru*

A.B. Andreev

*Institute of the Ionosphere,
Almaty, Kazakhstan, alexey.andreyev@rambler.ru*

A.I. Pogoreltsev

*Saint-Petersburg State University,
Russian State Hydro-meteorological University,
Saint-Petersburg, Russia, apogor@rshu.ru*

Аннотация. Метод цифровых разностных фильтров используется при анализе данных наблюдений интенсивности ночного свечения и вращательной температуры гидроксила ОН на высотах 85–90 км прибором SATI в Алма-Ате (43°03' N, 76°58' E), Казахстан, в 2010–2017 гг. Исследованы сезонные и межгодовые изменения среднемесячных значений и дисперсий вариаций с периодами 0.4–5.4 ч, которые могут быть связаны с внутренними гравитационными волнами в области мезопаузы. Усредненный за 2010–2017 гг. годовой ход среднемесячной температуры вблизи мезопаузы имеет максимум зимой и минимум летом. В отличие от среднемесячных температур, среднемесячные интенсивности свечения ОН кроме зимнего максимума имеют дополнительный максимум летом (в июне). Дисперсия мезомасштабных вариаций вращательной температуры и характеристики внутренних гравитационных волн максимальны весной и осенью. Для мезомасштабных вариаций интенсивности свечения ОН весенний максимум сдвинут на июнь. Детали межгодовых изменений интенсивности свечения и вращательной температуры ОН могут различаться. Это может быть связано с сезонными и долговременными изменениями в сложной системе фотохимических процессов, приводящих к ночному свечению ОН.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, ночные свечения, гидроксил, интенсивность свечения, вращательная температура, климатология, сезонные вариации, тренды, мезомасштабная изменчивость, внутренние гравитационные волны.

Abstract. The method of digital difference filters is applied to the data analysis of SATI observations of hydroxyl nightglow intensity and rotational temperature at altitudes 85–90 km over Almaty (43°03' N, 76°58' E), Kazakhstan, in 2010–2017. We examine seasonal and interannual variations in average monthly values and standard deviations of variations with periods 0.4–5.4 hrs, which may be associated with internal gravity waves in the mesopause region. The average monthly temperature near the mesopause has a maximum in winter and a minimum in June. The average monthly intensity has an additional maximum in June. Standard deviation of mesoscale rotational temperature variations and characteristics of internal gravity waves are maximum in spring and autumn. The spring maximum of mesoscale OH emission intensity variations is shifted to June. Interannual variations and multi-year trends of OH rotational temperature and emission intensity may differ in detail. This may be connected with seasonal and long-term variations in the complex system of the photochemical processes, which produce the OH nightglow.

Keywords: upper atmosphere, nightglows, hydroxyl, intensity, rotational temperature, climatology, seasonal variations, trends, mesoscale variability, internal gravity waves.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию внутренних гравитационных волн (ВГВ) в средней и верхней атмосфере. Их источники находятся в основном в нижних слоях атмосферы.

Распространяясь вверх, ВГВ способны переносить энергию и импульс в среднюю и верхнюю атмосферу, оказывая, таким образом, влияние на термодинамические процессы на всех высотах атмосферы. Измерение интенсивности свечений ночного неба и вращательной температуры является одним из спо-

совов мониторинга термодинамического режима и состава верхней атмосферы.

Распространяясь через слой ночной эмиссии верхней атмосферы, ВГВ модулируют температуру и интенсивность излучения [Шефов и др., 2006]. Когерентные волнообразные структуры были обнаружены в слоях излучения OH, Na, O и O₂ в интервале высот 80–100 км [Krassovski, 1972; Красовский и др., 1978; Гаврилов, Швед, 1982; Taylor et al., 1987]. В работе [Swenson, Mende, 1994] наблюдались квазимонохроматические ВГВ и процессы разрушения волн с последующим образованием вихревых структур в слое ночного свечения OH. В работах [Taylor, Hargood, 1990; Vadas et al., 2009] обнаружены волновые структуры с горизонтальными длинами волны 5–160 км в слое свечения OH. По наблюдениям в Шигараки, Япония, выявлены типичные параметры ВГВ в слое свечения OH: горизонтальные длины 5–60 км, периоды 5–30 мин, горизонтальные фазовые скорости 0–100 м/с [Nakamura et al., 1999].

В ряде работ исследовались долговременные изменения интенсивности ВГВ в верхней атмосфере. В работе [Gavrilov et al., 2002b] сделан статистический анализ средне- и крупномасштабных ВГВ с периодами 0.5–5 ч и длинами волны 100–1700 км в слоях излучения OH и O₂ с 1998 по 2001 г. Исследовалась также межгодовая и сезонная изменчивость температуры области мезопаузы по данным спектральных наблюдений гидроксильного излучения в Звенигороде и Иркутске в 2000–2010 гг. [Перминов и др., 2014]. В работах [Медведева и др., 2011; Перцев и др., 2013] изучена изменчивость характеристик области мезопаузы во время внезапных стратосферных потеплений. Исследования последних лет выявляют наличие многолетних изменений характеристик верхней атмосферы [Laštovička, 2017].

В работе [Гаврильева и др., 2009] анализировались изменения интенсивности ночной эмиссии и вращательной температуры OH под действием атмосферных приливов. Сомских и др. [2015] исследовали средние характеристики ВГВ в слое свечения OH в Алма-Ате за 2010–2015 гг. Они определили, что основной вклад в мезомасштабные вариации слоя свечения OH вносят ВГВ с горизонтальными длинами 100–900 км. Аналогичные значения горизонтальных длин ВГВ были получены ранее при анализе данных наблюдений эмиссий OH и O₂ с помощью прибора SATI (Spectral Airglow Temperature Imager) в Шигараки, Япония [Gavrilov et al., 2002b]. Исследование вариаций ночного свечения O₂ прибором MORTI в Алма-Ате дало даже большие горизонтальные длины ВГВ — до нескольких тысяч километров [Aushev et al., 2000].

В работе [Gavrilov et al., 2001] с использованием простых разностных фильтров проанализированы сезонные и межгодовые изменения интенсивности ВГВ на высотах 80–100 км по наблюдениям дрейфов метеорных следов и ионосферных неоднородностей. Этот метод оказался эффективным для анализа многолетних изменений интенсивности ВГВ в верхней атмосфере [Gavrilov et al., 1995, 2002a].

В данной работе метод цифровых разностных фильтров используется для анализа данных наблюдений ночного свечения и вращательной температуры гидроксила на высотах 85–90 км прибором SATI в Алма-Ате, Казахстан, в 2010–2017 гг. Исследуются сезонные и межгодовые изменения средней температуры и интенсивности вариаций в трех интервалах периодов, покрывающих диапазон 0.4–5.4 ч, которые могут быть связаны с распространением ВГВ в области мезопаузы.

1. ПРИБОР И МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ

Данные о ночном свечении гидроксила на высотах 85–90 км в 2010–2017 гг. были получены в Институте ионосферы в Алма-Ате, Республика Казахстан. Используется прибор SATI, установленный в предгорьях Тянь-Шаня. Измерения проводятся на высокогорном комплексе Института ионосферы (43°03' N, 76°58' E) на высоте 2730 м над уровнем моря. Прибор представляет собой спектрометр Фабри — Перо, в котором эталоном является узкополосный интерференционный фильтр, а детектором — ПЗС-камера. SATI измеряет вращательную температуру и интенсивность ночной эмиссии в полосе (6-2) гидроксила. Для ее выделения SATI использует интерференционный фильтр с полосой пропускания, центрированной на 836.813 нм [Lopez-Gonzalez et al., 2007]. Температура определяется путем сравнения измеренного спектра полос OH (6-2) с модельными спектрами, которые рассчитаны для различных колебательно-вращательных температур молекулы гидроксила. Время экспозиции составляет 1 мин. Использование SATI для исследования мезомасштабных вариаций, создаваемых ВГВ в нижней термосфере, подробно описано в [Wiens et al., 1997].

SATI измеряет интенсивность эмиссии и вращательную температуру OH на средней высоте 87 км в двенадцати точках небосвода вдоль кольца ночного неба диаметром около 100 км и шириной 14–16 км (см. рис. 1 в работе [Сомских и др., 2015]). При первичной обработке измеренные значения усреднялись по указанным двенадцати точкам небосвода и по временным интервалам длительностью Δt . Сравнение вращательной температуры OH, измеренной в Алма-Ате прибором SATI, со спутниковыми данными [Перцев и др., 2013] показало, что расхождения не превышают нескольких кельвинов.

Для оценки интенсивности мезомасштабных возмущений в области мезопаузы применен метод, описанный в [Gavrilov et al., 2001]. Использована численная фильтрация путем вычисления разностей между последовательными средними за интервал Δt значениями измеренной характеристики ночного свечения f :

$$f'_i = (f_{i+1} - f_i) / 2, \quad (1)$$

где i — номер интервала с серединой t_i . В работе [Gavrilov et al., 2001] показано, что такая разность среднечасовых значений эквивалентна численному частотному фильтру с функцией пропускания

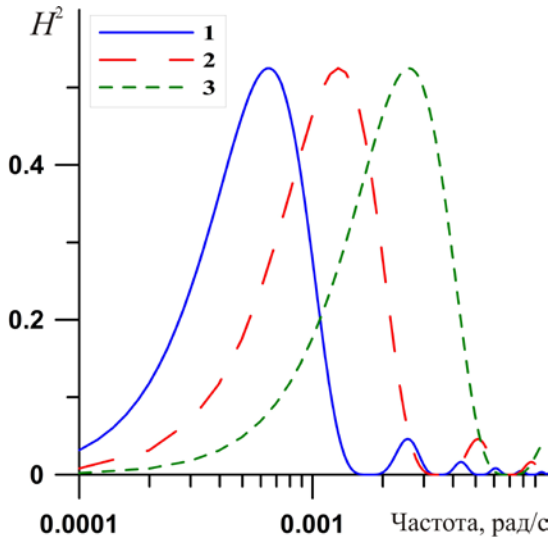


Рис. 1. Функции пропускания разностного фильтра (2) для Δt : 1 ч — 1, 0.5 ч — 2, 0.25 ч — 3

$$H^2 = \frac{\sin^4(\sigma\Delta t / 2)}{(\sigma\Delta t / 2)^4}, \quad (2)$$

где σ — частота, $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ — временной шаг последовательных интервалов. На рис. 1 приведены функции пропускания фильтра (2) для различных значений Δt .

Максимумы H^2 и границы полуширины функций пропускания, показанных на рис. 1, на уровне 0.5 от максимумов представлены в таблице.

Периоды τ_m , соответствующие максимумам H^2 и низкочастотной τ_0 и высокочастотной τ_h границам полосы пропускания на уровне 0.5 от максимумов функций пропускания, показанных на рис. 1

Δt , ч	τ_m , ч	τ_0 , ч	τ_h , ч
1	2.8	5.4	1.7
0.5	1.4	2.7	0.8
0.25	0.7	1.3	0.4

В частотной области полосы пропускания фильтров с $\Delta t = 0.25$ ч и 0.5 ч примерно в четыре и в два раза соответственно шире полосы пропускания более низкочастотного фильтра с $\Delta t = 1$ ч. Усреднение данных по кольцевой области светящегося слоя диаметром около 100 км, наблюдаемой SATI (см. выше), исключает из рассмотрения возмущения с горизонтальными масштабами менее 100 км.

Для повышения статистической надежности фильтрация (1) осуществлялась только по парам соседних интервалов, в каждом из которых регистрировалось не менее 67 % минутных значений температуры. Для исследования сезонных и межгодовых изменений были вычислены среднемесячные значения и относительные среднеквадратичные отклонения величин (1) для каждого календарного месяца наблюдений ночного свечения гидроксила.

2. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОН

Методом, описанным в разделе 1 были, обработаны данные наземных наблюдений интенсивности

ночного свечения полосы ОН (6-2) и вращательной температуры прибором SATI в Алма-Ате за период с мая 2010 г. по апрель 2017 г. Одной из причин мезомасштабных вариаций ночных свечений могут быть ВГВ, распространяющиеся в светящемся слое верхней атмосферы. Поляризационные соотношения теории атмосферных ВГВ [Госсард, Хук, 1978] позволяют получить следующие формулы для связи амплитуд волновых вариаций горизонтальной скорости U и потенциальной волновой энергии E_p с мезомасштабной дисперсией и средним значением температуры:

$$U = \frac{g}{N} \sqrt{\frac{T'^2}{T_0^2}}, \quad E_p = \frac{U^2}{2}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения, N — частота Брента—Вайсяля, T_0 — среднемесячная температура, $\overline{T'^2}$ — средний квадрат разностей температуры, полученных с использованием (1).

На рис. 2 представлены сезонные изменения среднемесячных значений и относительных дисперсий вращательной температуры ОН, а также параметров ВГВ (3), усредненные за 2010–2017 гг. Среднемесячные температуры вблизи мезопаузы (рис. 2, а) имеют максимум зимой и минимум летом,

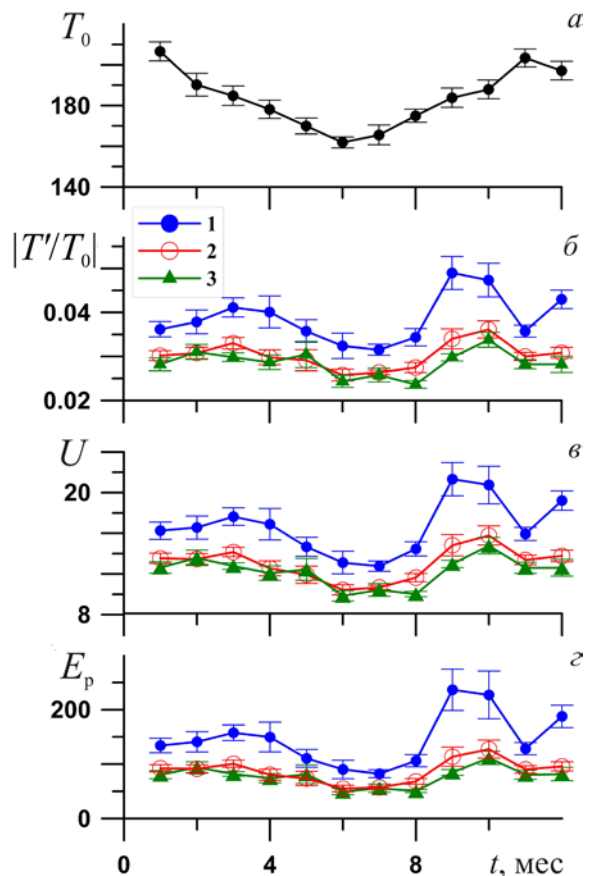


Рис. 2. Сезонные изменения: а — среднемесячной температуры, К; б — относительной дисперсии мезомасштабных вариаций температуры; в — амплитуды возмущений горизонтальной скорости, м/с; з — потенциальной волновой энергии, Дж/кг, усредненных за 2010–2017 гг. с применением разностного фильтра (2) с Δt : 1 ч — 1, 0.5 ч — 2, 0.25 ч — 3

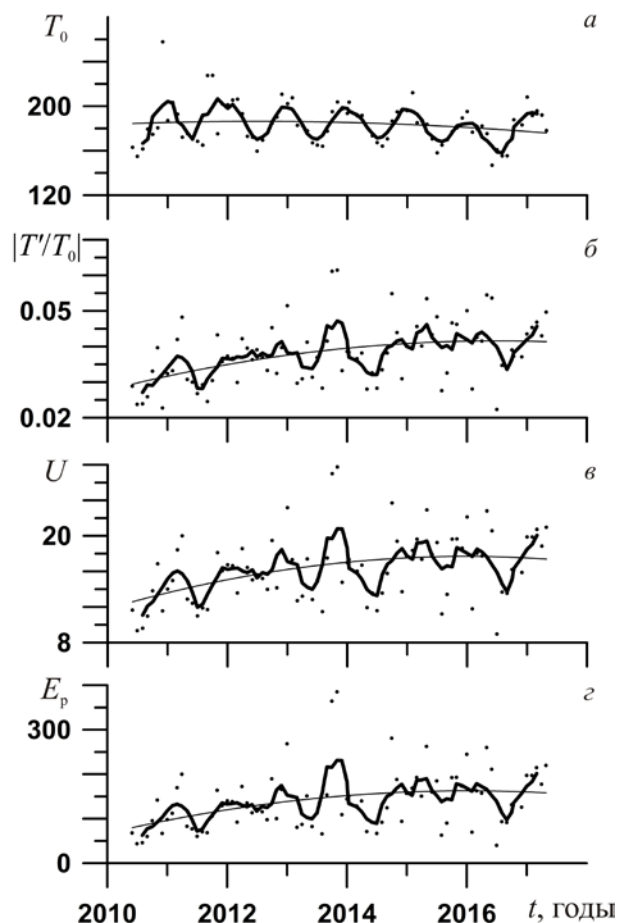


Рис. 3. Межгодовые изменения: *a* — среднемесячной температуры, К; *б* — относительной дисперсии мезомасштабных вариаций температуры; *в* — амплитуды возмущений горизонтальной скорости, м/с; *г* — потенциальной волновой энергии, Дж/кг, в диапазоне периодов $\tau \sim 1.7\text{--}5.4$ ч. Толстыми линиями показаны 4-месячные скользящие средние, тонкими линиями — квадратичные аппроксимации методом наименьших квадратов

в июне. Интенсивности мезомасштабных вариаций температуры (рис. 2, *б*) и характеристики ВГВ во всех частотных интервалах (рис. 2, *в, г*) имеют максимумы весной и осенью, а минимумы — зимой и летом для всех частотных диапазонов. Аналогичный сезонный ход интенсивностей ВГВ с главным максимумом осенью и меньшим максимумом весной был получен Гавриловым и Шведом [1982] при анализе волновых вариаций в слое ночного свечения ОI 557.7 нм в Ашхабаде. Весенний и осенний максимумы интенсивности ВГВ были выявлены также по радарным наблюдениям ветра на высотах 80–100 км в работе [Gavrilov et al., 2003] и по наблюдениям прибором SATI в Шигараки [Gavrilov et al., 2002b].

На рис. 3 показаны межгодовые изменения вращательной температуры ОН за период с 2010 по 2017 г. Тонкие линии соответствуют полиномиальным квадратичным аппроксимациям. Средняя температура вблизи мезопаузы на рис. 3, *а* демонстрирует периодические изменения в соответствии с сезонным ходом, приведенным на рис. 2, *а*. Ход регрессионной линии качественно согласуется с отрицательными трендами температуры на высотах 80–100 км,

определенными по спутниковым и наземным измерениям [Laštovička, 2017].

По наблюдениям на средних широтах величина отрицательного температурного тренда, который определяется после исключения влияния солнечной активности, на указанных высотах составляет порядка $-(0.2\pm 0.3)$ К в год [Перминов и др., 2014]. Аппроксимации температуры, представленные на рис. 3, *а*, имеют большие скорости изменения. Это может быть вызвано межгодовыми изменениями солнечной активности, которая имеет положительную корреляцию с вращательной температурой ОН [Перминов и др., 2014; Ammosov et al., 2014]. Впрочем, нельзя исключить также влияние изменений характеристик измерительного прибора со временем.

Относительные вариации интенсивности свечения и вращательной температуры ОН могут быть более устойчивы к медленным изменениям характеристик измерительного прибора. На рис. 3, *б–г* приведены межгодовые изменения характеристик мезомасштабных вариаций с периодами 1.7–5.4 ч. Эти изменения менее периодичны по сравнению с изменениями средней температуры на рис. 3, *а*. Это связано с более сложным сезонным ходом этих же характеристик на рис. 2, *б–г* и с его большей неустойчивостью в разные годы. Полиномиальные квадратичные аппроксимации на рис. 3, *б–г* показывают многочисленные изменения интенсивности мезомасштабных возмущений вблизи мезопаузы. Аналогичные изменения интенсивности ВГВ были получены по наблюдениям мезомасштабных вариаций скорости ветра в верхней атмосфере [Gavrilov et al., 2001, 2002a].

Значения $|T'/T_0|$ и E_p на рис. 2, 3 превышают оценки этих величин для ВГВ, полученные по данным наблюдений эмиссии ОН в Звенигороде и Торах [Перминов и др., 2014]. Возможно, это обусловлено иным способом частотной и пространственной фильтрации данных, что приводит к различиям исследуемых частей спектра ВГВ. Кроме того, в нашем исследовании не вводилась поправка на случайный шум, создаваемый приборными погрешностями измерений.

3. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ОН

На рис. 4, *б* приведен сезонный ход интенсивности I ночного свечения ОН, усредненный за 2010–2017 гг. Для сравнения на рис. 4, *а* повторен сезонный ход вращательной температуры ОН с рис. 2, *а*. Видно, что, в отличие от T_0 , средняя интенсивность свечения ОН I_0 , кроме зимнего максимума, имеет дополнительный максимум летом (рис. 4, *б*). Аналогичные различия сезонного хода I_0 и T_0 были получены для Алма-Аты и Звенигорода в работе [Shefov et al., 1969]. Различия в сезонных изменениях I_0 и T_0 могут быть связаны с изменениями циркуляции, которые могут влиять на газовый состав, скорость фотохимических реакций, отношение смеси ОН и высоту светящегося слоя.

Рисунок 4, *д* показывает сезонные изменения относительной мезомасштабной дисперсии интенсив-

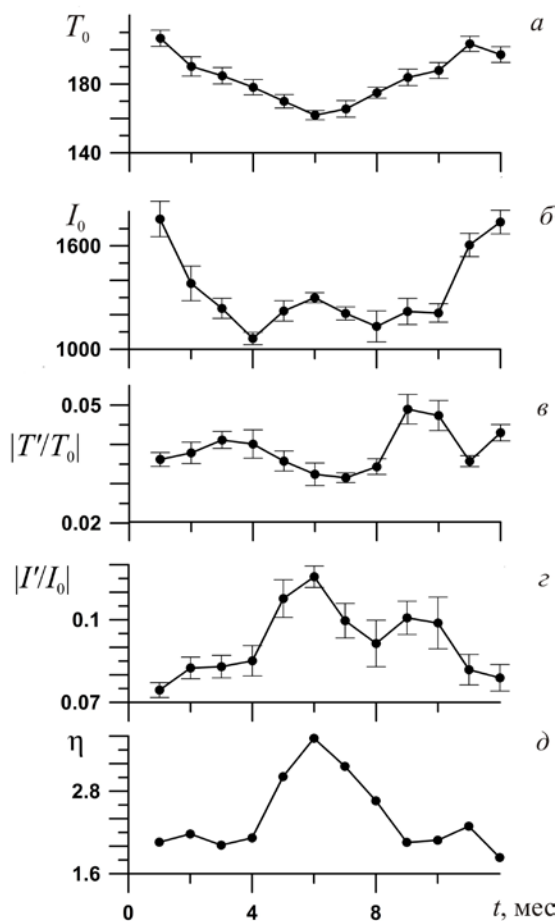


Рис. 4. Сезонные изменения, усредненные за 2010–2017 гг.: *a* — вращательной температуры, К; *б* — интенсивности свечения ОН, произвольные относительные единицы; *в, з* — относительных мезомасштабных дисперсий температуры и интенсивности соответственно; *д* — η для диапазона периодов $\tau \sim 1.7\text{--}5.4$ ч

ности свечения ОН $|I'/I_0|$. Сравнение этого графика с графиком $|T'/T_0|$ (рис. 4, *в*) обнаруживает смещение весеннего максимума $|I'/I_0|$ на июнь и его большую величину. При анализе мезомасштабных вариаций ночных свечений часто используется отношение

$$\eta = \left| I' / I_0 \right| / \left| T' / T_0 \right|. \quad (4)$$

Сезонные изменения η приведены на рис. 4, *д*. Главного максимума η достигает в июне, синхронно с летним максимумом I_0 (рис. 4, *б*). Гаврилов, Юдин [1982] получили аналитические выражения для η , используя простую фотохимическую модель свечения ОН и линейную теорию атмосферных ВГВ. Полученные теоретические оценки $\eta \sim 1.9\text{--}2.5$ соответствуют большинству значений на рис. 4, *д*.

Междугодовые изменения T_0 , I_0 , $|T'/T_0|$, $|I'/I_0|$ и η приведены на рис. 5. Тонкие линии показывают полиномиальные квадратичные аппроксимации методом наименьших квадратов. Видно, что детали междугодовых изменений для вращательной температуры и интенсивности свечения ОН могут различаться. Это может быть связано с сезонными и долговременными изменениями в сложной системе фотохимических процессов, приводящих к ночному свечению ОН. Например, для оценки сезонных и междугодовых изме-

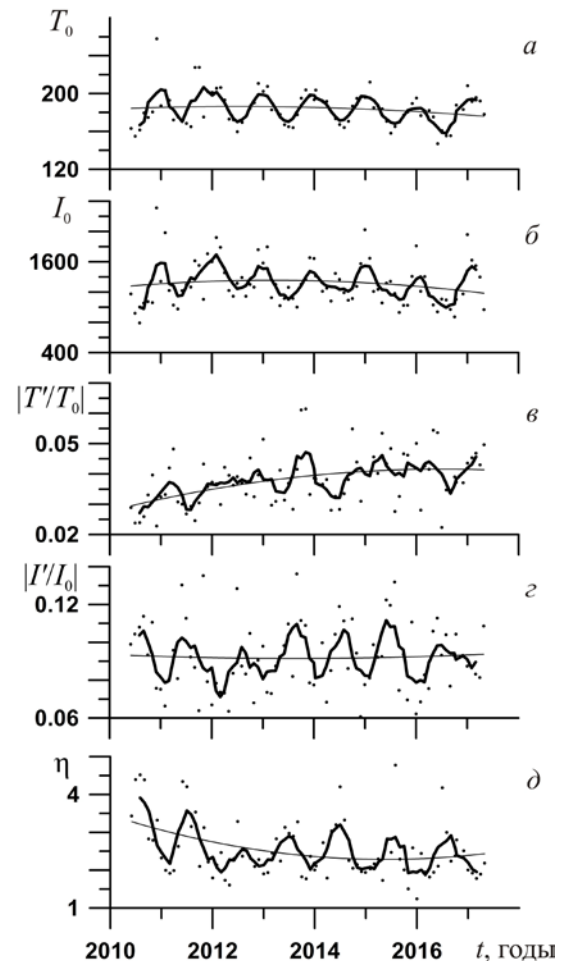


Рис. 5. Междугодовые изменения: *a* — среднемесячной вращательной температуры, К; *б* — интенсивности свечения ОН, произвольные относительные единицы; *в, з* — относительных мезомасштабных дисперсий температуры и интенсивности соответственно; *д* — η для диапазона периодов $\tau \sim 1.7\text{--}5.4$ ч. Толстыми линиями показаны 5-месячные скользящие средние, тонкими линиями — квадратичные аппроксимации методом наименьших квадратов

нений η согласно подходу Гаврилова и Юдина [1982] требуется знание вертикальных профилей О, О₃, Н, НО₂ и ОН на высотах 70–110 км и их изменений за несколько лет.

Кроме того, наблюдаемые многолетние изменения могут быть чувствительны к погрешностям измерений, которые могут различаться для разных приборов. Для определения влияния этих различий необходимо сравнение результатов, полученных предлагаемым методом фильтрации ВГВ на основе данных наблюдений эмиссии ОН разными приборами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод цифровых разностных фильтров (2) использовался при анализе данных наблюдений вращательной температуры и интенсивности ночного свечения гидроксила на высотах 85–90 км прибором SATI в Алма-Ате, Казахстан (43°03' N, 76°58' E), за 2010–2017 гг. Исследованы сезонные и междугодовые изменения средней температуры и интенсивности вариаций в диапазоне периодов 0.4–5.4 ч, которые могут быть связаны с распространением ВГВ

в области мезопаузы. Для выделения вариаций с часовыми периодами проведена численная фильтрация путем вычисления разностей между последовательными средними за интервалы Δt значениями характеристик ночного свечения ОН. Среднемесячные температуры вблизи мезопаузы (рис. 2, а) имеют максимум зимой и минимум летом, в июне. В отличие от среднемесячных температур, среднемесячные интенсивности, кроме зимнего максимума, имеют дополнительный максимум в июне. Дисперсия мезомасштабных вариаций вращательной температуры ОН и характеристики внутренних гравитационных волн (рис. 2, б–г) максимальны весной и осенью, а минимальны зимой и летом. Для мезомасштабных вариаций интенсивности свечения ОН (рис. 4, з) весенний максимум сдвинут на июнь. Детали межгодовых изменений вращательной температуры и интенсивности свечения ОН могут различаться. Это связано с сезонными и долговременными изменениями в сложной системе фотохимических процессов, приводящих к ночному свечению ОН.

Авторы благодарны Г.М. Шведу за полезные предложения. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-0458).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гаврилов Н.М., Швед Г.М. Исследование внутренних гравитационных волн в нижней термосфере по изофотам свечения ночного неба // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18, № 1. С. 8–17.

Гаврилов Н.М., Юдин В.А. О природе волновых вариаций ночного свечения гидроксидов в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 1982. Т. 22, № 3. С. 444–449.

Гаврилова Г.А., Аммосов П.П., Колтовской И.И. Полусуточный термический прилив в области мезопаузы над Якутией // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49, № 1. С. 117–122. DOI: [10.1134/S0016793209010150](https://doi.org/10.1134/S0016793209010150).

Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.

Красовский В.И., Потапов Б.П., Семенов А.И. и др. Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы. 1. Результаты исследований гидроксильной эмиссии // Полярные сияния и свечение ночного неба / Под ред. Ю.И. Гальперина. М.: Свеч. Радио, 1978. № 26. С. 5–29.

Медведева И.В., Белецкий А.Б., Перминов В.И. и др. Вариации температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы в периодах стратосферных потеплений по данным наземных и спутниковых измерений в различных долготных секторах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 127–135.

Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В. и др. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54, № 2. С. 246–256. DOI: [10.1134/S0016793214020157](https://doi.org/10.1134/S0016793214020157).

Перцев Н.Н., Андреев А.Б., Мерзляков Е.Г. и др. Мезосферно-термосферные проявления стратосферных потеплений: совместное использование спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 93–100.

Сомиков В.М., Андреев А.Б., Жумабаев Б.Т. Особенности сезонного поведения волновых возмущений мезосферы по данным SATI и по спутниковым наблюдениям // Изв. Нац.

акад. наук Респ. Казахстан. Сер. физико-математическая. 2015. Т. 4, № 302. С. 33–39.

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

Ammosov P., Gavrilova G., Ammosova A., Koltovskoi I. Response of the mesopause temperatures to solar activity over Yakutia in 1999–2013 // Adv. Space Res. 2014. V. 54. P. 2518–2524. DOI: [10.1016/j.asr.2014.06.007](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.007).

Aushev V.M., Pogoreltsev A.I., Vodyannikov V.V., et al. Results of the airglow and temperature observations by MORTI at the Almaty site (43.05 N, 76.97 E) // Physics and Chemistry of the Earth. (Part B). 2000. V. 25, N 5–6. P. 409–415. DOI: [10.1016/S1464-1909\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00035-6).

Gavrilov N.M., Manson A.H., Meek C.E. Climatological monthly characteristics of middle atmosphere gravity waves (10 min – 10 hr) during 1979–1993 at Saskatoon // Ann. Geophys. 1995. V. 13, N 1. P. 285–295. DOI: [10.1007/s00585-995-0285-7](https://doi.org/10.1007/s00585-995-0285-7).

Gavrilov N.M., Jacobi Ch., Kurschner D. Climatology of ionospheric drift perturbations at Collm, Germany // Adv. Space Res. 2001. V. 27, N 10. P. 1779–1784. DOI: [10.1016/S0273-1177\(01\)00339-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00339-8).

Gavrilov N.M., Fukao S., Nakamura T., et al. Comparative study of interannual changes of the mean winds and gravity wave activity in the middle atmosphere over Japan, Central Europe and Canada // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002a. V. 64, N 8–11. P. 1003–1010. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00055-X).

Gavrilov N.M., Shiokawa K., Ogawa T. Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from SATI observations at Shigaraki, Japan // J. Geophys. Res. 2002b. V. 107, N D24. 4755. DOI: [10.1029/2001JD001469](https://doi.org/10.1029/2001JD001469).

Gavrilov N.M., Riggan D.M., Fritts D.C. Medium-frequency radar studies of gravity-wave seasonal variations over Hawaii (22° N, 160° W) // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N D20. 4655. DOI: [10.1029/2002JD003131](https://doi.org/10.1029/2002JD003131).

Krassovski V.I. Infrasonic variations of OH emission in the upper atmosphere // Annales de Géophysique. 1972. V. 28. P. 739–746.

Laštovička J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2017. V. 163. P. 2–13. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.009).

Lopez-Gonzalez M.J., Rodriguez E., Wiens R.H., et al. Seasonal variations of O₂ atmospheric and OH (6-2) airglow and temperature at midlatitudes from SATI observations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69, N 17–18. P. 2379–2390. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.07.004).

Nakamura T., Higashikawa A., Tsuda T., et al. Seasonal variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki // Earth, Planets and Space. 1999. V. 51. P. 897–906. DOI: [10.1186/BF03353248](https://doi.org/10.1186/BF03353248).

Shefov N.N. Hydroxyl emission of the upper atmosphere — I // Planet. Space Sci. 1969. V. 17. P. 797–813. DOI: [10.1016/0032-0633\(69\)90089-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90089-0).

Swenson G.R., Mende S.B. OH emission and gravity waves (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake, UT // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 20. P. 2239–2242.

Taylor M.J., Hapgood M.A. On the origin of ripple-type wave structure in the OH nightglow emission // Planet. Space Sci. 1990. V. 38, N 11. P. 1421–1430. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90117-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90117-9).

Taylor M.J., Hapgood M.A., Rothwell P. Observations of gravity wave propagation in the OH (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions // Planet. Space Sci. 1987. V. 35, N 4. P. 413–427. DOI: [10.1016/0032-0633\(87\)90098-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90098-5).

Vadas S.L., Taylor M.J., Pautet P.-D., et al. Convection: the likely source of the medium-scale gravity waves observed in the OH airglow layer near Brasília, Brazil, during the SpreadFEx campaign // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 231–259. DOI: [10.5194/angeo-27-231-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-231-2009).

Wiens R.H., Moise A., Brown S., et al. SATI: A spectral airglow temperature imager // *Adv. Space Res.* 1997. V. 19. P. 677–680. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00162-2).

REFERENCES

- Ammosov P., Gavriilyeva G., Ammosova A., Koltovskoi I. Response of the mesopause temperatures to solar activity over Yakutia in 1999–2013. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, pp. 2518–2524. DOI: [10.1016/j.asr.2014.06.007](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.007).
- Aushev V.M., Pogoreltsev A.I., Vodyannikov V.V., Wiens R.H., Shepherd G.G. Results of the airglow and temperature observations by MORTI at the Almaty site (43.05 N, 76.97 E). *Physics and Chemistry of the Earth. (Part B)*. 2000, vol. 25, no. 5–6, pp. 409–415. DOI: [10.1016/S1464-1909\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00035-6).
- Gavrilov N.M., Shved G.M. A study of internal gravity waves in the lower thermosphere based on skyglow isophots. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics]. 1982, vol. 18, no. 1, pp. 5–12.
- Gavrilov N.M., Yudin V.A. On the origin of wave variations of hydroxyl night airglow in the upper atmosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1982, vol. 22, no. 3, pp. 444–449. (In Russian).
- Gavrilov N.M., Manson A.H., Meek C.E. Climatological monthly characteristics of middle atmosphere gravity waves (10 min – 10 hr) during 1979–1993 at Saskatoon. *Ann. Geophys.* 1995, vol. 13, no. 1, pp. 285–295. DOI: [10.1007/s00585-995-0285-7](https://doi.org/10.1007/s00585-995-0285-7).
- Gavrilov N.M., Jacobi Ch., Kurschner D. Climatology of ionospheric drift perturbations at Collm, Germany. *Adv. Space Res.* 2001, vol. 27, no. 10, pp. 1779–1784. DOI: [10.1016/S0273-1177\(01\)00339-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00339-8).
- Gavrilov N.M., Fukao S., Nakamura T., Jacobi C., Kurschner D., Manson A. H., Meek C.E. Comparative study of interannual changes of the mean winds and gravity wave activity in the middle atmosphere over Japan, Central Europe and Canada. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002a, vol. 64, no. 8–11, pp. 1003–1010. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00055-X).
- Gavrilov N.M., Shiokawa K., Ogawa T. Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from SATI observations at Shigaraki, Japan. *J. Geophys. Res.* 2002b, vol. 107, no. D24, 4755. DOI: [10.1029/2001JD001469](https://doi.org/10.1029/2001JD001469).
- Gavrilov N.M., Riggin D.M., Fritts D.C. Medium-frequency radar studies of gravity-wave seasonal variations over Hawaii (22° N, 160° W). *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. D20, 4655. DOI: [10.1029/2002JD003131](https://doi.org/10.1029/2002JD003131).
- Gavriilyeva G.A., Ammosov P.P., Koltovskoi I.I. Semidiurnal thermal tide in the mesopause region over Yakutia. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009, vol. 49, no. 1, pp. 110–114. DOI: [10.1134/S0016793209010150](https://doi.org/10.1134/S0016793209010150).
- Gossard E.E., Hooke W.H. *Volny v atmosfere* [Waves in the atmosphere]. Moscow, Mir Publ., 1978, 532 p. (In Russian). English edition: Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the atmosphere*. New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975, 456 p.
- Krassovski V.I. Infrasonic variations of OH emission in the upper atmosphere. *Annales de Géophysique*. 1972, vol. 28, pp. 739–746.
- Krasovsky V.I., Potapov B.P., Semenov A.I., Sobolev V.G., Shagayev M.M., Shefov N.N. Internal gravity waves near the mesopause. 1. Results of investigation of the hydroxyl emission. *Polyarnye siyaniya i svechenie nochnogo neba* [Aurora and Nightglow]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1978, no. 26, pp. 5–29. (In Russian).
- Laštovička J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 163, pp. 2–13. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.009).
- Lopez-Gonzalez M.J., Rodriguez E., Wiens R.H., Shepherd G.G., Sargoytchev S., Brown S., Shepherd M.G., Aushev V.M., López-Moreno J.J., Rodrigo R., Cho Y.-M. Seasonal variations of O₂ atmospheric and OH (6-2) airglow and temperature at midlatitudes from SATI observations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, no. 17–18, pp. 2379–2390. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.07.004).
- Medvedeva I.V., Beletsky A.B., Perminov V.I., Semenov A.I., Shefov N.N. Atmosphere temperature variations in the mesopause and lower thermosphere during stratospheric warmings from data of ground-based and satellite measurements in different longitudinal sectors. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2011, vol. 8, no. 4, pp. 127–135. (In Russian).
- Nakamura T., Higashikawa A., Tsuda T., Matsushita Y. Seasonal variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki. *Earth, Planets, Space*. 1999, vol. 51, pp. 897–906. DOI: [10.1186/BF03353248](https://doi.org/10.1186/BF03353248).
- Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Pertsev N.N. Temperature variations in the mesopause region according to the hydroxyl-emission observations at midlatitudes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014, vol. 54, no. 2, pp. 230–239. DOI: [10.1134/S0016793214020157](https://doi.org/10.1134/S0016793214020157).
- Pertsev N.N., Andreyev A.B., Merzlyakov E.G., Perminov V.I. Mesosphere-thermosphere manifestations of stratospheric warmings: joint use of satellite and ground-based measurements. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2013, vol. 10, no. 1, pp. 93–100. (In Russian).
- Shefov N.N. Hydroxyl emission of the upper atmosphere — I. *Planet. Space Sci.* 1969, vol. 17, pp. 797–813. DOI: [10.1016/0032-0633\(69\)90089-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90089-0).
- Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Yu. Emission of the upper atmosphere as an indicator of its structure and dynamics. Moscow, GEOS Publ., 2006, 741 p. (In Russian).
- Somsikov V.M., Andreyev A.B., Zhumabayev B.T. Peculiarities of seasonal behavior of wave disturbances in the mesosphere according to SATI and satellite observations. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [News of NAS RK. Physico-Mathematical Series]. 2015, vol. 4, no. 302, pp. 33–39. (In Russian).
- Swenson G.R., Mende S.B. OH emission and gravity waves (including a breaking wave) in all-sky imagery from Bear Lake, UT. *Geophys. Res. Lett.* 1994, vol. 21, no. 20, pp. 2239–2242.
- Taylor M.J., Hapgood M.A. On the origin of ripple-type wave structure in the OH nightglow emission. *Planet. Space Sci.* 1990, vol. 38, no. 11, pp. 1421–1430. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90117-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90117-9).
- Taylor M.J., Hapgood M.A., Rothwell P. Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions. *Planet. Space Sci.* 1987, vol. 35, no. 4, pp. 413–427. DOI: [10.1016/0032-0633\(87\)90098-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90098-5).
- Vadas S.L., Taylor M.J., Pautet P.-D., Stamus P.A., Fritts D.C., Liu H.-L., Sao Sabbas F.T., Rampinelli V.T., Batista P., Takahashi H. Convection: the likely source of the medium-scale gravity waves observed in the OH airglow layer near Brasilia, Brazil, during the SpreadFEx campaign. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 231–259. DOI: [10.5194/angeo-27-231-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-231-2009).
- Wiens R.H., Moise A., Brown S., Sargoytchev S., Peterson R.N., Shepherd G.G., Lopez-Gonzalez M.J., Lopez-Moreno J.J., Rodrigo R. SATI: A spectral airglow temperature imager. *Adv. Space Res.* 1997, vol. 19, pp. 677–680. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00162-2).

Как цитировать эту статью

Попов А.А., Гаврилов Н.М., Андреев А.Б., Погорельцев А.И. Междугодовые изменения интенсивности мезомасштабных вариаций ночного свечения гидроксидов в Алма-Ате. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 102–108. DOI: [10.12737/szf-42201810](https://doi.org/10.12737/szf-42201810).