

УДК 550.388:551.524:551.590.22

## ЛУННЫЕ ПРИЛИВЫ В ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ О ЛЕТНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ГИДРОКСИЛА

© 2021 г. Н. Н. Перцев<sup>1,\*</sup>, П. А. Далин<sup>2,3</sup>, В. И. Перминов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Шведский институт космической физики, г. Кируна, Швеция

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 07.07.2020 г.

После доработки 16.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Летняя область мезопаузы (высоты 82–92 км), самое холодное место в земной атмосфере, подвержена влиянию внешних воздействий, включая лунные. В настоящей работе гармоники лунных приливов выделяются из рядов температуры излучающего слоя гидроксила (ОН\*), полученных из спектрофотометрических измерений на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в летние сезоны 2000–2016 гг. Температуры ОН\* являются средневзвешенными в слое толщиной ~9 км, имеющего максимум на высоте ~87 км. Анализ позволил выделить лунные колебания, среди которых две гармоники идентифицируются впервые в температуре области мезопаузы. Данные колебания распознаются как вторая гармоника аномалистического прилива (средний период ~13.78 сут), а также лунный прилив с периодом в 8 ч 17 мин или в альтернативной интерпретации – третья гармоника лунного синодического месяца (~9.84 сут).

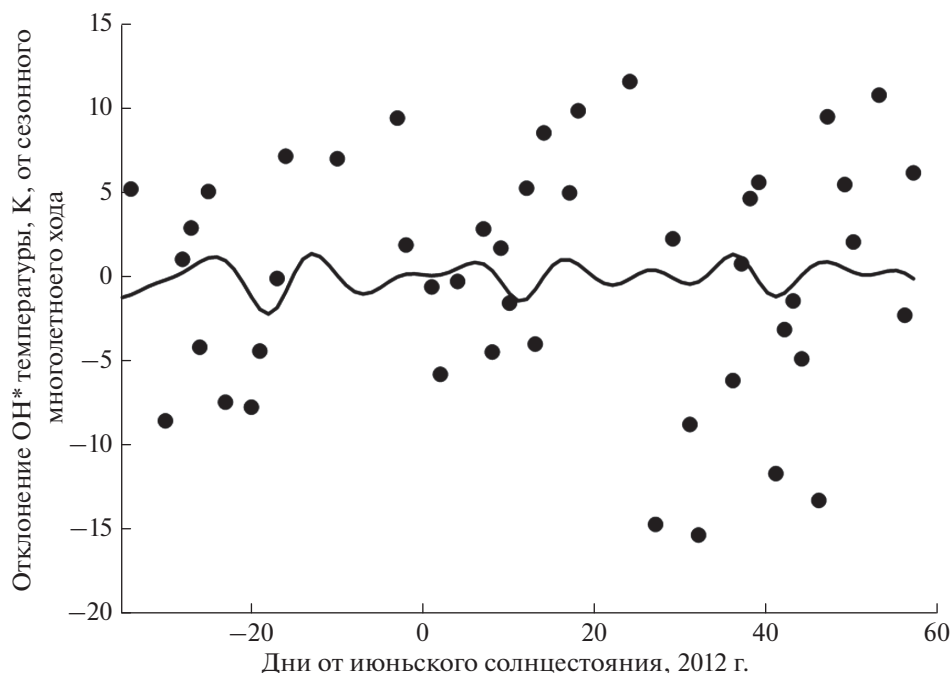
DOI: 10.31857/S0016794021020103

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Начало исследованиям лунных приливов в области мезопаузы было положено Egedal [1929], обнаружившим их в изменениях высоты сгорания метеоров. Позднее с развитием наблюдений свечения ночного неба было обращено внимание на изменения характеристик собственного излучения мезопаузы (82–92 км) в зависимости от возраста Луны. Исследования в основном касались излучения гидроксила – его интенсивности и вращательной температуры. Последняя, в силу высотного распределения колебательно-возбужденного гидроксила (ОН\*), является средневзвешенной в слое толщиной около 9 км и максимумом вблизи 87 км [Baker and Stair, 1988]. Анализируя среденочные данные об интенсивности и вращательной температуре гидроксильного излучения, Шефов [1967] сопоставил их с фазами синодического месяца (29.53 сут) и обнаружил первую и вторую гармоники. В публикации [Семенов и Шефов, 1996] показано наличие гармоник суточного и полусуточного лунного прилива в ночных вариациях данного излучения, причем с амплитудами меньшими, чем для гармоник синодического месяца. К настоящему времени гармоники лунных приливов найдены также в таких характеристиках области мезопаузы как компонен-

ты скорости ветра [Покровский и Тептин, 1970], вероятность появления [Кропоткина и Шефов, 1975] и яркость серебристых облаков [Перцев и др., 2015], радиус и концентрация их частиц [Hoffmann et al., 2018], интенсивность линии Na 589 нм [Фишкова, 1983], интенсивность и вращательная температура эмиссии O<sub>2</sub> 865 нм [Шефов и др., 2006], коэффициент отражения радиоволн для полярных мезосферных летних эхо [Dalin et al., 2017], отношение смеси мезосферных газов H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NO, O<sub>3</sub> [Hoffmann et al., 2018] (указаны лишь первые из ряда публикаций). В последние годы выявление лунных приливов успешно проводится на базе спутниковых измерений [von Savigny et al., 2015, 2017; Hoffmann et al., 2018]. Подавляющее большинство исследований лунных приливов в средней атмосфере как в случае анализа данных, так и в случае многочисленных модельных работ, начиная с работы [Sawada, 1954], посвящено полусуточной лунной компоненте прилива.

В настоящей работе на основе регулярных ночных спектрофотометрических измерений гидроксильного излучения на Звенигородской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в периоды летних сезонов 2000–2016 гг. статистическими методами были



**Рис. 1.** Отклонения от среднеемноголетнего сезонного хода полуночной температуры ОН\* в 2012 г. (кружки) и суммарный вклад статистически значимых лунных осцилляций (кривая), найденный с помощью МЛРА (многолетняя статистика; коэффициенты регрессии показаны в таблице 1).

исследованы гармоника лунных приливов вращательной температуры ОН\*. Работа является развитием анализа гармоник лунных приливов в характеристиках гидроксильного излучения и мезосферных серебристых облаках [Перцев и др., 2015]. По сравнению с предыдущим исследованием в базу температурных данных внесены измерения, проведенные в 2014–2016 гг., а в алгоритме анализа снято ограничение, исключающее данные, приходящиеся на моменты времени, когда расстояние от Земли до Луны было менее 58 земных радиусов. Кроме того, в настоящей работе анализируется большее число одновременно проверяемых лунных аргументов, взятых в качестве независимых переменных. В результате принятого подхода к анализу данных получена независимая статистическая оценка вероятности значимости выделенных лунных гармоник.

В последующих разделах статьи кратко описываются используемые данные и соответствующие им измерения (раздел 2), кратко излагаются теория лунных приливов и методика их выделения из атмосферных данных (раздел 3). Полученные результаты вместе с обсуждением сопутствующих физических механизмов и основных выводы представлены в двух последних разделах. Результаты настоящего исследования подтверждают основные выводы работы [Перцев и др., 2015] и дают некоторые новые детали в картине лунных возмущений области земной мезопаузы.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

### 2.1. Лунные эфемериды

Лунные эфемериды рассчитывались с шагом 1 сут по алгоритмам, приведенным в монографии [Montenbruck and Pflieger, 2000] и основанным на законах небесной механики, на момент времени 21:30 UT, что приблизительно соответствует местной солнечной полуночи в пункте измерений гидроксильного излучения.

### 2.2. Вращательная температура ОН\*

Для анализа лунных приливных гармоник были взяты измерения вращательной температуры излучающего гидроксила на Звенигородской научной станции ( $56^{\circ}$  N,  $37^{\circ}$  E) в течение летних периодов (с 16 мая по 16 августа) 2000–2016 гг. Наблюдения температуры ОН\* ведутся спектрографическим способом регистрации спектра полосы ОН(6–2) 840 нм в ночное время при ясной погоде [Семенов и др., 2002]. Детальное описание методики спектральных измерений, их обработки и определения вращательной температуры дано в работе [Pertsev and Perminov, 2008]. Общепринято полагать, что вращательная температура излучающего гидроксила соответствует температуре окружающей среды, средневзвешенной по толщине излучающего слоя гидроксила [Шефов и др., 2006]. Поле зрения спектрографа было центрировано на область с географическими координатами

ми 57° N, 36° E. Поскольку летом ночи непродолжительны, то в анализе использовались только температуры, осредненные в течение часа с центром вблизи местной солнечной полуночи. Для улучшения статистики из данных исключались среднеголетняя сезонная кривая и среднее значение температуры за каждый летний сезон. Кроме того, из анализа исключались значения температурных остатков с абсолютными значениями более 2 стандартных отклонений. Это улучшило статистические оценки, демонстрируя, что очень большие отклонения температуры, судя по всему, не связаны с рассматриваемыми лунными приливами. Общее количество используемых значений температурных остатков составило 555.

### 3. ЛУННЫЕ ПРИЛИВНЫЕ ГАРМОНИКИ И МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Согласно классической теории лунных приливных возмущений (напр., [Charman and Lindzen, 1970]), лунные приливы могут быть описаны гравитационным потенциалом, скорректированным на ускорение Земли,

$$\Phi_L \approx -\frac{3GM_L r^2}{2D^3} P_2(\cos \theta). \quad (1)$$

Здесь  $G$  – гравитационная постоянная;  $M_L$  – масса Луны;  $r$  – расстояние от центра Земли до пробной точки на поверхности Земли и в атмосфере;  $D$  – меняющееся расстояние Земля–Луна;  $\theta$  – полярный угол между направлениями на центр Луны и пробную точку,  $P_2(\cos \theta)$  – полином Лежандра второго порядка, который удобно выразить через широту пробной точки  $\phi$  и эфемериды Луны:

$$P_2(\cos \theta) = \frac{1}{2} [3(\sin^2 \phi - 1/3)(\sin^2 \delta_L - 1/3) - \sin 2\phi \sin 2\delta_L \cos \tau_L + \cos^2 \phi \cos^2 \delta_L \cos 2\tau_L], \quad (2)$$

где  $\delta_L$  – склонение Луны, изменяющееся в пределах  $\pm 28.6^\circ$ ;  $\tau_L$  – часовой угол Луны, который можно рассчитать по формуле  $\tau_L = t - v$ , где  $t$  – среднее солнечное местное время в угловых единицах, а  $v = s - h$  – лунная угловая фаза, равная разности эклиптических долгот Луны  $s$  и Солнца  $h$ . Формула (2) состоит из трех основных приливных компонент:

I) полумесячный зональный (синхронный на всех долготах) лунный прилив (средний период равен 13.66 сут), пропорциональный  $\sin^2 \delta_L$ ;

II) лунный суточный прилив, пропорциональный  $\cos(\tau_L)$ , со средним периодом, равным 24 ч 50.5 мин;

III) лунный полусуточный прилив, пропорциональный  $\cos(2\tau_L)$ , с вдвое меньшим периодом, т.е. 12 ч 25.2 мин.

Кроме того, выражение (2) содержит постоянную компоненту, знак которой зависит от широты  $\phi$ . Благодаря этому лунный приливной потенциал (1) должен обладать четвертой переменной составляющей лунного прилива, зависящей от изменяющегося расстояния между Луной и Землей как  $D^{-3}$  ( $D$  варьирует между 56 и 64 радиусами Земли,  $R_e$ ) со средним периодом 27.55 дней (аномалистический месяц). Множитель  $D^{-3}$  также модулирует зональную, суточную и полусуточную компоненты, обеспечивая более высокие по частоте и слабые по амплитуде лунные гармоники.

Однако статистические исследования лунных возмущений, содержащихся в данных атмосферных измерений, обнаружили также и другие гармоники, которые можно назвать “неканоническими” [Dalin et al., 2017], т.е. не проявляющимися в описанной гравитационной приливной модели. Это немонокотонная зависимость атмосферных данных от  $D$  [Dalin et al., 2006], синодический полумесячный [Семенов и Шефов, 1996; Перцев и др., 2015; Dalin et al., 2017] и месячный [Семенов и Шефов, 1996; Dalin et al., 2017] приливы, связанные с фазами Луны и неканонический суточный прилив, инвариантный к склонению Луны [Dalin et al., 2017]. Вероятно, эти приливные компоненты являются отображением нелинейных процессов в атмосфере.

В настоящей работе используется вариант статистического анализа, называемый множественным линейным регрессионным анализом (МЛРА), математические основы которого изложены в работе [Goldberger, 1991]. Он позволяет выделять из анализируемых рядов одновременно несколько компонент лунного приливного сигнала. Особенности МЛРА, которые нужно учитывать при выделении лунных гармоник из атмосферных данных, подробно обсуждаются в работах [Перцев и др., 2015; Dalin et al., 2017]. Статистический подход в настоящей работе очень близок к варианту [Dalin et al., 2017], детали которого более подробно описаны там же. Однако, между подходами к анализу в этой статье и в статье [Dalin et al., 2017] имеется разница, связанная с разным временным интервалом во временных рядах. В работе [Dalin et al., 2017] анализировались радарные данные, полученные с часовым осреднением и следующие с интервалом 1 ч, полностью покрывающие время суток. В настоящей работе используется интервал усреднения данных – 1 ч, а интервал между точками во временном ряде – 1 сут (или несколько суток при отсутствии погодных условий для измерений). Это обусловлено тем, что летом гидроксильные измерения проводятся только вблизи полуночи. К сожалению, при та-

**Таблица 1.** Лунные эффекты в полуночной температуре ОН\*: коэффициенты регрессии (КР) и оценки их значимости

Базисные переменные	Фазовая константа (°) при экстремальных значениях КР	КР, К и оценка (МЛРА) их погрешности для 90% доверительной вероятности	Вероятность значимости согласно RP-тесту, %
<b><math>\sin^2(\delta_L)</math>, зональный лунный прилив</b>	—	<b><math>11 \pm 7</math></b>	<b>99.6</b>
$(D_{\text{mean}}/D)^3$ , аномалистический прилив	—	$-1.9 \pm 3.3$	<80
<b><math>(1 - D/D_{\text{mean}})^2</math>, немонотонная зависимость от расстояния</b>	—	<b><math>-371 \pm 330</math></b>	<b>92.8</b>
$\cos(v - F_1)$ , неканонический лунный суточный либо синодический месячный прилив	307	$0.3 \pm 0.9$	<80
<b><math>\cos(2v - 2F_2)</math>, лунный полусуточный либо синодический полумесячный прилив</b>	<b>70</b>	<b><math>0.9 \pm 0.6</math></b>	<b>96.8</b>
<b><math>\cos(3v - 3F_3)</math>, третья гармоника лунного суточного либо синодического месячного прилива</b>	<b>99</b>	<b><math>0.59 \pm 0.52</math></b>	<b>93.0</b>

Примечание: Приливные компоненты с вероятностью значимости >90% выделены жирным шрифтом.

ком интервале между точками во временном ряде между некоторыми лунными гармониками возникает взаимная маскировка (*aliasing*) [Перцев и др., 2015; Dalin et al., 2017], когда вышеупомянутое тождество  $\tau_L = t - v$  приводит к тому, что  $N$ -я гармоника лунных суток (~24 ч 51 мин) неотличима от  $N$ -й гармоники лунного синодического месяца (~29.53 сут). Так, лунное полусуточное и синодическое полумесячное колебания, которые статистически значимы в результатах [Dalin et al., 2017], в настоящем исследовании неразличимы. Поэтому здесь анализируется меньшее число лунных гармоник, чем в Dalin et al. [2017], и некоторые из них имеют две возможных интерпретации.

В процессе МЛРА упомянутые выше канонические и неканонические колебательные моды были введены в расчет в виде списка аргументов (базисных переменных), они показаны в первом столбце таблицы 1. При выделении суточного (либо месячного синодического) и полусуточного (либо полумесячного синодического) лунных колебаний из анализируемых данных их фазовые константы рассматривались как неизвестные, поэтому для них проверялись по две регрессионных зависимости, косинусоидальная и синусоидальная, например,  $\cos(2\tau_L)$  and  $\sin(2\tau_L)$ . Если хотя бы одна из этих зависимостей оказывалась статистически значимой, то вычислялась фаза  $f$ , соответствующая наилучшему фитингу (так что зависимость  $\cos(2\tau_L - 2f)$  становится наиболее значимой,

а  $\sin(2\tau_L - 2f)$  — не значимой). Соответствующие фазы также показаны в таблице 1.

Что касается статистической значимости рассчитанных коэффициентов регрессии, то использовался подход, примененный в работе [Dalin et al., 2017]. Она оценивается двумя способами: во-первых, с помощью стандартных формул, принятых в МЛРА для погрешностей регрессионных коэффициентов с доверительной вероятностью 90 или 95% (что предполагает некоторые статистические свойства у рядов анализируемых данных, которые едва ли строго выполняются в случае геофизических рядов), и, во-вторых, дается независимая от первого способа оценка вероятности статистической значимости регрессионных коэффициентов путем большого числа (~1000) случайных перестановок внутри ряда анализируемой переменной. Последний способ называется RP-тестом (*Random Permutation test*), для которого необходимые детали и ссылки даны в работе [Dalin et al., 2017]. Таблица 1 показывает, что рассматриваемые регрессионные зависимости для обоих способов оценки дают близкие результаты.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 показаны результаты регрессионного анализа, исследующего влияние различных гармоник лунного прилива на вариации гидроксильной температуры. Выделен вклад в гидрок-

сильную температуру четырех статистически значимых лунных колебаний. Два из этих колебаний обладают приблизительно полумесячной периодичностью, со средними периодами 13.66 дней у зонального лунного прилива и 13.78 дней у второй гармоники аномалистического месяца. Что касается двух других осцилляций, выделенных в таблице, то из-за взаимной маскировки, обсуждаемой в разделе 3, для каждой из них есть две возможные интерпретации. Одну из них можно интерпретировать как лунный полусуточный прилив (с периодом  $\sim 12$  ч 25 мин) и/или как вторую гармонику ( $\sim 14.77$  сут) синодического месяца. Аналогично, четвертое выделенное колебание может интерпретироваться как лунный третьсуточный прилив (8 ч 17 мин) и/или третья гармоника синодического месяца ( $\sim 9.84$  сут).

Зональный прилив уже выявлялся из летних (с теми же знаком и амплитудой) и зимних гидроксильных температур [Перцев и др., 2015]; он же, по-видимому, выделяется в спектрах температуры области мезопаузы, полученных Шпыневым и др. [2014]. Зональный прилив также был найден в вероятности появления серебристых облаков [Pertsev et al., 2007] и в площади летней ночной тропосферной облачности [Pertsev et al., 2007; Pertsev and Dalin, 2010], в продолжительности земных суток [Сидоренков, 2002; Bizouard et al., 2004], в атмосферных геопотенциальных высотах [Li et al., 2011] и в вертикальной компоненте напряженности приземного электрического поля [Спивак и др., 2019].

Поскольку средний период зонального прилива (13.6608 сут) чрезвычайно близок к периоду (13.6376 сут) второй гармоники общепринятого (каррингтоновского) синодического периода вращения Солнца (27.2753 сут, см. напр., [Hanslmeier, 2007]), и поскольку эта вторая гармоника уже выявлялась в геомагнитных [Mursula and Zieger, 1996] и атмосферных [Dalin et al., 2017] данных, полученные результаты по зональному приливу требуют проверки на предмет солнечного влияния. Эта проверка, основанная на частотной зависимости отклика гидроксильной температуры на сигналы разных частот, сделана впервые. Ее детали даны в Приложении, а результаты свидетельствуют о значительно более вероятном лунном происхождении найденного зонального прилива, хотя сравнительно небольшое искажение его за счет солнечной гармоники также вероятно.

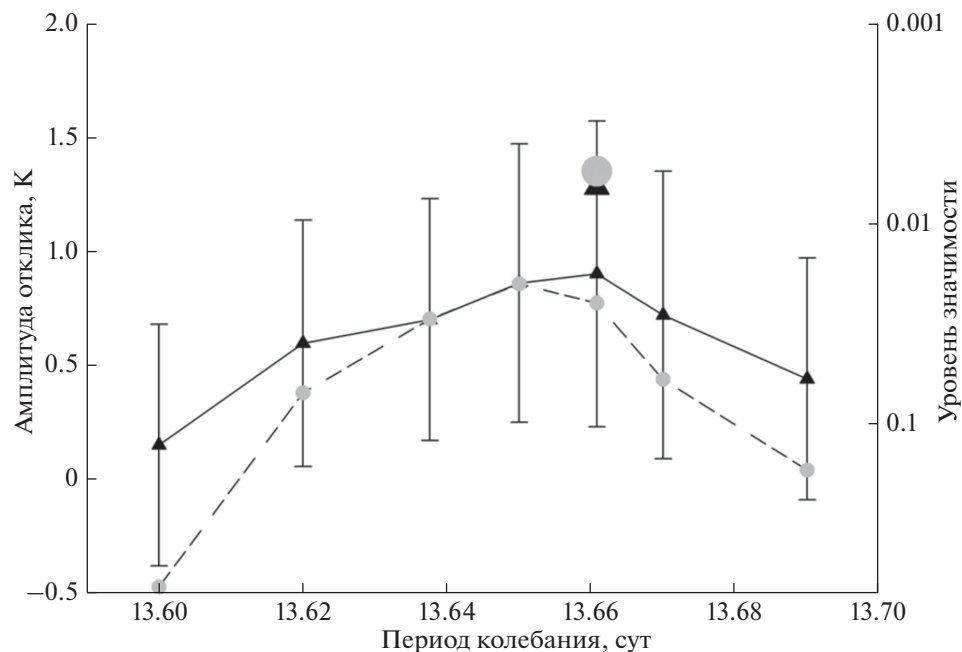
Вторая гармоника аномалистического месяца проявляется через немонотонную зависимость  $(1 - D/D_{\text{mean}})^2$  от расстояния от Земли до Луны ( $D$ ), демонстрирующей два максимума и два минимума при движении Луны от одного перигея к следующему. Целенаправленный поиск этого колебания в летней температуре ОН\* был инициирован открытием аналогичной зависимости в

вероятности появления серебристых облаков [Dalin et al., 2006]. Последняя демонстрирует регулярную тенденцию роста при отклонении расстояния  $D$  от его среднего значения в сторону апогея или перигея. Как видно из таблицы 1, летняя гидроксильная температура имеет противоположную тенденцию поведения. Противофазная вариация температуры области мезопаузы и частоты появления серебристых облаков позволяет предполагать, что воздействие обсуждаемой гармоники на серебристые облака осуществляется посредством изменения температуры области мезопаузы. Это колебание со средним периодом 13.78 сут содержится в теоретико-модельных спектрах угловой скорости вращения Земли [Yoder et al., 1981; Bizouard et al., 2004].

Показанный в таблице 1 результат по лунному полусуточному приливу и/или полумесячной синодической осцилляции весьма близок по амплитуде и фазе к результату Перцева и др. [2015], найденному также для летней температуры ОН\*. Четвертая из выявленных значимых лунных компонент, в обоих случаях ее интерпретации как третьмесячных синодических осцилляций или лунного третьсуточного прилива, по-видимому, является первым обнаружением соответствующей гармоники в рядах гидроксильной температуры. Вероятно, это колебание является лунным третьсуточным приливом. Хотя ни он, ни третьмесячная синодическая осцилляция не были выявлены в теоретических спектральных разложениях лунного гравитационного потенциала [Melchior, 1966; Chapman and Lindzen, 1970; Yoder et al., 1981; Bizouard et al., 2004], лунный третьсуточный прилив был выделен из рядов лидарных измерений характеристик серебристых облаков [Fiedler and Baumgarten, 2018]. Вероятно, его генерация осуществляется через нелинейное взаимодействие лунного суточного и лунного полусуточного приливов. На рисунке 1 показан (кривой линией) суммарный эффект четырех статистически значимых лунных гармоник, отмеченных выделенным шрифтом в таблице 1, на примере лета 2012 г., вместе с отклонениями измеренной гидроксильной температуры от среднемноголетнего сезонного хода (кружки). Наибольший перепад температур для этого лунного эффекта составил  $\sim 3$  К.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованный анализ лунно-индуцированных осцилляций в летней температуре области мезопаузы подтвердил прежние [Pertsev et al., 2015] результаты о статистической значимости зонального лунного прилива (со средним периодом 13.66 сут) и суперпозиции лунного полусуточного ( $\sim 12$  ч 25 мин) прилива и полумесячного ( $\sim 14.77$  сут) синодического колебания включая



**Рис. 2.** Амплитуды отклика гидроксильной температуры на синусоидальные сигналы с периодами в диапазоне 13.6–13.7 сут (сплошная черная линия) в сопоставлении с амплитудой отклика на сигнал  $\sin^2(\delta_L)$ , представляющий лунный зональный прилив (черный треугольник). Серой штриховой линией (правая шкала) показан соответствующий уровень статистической значимости. Уровень статистической значимости для отклика на сигнал  $\sin^2(\delta_L)$  показан серым кружком. Некоторые детали рисунка разъяснены в тексте Приложения.

прежние оценки амплитуд и фаз колебаний. Кроме того, впервые найдены в температуре излучающего гидроксидла два дополнительных статистически значимых лунных колебания.

2. Одним из них является вторая гармоника аномалистического месяца (со средним периодом 13.78 сут), обнаруженная ранее в частоте появления серебристых облаков [Dalin et al., 2006]. В данном случае она описывается с помощью немонотонной зависимости от расстояния Земля–Луна, обеспечивающей минимум летней температуры ОН\* и максимум частоты появления серебристых облаков (согласно Dalin et al. [2006]) в апогее и перигее и противоположный экстремум при среднем расстоянии до Луны. Вероятно, скоординированное поведение этих двух характеристик области мезопаузы в рассматриваемой колебательной гармонике обеспечивается с помощью влияния температуры на образование и сублимацию облачных ледяных частиц.

3. Другой впервые выделенной гармоникой в летней температуре ОН\* является лунный третьсуточный и/или лунный третьмесячный синодический прилив. Наиболее вероятно первая интерпретация, поскольку лунный третьсуточный прилив (с периодом 8 ч 17 мин) уже обнаружен в характеристиках серебристых облаков [Fiedler and Baumgarten, 2018].

4. Четыре значимых лунных осцилляции суммарно обеспечивают вклад примерно  $\pm 1.5$  К в разброс измеряемой температуры ОН\*.

5. Впервые проведена проверка, уверенно демонстрирующая, что результаты, полученные для зонального лунного прилива, не являются отображением близкой по периоду солнечной гармоники.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Проверка возможного влияния второй гармоники солнечного каррингтоновского периода на результат выявления лунного зонального прилива

Частотная близость лунной (средний период 13.6608 сут) и солнечной гармоник (13.6376 сут) заставляет провести проверку зависимости отклика гидроксильной температуры на синусоидальные сигналы от их периода и сопоставить это с откликом на квазисинусоидальный сигнал  $\sin^2(\delta_L)$ , представляющий зональный прилив. Более прямой способ, — одновременное выделение двух синусоидальных или квазисинусоидальных сигналов близких частот в рамках МЛРА, — не дает устойчивого к малым погрешностям результата из-за мультиколлинеарности (взаимной обусловленности) базисных переменных на временных рядах ограниченной длины. В настоящей провер-

ке расчеты проводились по той же схеме МЛРА, которая описана в разделе 3, за исключением того, что квазисинусоида  $\sin^2(\delta_L)$  заменялась двумя (синусоидальным и косинусоидальным) сигналами одного и того же периода, который поочередно менялся с шагом  $\sim 0.02$  сут. в окрестности указанных выше солнечной и лунной гармоник. Пара сигналов одного и того же периода позволяла вычислить амплитуду и фазу входной синусоиды, соответствующие наибольшему отклику температуры.

Результаты этих расчетов продемонстрированы на рис. 2. Он показывает амплитуды отклика на монохроматические сигналы разных частот и сигнал  $\sin^2(\delta_L)$ . При этом амплитуда последнего определялась таким образом, чтобы на временной шкале максимальная амплитуда этого сигнала была равна 1, как и в случае монохроматических синусоид. Вертикальными линиями показаны доверительные интервалы амплитуд отклика для вероятности 90%. Кроме того, на рис. 2 показан соответствующий уровень статистической значимости (вероятность случайного отклика). Результаты проверки свидетельствуют о следующем.

1. Статистическая значимость и амплитуда температурного отклика на квазисинусоидальный сигнал  $\sin^2(\delta_L)$ , представляющий зональный прилив, выше, чем на монохроматические сигналы той же амплитуды и периода, а также солнечного периода 13.6376 сут и других периодов в их окрестности.

2. Максимум частотной зависимости и статистической значимости температурного отклика на монохроматические сигналы значительно ближе к лунному периоду 13.6608 сут, чем к солнечному 13.6376 сут.

3. Более медленный спад этой зависимости в сторону меньших периодов заставляет предполагать небольшое влияние указанной солнечной гармоники на результаты для зонального лунного прилива, и, соответственно, небольшое искажение найденного температурного отклика на зональный лунный прилив. Для более точных выводов понадобятся значительно более длинные временные ряды.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Статья содержит результаты, полученные при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-00358а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Кротопкина Е.П., Шефов Н.Н. Влияние лунных приливов на вероятность появления серебристых облаков // Изв. АН СССР. ФАО. Т. 11. № 11. С. 1184–1186. 1975.

– Перцев Н.Н., Далин П.А., Перминов В.И. Влияние полусуточных и полумесячных лунных приливов на область мезопаузы по наблюдениям характеристик гидроксильного слоя и серебристых облаков // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 6. С. 839–848. 2015.

– Покровский Г.Б., Теттин Г.М. Лунные приливы в верхней атмосфере по радиометеорным наблюдениям // Астрон. Циркуляр. № 597. С. 5–7. 1970.

– Семенов А.И., Баканас В.В., Перминов В.И., Железнов Ю.А., Хомич В.Ю. Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли и ближней инфракрасной области // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 3. С. 407–414. 2002.

– Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций гидроксильного излучения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 4. С. 68–85. 1996.

– Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. С-Пб.: Гидрометеиздат. 366 с. 2002.

– Спивак А.А., Рябова С.А., Харламов В.А. Электрическое поле в приземной атмосфере московского мегаполиса // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 4. С. 501–513. 2019.

– Фишкова Л.М. Ночное излучение среднеширотной верхней атмосферы Земли. Ред. Н.Н. Шефов. Тб.: Мецниереба. 272 с. 1983.

– Шефов Н.Н. Некоторые свойства гидроксильного излучения // Полярные сияния и свечение ночного неба. № 13. С. 37–43. М.: Наука. 1967.

– Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 740 с. 2006.

– Шпынев Б.Г., Ойнац А.В., Лебедев В.П., Черниговская М.А., Орлов И.И., Белинская А.Ю., Грехов О.М. Проявление гравитационных приливов и планетарных волн в долговременных вариациях геофизических параметров // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 4. С. 540–552. 2014.

– Baker D.J., Stair A.T. Rocket measurements of the altitude distributions of the hydroxyl airglow // Physica Scripta. № 37. P. 611–622. 1988.

– Bizouard Ch., Eanes R., Ray R. Ch. 8. Tidal variations in the Earth's rotation / IERS Conventions (2003). Ed. McCarthy D.D. and Petit G. IERS Technical Note No. 32. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. P. 92–98. 2004.

[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote32/tn32.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote32/tn32.pdf?__blob=publicationFile)

– Chapman S., Lindzen R.S. Atmospheric tides. Dordrecht, Holland: Reidel Publishing Company. 188 p. 1970.

– Dalin P.A., Pertsev N.N., Romejko V.A. Significance of lunar impact on Noctilucent Clouds // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. P. 1653–1663. 2006.

– Dalin P., Kirkwood S., Pertsev N., Perminov V. Influence of solar and lunar tides on the mesopause region as observed in Polar Mesosphere Summer Echoes characteristics // J. Geophys. Res. Atmos. V. 122. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JD026509>

– Egedal J. The tides of the upper atmosphere and the heights of meteors // Nature. V. 124. № 3137. P. 913–914. 1929.

- *Fiedler J., Baumgarten G.* Solar and lunar tides in noctilucent clouds as determined by ground-based lidar // *Atmos. Chem. Phys.* V. 18. P. 16051–16061. 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16051-2018>
- *Goldberger A.S.* A course in econometrics. Cambridge: Harvard University Press. 432 p. 1991.
- *Hanslmeier A.* The Sun and space weather. Dordrecht, Holland: Springer. 315 p. 2007.
- *Hoffmann C.G., von Savigny C., Hervig M.E., Oberbremer E.* The lunar semidiurnal tide at the polar summer mesopause observed by SOFIE // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 167. P. 134–145. 2018.
- *Li G.Q., Zong H.F., Zhang Q.Y.* 27.3-day and average 13.6-day periodic oscillations in the Earth's rotation rate and atmospheric pressure fields due to celestial gravitation forcing // *Adv. Atmos. Sci.* V. 28. № 1. P. 45–58. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-0011-6>
- *Melchior P.* The Earth tides. New York: Pergamon Press. 458 p. 1966.
- *Montenbruck O., Pflieger T.* Astronomy on the personal computer. Berlin, Heidelberg: Springer. 266 p. 2000.
- *Mursula K., Zieger B.* The 13.5-day periodicity in the Sun, solar wind, and geomagnetic activity: the last three solar cycles // *J. Geophys. Res.* V. 101. P. 27077–27090. 1996.
- *Pertsev N., Dalin P., Romejko V.* A lunar signal in summer nighttime tropospheric cloudiness and in noctilucent clouds / Proceedings of the 18th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research. Visby, Sweden. ESA SP-647. P. 589–592. 2007.
- *Pertsev N., Dalin P.* Lunar semimonthly signal in cloudiness: lunar-phase or lunar-declination effect? // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 72. P. 713–717. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.03.013>
- *Pertsev N., Perminov V.* Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // *Ann. Geophysicae.* V. 26. № 5. P. 1049–1056. 2008. [www.ann-geophys.net/26/1049/2008](http://www.ann-geophys.net/26/1049/2008).
- *von Savigny C., Deland M. T., Schwartz M. J.* First identification of lunar tides in satellite observations of noctilucent clouds // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 162. P. 116–121. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.07.002>
- *von Savigny C., Lednyts'kyy O., Forbes J. M., Zhang X.* Lunar semidiurnal tide in the terrestrial airglow // *Geophys. Res. Lett.* V. 42. P. 3553–3559. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL063567>
- *Sawada R.* The atmospheric lunar tides // *N. Y. Univ. Meteor. Papers.* V. 2. № 3. 31 p. 1954.
- *Yoder C.F., Williams J.G., Parke M.E.* Tidal variations of Earth rotation // *J. Geophys. Res.* V. 86. № B2. P. 881–891. 1981.