

Значимость влияния Луны на серебристые облака^A

П. А. Далин (1), Н.Н. Перцев (2), В.А. Ромейко (3)

- (1) Шведский институт космической физики, Vox 812, SE-981 28 Кируна, Швеция
 (2) Институт физики атмосферы им. Обухова, Пыжевский пер. 3, Москва, 119017, Россия
 (3) Московская ассоциация наблюдателей серебристых облаков, Москва, Россия

1. Введение

Серебристые облака (СО) - самые высокие облака в атмосфере Земли, образующиеся на высотах 80-85 км. Эти облака представляют собой изумительное оптическое природное явление, которое можно наблюдать только в ночное время и только в летние месяцы (май - сентябрь). Широтный диапазон 50-65 град. северной полушария лучше всего подходит для наблюдений СО с земной поверхности. СО появляются на сумеречном сегменте между 22 и 4 часами местного времени. Структура СО подобна структуре перистых облаков, но первые представляют значительно более интенсивные и сложные образования с признаками волновой активности.

Объяснение вариаций в частоте появления СО и их яркости остается главной задачей для исследователей. Данные вариации носят как долгопериодический, так и короткопериодический характер.

К долгопериодическим атмосферным процессам, влияющим в определенной степени на формирование и динамику СО, относятся планетарные атмосферные волны с характерными периодами 2, 5, 10, 16 дней. Солнечная активность с периодом 10.4 ± 0.2 года составляет заметный вклад в декадные вариации СО. Однако, в настоящее время существует много вопросов о прямом или косвенном влиянии Солнца на серебристые облака и полного понимания данной связи пока что нет. Исследованию влияния атмосферных планетарных волн и солнечной активности на СО уделено не мало сил и времени научным сообществом. Читателю можно рекомендовать следующую литературу по данной теме: Васильев, 1967; Gadsden, 1985; Sugiyama и др., 1996; Thomas and Olivero, 2001; Kirkwood and Stebel, 2003; Merkel и др. 2003; DeLand и др., 2003; Romejko и др., 2003;

Другой вид волн - атмосферные гравитационные волны с периодами от нескольких минут до нескольких часов - ответственны за короткопериодические вариации в частоте появления и яркости СО. Данной проблеме также уделено достаточно внимания, но и здесь нет четкого понимания как гравитационные волны различных масштабов воздействуют на СО, разрушают ли их или усиливают. Можно рекомендовать следующую литературу по данной теме: Witt, 1962; Grishin, 1967; Turco и др., 1982; Jensen and Thomas, 1994; Klostermeyer, 1998; Rapp и др., 2002; Dalin и др., 2004.

Солнечные атмосферные термические приливы - следующий сильный фактор, влияющий на вариации СО в течение дня (Jensen и др., 1989; Klostermeyer, 1998). Так, например, показано, что солнечные полусуточные приливы приводят к двум максимумам в яркости СО

^A Сокращенный перевод статьи P. A. Dalin, N. N. Pertsev, V. A. Romejko. Significance of Lunar Impact on Noctilucent Clouds (Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, V. 68, N 14, P. 1653-1663)

около 7 и 19 часов местного времени (von Zahn и др., 1998; Klostermeyer, 2001).

Кроме солнечных термических атмосферных приливов, лунные атмосферные гравитационные приливы также имеют определенное влияние на состояние мезопаузы, области атмосферы, где образуются СО. Так, четко регистрируются вариации горизонтального ветра 1-4 м/с на высотах 80-105 км из-за распространения полусуточных лунных гравитационных приливов (Stening и др., 1987; Meek and Manson, 1987; Stening and Jacobi, 2001).

Первое статистическое исследование влияния лунного воздействия на вероятность появления СО было выполнено в работе Кропоткина и Шефов (1976). Авторы проанализировали временные ряды наблюдений СО в Советском Союзе и других странах, используя различные каталоги наблюдений (общее число появлений СО составило 1103 случая), в зависимости от лунного времени. Однако, данные были различного качества. В некоторых случаях, авторы использовали реальное время появлений СО, в других случаях авторы были вынуждены заменять реальное время временем, когда солнечный зенитный угол составлял 102 градуса, соответствующий максимальной вероятности появления СО, предсказанной эмпирической моделью. Согласно их пионерскому исследованию, вероятность появления СО возрастает примерно в два раза: от минимума с лунным временем 16 ± 2 часа до максимума с лунным временем 23 ± 1 час. Второй максимум и минимум в вероятности появления СО был обнаружен при лунном времени 5 ± 1 час и 9 ± 1 час, соответственно. Стоит отметить, что статистическая значимость этого эффекта не была рассмотрена в работе Кропоткина и Шефов (1976), но кажется, что статистическая значимость превысила порог 95%.

Второй статистический анализ о влиянии Луны на серебристые облака был проведен в работе Gadsden (1985) и позднее перепроверен в работе Gadsden and Schröder (1989). Авторы данной работы проанализировали каталог наблюдений СО из Шотландии за 17 лет с 1964 по 1981 год. Авторы выбрали только 192 "выдающихся" появления (то есть, яркие и большие по площади СО) и сгруппировали эти появления в зависимости от лунной фазы. Авторы обнаружили, что амплитуда суточного лунного прилива имеет значимость около 95%, тогда как амплитуда полусуточного лунного прилива значима на 99% уровне. Было найдено два максимума и два минимума в частоте появления СО: максимумы при возрасте Луны 8-9 дней и 24-25 дней; минимумы при возрасте Луны 2-3 дня и 17-18 дней.

В данной работе мы, впервые, проводим статистический анализ значимости лунного воздействия на частоту появления СО, используя однородные долговременные ряды наблюдений выполненных из одного и того же места. Впервые, мы анализируем не только зависимость СО от лунной фазы, но так же зависимости от двух других важных лунных орбитальных параметров: изменение склонения Луны и изменение расстояния Луны от Земли. Результат влияния лунной фазы на частоту появления СО сравнивается с двумя ранее найденными зависимостями, полученные в работах Кропоткиной и Шефова (1975) и Gadsden and Schröder (1989).

2. Данные используемые в работе

Мы рассматриваем Московскую базу данных наблюдений СО за период с 1962 по 2005 год. Полное детальное описание базы данных можно найти в работе Romejko и др., (2003). Здесь мы лишь коротко обозначим наиболее существенные моменты. Полное число

появлений СО составило 481, из них 25 сомнительных случаев, которые не были рассмотрены. Московская база данных включает информацию о погодных условиях за каждую ночь наблюдений, которая оказывается очень важным фактором (как будет показано ниже), влияющим на статистику появлений СО. Таким образом, мы можем отделить ночи с "плохой" погодой (то есть, полное закрытие сумеречного сегмента тропосферной облачности) от полуюсных и ясных ночей. Иначе говоря, мы можем определить, чем было вызвано отсутствие появления СО: по причине плохой погоды или из-за реального отсутствия СО в данную ночь. Полное число дежурных ночей составило 1059, из которых 393 ночи были с плохой погодой.

Орбитальные элементы движения Луны (фаза Луны, склонение Луны относительно экватора и расстояние Луны от Земли) были вычислены с помощью основ небесной механики (Montenbruck and Pfleger, 2000).

3. Теоретическое рассмотрение проблемы

Существует несколько моделей, которые используются для описания лунных приливов в нижней и верхней атмосфере (Chapman and Lindzen, 1970; Forbes, 1982a,b; Stening и др., 1997).

И Луна и Солнце создают гравитационные приливы в земной атмосфере. При этом, солнечная гравитационная приливная сила примерно в два раза слабее лунной. Лунная приливная сила описывается следующим уравнением:

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

где g - гравитационная постоянная, M_L - масса Луны, r - расстояние от центра Земли до пробной точки, D - изменяющееся расстояние Луны от Земли, θ - полярный угол между центром Луны и пробной точкой. $P_2(\cos\theta)$ - зональная гармоника степени 2, которая выражается следующим уравнением:

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

где φ - широта пробной точки, δ_L склонение Луны относительно экватора. Среднее местное лунное время равно: $\tau_L = t - v$, где t - среднее местное солнечное время, выраженное в угловых единицах, фаза Луны $v = s - h$, которая равна разнице между долготой средней Луны s и долготой среднего Солнца h .

Зональная гармоника и, соответственно, лунный приливной потенциал состоит из трех основных компонент:

- а) долговременный полумесячный лунный прилив (13.66 дней), пропорциональный $\sin^2\delta_L$, δ_L варьируется в пределах ± 28.6 град.
- б) лунный суточный прилив, пропорциональный $\cos \tau_L$, со средним лунным днем равным 24 час 50.47 мин.
- в) лунный полусуточный прилив, пропорциональный $\cos 2\tau_L$, с периодом равным примерно половине лунного дня.

Несмотря на столь громоздкое описание, лунный приливной потенциал можно описать (с достаточной степенью точности) тремя параметрами лунного орбитального движения:

изменением расстояния Луны от Земли (от 56 до 64 земных радиусов, з.р.), изменением склонения Луны относительно экватора (± 28.6 град.) и фазой Луны (от 0 до 29.53 дней).

4. Взаимосвязь между лунными параметрами

Так как наша цель - оценить вклад каждого из лунных параметров в частоту появлений СО, прежде всего, необходимо определить: являются ли лунные параметры взаимозависимыми. На Рисунке 1 представлены соотношения между фазой и склонением Луны (верхняя панель), между расстоянием и фазой Луны (центральная панель) и между расстоянием и склонением Луны (нижняя панель). Для построения использовался метод наложения эпох за период с 25 мая по 25 июля каждого года с 1962 по 2005, то есть за период наблюдений СО в Москве. Верхняя панель демонстрирует нам сильную зависимость склонения Луны от ее фазы. Этот эффект обусловлен собственными свойствами обращения Луны вокруг Земли. Мы видим, что рассеяние точек симметрично относительно полной Луны и если мы рассмотрим изменения фазы Луны от 0 до 15 дня, то распределение точек примет приблизительно линейную форму. Поэтому, если существует какая-либо зависимость от фазы Луны, то такая зависимость может быть интерпретирована изменениями в склонении Луны. Действительно, верхняя панель Рисунка 1 показывает, что очень трудно разделить фазу от склонения Луны, эти переменные имеют сильную взаимосвязь.

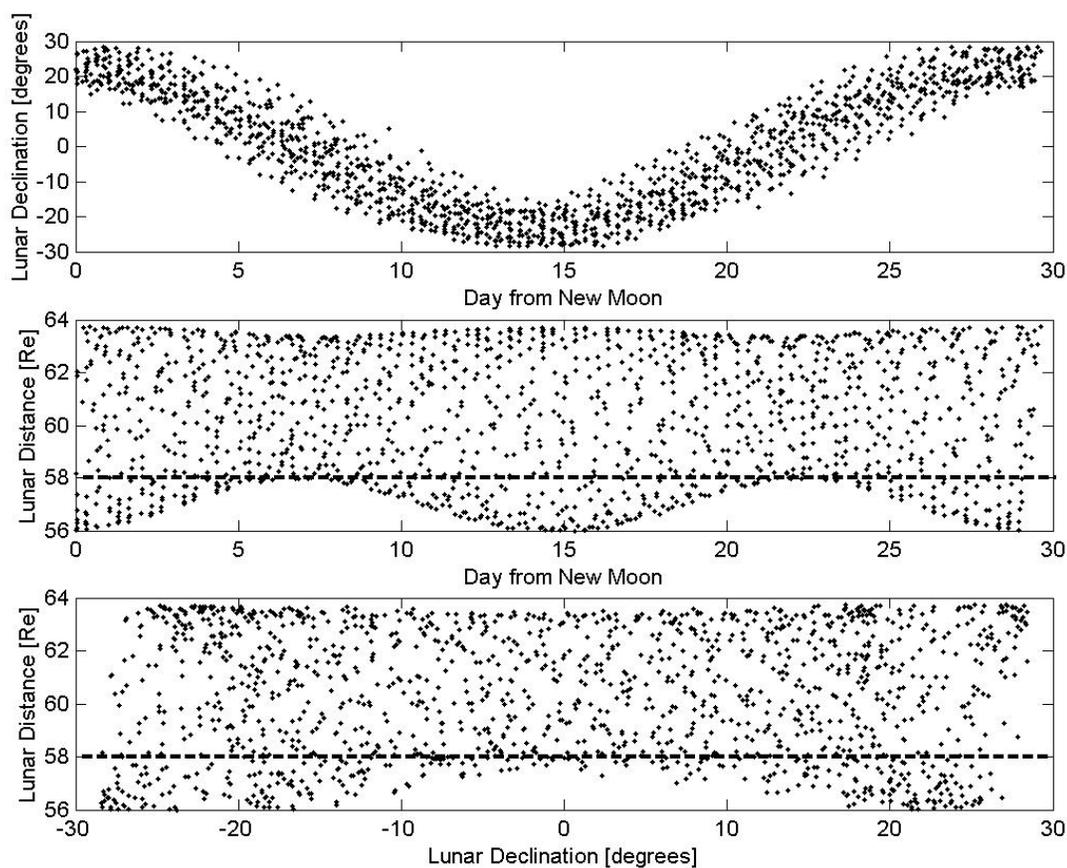


Рис.1. Взаимосвязь между лунными координатами. Верхний график – зависимость лунного склонения в градусах от лунного возраста (в днях после новолуния). Средний – расстояние до Луны (в з.р.) от лунного возраста. На нижнем – оно же от склонения Луны.

Центральная и нижняя панели Рисунка 1 показывают нам, что расстояние Луны в диапазоне 58-64 з.р. не зависит ни от фазы, ни от склонения Луны. Однако, когда Луна близка к положению перигея 56-58 з.р., расстояние Луны сильно зависит как от фазы, так и от склонения Луны. Все эти особенности лунного движения приняты во внимание в данной работе, как будет показано ниже.

5. Статистический анализ и результаты

Прежде чем мы приступим к рассмотрению влияния лунного эффекта на серебристые облака, необходимо отметить следующее. Перистые облака могут быть легко приняты за слабые СО в вечерние и утренние часы наблюдений. Кроме того, если СО наблюдаются сквозь просветы в тропосферной облачности, обычный фон сумеречного сегмента также может быть принят за слабые СО. Таким образом, слабые СО ненадежны в статистическом смысле. Вероятно по этой причине Gadsden and Schröder (1989) рассмотрели случаи только ярких и больших по площади СО.

В дополнение к статистическому аспекту существует также физическая причина отделить случаи слабых от ярких СО. Слабые серебристые облака обычно представлены единичными полосами, которые покрывают только малую часть площади сумеречного сегмента. Такие слабые полосы представляют собой среднемасштабные гравитационные атмосферные волны с горизонтальными и вертикальными длинами волн в несколько десятков км и несколько км, соответственно (Witt, 1962; Grishin, 1967; Dalin и др., 2004). При этом лунные эффекты представляют собой явления планетарных масштабов с горизонтальными длинами волн в несколько тысяч км и вертикальными длинами волн в несколько десятков км (Charman and Lindzen, 1970; Stening и др., 1987). Поэтому в данной работе мы исключаем из рассмотрения слабые СО на той основе, что они, с одной стороны, статистически плохо обоснованы, а с другой стороны из-за того, что слабые СО представляют собой атмосферные процессы, которые заведомо отличны от лунного происхождения. Число слабых СО равно 121, таким образом мы анализируем в дальнейшем только 335 случаев ярких и протяженных в пространстве серебристых облаков.

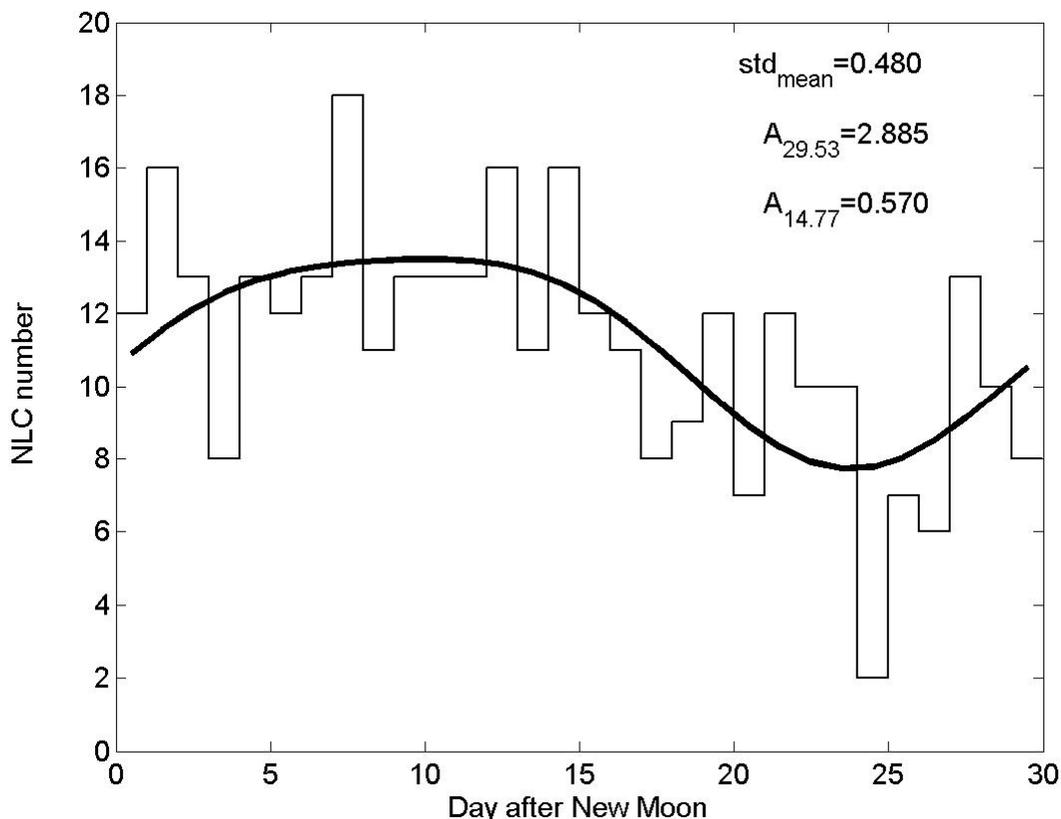


Рис.2. Распределение случаев появления СО (всего 335) наблюдавшихся вблизи Москвы с 1962 по 2005 г. по лунному возрасту. По оси абсцисс – номер дня после новолуния, в который были СО, по оси ординат – число таких случаев. Кривая показывает сумму месячной и полумесячной синусоид, найденных методом наименьших квадратов по значениям гистограммы.

Для дальнейшего анализа мы применяем метод наложения эпох, сочетаемый с методом временного доминирования. Метод временного доминирования подразумевает, что все СО условно наблюдались в 00:00 часов местного времени, то есть в фиксированное солнечное время. Такое рассмотрение приемлемо и удобно, так как в этом случае среднее местное лунное время представляет собой просто лунный фазовый угол. В свою очередь, изменение лунного фазового угла мы условно разделили на 30 интервалов (бинов). Рисунок 2 демонстрирует гистограмму зависимости числа появлений СО от фазы Луны. Поверх гистограммы построена толстая кривая линия, представляющая собой наилучшее приближение, вычисленное методом наименьших квадратов. Уравнение для этой кривой аппроксимирует число появлений СО суммой месячной (29.53 дня) и полумесячной (14.77 дней) гармоник:

$$y = 11.2 \cdot [1 + 0.26 \cos(2\pi/29.53 (d - 9.7)) + 0.05 \cos(2\pi/14.77 (d - 2.0))] \quad (3)$$

где d - число дней от новолуния. Мы применяем F-тест, чтобы определить значимость этой нелинейной модели (Daniel and Wood, 1980). Вычисленное $F(4,25)$ -отношение равно 3.98. Критическое значение статистики $F(4,25;0.01)$ на уровне значимости 0.01 равно 4.18 и значение статистики $F(4,25; 0.02)$ на уровне значимости 0.02 равно 3.55. Таким образом,

данная модель имеет 98% уровень значимости. Несмещенное стандартное отклонение для 30-ти разниц между гистограммой и кривой равно 0.480. Значимость амплитуд найденных гармоник оценивается с помощью стандартного t-теста. Амплитуда месячной гармоники равна 2.885, которое дает вычисленное t-отношение равное 6.01. Критическое значение статистики $t(25;0.01)$ на уровне значимости 0.01 равно 2.49, что дает 99% значимость амплитуды месячной компоненты. Амплитуда полумесячной компоненты равна 0.570, которое дает вычисленное t-отношение равное 1.19. Таким образом, полумесячная гармоника данного процесса статистически не значима. Процентная модуляция месячной компоненты равна 26% и кривая имеет один максимум около 10-11 лунного дня и один минимум около 24-25 лунного дня.

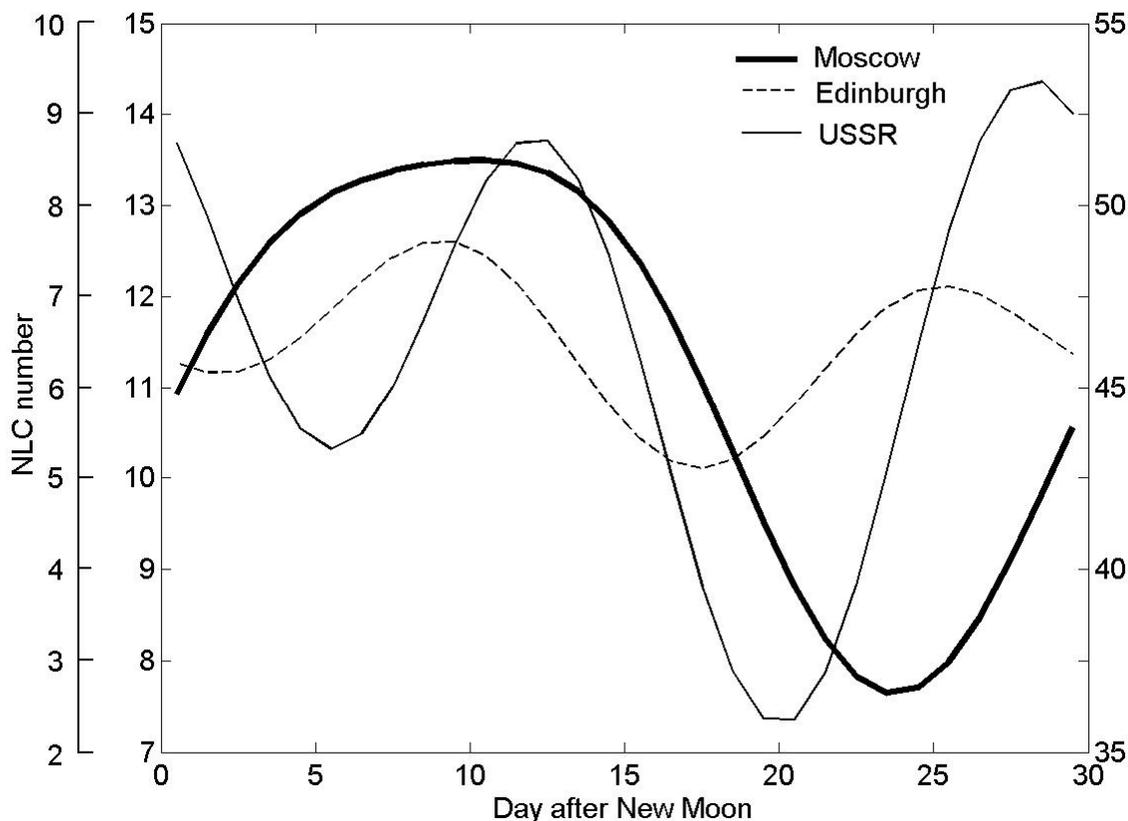


Рис.3. Такие же кривые, как жирная кривая на Рис.2, но для трех разных баз данных. Кривая на Рис.2 соответствует жирной кривой и на этом рисунке (московская база данных, средняя вертикальная шкала). Штриховой линией дан результат для Эдинбургского каталога, использованного в книге Gadsden and Schröder (1989), см. самую левую шкалу. Наконец, тонкая линия и правая шкала относятся к комбинированным данным из каталогов по СССР с добавлением данных по другим странам, согласно Кропоткиной и Шефова (1975).

Интересно сравнить полученный результат с результатами, найденными в работах Кропоткиной и Шефова (1975), и Gadsden and Schröder (1989). Рисунок 3 показывает такое сравнение (три кривых для трех различных баз данных). Видно, что все три кривые имеют схожий максимум за период 8-13 лунных дней. Однако, заметно и различие: кривые для баз данных СССР и Шотландии демонстрируют четкую полумесячную вариацию, тогда как кривая для Московской базы данных не показывает таковой. Данное различие предположительно может быть вызвано различными погодными условиями для различных

мест наблюдений. В частности, это верно для нашего случая, когда мы сравниваем наблюдения СО, выполненные из одного и того же места (Московская база данных), с коллекциями наблюдений, проведенных в различных, широко разнесенных друг от друга местах (база данных СССР и Шотландии). Значение погодного фактора демонстрируется ниже. Самый важный для нас вывод из Рисунка 3 тот, что все три базы данных показывают четкое и значимое влияние Луны на частоту появления серебристых облаков. Вклад лунного влияния составляет 10-25% от общей вариации частоты появлений СО в течение сезона наблюдений.

Из наблюдений СО хорошо известно (Romejko и др., 2003), что погодные условия должны быть приняты во внимание при рассмотрении статистики СО. Это касается, прежде всего, наблюдений, выполненных из одной и той же точки. Полное число появлений СО за сезон может зависеть не только от физического-химических процессов в мезопаузе, но также просто от числа ясных и полужасных ночей за сезон. Данное утверждение может не относиться к коллекции наблюдений, выполненных из разных мест, при котором влияние погодного фактора возможно устраняется при осреднении за большую область пространства, в которой проведены наблюдения. Мы можем оценить влияние погодного фактора, рассматривая нормированную частоту появлений СО, то есть число появлений СО нормированное на число ясных и полужасных ночей. Такой анализ можно выполнить только для Московской базы данных, в которой четко отражена информация о тропосферной облачности за каждую ночь наблюдений.

Еще одна причина, для чтобы использовать нормированную частоту появлений СО та, что Луна имеет эллиптическую орбиту: Луна вращается быстрее, приближаясь к перигею, и медленнее, проходя апогей. Это приводит к неоднородным по времени распределениям лунных параметров. На Рисунке 1 хорошо виден этот эффект. Это означает, что бины гистограммы, представленной на Рисунке 2, имеют неравные статистические веса.

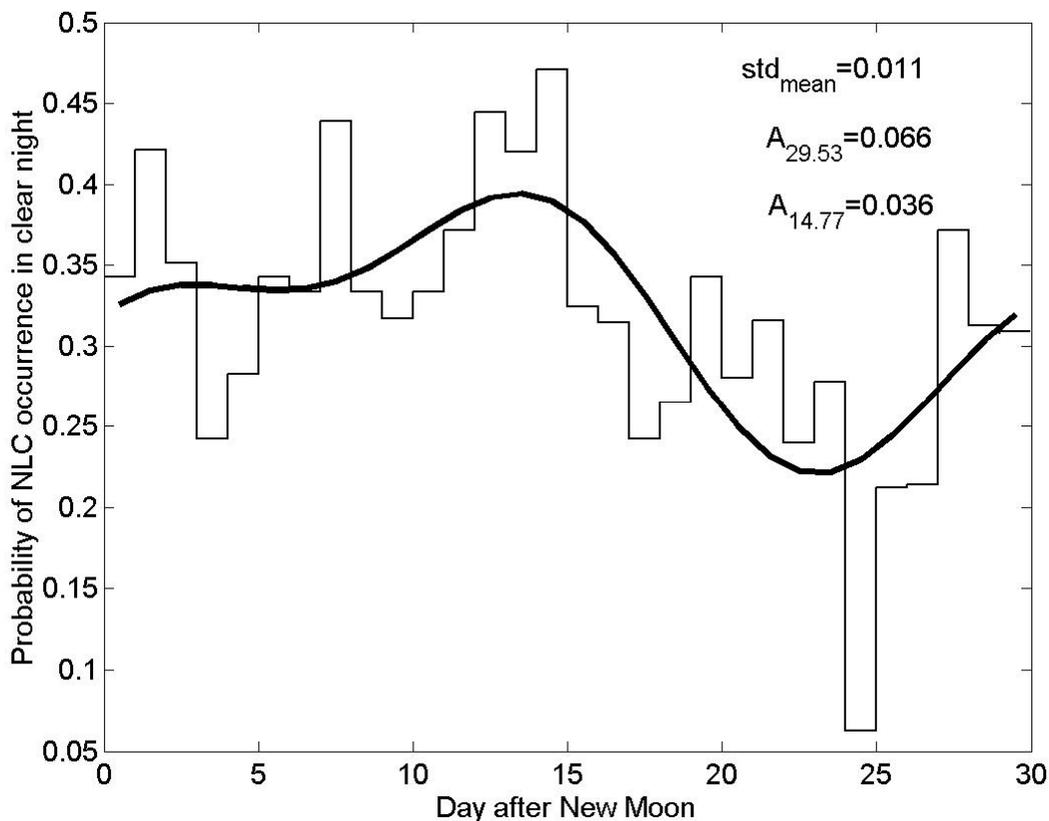


Рис.4. Почти то же, что на Рис.2, но по оси ординат не число появлений СО, а их вероятность появления в ясную ночь.

Рисунок 4 показывает нам зависимость нормированной частоты появления СО (или вероятности появления СО в ясную ночь) от фазы Луны. Толстая кривая, построенная поверх гистограммы, представляет собой наилучшее приближение, выраженное суммой месячного и полумесячного процесса, и найденное методом наименьших квадратов:

$$y = 0.32 \cdot [1 + 0.21 \cos(2\pi/29.53 (d - 10.4)) + 0.11 \cos(2\pi/14.77 (d - 0.7))] \quad (4)$$

где d - число дней от новолуния. Вычисленное $F(4,25)$ -отношение равно 4.66. Критическое значение статистики $F(4,25;0.01)$ на уровне значимости 0.01 равно 4.18. Таким образом, данная модель имеет 99% уровень значимости. Несмещенное стандартное отклонение для 30-ти разниц между гистограммой и кривой равно 0.011. Амплитуда месячной гармоники равна 0.066, которое дает вычисленное t -отношение равное 6.02. Критическое значение статистики $t(25;0.01)$ на уровне значимости 0.01 равно 2.49, что дает 99% значимость амплитуды месячной компоненты. Амплитуда полумесячной компоненты равна 0.036, которое дает вычисленное t -отношение равное 3.26. Таким образом, полумесячная гармоника данного процесса имеет также 99% уровень значимости. Процентная модуляция месячной и полумесячной компоненты равна 21% и 11%, соответственно. Кривая имеет главный максимум около 13-14 лунного дня и главный минимум около 23-24 лунного дня.

Сравнивая кривые на Рисунке 2 и 4 мы видим, что кривая Рисунка 4 имеет бóльшую статистическую значимость, чем кривая Рисунка 2. Кроме того, кривая Рисунка 4

демонстрирует нам сильную полумесячную гармонику. Также, главный максимум кривой Рисунка 4 сдвинулся вперед на 3 дня и теперь хорошо совпадает с первым максимумом (12-13 лунных дней) кривой СССР на Рисунке 3. Таким образом, мы можем сделать важный вывод: при учете погодного фактора мы получили значимую и полумесячную и месячную гармонику, что совпадает с результатами, полученные в работах Кропоткиной и Шефова (1975), и Gadsden and Schröder (1989).

Мы должны помнить о том, что фаза Луны представляет собой функцию от склонения Луны, когда применяется метод наложения эпох для коротких выборок данных (верхняя панель на Рис. 1). Поэтому полученная зависимость может быть частично объяснена в терминах полумесячной гармоники цикла лунного склонения. Отделить влияние фазы от склонения Луны не представляется возможным в данной работе.

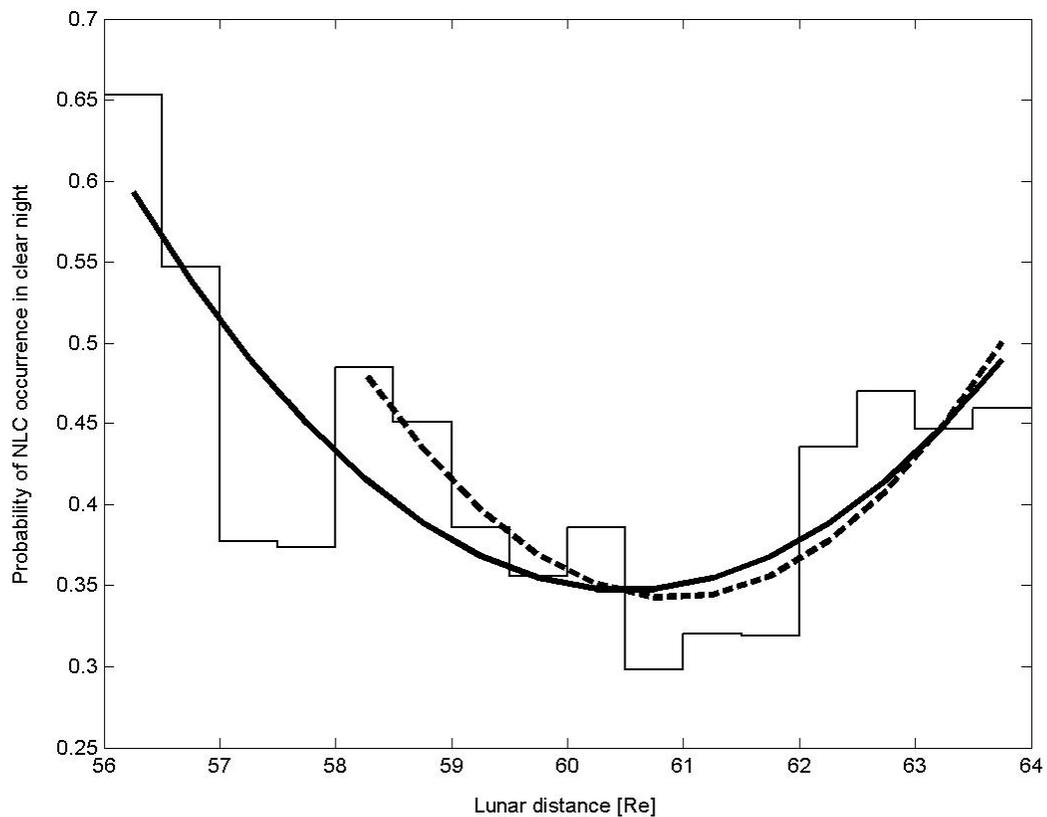


Рис.5. Почти то же, что на Рис.4, но по оси абсцисс- расстояние до Луны в з.р. Две параболических аппроксимации построены методом наименьших квадратов по значениям гистограммы, сплошная линия- для всех расстояний до Луны, прерывистая – для урезанного диапазона расстояний (58 – 64 з.р.).

Третьим важным параметром лунного движения является расстояние Луны от Земли. Влияние данного параметра на серебристые облака рассматривается впервые. Рисунок 5 показывает нам вероятность появления СО в ясную ночь в зависимости от лунного расстояния, изменяющегося в пределах от 56 до 64 з.р. Видно, что гистограмма, состоящая из 16 бинов, имеет приблизительно квадратичную форму, и мы можем попытаться описать ее квадратичной функцией. Метод наименьших квадратов дает следующее уравнение (толстая

непрерывная кривая):

$$y = 0.01x^2 - 1.7x + 50.5 \quad (5)$$

где x - расстояние между Луной и Землей. Вычисленное $F(2,13)$ -отношение равно 11.8. Критическое значение статистики $F(2,13;0.01)$ на уровне значимости 0.01 равно 6.7. Таким образом, данная квадратичная модель имеет 99% уровень значимости.

Выше мы сделали замечание о том, что лунное расстояние сильно зависит от склонения и возраста Луны, когда Луна находится близко к перигею (см. Рис. 1, центральная и нижняя панели). Действительно, мы видим особенность в гистограмме (резкий провал) на Рисунке 5 между 56 и 58 р.з. и мы можем ожидать, что этот провал связан с влиянием склонения и фазы Луны на ее расстояние в этих пределах. Чтобы исключить данные влияния, можно построить другую квадратичную функцию только для диапазона от 58 до 64 р.з. (пунктирная кривая). Уравнение данной модели следующее:

$$y = 0.02x^2 - 2.4x + 74.0 \quad (6)$$

Вычисленное $F(2,9)$ -отношение равно 10.0. Критическое значение статистики $F(2,9;0.01)$ на уровне значимости 0.01 равно 8.0. Таким образом, данная квадратичная модель также имеет 99% уровень значимости. Найденная форма зависимости (квадратичная) вероятности появления СО от расстояния кажется достаточно странной, так как расстояние между Луной и Землей изменяется как D^{-3} (см. уравнение 1). Поэтому, предполагается, что лунное влияние должно быть из другого источника, нежели чем «простой» лунный гравитационный прилив, связанный с изменением расстояния до Луны. Сейчас мы можем только сделать предположение о том, что влияние Луны может быть некоторым атмосферным процессом, который зависит от временной производной от лунного расстояния. Расстояние между Луной и Землей изменяется сравнительно медленно вблизи перигея и апогея, тогда как расстояние изменяется быстрее, когда Луна проходит промежуточные стадии своего движения. Квадратичная зависимость, показанная на Рис. 5, поддерживает данное предположение в определенной степени.

6. Обсуждение и заключение

В целом, роль лунных приливов в динамике верхней атмосферы достаточно умеренная. Вариации горизонтального ветра, обусловленные лунным полусуточным приливом, составляют **1-4 м/с** на высоте 90 км (Stening and Jacobi, 2001). Данные вариации меньше в 4-5 раз ветровых изменений, создаваемых солнечными термическими приливами. Однако, как следует из теоретического рассмотрения (Forbes, 1982a), вертикальные скорости ветра могут составлять **0.1–1 м/с** при прохождении лунного полусуточного прилива (в зависимости от широты точки наблюдения и от склонения Луны). Такие вертикальные скорости могут быть критичными в общем балансе вертикальных движений СО. Так, частицы СО с радиусом **50 нм** испытывают вертикальные движения со скоростями порядка **1 см/с** в отсутствие солнечных приливов и низкочастотных гравитационных волн (Klostermeyer, 1998). Поэтому лунное гравитационное воздействие сравнимо по величине с другими низкочастотными атмосферными процессами, и скорость оседания частиц может существенно измениться при прохождении лунного гравитационного прилива, либо даже измениться на противоположную (частицы будут подниматься).

Ночные спектрофотометрические измерения гидроксильной эмиссии в спектральном диапазоне 580-1150 нм продемонстрировали четкое влияние лунного воздействия на мезопаузу (Shefov, 1974a,b; Semenov and Shefov, 1999). Так, полумесячные лунные вариации являются наибольшими и составляют **9 К** и **0.6 км** в температуре и высоте гидроксильного слоя, соответственно. Месячные лунные вариации слабее, а полусуточные и суточные осцилляции заметно слабее полумесячных (Semenov and Shefov, 1999).

Таким образом, физическая связь между лунными приливами и серебристыми облаками может быть объяснена посредством последовательных изменений в температуре и ветре в области мезопаузы.

В дополнение к гравитационным лунным приливам, Луна может оказывать не прямое влияние на формирование серебристых облаков, например, за счет изменения притока входящих в атмосферу метеорных частиц и, следовательно, изменяя концентрацию ядер конденсации, необходимых для формирования CO (Adderley and Bowen, 1962; Bigg, 1963).

Мы показали, что фактор погоды должен учитываться в статистическом анализе наблюдений CO, выполненных по крайней мере из одной и той же точки. Анализ, который включает в себя число ясных ночей, обеспечивает лучшую статистическую оценку частоты появлений CO, нежели чем простое число появлений CO.

Выводы данной работы следующие:

- 1) Статистический анализ Московских многолетних наблюдений CO (более 40 лет), показывает, что лунные месячные и полумесячные процессы вызывают вариации в частоте появлений серебристых облаков. Некоторые результаты совершенно новые (относительно эффектов, вызванных изменениями в расстоянии от Луны до Земли), другие (влияние фазы Луны) находятся в соответствии с ранее полученными статистическими результатами.
- 2) Месячная (**29.53** дня) и полумесячная (**14.77** дней) компоненты, связанные с изменениями в фазе Луны и/или лунном склонении, вызывают модуляцию в вероятности появления CO около **20%** и **10%**, соответственно. Эти эффекты имеют **99%** уровень значимости. Суммарный эффект действия данных процессов приводит к появлению главного максимума около **13-14** лунного дня и минимума около **23-24** дня после новолуния. Этот результат хорошо совпадает с результатом, полученным в работе Кропоткиной и Шефова (1975), который показал максимум около 12-13 лунного дня и минимум около 19-21 лунного дня.
- 3) Изменения в расстоянии между Луной и Землей находят четкое отражение в частоте появлений CO. **Вероятность появления CO возрастает, когда Луна находится в перигее и апогее.** Полученная квадратичная модель имеет **99%** уровень значимости. Источник такой зависимости пока что не известен. Мы предполагаем, что это может быть атмосферный процесс, который зависит от временной производной от лунного расстояния.

Литература

Васильев О.Б., 1967, Астрофизические исследования серебристых облаков. М, АН СССР, Астросовет, с. 54-63.

Кропоткина Е.П. и Шефов Н.Н., 1975, Влияние лунных приливов на вероятность появлений серебристых облаков. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, Т. 11, № 11, С. 1179-1181.

Adderley, E.E., and Bowen, E.G., 1962. Lunar component in precipitation data. *Science* 137, 749-750.

Bigg, E.K., 1963. A lunar influence on ice nucleus concentrations. *Nature* 197, 172-173.

Chapman, S., and Lindzen, R. S., 1970. Atmospheric tides. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland.

Dalin, P., Kirkwood, S., Moström, A., Stebel, K., Hoffmann, P., Singer, W., 2004. A case study of gravity waves in noctilucent clouds. *Annales Geophysicae* 22, 1875-1884.

Daniel, C., and Wood, F.S., 1980. Fitting equations to data: computer analysis of multifactor data. John Wiley & Sons, New York.

DeLand, M. T., Shettle, E. P., Thomas, G.E., and Olivero, J. J., 2003. Solar backscattered ultraviolet (SBUV) observations of polar mesospheric clouds (PMCs) over two solar cycles. *Journal of Geophysical Research* 108, 8445, doi: 10.1029/2002JD002398.

Espy, P. J., and Witt, G., 1996. Observation of a quasi 16-day oscillation in the polar summer mesospheric temperature. *Geophysical Research Letters* 23 (10), 1071-1074.

Forbes, J. M., 1982a. Atmospheric tides 1, Model description and results for the solar diurnal component. *Journal of Geophysical Research* 87 (A7), 5222-5240.

Forbes, J. M., 1982b. Atmospheric tides 2, The solar and lunar semi-diurnal components. *Journal of Geophysical Research* 87 (A7), 5241-5252.

Gadsden, M., 1985. Observations of noctilucent clouds from North-West Europe. *Annales Geophysicae* 3, 119-126.

Gadsden, M., and Schröder, W.: Noctilucent Clouds, 165 pp., Springer-Verlag, New York, 1989.

Gadsden, M., 1998. The North-West Europe data on noctilucent clouds: a survey. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 60, 1163-1174.

Grishin N.I., 1967, Dynamical morphology of noctilucent clouds // Noctilucent clouds. Proceedings of international Symposium (Tallin, 1966), ed. by I.A.Khvostikov and G. Witt, Moscow, VINITI, P. 193-199.

Jacobi, Ch., Schminder, R., and Kürschner, D., 1998. Planetary wave activity obtained from long-period (2-18 days) variations of mesopause region winds over Central Europe (52°N, 15°E). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 60 (1), 81-93.

- Jensen, E. J., Thomas, G. E., and Toon, O. B., 1989. On the diurnal variation of noctilucent clouds. *Journal of Geophysical Research* 94 (D12), 14693-14702.
- Jensen, E. J., and Thomas, G. E., 1994. Numerical simulations of the effects of gravity waves on noctilucent clouds. *Journal of Geophysical Research* 99 (D2), 3421-3430.
- Kirkwood, S., and Stebel, K., 2003. Influence of planetary waves on noctilucent clouds occurrence over NW Europe. *Journal of Geophysical Research* 108, 8440, doi:10.1029/2002JD002356.
- Klostermeyer, J., 1998. A simple model of the ice particle size distribution in noctilucent clouds. *Journal of Geophysical Research* 103 (D22), 28743-28752.
- Klostermeyer, J., 2001. Effect of tidal variability on the mean diurnal variation of noctilucent clouds. *Journal of Geophysical Research* 106 (D9), 9749-9755.
- Manson, A. H., Meek, C. E., Luo, Y., Hocking, W. K., MacDougall, J., Riggin, D., Fritts, D. C., Vincent, R. A., 2003. Modulation of gravity waves by planetary waves (2 and 16 d): observations with the North American-Pacific MLT-MFR radar network. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 65, 85-104.
- Meek, C. E., and Manson, A. H., 1987. Middle atmosphere lunar tides at Saskatoon (52N, 107W). *Planetary and Space Science* 35 (4), 445-449.
- Merkel, A.W., Thomas, G.E., Palo, S.E., Bailey, S.M., 2003. Observations of the 5-day planetary wave in PMC measurements from the Student Nitric Oxide Explorer Satellite. *Geophysical Research Letters* 30 (4), 1196, doi:10.1029/2002GL016524.
- Montenbruck, O., and Pfleger, T., 2000. *Astronomy on the personal computer*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Rapp, M., Lübken, F.-J., Müllemann, A., Thomas, G. E., Jensen, E. J., 2002. Small scale temperature variations in the vicinity of NLC: experimental and model results. *Journal of Geophysical Research* 107, 4392, doi: 10.1029/2001JD001241.
- Romejko, V. A., Dalin, P. A., Pertsev, N. N., 2003. Forty years of noctilucent cloud observations near Moscow: database and simple statistics. *Journal of Geophysical Research* 108, 8443, doi: 10.1029/2002JD002364.
- Semenov, A.I., and Shefov, N.N., 1999. Empirical model of hydroxyl emission variations. *International J. Geomagn. Aeron.*, 1, 3, 229-242.
- Shefov, N.N., 1974a. Lunar tidal variations of hydroxyl emission. *Indian J. Radio Space Phys.* 3, 3, 314.
- Shefov, N.N., 1974b. Lunar variations of the hydroxyl emission. *Geomagnetism and Aeronomy* 14, 5, 920.

Stening, R. J., Meek, C. E., and Manson, A. H., 1987. Lunar tidal winds in the upper atmosphere (78-105 km) at Saskatoon, Canada. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44, 1143-1151.

Stening, R. J., Forbes, J.M., Hagan, M. E., and Richmond, A. D., 1997. Experiments with a lunar atmospheric tidal model. *Journal of Geophysical Research* 102, 13465-13471.

Stening, R. J., and Jacobi, C., 2001. Lunar tidal winds in the upper atmosphere over Collm. *Annales Geophysicae* 18, 1645-1650.

Sugiyama, T., Murako, Y., Sogawa, H., and Fukao, S., 1996. Oscillations in polar mesospheric summer echoes and bifurcation of noctilucent cloud formation. *Geophysical Research Letters* 23, 653-656.

Sugiyama, T., 1998. Statistical study of noctilucent cloud occurrence in Western Europe. *Proceedings of the NIPR Symposium on Upper Atmosphere Physics*, No. 11.

Thomas, G. E., and Olivero, J., 2001. Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mesosphere, *Advances in Space Research* 28 (7), 937-946.

Turco, R. P., Toon, O. B., Whitten, R. C., Keesee, R. G., and Hollenbach, D., 1982. Noctilucent clouds: simulation studies of their genesis, properties and global influences. *Planetary and Space Science* 30 (11), 1147-1181.

von Zahn, U., von Cossart, G., Fiedler, J., and Rees, D., 1998. Tidal variations of noctilucent clouds measured at 69°N latitude by ground-based lidar. *Geophysical Research Letters* 25, 1289-1292.

Witt, G., Height, structure and displacements of noctilucent clouds, 1962. *Tellus* XIV(1),1-18.