

Это- препринт Материалов, принятых для публикации в журнале ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, ©2015, владелец авторского права указан в Журнале (<http://www.maik.ru>)

ВЛИЯНИЕ ПОЛУСУТОЧНЫХ И ПОЛУМЕСЯЧНЫХ ЛУННЫХ ПРИЛИВОВ НА  
ОБЛАСТЬ МЕЗОПАУЗЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОКСИЛЬНОГО  
СЛОЯ И СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ.

Н.Н. Перцев<sup>1</sup>, П.А. Далин<sup>2,3</sup>, В.И. Перминов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, г. Москва*

<sup>2</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН, г. Москва*

<sup>3</sup> *Шведский институт космической физики, г. Кируна, Швеция*

*e-mails: [n.pertsev@bk.ru](mailto:n.pertsev@bk.ru); [pdalin@irf.se](mailto:pdalin@irf.se); [v.perminov@rambler.ru](mailto:v.perminov@rambler.ru)*

Поступила в редакцию:

В статье рассматриваются новые результаты по лунным приливам в среднеширотной области мезопаузы. Среди исследованных полумесячных и полусуточных лунных приливных гармоник по данным наблюдений серебристых облаков и спектрофотометрических измерений гидроксильного излучения статистически значимыми оказались полумесячный зональный прилив (13.66 сут.), полумесячный синодический прилив (14.77 сут.) и полусуточный прилив (12 ч 25 мин). Колебания в температуре летнего гидроксильного слоя и яркости серебристых облаков оказываются согласованными примерно в противофазе. Впервые рассмотрены два возможных механизма генерации синодической полумесячной гармоник. При этом статистический анализ гидроксильных данных показывает, что наиболее вероятным процессом является нелинейная демодуляция суперпозиции солнечной и лунной полусуточных приливных гармоник.

## **1. Введение-**

Область мезопаузы (ОМ) представляет собой самый холодный атмосферный слой (80-

100 км) верхней атмосферы Земли. Лунные полусуточные приливы в ОМ стали известны благодаря работе датского геофизика Эгедаля, обнаружившего их в изменениях высот сгорания метеоров [Egedal, 1929]. В 60-е годы прошлого века исследователи свечения ночного неба обратили внимание на  $27\div 29$  - дневные вариации гидроксильной температуры и интенсивности некоторых линий свечения неба. Шефовым [1967] межсуточные вариации были сопоставлены с синодическим периодом Луны. Полученные методом наложения эпох зависимости температуры и интенсивности гидроксильного излучения (максимум эмиссии на 87 км) от «возраста Луны» указывали на наличие полумесячной (14.77 сут) и меньшей по амплитуде месячной (29.5 сут) гармоник. Лунные приливы были обнаружены и в мезосферных (серебристых) облаках (МСО), наблюдаемых летом на широтах  $55-60^\circ$  обоих полушарий [Кропоткина и Шефов, 1975]. При этом вероятность появления серебристых облаков строилась уже не в зависимости от возраста Луны, а от локального лунного времени. В результате две первых гармоники в полученных зависимостях интерпретировались авторами как суточный и полусуточный лунные приливы с периодами соответственно 24 ч 51 мин и 12 ч 25 мин (в часах и минутах обычного солнечного времени). Лунно-приливные гармоники были получены также в [Gadsden and Schröder, 1989]. Но поскольку они определялись из зависимости от возраста Луны, то соответственно интерпретировались как месячная и полумесячная гармоники. В некоторой степени произвольный подход к выбору гармоник в вариациях серебристых облаков неизбежен из-за коротких летних ночей, когда наблюдения МСО возможны только в течение нескольких часов около местной полночи, и поэтому возраст Луны и местное лунное время являются в первом приближении взаимно-однозначными функциями [Чепмен и Линдзен, 1972]. В результате полусуточный и полумесячный, а также суточный и месячный лунные приливы становятся неразличимы без привлечения дополнительной информации [Pertsev and Dalin, 2010]. В настоящей работе для более длинных (до 14 часов) зимних измерений ночного гидроксильного излучения эта неразличимость снимается. Первая попытка «расщепления» полусуточного от полумесячного и суточного от месячного (синодического) лунных приливов по измерениям параметров гидроксильного излучения предпринята в [Шефов и др., 2006]. В этой работе найдено, что амплитуды лунного полусуточного и суточного приливов, если и значимы, то, по крайней мере, на порядок меньше, полумесячного и месячного прилива, соответственно.

Настоящее исследование является продолжением статистического поиска лунных возмущений в характеристиках слоев области мезопаузы на новом уровне с учетом:

- возросшего объема данных;
- расширения списка лунных приливных аргументов (к традиционно использовавшимся

лунной фазе и местному лунному времени добавлены склонение Луны и расстояние от Земли до Луны);

- многомерного регрессионного анализа, необходимость которого обусловлена пониманием статистической взаимозависимости между различными лунными аргументами [Dalin et al., 2006];

- частичной маскировки лунного сигнала в МСО лунным сигналом в погодных условиях в тропосфере при наблюдении с поверхности Земли [Dalin et al., 2006; Pertsev et al., 2007; Pertsev and Dalin, 2010].

Целью настоящей работы является анализ колебаний, которые возникают в характеристиках излучающего слоя гидроксила и серебристых облаков благодаря изменению трех наиболее физически значимых координат Луны при ее движении относительно Земли: экваториального склонения, геоцентрического расстояния и лунной фазы (последняя, строго говоря, описывает не взаимное движение Луны и Земли, а угол Солнце-Земля-Луна). В результате предпринятого поиска отклик на изменения всех трех аргументов был найден с разными коэффициентами регрессии, некоторые из которых оказались статистически значимыми в яркости МСО, температуре  $T_{OH}$  и индексе  $I_{779}$ , отображающем фоновую атмосферную плотность в излучающем слое гидроксила. В настоящей статье излагаются результаты, касающиеся только полусуточного и полумесячного лунных приливов.

## 2. Теоретические основания

Луна, как и Солнце, создает гравитационные приливы в земной атмосфере (солнечная гравитационная приливная сила примерно в два раза слабее лунной). Лунный приливной потенциал описывается следующим выражением [Чепмен и Линдзен, 1972]:

$$\Pi_L \approx -\frac{3}{2} \frac{GM r^2}{R_L^3} P_2(\cos \theta), \quad (1)$$

где  $G$  - гравитационная постоянная,  $M$  - масса Луны,  $r$  - расстояние от центра Земли до пробной точки,  $R_L$  - изменяющееся расстояние от Луны до Земли,  $\theta$  - полярный угол между центром Луны и пробной точкой,

$$P_2(\cos \theta) = [3(\sin^2 \varphi) - 1/3](\sin^2 \delta_L - 1/3) - \sin 2\varphi \sin 2\delta_L \cos \tau_L + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta_L \cdot \cos 2\tau_L] / 2 \quad (2)$$

– тригонометрический многочлен (полином Лежандра второй степени), который может быть выражен через широту пробной точки  $\varphi$ , склонение Луны  $\delta_L$  относительно экватора и часовой угол  $\tau_L = LT \cdot 15 - v$ , где  $LT$  - среднее местное солнечное время (в часах),  $v$  - фаза

Луны, которая равна разнице между эклиптическими долготами средней Луны  $s$  и среднего Солнца  $h$  (в градусах).

Как видно из (2), в лунный приливной потенциал входят:

- «зональный» (синхронный на всех долготах) полумесячный лунный прилив (13.66 дней – половина тропического месяца), который пропорционален  $\sin^2\delta_L$ , причем  $\delta_L$  изменяется в пределах  $\pm 28.6$  градуса;

- лунный суточный прилив (пропорциональный  $\cos \tau_L$ ) со средним «лунным днем» равным 24 час 50.47 мин;

- лунный полусуточный прилив (пропорциональный  $\cos 2\tau_L$ ) с периодом равным половине лунного дня.

Несмотря на некоторую громоздкость, лунный приливной потенциал можно описать с достаточной степенью точности тремя параметрами орбитального движения Луны: ее склонением относительно экватора ( $\pm 28.6^\circ$ ), расстоянием от Земли до Луны ( $R_L$  меняется от 56 до 64 земных радиусов, з.р.) и ее фазой ( $v=0^\circ$  соответствует новолунию,  $v=90^\circ$  - первой четверти и т.д.). Для анализа суточных и полусуточных лунных приливов, как правило, используется «местное лунное время» [Чепмен и Линдзен, 1972],

$$LT_L = LT - v/15. \quad (3)$$

### 3. Анализируемые данные

Для анализа были взяты данные за летние сезоны (16 мая – 16 августа) с 1962 по 2013 гг. и зимние сезоны (16 ноября – 15 февраля) с 2000 по 2013 гг. Расчеты всех перечисленных лунных эфемерид проводились с достаточно высокой точностью на основе [Montenbruck and Pfleger, 2000]. Эти эфемериды, а также некоторые их комбинации, отвечающие за определенные компоненты лунного прилива, использовались как аргументы, а характеристики серебристых облаков или гидроксильного слоя – как функции этих аргументов.

Из характеристик излучающего гидроксильного слоя для дальнейшего анализа взяты измеренные в 2000-2013 гг. вращательная температура  $T_{OH}$ , определяемая по полосе OH(6,2) и совпадающая со средневзвешенной по толщине слоя температурой окружающего воздуха [Перминов и др., 2014], а также отношение  $I_{79}$  интенсивностей полос OH(7-3) и OH(9-4), которое может служить индикатором атмосферной плотности в излучающем слое гидроксила [Pertsev and Perminov, 2008]. Поскольку основной причиной изменения плотности воздуха в излучающем слое гидроксила являются его вертикальные смещения, то  $I_{79}$  можно принять также за индикатор вертикальной координаты гидроксильного слоя [Pertsev et al., 1999].

Измерения гидроксильных характеристик были выполнены спектрографическим методом на Звенигородской обсерватории Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН [Семенов и др., 2002]. Поле зрения спектрографа было центрировано на область излучающего гидроксильного слоя с координатами  $57^\circ \text{ N}$  и  $36^\circ \text{ E}$ .

В качестве единственной суточной переменной, характеризующей активность серебристых облаков, использована оценка их максимальной яркости за ночь по пятибалльной шкале (0÷5) [Ромейко и др., 2002]. Для анализа использована база данных по наблюдениям серебристых облаков в Подмоскowie за 1962-2013 гг. [Pertsev et al., 2014]. В ней имеется некоторая неоднородность наблюдений по годам, обсуждаемая в [Pertsev et al., 2014] и связанная с переходом от визуальных наблюдений МСО к автоматической фотосъемке в 2005 году. Однако для проводимого в настоящей работе статистического исследования она несущественна.

#### **4. Взаимозависимость лунных координат и взаимная маскировка составляющих лунного прилива**

Как будет показано в этом разделе, некоторые лунные аргументы (переменные) не являются статистически независимыми, и это значительно затрудняет анализ. Под статистической взаимозависимостью аргументов мы понимаем неравномерность распределения точек, используемых для регрессионного анализа, в пространстве аргументов (см. рис. 1-4). Эта неравномерность возникает объективно по законам небесной механики, если эти аргументы рассмотреть не как аргументы, а как функции времени на достаточно коротком (сезонном) временном интервале. В нашем подходе мы не рассматриваем аргументы как функции времени, а используем регрессионный анализ, в котором функция зависит от нескольких аргументов, но при этом сами аргументы обладают статистической взаимозависимостью (мультиколлинеарностью) [Кремер, 2004]. Особенно ярко это проявляется для местного лунного времени  $LT_L$  и фазы Луны  $\nu$  в летний сезон. При отборе данных в одно и то же местное солнечное время местное лунное время пробегает 24-часовой цикл за синодический месяц, при этом любая гармоника лунно-суточного цикла становится неотличимой от гармоники с таким же номером от синодического месяца. Рис. 1 иллюстрирует статистическую взаимозависимость аргументов  $LT_L$  и  $\nu$  для летней ситуации полуночных гидроксильных наблюдений (а) и ситуации гидроксильных измерений на протяжении длинных зимних ночей (б). Во время короткой летней ночи, когда все измерения сконцентрированы вблизи местной солнечной полуночи ( $LT=0$ ), для точек, соответствующих измерениям, возникает взаимно-однозначная зависимость между  $LT_L$  и  $\nu$  (рис.1а). Наклонная

линия, возникающая при этом на графике, соответствует, согласно (3), условию  $LT=0$ , налагаемому на множество значений  $LT_L$  и  $\nu$ . В зимний сезон (рис.1б) условие  $LT=0$  меняется на неравенство  $LT < 6.5$  ч или  $> 17.5$  ч. Такое ограничение отображается на рисунке широкими наклонными полосами, пустые промежутки между которыми соответствуют светлому времени, не позволяющему проводить измерения.

Благодаря указанной почти взаимно-однозначной зависимости  $LT_L$  и  $\nu$  для лета без привлечения дополнительной информации лунный полусуточный прилив становится неотличимым от полумесячного синодического, а лунный суточный – от месячного синодического. Поэтому в первых работах, посвященных лунным эффектам в МСО, авторы даже не пытались отличить один эффект от другого. При весьма похожих относительных амплитудах и фазах Кропоткина и Шефов [1975] описали найденный эффект как суточный и полусуточный прилив, а Gadsden and Schröder [1989], ссылаясь на первых, как месячный и полумесячный прилив. Отметим, что ни одна из компонент формулы (2) не содержит синодического (29.53 суток) или полусинодического (14.77 суток) периода. Однако учет общего множителя  $R_L^{-3}$  в (1), который демонстрирует не только колебание с основным (аномалистическим) периодом 27.55 сут., но и слабую модуляцию солнечным притяжением с полусинодическим периодом [Сидоренков, 2002], дает некоторое основание для описания полусинодического колебания в рамках теории лунных гравитационных приливов.

Анализ лунного приливного потенциала (1) показывает, что за исключением полярной области полусуточный вклад в приливной потенциал гораздо больше, чем вклад полусинодической модуляции общего множителя  $R_L^{-3}$ . Тем не менее, на основании только этого вряд ли можно отказать полумесячному приливу в праве на существование: частоты полусуточного и полумесячного процессов отличаются в ~30 раз; более слабые при генерации волны могут лучше передаваться в область наблюдения и приводить в итоге к большим эффектам в температуре и других измеряемых величинах. В некоторых публикациях, начиная с [Howard, 1820], авторы пытаются объяснять происхождение полумесячного синодического сигнала за счет суперпозиции лунных и солнечных гравитационных приливов, однако отметим, что такая интерпретация объясняет лишь появление полумесячной огибающей сигнала с полусуточной несущей частотой. Для преобразования этого колебания в синусоидальное колебание с полумесячной частотой требуется нелинейный механизм, подобный демодулятору в радиотехнике.

Статистическая взаимозависимость аргументов  $LT_L$  и  $\nu$  для зимнего сезона, как показывает рис. 1 (б), значительно слабее, и это дает возможность разделения суточного и месячного синодического приливов, а полусуточного – от полумесячного синодического прилива. Существует также статистическая взаимозависимость лунной фазы  $\nu$  и лунного

склонения  $\delta_L$  (эта зависимость противоположна зимой и летом) [Dalin et al., 2006]. Для летнего сезона она показана на рис. 2. Каждая точка на нем соответствует паре полуночных значений  $v$  и  $\delta_L$  для определенной ночи, взятой для анализа, а вся совокупность точек – полному набору анализируемых летних ночей из многолетнего периода 2000–2013 гг. Из него видно, что если существует какая-либо зависимость от фазы Луны, то такая зависимость может быть интерпретирована изменениями в склонении Луны, и наоборот. Такой же смысл имеют рис. 3 (для летнего сезона) и рис. 4 (для зимнего сезона), но для переменных лунная фаза – лунное склонение. Они показывают сильную неоднородность массива точек по этим переменным при значениях расстояния от Земли до Луны близких к перигейным [Dalin et al., 2006]. В связи с такой неоднородностью совокупности точек по лунным аргументам возможна взаимная маскировка компонент прилива. Чтобы исключить ее, необходимо выполнить, во-первых, многомерный регрессионный анализ, и, во-вторых, проверку каждой значимой гармоники на различных вариантах списка аргументов и различных многомерных интервалах изменения аргументов с целью выявить и исключить возможное паразитное влияние этой неоднородности. Так, при анализе гармоники с полусинодическим периодом необходимо проверить, не вызвана ли она полусинодической неоднородностью совокупности точек при расстояниях до Луны меньших 58 земных радиусов (см. рис. 3) [Dalin et al., 2006]. Это можно сделать пробным исключением из статистики всех точек с такими расстояниями. В результате получается, что для полноценной проверки статистических результатов не достаточно раз и навсегда установленного списка лунных аргументов и границ их изменения. Для каждой проверяемой гармоники нужно проводить несколько вариантов расчетов.

## 5. Метод анализа

Для нахождения вклада различных компонент лунного прилива в характеристики излучающего гидроксильного слоя и серебристых облаков использовался стандартный линейный многомерный регрессионный анализ, позволяющий найти соответствующие коэффициенты регрессии и их статистические погрешности с заданной вероятностью. Возможное влияние взаимозависимости аргументов проверялось. При поиске полусуточных, полумесячных и других составляющих лунного прилива учитывалось возможное запаздывание по фазе отклика на лунное воздействие. Поэтому вычисление коэффициентов регрессии для всех описанных выше колебательных компонент прилива осуществлялось одновременно для зависимости от косинуса и от синуса, а затем вычислялась фаза запаздывания для наибольшей амплитуды отклика.

Практика выявления слабых сигналов показывает, что для наилучшего результата и

повышения статистической значимости необходимо предварительно исключить из анализируемого ряда все посторонние эффекты, не связанные с искомым влиянием. При расчетах опробовалось несколько различных фильтраций. Индекс  $A$  для фильтрации исходных временных рядов означает исключение среднемноголетних вариаций в течение суток и сезона, а также средних значений за каждый сезон (обусловленных посторонними процессами межгодовой изменчивости). Индекс  $B$ , используемый только для фильтрации гидроксильной температуры, означает дополнительно исключение из рядов температуры вертикальных смещений гидроксильного слоя, отображаемых переменной  $I_{79}$  (подобная методика обоснована в [Pertsev et al., 1999]). Кроме того, для некоторых переменных использовалось исключение точек с очень большими и очень малыми значениями.

## 6. Результаты анализа

### 6.1. Зимний излучающий слой гидроксила

Зимний гидроксильный слой оказался подверженным влиянию как полумесячного, так и (в меньшей степени) полусуточного прилива. Соответствующие коэффициенты регрессии (КР) приведены в табл.1. Для сопоставления найденных гармоник с полным характерным разбросом исследуемых величин указаны также стандартные отклонения (СтО) последних. Исключение областей сильной взаимозависимости аргументов (табл.2) и, кроме этого, сильно выпадающих значений  $I_{79}$  (табл.3) заметно влияют на результаты анализа. Окончательно принимаемый результат содержится в табл.3. Он показывает, что для зимней температуры гидроксильного слоя значимыми являются полумесячный зональный (тропический) и полумесячный синодический приливы, а для индекса  $I_{79}$  - полусуточный прилив. Такое различное поведение двух характеристик излучающего слоя ОН, по-видимому, вызвано тем, что вторая из них определяется вертикальными смещениями этого слоя, вызванных изменениями профиля концентрации атомарного кислорода. Полусуточный прилив в меньшей степени (со значительно меньшей вероятностью значимости) проявляется в гидроксильной температуре из-за ее осреднения по толщине излучающего слоя ОН.

Как уже отмечалось в разделе 4, происхождение полумесячного синодического колебания в атмосферных данных может происходить за счет двух разных механизмов – за счет полумесячной синодической модуляции общего множителя  $R_L^{-3}$  солнечным притяжением и/или за счет нелинейной демодуляции полумесячной огибающей сигнала с полусуточной несущей частотой. Результаты анализа температурных данных вполне определенно отвергают первый из этих механизмов. Несмотря на то, что даже после исключения данных с

$R_L < 58$  з.р. значения  $R_L$  все еще содержат в используемом массиве точек значимое полумесячное синодическое колебание, исключение или добавление в список аргументов величины  $R_L^{-3}$  практически не меняет амплитуд и фаз значимых колебаний в зимней температуре гидроксильного слоя, найденных в табл. 3. Что же касается возможного механизма осуществления демодуляции, то им может быть квадратичная нелинейность. Если сумма синусоид с солнечным полусуточным периодом 12 часов и лунным полусуточным периодом 12 ч 25 мин 14 с возводится в квадрат, в результате возникает сумма синусоид с новыми периодами  $\infty$ , 6 ч, 6 ч 06 мин, 6 ч 13 мин и 14.77 сут. Последний из перечисленных периодов как раз и соответствует лунному полумесячному синодическому колебанию.

И полумесячное зональное, и полумесячное синодическое колебание в температуре зимнего гидроксильного слоя весьма заметны по величине: и то, и другое дают полный размах колебания около 5 К, что вполне сопоставимо с регулярным изменением температуры в суточном цикле [Kopp et al., 2015].

## **6.2. Летний излучающий слой гидроксила**

Анализ лунных приливов в характеристиках летнего излучающего гидроксильного слоя проводился аналогично, за исключением того, что в список аргументов включался лишь один из двух аргументов,  $LT_L$  или  $\nu$ , поскольку лунный полусуточный и полумесячный синодический приливы, как указывалось выше, для летних условий становятся статистически неразличимы. Ниже приводится табл.4 результатов для летнего гидроксильного слоя, где по аналогии с табл.3. из анализа исключены области сильной взаимозависимости аргументов и, кроме этого, сильно выпадающие значения аргументов. Из-за того, что летом точек в несколько раз меньше, поскольку ночи более короткие, чем зимой, а каждая точка соответствует часовому осреднению гидроксильных измерений, ошибки для летних КР больше, и уровень значимости дается для вероятности 90%.

Как и для зимнего сезона, значимый эффект для полумесячного зонального прилива в температуре и значимый эффект в индексе  $I_{79}$  удается получить только после исключения точек с  $R_L < 58$  з.р. и сильно отскакивающих по температуре и по индексу  $I_{79}$ . И зимой, и летом полумесячный зональный прилив, управляемый склонением Луны, обнаруживается в температуре гидроксильного слоя и не обнаруживается в индексе  $I_{79}$ , причем для летней температуры соответствующая амплитуда примерно вдвое меньше и противоположного знака, чем для зимней. Летний полумесячный синодический (если его не интерпретировать как полусуточный) прилив в температуре оказывается втрое слабее зимнего полумесячного синодического и примерно в противофазе с последним, то есть также действующим противоположно. Температура гидроксильного слоя увеличивается зимой и уменьшается

летом при приближении Луны к склонению, равному нулю, и к фазам  $\sim -45^\circ$  и  $135^\circ$  (середины между сизигием и предшествующей ему квадратурой). Как и для зимнего сезона, летом в индексе  $I_{79}$  обнаруживается одна значимая гармоника, которую в отличие от зимней полусуточной можно интерпретировать и как полусуточную, и как полумесячную синодическую. Отметим, что при первой из двух интерпретаций амплитуды и фазы зимой и летом близки, но этого факта вряд ли достаточно для гарантии правильности выбора.

Результат для температуры зимнего и летнего гидроксильного слоя может быть сопоставлен с результатом вычисления текущих (скользящих по времени) спектров зимней и летней температуры [Шпынев и др., 2014] на высоте около 85 км по данным радиометра MLS (спутник Аура). Скользящие спектры имеют значительный эпизодически возникающий локальный максимум вблизи полумесячного периода. Из четырех проанализированных лет такой максимум проявляется в 2008 и 2009 г., причем летом, как и в данной работе, заметно слабее, чем зимой. Частотный пик приходится явно на полумесячный зональный прилив (13.66 сут), а не полумесячный синодический (14.77 сут.). Это не вполне согласуется с нашими результатами: для зимней гидроксильной температуры, как уже указывалось, полумесячный зональный прилив, и полумесячный синодический прилив дают примерно одинаковую амплитуду колебаний,  $\sim 2.5$  К (см. табл.3). Однако следует отметить, что методика анализа основана на различных подходах: оценка регулярных синусоид неизменной фазовой привязки к абсолютной величине склонения в нашей работе и рассмотрение коротких цугов колебаний, демонстрируемых текущими спектрами Шпынева и др. [2014].

### **6.3. Яркость серебристых облаков**

Полусуточные /полумесячные приливы в характеристиках серебристых облаков исследуются так же, как и в предыдущем пункте. Ниже приводится табл.5 результатов для серебристых облаков, аналогичная табл. 4. Полумесячный синодический (или полусуточный) прилив оказывается значимым с вероятностью более 90% и для логарифма максимальной ночной яркости, причем реакция яркости МСО на фазу Луны идет приблизительно в противофазе с реакцией температуры гидроксильного слоя (увеличение температуры сопровождается уменьшением яркости облаков). Влияние зонального прилива на яркость МСО оказывается не значимым, хотя знак этого влияния и здесь противоположен знаку влияния на температуру.

## **7. Выводы**

1. Впервые предпринят одновременный поиск и получены согласованные результаты по лунным полумесячным зональным приливам, лунным полумесячным синодическим и лунным полусуточным приливам в данных по яркости серебристых облаков, данных по летнему и зимнему гидроксильному излучению на основе многомерного регрессионного анализа.

2. Для зимнего гидроксильного слоя различные гармоники лунного приливного потенциала статистически значимы для гидроксильной температуры  $T_{OH}$  и отношения  $I_{779}$  интенсивностей двух полос гидроксила. В первой из них обнаружено влияние полумесячного зонального и полумесячного синодического приливов. Отношение  $I_{779}$  показывает присутствие лунного полусуточного прилива.

3. Те же гармоники статистически значимы (с несколько меньшей вероятностью, 90%) и для летнего гидроксильного слоя, при этом полумесячный синодический и полусуточный прилив не различимы (являются взаимно-маскирующими гармониками).

4. Для летнего гидроксильного слоя наиболее правдоподобна такая интерпретация взаимно-маскирующих гармоник, которая совпадает с результатами для зимнего гидроксильного слоя. При этом температура гидроксильного слоя увеличивается зимой и уменьшается летом при приближении Луны к нулю склонения и к фазам  $\sim -45^\circ$  и  $135^\circ$  (середина между сизигией и предшествующей ему квадратурой).

5. Яркость серебристых облаков показывает лишь одну значимую лунную гармонику – полумесячный синодический либо полусуточный прилив. Этот сигнал оказывается приблизительно противофазным с температурой гидроксильного слоя - уменьшению температуры соответствуют более яркие МСО, что вполне естественно, поскольку меньшие температуры соответствуют большим относительным влажностям окружающего воздуха, способствующим конденсации, что ведет к росту ледяных частиц и, соответственно, яркости облаков.

6. Устойчивые статистически значимые результаты удалось получить только после исключения точек с малым расстоянием до Луны (меньшим 58 з.р.), где плотность числа точек подвержена сильным полумесячным вариациям, а также экстремально больших и малых значений исследуемых величин.

7. Впервые рассмотрены два возможных механизма возникновения лунного полумесячного синодического колебания – через полумесячную синодическую модуляцию расстояния от Земли до Луны и через демодуляцию полумесячной огибающей сигнала с полусуточной несущей частотой. На основе статистического анализа температуры гидроксильного слоя показано, что первый из этих механизмов не дает заметного вклада в

результат. Указан вероятный путь осуществления демодуляции – квадратичная демодуляция (возведение в квадрат суперпозиции исходных синусоид).

Кроме исследованных полумесячных и полусуточных приливов, изучаемые временные ряды содержат также лунные суточные и месячные приливы, влияние которых будет исследовано в другой работе.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №15-05-04975а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.:Юнити-Дана. 573 с. 2004.
- Кропоткина Е.П., Шефов Н.Н. Влияние лунных приливов на вероятность появления серебристых облаков // Известия АН СССР. ФАО. Т. 11. № 11. С. 1179-1181. 1975.
- 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.
- Ромейко В.А., Перцев Н.Н., Далин П.А. Многолетние наблюдения серебристых облаков в Москве: база данных и статистический анализ // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 42. № 5. С. 702-707. 2002.
- Семенов А.И., Баканас В.В., Перминов В.И., Железнов Ю.А., Хомич В.Ю. Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли в ближней инфракрасной области // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 3. С. 407–414. 2002.
- Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. С-Пб.: Гидрометеиздат. 380 с. 2002.
- Чепмен С., Линдзен Р. Атмосферные приливы. М.: Мир. 293 с. 1972.
- Шефов Н.Н. Некоторые свойства гидроксильного излучения/ Полярные сияния и свечение ночного неба. № 13. Ред. Красовский В.И. М.: Наука. С. 37-43. 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 Аэрномия. Т. 54. № 4. С. 540-552 2014.
- Dalin P. A., Pertsev N. N., Romejko V. A. Significance of Lunar Impact on Noctilucent Clouds // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 14. P. 1653-1663. 2006.

- Egedal J.* The tides of the upper atmosphere and the heights of meteors // *Nature*. V.124. № 3137. P. 913-914. 1929.
- Gadsden, M., Schröder W.* Noctilucent clouds. Berlin, Heidelberg, New York.:Springer-Verlag, 165 p. 1989.
- Howard, L.* The climate of London, deduced from meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis, V. 2. London: Harvey and Darton, 163 p., 1820.
- Kopp M., Gerding M., Höffner J., Lübken F.-J.* Tidal signatures in temperatures derived from day-light lidar soundings above Kühlungsborn (54°N, 12°E)// *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* doi:10.1016/j.jastp.2014.09.002, 2015.
- Montenbruck O., Pflieger T.* Astronomy on the personal computer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 300 p. 2000.
- Pertsev N. N., Perminov V. I., Lowe R. P., DeSerranno R.* Effect of Vertical Motion of the hydroxyl Nightglow Layer on the observed variation of rotational temperature // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. V.1. № 3, P. 259-265. 1999.
- Pertsev N., Dalin P., Romejko V.* A lunar signal in summer nighttime tropospheric cloudiness and in Noctilucent clouds/ Proc. 18th ESA Symposium on 'European Rocket and Balloon Programmes and Related Research', Visby, Sweden, 3–7 June 2007 (ESA SP-647), P. 589-592. 2007.
- Pertsev N., Perminov V.* Response of the mesopause airglow to solar activity inferred from measurements at Zvenigorod, Russia // *Annales Geophysicae*. V. 26. № 5. P. 1049-1056. 2008.
- Pertsev N., Dalin P.* Lunar semimonthly signal in cloudiness: lunar-phase or lunar-declination effect? // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 72, doi:10.1016/j.jastp.2010.03.013, 2010.
- Pertsev N., P. Dalin, V. Perminov, V. Romejko, A. Dubietis, R. Balčiunas, K. Černis, M. Zalcik.* Noctilucent clouds observed from the ground: sensitivity to mesospheric parameters and long-term time series // *Earth, Planets and Space*. 66, doi:10.1186/1880-5981-66-98, 2014

Таблица 1. Коэффициенты линейной регрессии для оценки лунного вклада в возмущения измеряемых характеристик зимнего гидроксильного слоя области мезопаузы.

Функции → Аргументы↓	$(T_{OH})_A$ СтО=9.51	$(T_{OH})_B$ СтО=9.50	$(I_{79})_A$ СтО=0.30
Полумес. Зональный $\sin^2(\delta_L)$	КР=2±7	КР=2±7	<b>КР=-0.3±0.2</b>
Полумес. Синод. $\cos(2v - 2 \cdot F1)$	<b>КР=0.9±0.7</b> <b>F1=86°</b>	<b>КР=0.8±0.7</b> <b>F1=85°</b>	<b>КР=0.05±0.02</b> <b>F1=-44°</b>
$\sin(2v - 2 \cdot F1)$	КР=0.0±0.6	КР=0.0±0.6	КР=0.00±0.02
Полусуточный $\cos(4\pi LT_L/24h - 2 \cdot F2)$	КР=0.2±0.6	КР=0.3±0.6	КР=0.01±0.02
$\sin(4\pi LT_L/24h - 2 \cdot F2)$	КР=0.0±0.6	КР=0.0±0.6	КР=0.00±0.02

Примечание: Ошибки КР соответствуют вероятности 95%. Значимые с этой вероятностью КР выделены. Число точек - 2139. Параметры регрессионного анализа, -  $F1$  для полумесячного синодического колебания,  $F2$  для полусуточного колебания, - управляют положением максимума гармоник  $\cos(2v - 2 \cdot F1)$  или  $\cos(4\pi LT_L/24h - 2 \cdot F2)$  на оси  $v$  или  $LT_L$ . Для значимых гармоник значения  $F1$  и/или  $F2$ , дающие наилучшую регрессию, указаны.

Таблица 2. То же самое, но для укороченной базы данных (точки с  $R_L < 58$  з.р. исключены).

Функции → Аргументы↓	$(T_{OH})_A$ СтО=9.44	$(T_{OH})_B$ СтО=9.44	$(I_{7/9})_A$ СтО=0.30
Полумес. Зональный $\sin^2(\delta_L)$	<b>KP= -18±8</b>	<b>KP= -19±8</b>	<b>KP=-0.257±0.254</b>
Полумес. Синод. $\cos(2v - 2 \cdot F1)$	<b>KP=1.9±0.7</b> <b>F1=-45°</b>	<b>KP=1.9±0.7</b> <b>F1=-43°</b>	<b>KP=0.026±0.023</b> <b>F1=3°</b>
$\sin(2v - 2 \cdot F1)$	KP=0.0±0.7	KP=0.0±0.7	KP=0.00±0.02
Полусуточный $\cos(4\pi LT_I/24h - 2 \cdot F2)$	KP=0.1±0.6	KP=0.2±0.6	KP=0.017±0.020 <b>F2=-47°</b>
$\sin(4\pi LT_I/24h - 2 \cdot F2)$	KP=0.0±0.6	KP=0.0±0.6	KP=0.00±0.02

Примечание: Число точек - 1738.

Таблица 3. То же самое, но дополнительно исключены точки, отклонение которых от среднего превышает 3 СтО.

Функции → Аргументы↓	$(T_{OH})_A$ СтО=9.44	$(T_{OH})_B$ СтО=9.44	$(I_{7/9})_A$ СтО=0.30
Полумес. Зональный $\sin^2(\delta_L)$	<b>KP= -20±8</b>	<b>KP= -24±8</b>	KP=-0.1±0.2
Полумес. Синод. $\cos(2v - 2 \cdot F1)$	<b>KP=2.2±0.7</b> <b>F1=-46°</b>	<b>KP=2.5±0.8</b> <b>F1=-46°</b>	KP=-0.17±0.24
$\sin(2v - 2 \cdot F1)$	KP=0.0±0.7	KP=0.0±0.7	KP=-0.00±0.18
Полусуточный $\cos(4\pi LT_I/24h - 2 \cdot F2)$	KP=0.2±0.6	KP=0.3±0.6	<b>KP=0.022±0.018</b> <b>F2=13°</b>
$\sin(4\pi LT_I/24h - 2 \cdot F2)$	KP=0.0±0.6	KP=0.0±0.6	KP=0.00±0.02

Примечание: Число точек меняется в зависимости от столбца и заключено в пределах 1724-1731.

Таблица 4. Коэффициенты линейной регрессии для оценки лунного вклада в возмущения измеряемых характеристик летнего гидроксильного слоя области мезопаузы.

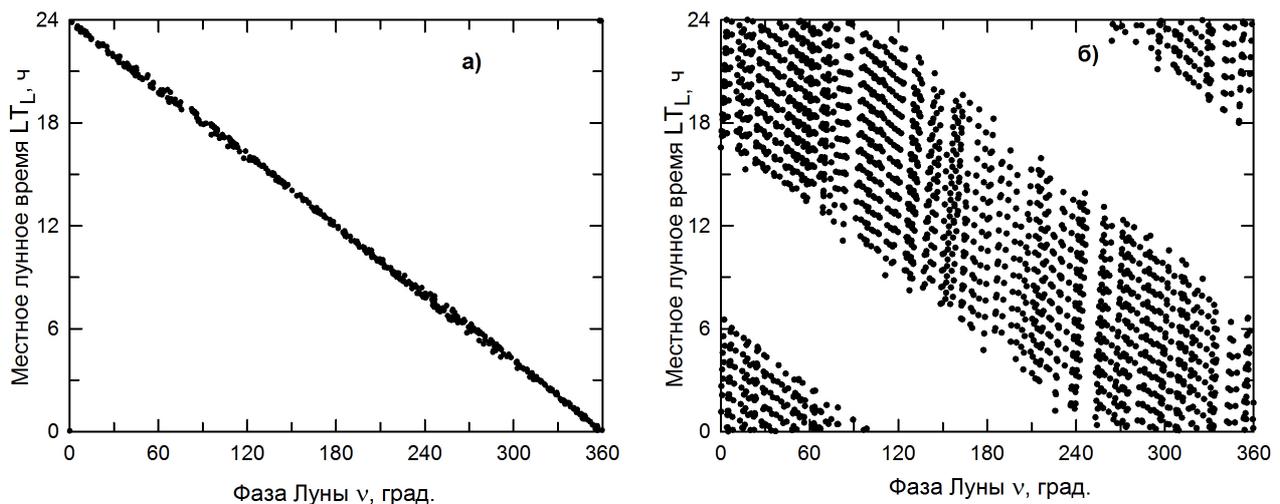
Функции → Аргументы↓	$(T_{OH})_A$ СтО=5.7	$(T_{OH})_B$ СтО=5.7	$(I_{7/9})_A$ СтО=0.26
Полумес. Зональный $\sin^2(\delta_L)$	<b>КР=11±9</b>	<b>КР=11±9</b>	КР=-0.2±0.3
Полумес. Синод. $\cos(2v - 2 \cdot F)$	КР=0.78±0.80 $F=56^\circ$	<b>КР=0.78±0.77</b> $F=50^\circ$	<b>КР=0.034±0.030</b> $F=10^\circ$
$\sin(2v - 2 \cdot F)$	КР=0.0±0.8	КР=0.0±0.8	КР=0.00±0.03

Примечание: Ошибки КР соответствуют вероятности 90% . Значимые с этой вероятностью КР выделены. Исключены точки с  $R_L < 58$  з.р. и для каждой из исследуемых функций дополнительно исключены точки, отклонение которых от среднего превышает 2 СтО. Число точек меняется в зависимости от столбца и заключено в пределах 324-330.

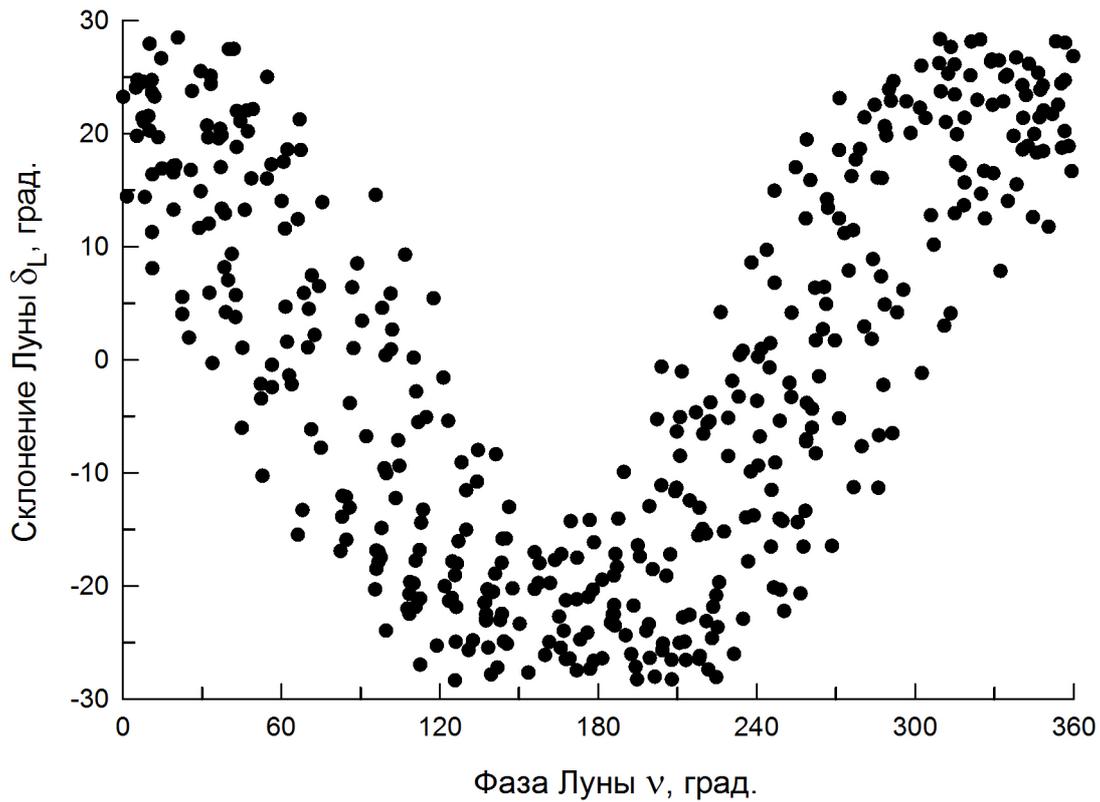
Таблица 5. Коэффициенты линейной регрессии для оценки лунного вклада в возмущения яркости серебристых облаков.

Функции → Аргументы↓	Логарифм (натур.) максимальной ночной яркости в баллах СтО=0.52
Полумес. Зональный $\sin^2(\delta_L)$	КР= $-0.5 \pm 1.0$
Полумес. Синод. $\cos(2\nu - 2 \cdot F)$	<b>КР= <math>0.091 \pm 0.086</math></b> <b><math>F = -24^\circ</math></b>
$\sin(2\nu - 2 \cdot F)$	КР= $0.00 \pm 0.07$

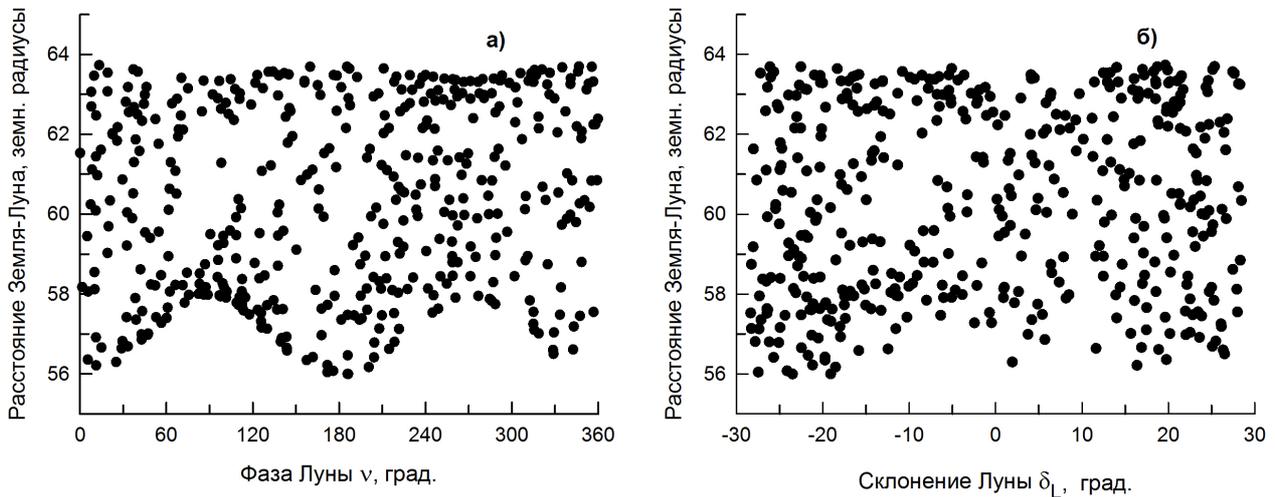
Примечание: Ошибки КР соответствуют вероятности 90%. Значимые с этой вероятностью КР выделены. Исключены точки с  $R_L < 58.15$  з.р. и, кроме того, исключены все точки с очень малой (<1 балла) максимальной ночной яркостью. Число точек 490.



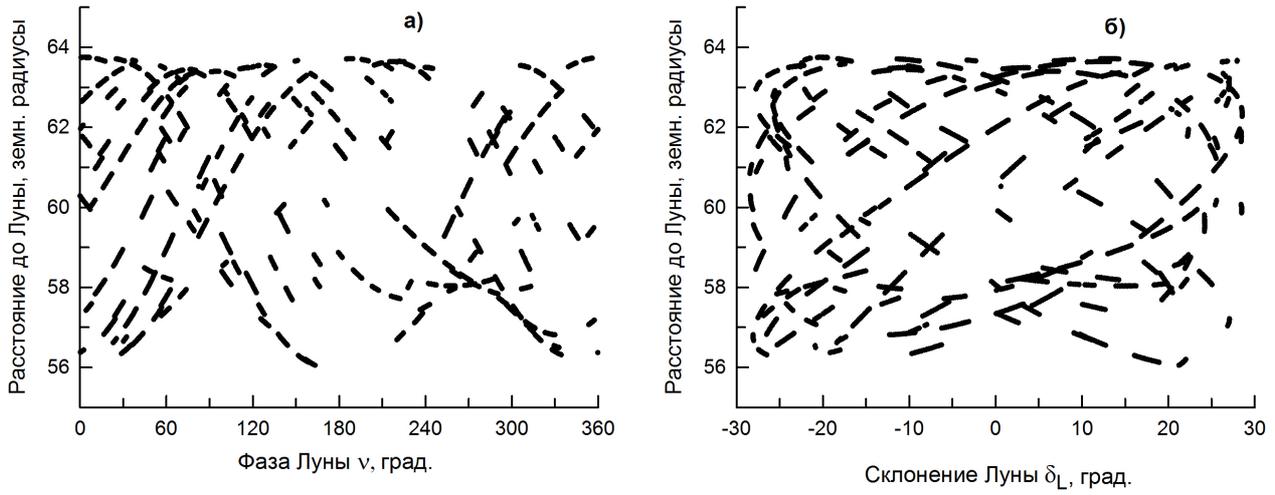
**Рис. 1.** Статистическая взаимозависимость между двумя аргументами,  $LT_L$  и  $\nu$ , описывающими положение Луны, на примере многолетних (2000-2013) гидроксильных наблюдений на ЗНС, в летний(а) и зимний (б) сезоны. Каждая точка соответствует продолжительности измерений  $\pm 0.5$  ч от выбранного момента времени, который в летний сезон совпадал с местной полночью, а в зимний сезон принимал разные значения до  $\pm 6$  ч от полуночи.



**Рис. 2.** Статистическая взаимозависимость между лунной фазой и лунным склонением для летнего сезона. Рисунок построен для тех же данных, что на рис. 1(а).



**Рис. 3.** Статистическая взаимозависимость между расстоянием от Земли до Луны и лунной фазой (а)/ лунным склонением (б) для летнего сезона. Рисунок перестроен для тех же данных, что на рис. 1.(а). Расстояние до Луны в диапазоне 58-64 земных радиусов не зависит ни от фазы, ни от склонения Луны. Однако, когда Луна близка к перигею (56-58 з.р.), расстояние до Луны сильно зависит как от фазы, так и от склонения Луны [Dalin et al., 2006].



**Рис. 4.** То же самое, что на рис. 3, но для зимнего сезона. Разница между точками на рис. 3 и черточками на этом рисунке соответствует разнице в продолжительности измерений (длине ночи) во время летних и зимних гидроксильных измерений.