

УДК 551.511.3

СТАТИСТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ДИСПЕРСИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НОЧНОЙ ЭМИССИИ ГИДРОКСИЛА В ЗВЕНИГОРОДЕ

© 2022 г. А. А. Попов¹, *, Н. М. Гаврилов¹, **,
В. И. Перминов², ***, Н. Н. Перцев², ****

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: Andrew.popovix@gmail.com

**e-mail: n.gavrilov@spbu.ru

***e-mail: v.i.perminov@rambler.ru

****e-mail: n.pertsev@bk.ru

Поступила в редакцию 13.08.2021 г.

После доработки 18.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Когерентные во времени мезомасштабные возмущения вращательной температуры возбужденного гидроксила (ОН*) часто используются как индикатор волновых процессов в мезосфере и нижней термосфере. Для определения мезомасштабной составляющей с периодами в диапазоне 0.8–11 ч в данном исследовании применяются цифровые фильтры, использующие разности измеряемых значений, сдвинутых по времени на фиксированные интервалы, меняющиеся в пределах от 10 мин до 2 ч. Среднемесячная интенсивность мезомасштабных вариаций пропорциональна дисперсии указанных разностей, регистрируемых в течение каждого календарного месяца измерений. Эти дисперсии содержат не только информацию о когерентных мезомасштабных процессах, но также некогерентный во времени шум инструментальной и турбулентной природы. Разработан и применен статистический метод анализа структурных функций анализируемых характеристик ночных свечений для оценки дисперсии некогерентного случайного шума. Эти оценки вычитаются из измеряемой среднемесячной дисперсии мезомасштабных разностей в целях получения информации об интенсивности когерентных мезомасштабных процессов вблизи мезопаузы. Вычитание дисперсии некогерентного шума не меняет характера сезонных вариаций во всех спектральных интервалах, но уменьшает значения мезомасштабных стандартных отклонений на 10–20%. Предлагаемая коррекция позволяет лучше выявить особенности сезонных и межгодовых изменений когерентных мезомасштабных возмущений в различных диапазонах частотного спектра.

DOI: 10.31857/S0016794022010151

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный интерес имеют исследования мезомасштабных волн в средней и верхней атмосфере. Их основные источники находятся в нижних слоях атмосферы. При распространении вверх волны способны создавать значительные потоки энергии и импульса в среднюю и верхнюю атмосферу и, тем самым, влиять на термодинамические процессы на всех высотах атмосферы. Измерение когерентных во времени мезомасштабных возмущений характеристик свечений ночного неба является одним из способов мониторинга волновой возмущенности верхней атмосферы.

В слоях ночных эмиссий верхней атмосферы волны могут модулировать температуру и яркость излучения [Шефов и др., 2006]. Когерентные вол-

нообразные структуры были обнаружены при наблюдениях эмиссий ОН, Na, O и O₂ в интервале высоты 80–100 км [например, Krassovski, 1972; Красовский и др., 1978; Taylor et al., 1987]. В работе [Swenson and Mende, 1994] сообщалось о квази-монокроматических волновых структурах и были обнаружены процессы разрушения волн с последующим образованием вихревых структур в слое ночного свечения ОН. Исследования [Taylor and Hargood, 1990; Vadas et al., 2009] в слое свечения ОН обнаружили волновые структуры с горизонтальными длинами волны 5–160 км. Исследование в Японии [Nakamura et al., 1999] выявили типичные параметры мезомасштабных волн в свечении ОН: горизонтальные длины 5–60 км, периоды 5–

30 мин, горизонтальные фазовые скорости 0–100 м/с.

В ряде работ исследовались долговременные изменения интенсивности мезомасштабных волн в верхней атмосфере. В исследовании [Gavrilov et al., 2002b] сделан статистический анализ средних и крупномасштабных волновых структур с периодами 0.5–5 ч и длинами волны 100–1700 км в слоях излучения OH и O₂ с 1998 по 2001 гг. Исследовалась междугодовая и сезонная изменчивость температуры области мезопаузы по данным спектральных наблюдений гидроксильного излучения в Звенигороде и Иркутске в 2000–2010 гг. [Перминов и др., 2014]. Медведева и др. [2011] и Перцев и др. [2013] изучали изменчивость характеристик области мезопаузы во время внезапных стратосферных потеплений. Исследования последних лет [Lastovichka, 2017] выявили наличие многолетних изменений характеристик верхней атмосферы.

Гаврильева и др. [2009] проанализировали изменения интенсивности и вращательной температуры ночной эмиссии OH под действием атмосферных приливов. В работе [Somsikov et al., 2015] исследовались средние характеристики волн в слое свечения OH в Алма-Ате за 2010–2015 гг. Было определено, что основной вклад в мезомасштабные вариации слоя свечения OH вносят волны с горизонтальными длинами 100–900 км. Аналогичные значения горизонтальных длин волн были получены при анализе данных наблюдений эмиссий OH и O₂ с помощью прибора SATI в Шигараки, Япония [Gavrilov et al., 2002b].

В работе [Gavrilov et al., 2002a] были применены простые разностные фильтры и проанализированы сезонные и межгодовые изменения интенсивности мезомасштабных возмущений с периодами 0.8–11 ч на высотах 80–100 км по наблюдениям дрейфов метеорных следов и ионосферных неоднородностей. Этот метод оказался эффективным для анализа многолетних изменений интенсивности мезомасштабных волн в верхней атмосфере [Gavrilov et al., 2002a]. Указанным методом были изучены сезонные и межгодовые изменения интенсивности мезомасштабных возмущений вращательной температуры гидроксила, наблюдаемые на российских станциях [Gavrilov et al., 2020; Попов et al., 2020]. Такой метод фильтрации мезомасштабных возмущений имеет преимущества при анализе результатов наблюдений ночных свечений, поскольку он обеспечивает стабильность функции пропускания фильтра в условиях коротких летних ночей и значительных перерывов в измерениях, а также позволяет получить среднемесячные дисперсии мезомасштабных возмущений характеристик свечений с различными временными масштабами (периодами

спектральных гармоник) в области от десятков минут до нескольких часов.

Однако, дисперсии мезомасштабных возмущений характеристик ночных эмиссий, полученных методом цифровой частотной фильтрации, кроме когерентной во времени составляющей, содержат вклад случайного некоррелированного шума инструментальной и атмосферной природы. Для коррекции этого шума в данной статье, предложен метод анализа статистических свойств структурных функций характеристик ночных свечений, который позволяет оценить дисперсии некоррелированного шума. Вычитанием последних из указанных выше экспериментальных дисперсий мезомасштабных возмущений достигается коррекция с целью получения информации об интенсивности когерентных во времени мезомасштабных возмущений, одной из причин которых могут быть внутренние гравитационные волны (ВГВ), распространяющиеся в области мезосферы и нижней термосферы (МНТ). Полученные дисперсии некогерентного шума сравниваются с дисперсиями, обусловленными флуктуациями темного тока спектрографа, которые известны для наблюдений в Звенигороде.

2. ДАННЫЕ И ИХ ФИЛЬТРАЦИЯ

Для оценок в настоящей работе использованы данные измерений вращательной температуры гидроксила на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы РАН (56° N, 37° E), полученные с помощью спектрографа SP-50 с цифровой записью спектра в области 800–1000 нм [Шефов и др., 2006]. Поле зрения спектральной аппаратуры составляет 9° с зенитным углом наклона центральной оси прибора 53° в северном направлении. Измерения проводятся в безоблачные ночи. Для получения необходимого отношения сигнал/шум, время накопления для одной регистрации спектра составляет 10 мин. Вращательная температура определяется на основе распределения населенности на первых трех вращательных уровнях молекулы OH*. Более детальное описание процедуры определения вращательной температуры гидроксила с использованием полосы OH (6–2) можно найти в работе [Перминов и др., 2014].

Для выделения мезомасштабных вариаций характеристик ночных свечений применен метод разностной цифровой частотной фильтрации [Попов et al., 2018, 2020]. В качестве исходных данных берутся регистрации характеристик гидроксила излучения \bar{f}_i в моменты времени t_i , которые усредняются прибором за время накопления δt . Функция $f(t)$ может быть представлена в виде разложения в ряд Фурье по гармоникам $f_\sigma \sim F \cos(\omega t + \psi)$ с различными амплитудами F , ча-

стотами ω и фазами ψ . Приборное усреднение по интервалам δt приводит к уменьшению регистрируемых амплитуд фурье-гармоник до значений $\bar{F} = Fr_1$, где $r_1 = \sin(\beta)/\beta$ и $\beta = \omega\delta t/2$. Для оценки мезомасштабных вариаций используется численная фильтрация путем определения разностей между регистрируемыми значениями \bar{f}_i , отстоящими на временные интервалы Δt :

$$f'_i(\Delta t) = [\bar{f}(t_i + \Delta t) - \bar{f}(t_i)]/2. \quad (1)$$

Вычисление таких разностей приводит к дальнейшему уменьшению амплитуд фурье-гармоник, причем $F' = \bar{F}r_2$, где $r_2 = \sin(\alpha)$ и $\alpha = \omega\Delta t/2$. Поэтому разности (1) эквивалентны цифровому фильтру с функцией пропускания мощности (пропорциональной F'^2/F^2), которая в терминах периода $\tau = 2\pi/\omega$ описывается выражением

$$H^2(\tau) = (r_1 r_2)^2 = \frac{\sin^2(\pi\Delta t/\tau) \sin^2(\pi\delta t/\tau)}{(\pi\Delta t/\tau)^2}. \quad (2)$$

Для спектроскопических наблюдений ночных эмиссий верхней атмосферы в Звенигороде с $\delta t \sim 10$ мин зависимости $H^2(\tau)$ аналогичны рис. 1 из работы [Роров et al., 2020]. При $\Delta t = 0.5$ ч, $\Delta t = 1$ ч и $\Delta t = 2$ ч максимумы функции пропускания (2) соответствуют периодам возмущений $\tau_m \approx 1.3$ ч, $\tau_m \approx 2.7$ ч и $\tau_m \approx 5.4$ ч. С учетом полосы пропускания указанных фильтров на уровне 0.5 от максимума [Роров et al., 2020], совокупность этих трех фильтров позволяет исследовать спектральный диапазон периодов от 40 мин до 11 ч. Преимущество разностных фильтров (1) состоит в их применимости к измерениям эмиссий верхней атмосферы в короткие летние ночи (с минимальной длительностью Δt) и при наличии длительных перерывов в измерениях. Значения разностей (1), полученных в течение каждого календарного месяца измерений позволяют вычислить дисперсии

$$d_f^2(\Delta t) = \langle f'^2(\Delta t) \rangle, \quad (3)$$

где угловые скобки $\langle \rangle$ обозначают осреднение по времени. Дисперсии (3) характеризуют интенсивность мезомасштабной изменчивости параметра f в соответствующем частотном диапазоне. По современным представлениям, значительный вклад в мезомасштабную изменчивость области МНТ могут вносить ВГВ. Поэтому дисперсии d_f^2 могут дать информацию об интенсивности этих мезомасштабных волн.

3. ФЛУКТУАЦИИ ТЕМНОВОГО ТОКА

Кроме атмосферных процессов, вклад в дисперсию (3) разностей (1) могут вносить случайные вариации темнового тока регистрирующего

элемента спектрального измерительного прибора. Флуктуации темнового тока могут быть определены путем записей показаний прибора при закрытой входной щели. Для измерений вращательной температуры гидроксила T на Звенигородской научной станции ИФА РАН при времени накопления сигнала $\delta t \sim 5$ – 10 мин указанным способом получена следующая эмпирическая зависимость стандартного отклонения темнового тока d_{dc} :

$$d_{dc} = A_0 + A_1 T + A_2 T^2 + (B_0 + B_1 T + B_2 T^2)/I, \quad (4)$$

где I – интенсивность свечения гидроксила, а постоянные коэффициенты $A_0 = -0.08$ К, $A_1 = 1.0 \times 10^{-3}$, $A_2 = -3.4 \times 10^{-6}$ К $^{-1}$, $B_0 = 1.6 \times 10^3$ R К, $B_1 = -20$ R, $B_2 = 0.09$ R К $^{-1}$. Рис. 1 показывает сезонные изменения d_{dc} , рассчитанные по формуле (4) для каждого месяца и осредненные за период измерений эмиссии ОН в Звенигороде с 2004 г. по 2017 г. Видны меньшие значения d_{dc} летом, что можно объяснить минимальными значениями температуры и максимальными интенсивностями эмиссии ОН летом, например, [Gavrilov et al., 2020, Popov et al., 2020]. Теория распространения ошибок [Barlow, 1993] показывает, что при осреднении по n значениям, зарегистрированным в течение календарного месяца, вклад вариаций темнового тока в дисперсию средней температуры составляет d_{dc}^2/n . Соответствующий вклад в дисперсию разностей (3) равен $d_{dc}^2/2n$.

4. НЕКОГЕРЕНТНЫЙ ШУМ

Эмпирические формулы типа (4) определены не для всех станций мировой сети наблюдений ночных свечений, а также отсутствуют для исторических данных. Поэтому, существует потребность в других методах оценки погрешностей, связанных с некоррелированным во времени случайным шумом. В этом разделе описан статистический метод, разработанный для оценки вклада некоррелированного шума в измеряемую дисперсию (3) мезомасштабных разностей (1).

Кроме вариаций темнового тока, вклад в дисперсию мезомасштабных возмущений (3) могут дать атмосферные вариации с временными масштабами меньшими, чем время приборного накопления сигнала δt (мелкомасштабная турбулентность и высокочастотные акустико-гравитационные волны). В области масштабов $\Delta t > 10$ мин эти флуктуации выглядят как некоррелированный во времени случайный шум, который далее мы будем именовать “некогерентным шумом” $s(t)$. Поэтому, регистрируемый сигнал $f(t)$ можно записать в виде суммы когерентного во времени атмосферного мезомасштабного процесса $S(t)$ и указанного некогерентного шума:

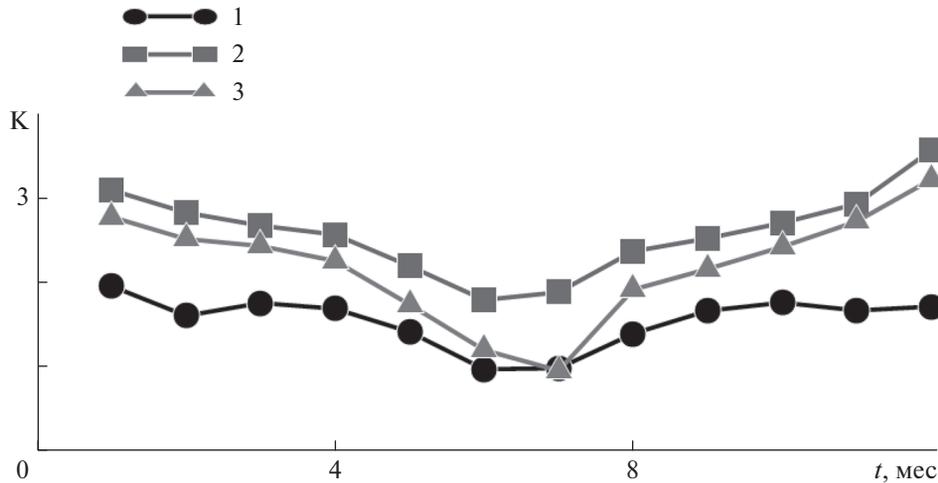


Рис. 1. Стандартные отклонения регистрируемой вращательной температуры ОН, вызванные флуктуациями темнового тока d_{dc} (4) – 1 и некогерентным шумом $\sqrt{2a_0}$ при определении по формуле (9) – 2 и методом наименьших квадратов (8) – 3 для измерений в Звенигороде.

$$\bar{f}(t) = S(t) + s(t). \tag{5}$$

При статистической независимости функций $S(t)$ и $s(t)$ автокорреляционная функция $B(0)$ при нулевом временном сдвиге описывается выражением

$$B(0) = \langle \bar{f}^2 \rangle = \langle S^2 \rangle + \langle s^2 \rangle. \tag{6}$$

Для нахождения величины $\langle s^2 \rangle$ необходимо определить дисперсию некогерентного шума $\langle s^2 \rangle$, которую надо вычесть из измеренного значения $B(0)$. Это можно сделать путем анализа структурной функции $D_f(\Delta t)$, которая с учетом (5) для статистически стационарного процесса и некоррелированного во времени шума записывается в виде

$$\begin{aligned} D_f(\Delta t) &= \langle [\bar{f}(t + \Delta t) - \bar{f}(t)]^2 \rangle = \\ &= 2 \langle S^2 - S(t + \Delta t)S(t) + s^2 \rangle. \end{aligned} \tag{7}$$

Отсюда следует, что с учетом (3) дисперсия некогерентной составляющей $\langle s^2 \rangle = D_f(0)/2 = 2d_f^2(0)$. При малых значениях Δt справедливо разложение в ряд Тейлора

$$d_f^2(\Delta t) = D_f(\Delta t)/4 = a_0^2 + a_1\Delta t + O(\Delta t^2), \tag{8}$$

где a_0 и a_1 – постоянные коэффициенты, причем $\langle s^2 \rangle = 2a_0^2$. Для измерений в Звенигороде при оценках по (8) использованы дисперсии разностей (3), полученных при смещениях Δt равных 10, 20 и 30 мин. Рис. 2 демонстрирует пример аппроксимации месячных дисперсий вращательной температуры $d_f^2(\Delta t)$ линейной зависимостью (8) с помощью метода наименьших квадратов. Видно, что прямая линия на рис. 2 пересекает ось ор-

динат в точке, соответствующей положительному значению a_0^2 . Это значение может быть использовано для оценки дисперсии некогерентной составляющей $\langle s^2 \rangle$ (см. выше). Когда измерены только два значения $d_f(\Delta t)$ и $d_f(2\Delta t)$, например для смещений $\Delta t = 10$ мин и $2\Delta t = 20$ мин, значение a_0^2 в (8) можно вычислить по формуле

$$a_0^2 = \langle s^2 \rangle / 2 = 2d_f^2(\Delta t) - d_f^2(2\Delta t). \tag{9}$$

На рисунке 1 показаны сезонные изменения стандартного отклонения некогерентного шума вращательной температуры ОН $\sqrt{2a_0}$, определенные методом наименьших квадратов (8) и по фор-

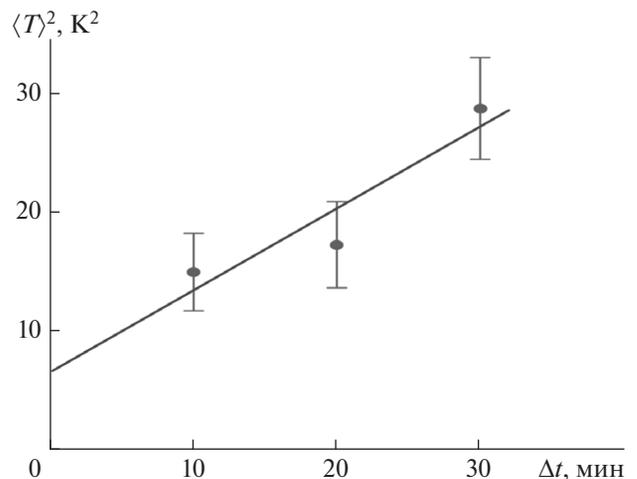


Рис. 2. Пример линейной аппроксимации структурной функции вращательной температуры ОН (8) для марта месяца в Звенигороде.

муле (9). Видно, что формула (9) дает значения a_0 систематически завышенные на $\sim 0.3\text{--}1$ К, причем характер сезонных измерений на рис. 1 сходен для обоих методов оценки. Рисунок 1 также показывает, что обычно стандартные отклонения некогерентного шума превосходят стандартные отклонения вариаций темного тока (4) из-за вклада атмосферной составляющей.

На рисунке 3 представлена гистограмма месячных значений a_0 , определяемых методом наименьших квадратов (8) для различных месяцев интервала наблюдений с 2004 г. по 2017 г. Видно, что большая часть значений находится в диапазоне $a_0 \sim 1\text{--}2$ К. Изменения a_0 связаны с изменениями параметров атмосферы (в частности, средней температуры). Рисунок 4 показывает положительную регрессионную зависимость a_0 от среднемесячных значений вращательной температуры гидроксила в слое ночного свечения ОН на средней высоте ~ 87 км.

4. КОРРЕКЦИЯ СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

В работах [Gavrilov et al., 2020; Popov et al., 2020] рассматривались сезонные и межгодовые изменения месячных дисперсий мезомасштабных возмущений вращательной температуры гидроксила в Звенигороде. Как указано выше, часть этих возмущений может быть обусловлена некогерентным шумом, связанным с флуктуациями темного тока и мелкомасштабными атмосферными процессами. Для получения более точной информации о когерентных мезомасштабных процессах требуется коррекция дисперсий (3) разностей (1) наблюдаемых значений вращательной температуры гидроксила. Коррекция делается путем вычитания значений a_0^2 , определяемых методом наименьших квадратов (8) или по формуле (9) из значений $d_T^2(\Delta t)$ в (3).

На рисунке 5 показаны осредненные за 2004–2017 гг. сезонные вариации среднемесячной вращательной температуры гидроксила T_0 и относительных стандартных отклонений d_T/T_0 ее мезомасштабных возмущений (3) в различных участках частотного спектра, которые были рассчитаны по наблюдаемым значениям (левые графики рис. 5) и после вычитания дисперсий некогерентного шума (правые графики рис. 5), определенных методом наименьших квадратов (8). Сравнение левых и правых графиков на рис. 5 показывает, что вычитание некогерентного шума не меняет характера сезонных вариаций во всех частотных интервалах, но уменьшает значения стандартных отклонений когерентных мезомасштабных возмущений на 10–20%. Относительный вклад некогерентного шума уменьшается с ростом времен-

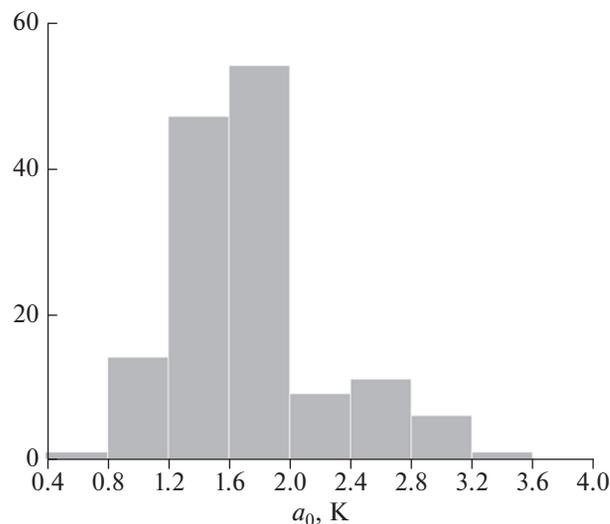


Рис. 3. Гистограмма месячных стандартных отклонений некогерентного шума a_0 разностей температуры (1), определяемых методом наименьших квадратов (8) для измерений эмиссии ОН в Звенигороде в 2004–2017 гг.

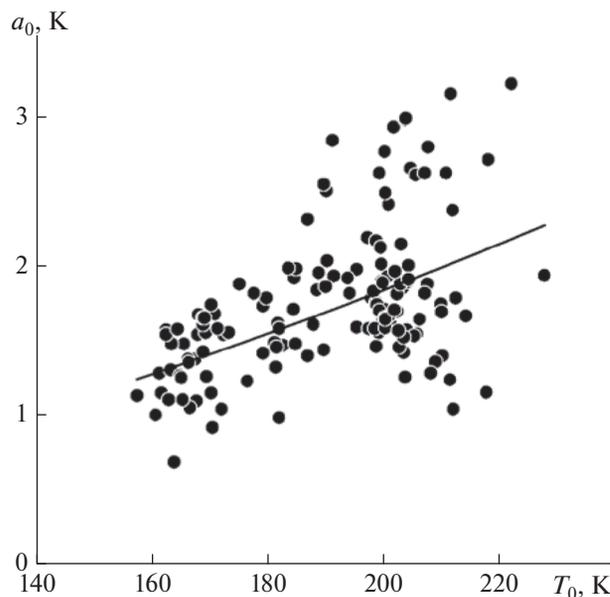


Рис. 4. Зависимость месячных стандартных отклонений некогерентного шума a_0 от среднемесячной вращательной температуры ОН для Звенигорода. Линия показывает квадратичную полиномиальную аппроксимацию.

ных масштабов анализируемых возмущений при увеличении временного смещения Δt в (1).

На рисунке 6 показаны изменения абсолютных d_T и относительных d_T/T_0 стандартных месячных отклонений (3) разностей (1) с $\Delta t = 2$ ч, полученных по данным измерений (левые графики) и после исключения некогерентного шума (правые графики). Видно, что исключение некогерентного шума уменьшает значения стандарт-

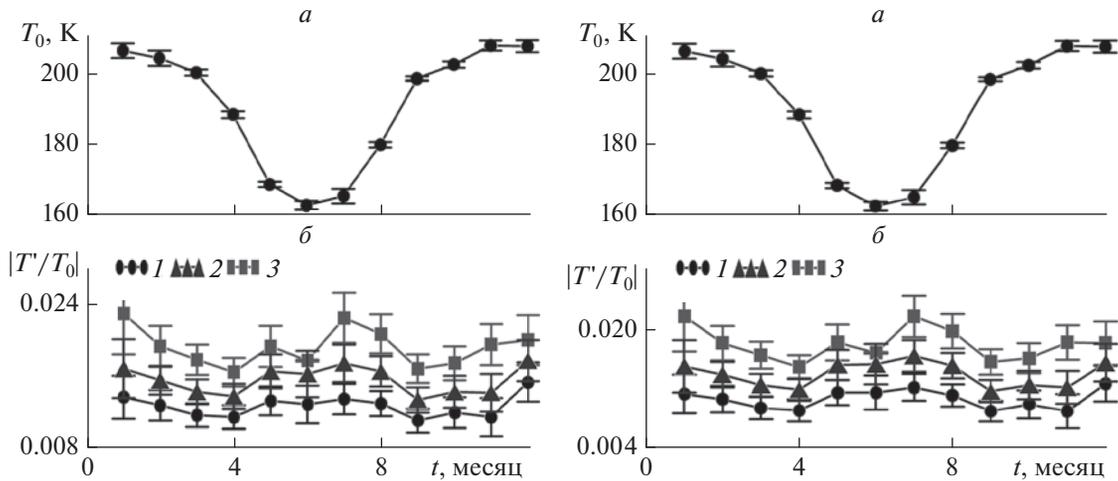


Рис. 5. Сезонные вариации средней вращательной температуры ОН, T_0 – (а), и относительных стандартных отклонений d_T/T_0 (3) разностей (1) – (б) для $\Delta t = 0.5$ ч – 1, $\Delta t = 1$ ч – 2 и $\Delta t = 2$ ч – 3, рассчитанные по регистрируемым данным (слева) и после исключения некогерентного шума (справа) и усредненные за 2004–2017 гг. наблюдений в Звенигороде.

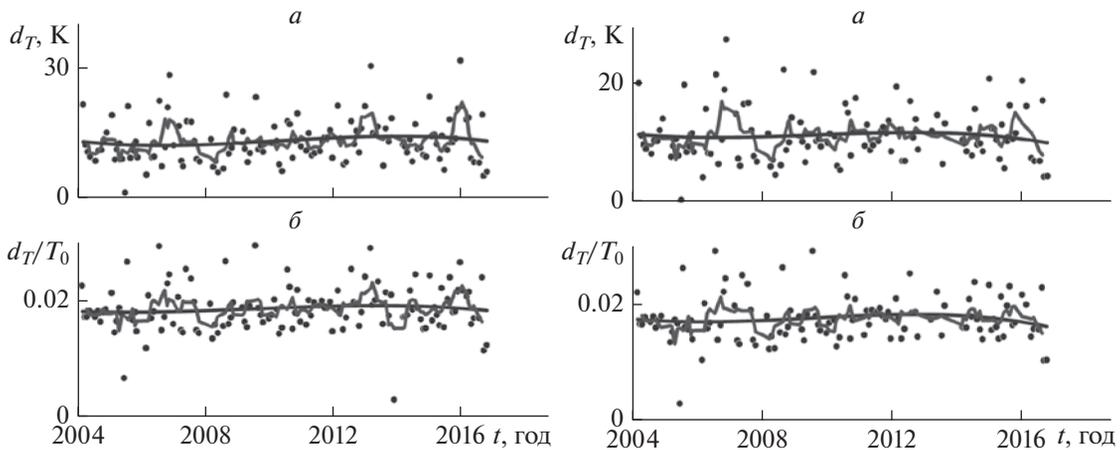


Рис. 6. Изменение абсолютных d_T – (а) и относительных d_T/T_0 – (б) месячных стандартных отклонений (3) разностей (1) с $\Delta t = 2$ ч, вычисленных по измеренным значениям (слева), и после вычитания некогерентного шума (справа), для измерений в Звенигороде. Линии показывают бегущее среднее по 7-ми точкам и кубичную полиномиальную аппроксимацию.

ных отклонений когерентных мезомасштабных возмущений на правых графиках рис. 6. Гладкие линии на рис. 6 показывают кубичную полиномиальную аппроксимацию. Особенностью межгодовых изменений на рис. 6 является рост мезомасштабных стандартных отклонений до 2012–2014 г. и их уменьшение после этого. Такое же поведение отмечалось в работах [Gavrilov et al., 2020; Роров А.А., 2020]. Указанное поведение трендовых линий более отчетливо видно на правых графиках рис. 6 после вычитания дисперсий некогерентного шума. Следует учитывать, что разностный фильтр (1) с $\Delta t = 2$ ч краем полосы пропускания зацепляет полусуточный прилив [Роров et al., 2020], который может вносить определенный вклад в вариации, изображенные на рис. 6.

Таким образом, описанное выше исключение некогерентного шума позволяет лучше выявить особенности сезонных и межгодовых изменений когерентных мезомасштабных процессов в разных областях частотного спектра.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом анализа статистических свойств структурной функции поля температур оценены дисперсии и стандартные отклонения некогерентного случайного шума, который обусловлен инструментальными погрешностями, а также атмосферными волнами и турбулентностью с масштабами меньшими времени регистрации измеряемых характеристик ночной эмиссии гид-

роксила вблизи мезопаузы. Оценки дисперсии некогерентного шума использованы для коррекции значений дисперсии мезомасштабных возмущений, которая может дать информацию об интенсивности когерентных (волновых) процессов в области МНТ.

Для определения мезомасштабной составляющей с периодами 0.8–11 ч использованы различные цифровые фильтры (1) с различными значениями временного сдвига Δt в диапазоне от 10 мин до 2 ч. Вычитание некогерентного шума не меняет характера сезонных вариаций во всех частотных интервалах, но уменьшает значения мезомасштабных стандартных отклонений на 10–20%. Предлагаемая коррекция позволяет лучше выявить особенности сезонных и межгодовых изменений когерентных мезомасштабных возмущений в разных областях частотного спектра. Описанный метод статистической коррекции не требует дополнительных измерений и применим для анализа данных любых станций мировой сети наблюдений ночных свечений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-35-90130 и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-583.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврильева Г.А., Аммосов П.П., Колтовской И.И. Полусуточный термический прилив в области мезопаузы над Якутией // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 1. С. 117–122. 2009.
<https://doi.org/10.1134/S0016793209010150>
- Красовский В.И., Потапов Б.П., Семенов А.И., Шефов Н.Н. Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы. 1. Результаты исследований гидроксильной эмиссии // Полярные сияния и свечение ночного неба / Под ред. Ю.И. Гальперина. М.: Сов. Радио. № 26. С. 5–29. 1978.
- Медведева И.В., Белецкий А.Б., Перминов В.И., Перцев Н.Н. Вариации температуры атмосферы на высотах мезопаузы и нижней термосферы в периоды стратосферных потеплений по данным наземных и спутниковых измерений в различных долготных секторах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 8. № 4. С. 127–135. 2011.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В., Перцев Н.Н. Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 2. С. 246–256. 2014.
<https://doi.org/10.1134/S0016793214020157>
- Перцев Н.Н., Андреев А.Б., Мерзляков Е.Г., Перминов В.И. Мезосферно-термосферные проявления стратосферных потеплений: совместное использование спутниковых и наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 10. № 1. С. 93–100. 2013.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Barlow R.J. A guide to the use of statistical methods in the physical sciences. Wiley Publ. 222 p. 1993.
- Gavrilov N.M., Fukao S., Nakamura T., Jacobi Ch., Kerschner 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. V. 64. P. 1003–1010. 2002a.
- 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. V. 107. № D24. P. 4755. 2002b.
<https://doi.org/10.1029/2001JD001469>
- Gavrilov N.M., Popov A.A., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V., Ammosov P.P., Gavrilyeva G.A., Koltovskoi I.I. Mesoscale variations of hydroxyl rotational temperature from observations at Russian sites // Proc. SPIE. V. 11560. 115607W. 2020.
<https://doi.org/10.1117/12.2574795>
- Krassovski V.I. Infrasonic variations of OH emission in the upper atmosphere // Ann. Géophys. V. 28. P. 739–746. 1972.
- Lastovichka J. A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 163. P. 2–13. 2017.
- 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. V. 51. P. 897–906. 1999.
- Popov A.A., Gavrilov N.M., Andreev A.B., Pogoreltsev A.I. Interannual dynamics in intensity of mesoscale hydroxyl nightglow variations over Almaty // Solar-Terr. Phys. V. 4. № 2. P. 63–68. 2018
- Popov A.A., Gavrilov N.M., Perminov V.I., Pertsev N.N., Medvedeva I.V. Multi-year observations of mesoscale variances of hydroxyl nightglow near the mesopause at Tory and Zvenigorod // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 205. № 105311. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105311>
- Somsikov V.M., Andreev A.B., Zhumbaev B.T. Peculiarities of seasonal behavior of wave disturbances in the mesosphere according to SATI and satellite observations // News Natl. Acad. Sci. Rep. Kazakhstan. V. 4. № 302. P. 33–39. 2015.
- 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. V. 21. № 20. P. 2239–2242. 1994.
- 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. V. 35. № 4. P. 413–427. 1987.
- Taylor M.J., Hapgood M.A. On the origin of ripple-type wave structure in the OH nightglow emission // Planet. Space Sci. V. 38. № 11. P. 1421–1430. 1990.
- Vadas S.L., Taylor M.J., Pautet S.P.-D., Fritts D.C., Liu H.-L. 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. V. 27. P. 231–259. 2009.