

УДК 550.388:551.524:551.590.22

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ: КОСМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ¹

© 2022 г. Н. Н. Перцев^а, *, В. И. Перминов^а, **, П. А. Далин^б, с, ***

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, Москва, 119017 Россия

^бSwedish Institute of Space Physics, Box 812, Kiruna, SE-981 28 Sweden

^сИнститут космических исследований РАН, Профсоюзная ул., д. 84/32, Москва, 117997 Россия

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

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

***e-mail: pdalin@irf.se

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.

После доработки 14.03.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

В статье обсуждаются некоторые важные результаты о лунном приливном и солнечном воздействии на характеристики области мезопаузы, полученные в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН при участии соавторов из других организаций. Рассматриваются современные подтверждения гипотезы А.И. Семенова и Н.Н. Шефова о существовании колебаний с периодом лунного синодического месяца и его половины в характеристиках области мезопаузы. Даются оценки амплитуд, найденные статистическим анализом данных измерений, предлагаются возможные механизмы генерации этих колебаний. Обсуждаются статистические результаты по воздействию солнечной активности на область мезопаузы. Показано, что влияние солнечной активности на некоторые характеристики атмосферы на межгодовом и внутрисезонном масштабах времени имеет разный знак, что свидетельствует о различных физических механизмах солнечно-земных связей, действующих в этих частотных диапазонах.

Ключевые слова: лунные приливы, полусуточный прилив, суточный прилив, синодический месяц, область мезопаузы, солнечно-земные связи

DOI: 10.31857/S0002351522040113

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические влияния на различные оболочки Земли интересовали людей еще в древние времена. Однако серьезное продвижение в их поисках с естественно-научной точки зрения стало возможным лишь тогда, когда появились долговременные ряды измерений. Эта тенденция не обошла стороной и исследователей области мезопаузы земной атмосферы (высоты 80–95 км). В настоящей статье обсуждаются наиболее заметные научные результаты в вопросе лунных и солнечных воздействий на характеристики области мезопаузы, полученные в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (далее ИФА) при активном участии соавторов из других организаций. Глубокий интерес к этой теме в Институте возник во многом благодаря работам Н.Н. Шефова и А.И. Семенова, получившими первые весьма

интересные результаты по этой теме и продолжавшими разрабатывать ее на протяжении всей жизни [1].

Хронологически изучение космического влияния на область мезопаузы начиналось в ИФА [2], как и в мировой практике [3], с поиска лунного, а не солнечного влияния. Это было связано с довольно короткими рядами данных на первом этапе измерений характеристик области мезопаузы, которые не позволяли уверенно отслеживать изменения, связанные с самыми мощными и довольно длинными (~11 лет) циклами солнечной активности. В то же время имеющиеся временные ряды охватывали большое число лунных месяцев. В настоящей статье ставится задача не перечислить все уже выделенные во временных рядах измеряемых характеристик области мезопаузы лунные и солнечные периодические или квазипериодические гармоники, а показать наиболее интересные результаты по их исследованию с точки зрения научной перспективы. В разделе 2 настоящей статьи подробно рассматривается от-

¹ Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы” (Москва, 22–23 ноября 2021 г.).

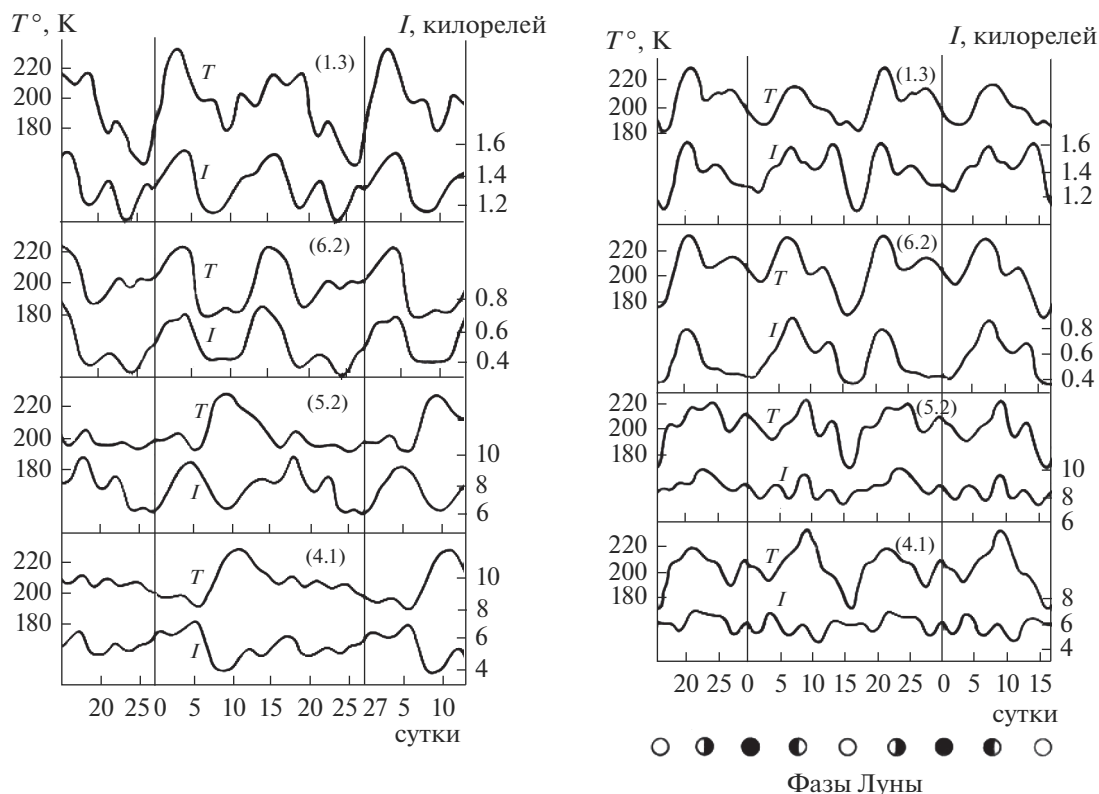


Рис. 1. Первые оценки лунных возмущений ОН-слоя [2]. Средние вариации интенсивностей (I) и вращательных температур (T) полос ОН (4–1), (5–2), (6–2) и (7–3). Слева: с периодом 27 сут, справа: в зависимости от фазы Луны.

крытие синодического месячного лунного колебания и его второй гармоники в характеристиках области мезопаузы и его последующие подтверждения, перечисляются возможные механизмы их генерации, некоторые из них указаны впервые. В разделе 3 кратко рассматривается история включения солнечных циклов в практику эмпирических моделей характеристик области мезопаузы, делается акцент на недавно открытое разнонаправленное влияние изменений солнечной активности на характеристики области мезопаузы на разных временных масштабах.

2. ОТКРЫТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ С ПЕРИОДАМИ ЛУННОГО СИНОДИЧЕСКОГО МЕСЯЦА И ЕГО ПОЛОВИНЫ

К середине 60-х годов в ИФА был накоплен материал многолетних измерений верхнеатмосферных компонентов свечения ночного неба, в том числе вращательной температуры и интенсивности различных полос гидроксидов (излучающий слой гидроксидов локализован в области мезопаузы с максимумом излучения на высоте ~ 87 км). Соответствующие ряды данных, основанные на измерениях на звенигородской базе ИФА, были проверены Н.Н. Шефовым [2] на предмет поиска лунных

влияний. Исходные временные ряды осреднялись методом наложения эпох с заданной периодичностью 27 суток (близкой к лунному сидерическому месяцу и одновременно к синодическому солнечному периоду вращения) и 29.5 суток (лунный синодический месяц). Результат осреднения [2] показан на рис. 1. Обращает на себя внимание нереалистично большая амплитуда колебаний, превышающая для температуры гидроксильного слоя 20 К. По-видимому, здесь сказался эффект коротких выборок. Доверительные интервалы и оценки статистической значимости тогда еще не вошли как обязательный инструмент в практику анализа геофизических данных. Впоследствии амплитуды, вычисляемые на более длинных выборках, были существенно понижены [4].

Нужно отметить осторожное отношение Н.Н. Шефова в [2] к своим результатам, а также аналогичным результатам зарубежных коллег [5–7] по эмиссии атомарного кислорода 558 нм. Результаты, касающиеся лунного влияния, были сформулированы не в виде окончательного вывода, а скорее как гипотеза. Тем не менее, эти ранние результаты послужили вдохновляющим примером для дальнейших поисков лунного влияния на различные характеристики области мезопаузы. В 70-е годы лунные приливные эффекты были об-

наружены в компонентах скорости ветра, измеряемой метеорным методом [8], в колебательной температуре гидроксильного излучения [9–10] и в частоте появления серебристых облаков [11].

По-видимому, основным недостатком указанных выше работ 60х–70х годов являлся интервал опроса исследуемых переменных, равный 24 ч (привязка измерений к астрономической полночи). При этом фазы Луны оказываются жестко привязанными к лунному времени, и любая N-я гармоника лунных суток (продолжающихся в среднем 24 ч 51 мин) для такой специальной выборки становится неотличимой от N-й гармоники лунного синодического месяца, продолжающегося в среднем 29.53 суток. Учитывая возможную двоякую интерпретацию полученных результатов, в [9–10] результаты в виде графиков колебаний приведены сразу на двух временных шкалах. Но, как правило, найденные результаты воспринимались как колебания с периодами, равными лунным суткам и их второй и более высоким гармоникам, поскольку именно они присутствуют в линейной модели лунных гравитационных возмущений в атмосфере [12].

Тема альтернативной интерпретации старых и новых результатов получила дальнейшее развитие у А.И. Семенова и Н.Н. Шефова в [4]. Авторы этой работы не только повторили анализ, проведенный Шефовым [2, 9] на более длительных наблюдениях, но и сравнили их с результатами, найденными ими для лунного суточного и полусуточного приливов в температуре и интенсивности гидроксильного излучения, полученными по графикам температуры и интенсивности для 15 ночей, которые были опубликованы по данным измерений на широте 32° S [13]. При анализе они обратили внимание на то, что амплитуды температуры и интенсивности в случае суперпозиции синодического месячного и лунно-суточного колебаний, а также суперпозиции синодического полумесячного и лунного полусуточного колебаний, полученные по звенигородским данным, были в несколько раз большими, чем амплитуды чисто лунно-суточных и лунно-полусуточных колебаний, определенные по данным [13].

Впервые статистически обоснованное разделение лунного полусуточного прилива и лунного синодического полумесячного колебания на одних и тех же многолетних данных по зимней температуре излучающего гидроксила (с интервалом осреднения данных 1 час), проведено в [14]. Оно подтвердило правильность гипотезы Шефова и Семенова о существовании колебаний в гидроксильной температуре с периодом половины лунного синодического месяца. Подтвердилась и субординация между амплитудами: для полумесячного колебания амплитуда была равной 2.5 ± 0.8 K (погрешность дана для вероятности 90%), для

лунного полусуточного колебания она оказалась меньше и статистически не значимой.

Получить надежный результат для лунного суточного прилива по гидроксильным температурам нельзя, поскольку продолжительность ночных измерений даже в зимний сезон не превышает или лишь немного превышает полсутки. Поэтому для одновременного нахождения колебаний с периодами лунных суток и лунного синодического месяца, а также вдвое меньшими периодами, в [15] были использованы другие данные для примерно тех же высот, где располагается гидроксильный слой. Это – круглосуточные данные по полярным мезосферным летним эхо, измеренные при помощи радара ESRAD, расположенного в северной части Швеции, г. Кируна, с интервалом осреднения 1 ч. В качестве анализируемых переменных были взяты логарифм коэффициента отражения зондирующих радиоволн и компоненты скорости ветра на высоте отражения. Полученные в [15] результаты для амплитуд изучаемых колебаний в соответствующих многолетних временных рядах приведены в табл. 1. Из нее видно, что амплитуды четырех изучаемых колебаний одного порядка величины, и для логарифма коэффициента отражения амплитуда месячного и полумесячного колебания превышает амплитуду лунно-суточного и лунно-полусуточного.

Амплитуды вычислялись в [15] методом множественного регрессионного анализа. При этом принимались специальные меры против возможных интерференций со стороны основных приливных гармоник. Так, например, благодаря статистической взаимосвязи между фазами лунного синодического месяца и склонением Луны, которое отвечает за зональный прилив с периодом 13.66 сут. (см. [14]), можно предполагать выделение фиктивных колебаний с периодом половины синодического месяца, наведенное зональным приливом. Для исключения таких наводок все возможные компоненты прилива, которые могли бы их генерировать, вычислялись и выделялись одновременно.

Таким образом, и для периода 29.53 сут., и для его второй гармоники гипотеза Шефова и Семенова о существовании лунно-синодического колебания подтвердилась.

Как отмечалось выше, линейная теория лунных гравитационных приливов в атмосфере не предсказывает существование этих двух компонентов в спектре. В настоящее время можно наметить лишь возможные механизмы их генерации. Что касается лунного синодического полумесячного прилива, два механизма их генерации уже рассматривались в [14]. Это малоэффективный механизм, основанный на модуляции расстояний до Луны в синодическом полумесячном цикле и нелинейный механизм квадратичной де-

Таблица 1. Рассчитанные в [15] амплитуды различных лунных приливных колебаний в данных по полярным мезосферным летним эхо

Период рассматриваемого колебания	Анализируемые переменные		
	Логарифм коэффициента отражения	Зональный компонент скорости ветра, м/с	Меридиональный компонент скорости ветра, м/с
Лунный синодический месяц	0.053 ± 0.016	0.4 ± 0.5	1.3 ± 0.6
Половина лунного синодического месяца	0.039 ± 0.016	0.4 ± 0.5	0.3 ± 0.5
Лунные сутки	0.023 ± 0.016	0.7 ± 0.5	1.0 ± 0.5
Половина лунных суток	0.021 ± 0.016	1.1 ± 0.5	0.5 ± 0.5

Примечание. Погрешности даны для вероятности 95%.

модуляции, основанный на перемножении двух суперпозиций колебаний с периодами солнечного полусуточного и лунного полусуточного приливов. Квадратичные составляющие уравнений гидродинамики производят демодуляцию биеений между солнечным полусуточным и лунным полусуточным приливами, генерируя две новых синусоиды с суммой и разностью частот. Еще одним эффективным механизмом в генерации полумесячного синодического колебания может быть другой вариант нелинейной генерации (повидимому, впервые здесь предлагаемый), — перемножение двух суперпозиций колебаний с периодами весьма заметного лунного зонального прилива с периодом 13.66 сут и полугодового прилива с периодом 182.625 сут.

Аналогичные механизмы можно рассматривать и для генерации месячного синодического прилива, но при удвоении всех действующих периодов. Однако для первого механизма модуляция расстояний до Луны синодическим месячным колебанием становится ничтожной, а в третьем механизме вместо весьма заметного прилива с периодом 13.66 сут. нужно рассматривать значительно более слабый (в линейной теории [12]) прилив с вдвое большим периодом, и только второй механизм — перемножение двух суперпозиций колебаний с периодами солнечного суточного и лунного суточного приливов позволяет надеяться на эффективную генерацию лунного синодического месячного прилива. Несмотря на то, что в линейной теории лунный суточный прилив с периодом 24 ч 51 мин значительно слабее лунного полусуточного, анализ данных по полярным мезосферным летним эхо [15] показывает их наблюдаемые амплитуды одного порядка, что, с одной стороны, требует самостоятельного изучения, а, с другой стороны, вероятно, может обеспечить нелинейную генерацию лунного синодического колебания с периодом 29.53 сут.

3. ПРОЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

На протяжении XX века произошла трансформация понимания влияния солнечной активности на область мезопаузы от первых предположений о существовании такого влияния до его количественного учета в моделях. В 1904 г. Брохом найдена 11-летняя цикличность в свойствах метеорных следов [16]. В середине столетия появились первые указания на изменения характеристик инфракрасных эмиссий области мезопаузы в цикле солнечной активности [17]. Затем получены 10–11-летние пики в спектре количества ночей с появлениями мезосферных облаков [18]. Количественный учет ~11-летних циклов солнечной активности в моделях характеристик эмиссий излучения области мезопаузы начался с [19]. В результате целенаправленной работы Н.Н. Шефова и А.И. Семенова по созданию моделей основных эмиссий области мезопаузы, к началу XXI века такие эмпирические модели были созданы [1], и они учитывали изменение солнечной активности в ~11-летнем цикле с помощью индекса радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$, усредненного за несколько месяцев. Впоследствии при изучении влияния солнечной активности на мезосферные облака [20], а затем и на инфракрасные эмиссии области мезопаузы, вместо этого индекса стало более логично использовать поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа 122 нм [21], как непосредственно влияющий через фотохимические реакции на изучаемую среду.

В дальнейшем оказалось, что не только межгодовые, но и межсуточные изменения потока Лайман-альфа влияют на характеристики области мезопаузы. Это было продемонстрировано как на модели [22], так и с помощью анализа данных измерений [23]. При изучении межсуточных прояв-

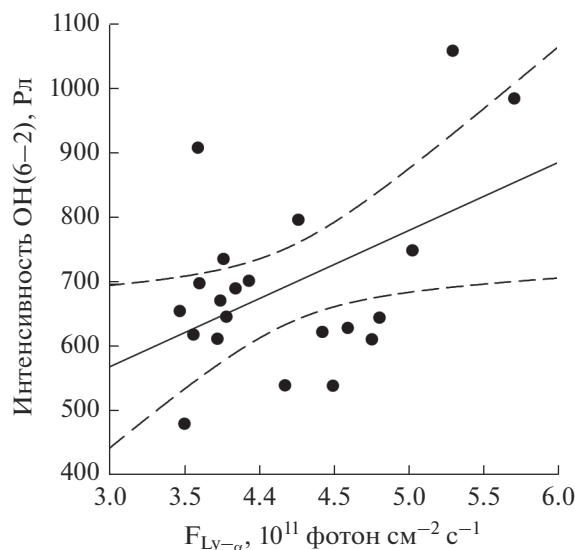


Рис. 2. Сравнение интенсивности OH(6–2) и потока солнечного излучения в линии Лайман-альфа ($F_{\text{Ly-}\alpha}$). Значения взяты как средние по интервалам с 1 октября по 31 марта 2000–2021 гг. после сглаживания с помощью суперпозиции четырех годовых гармоник (т.е. более высокие гармоники исключаются). Прямая линия – линейная регрессия (с коэффициентом 106 ± 102 Рл/(10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$)). В качестве меры интенсивности потока Лайман-альфа используется его измеренное значение в единицах 10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, приведенное к расстоянию 1 а.е. от Солнца. Интенсивность гидроксильной эмиссии измеряется в рэлях (Рл), 1 Рл = 10^6 фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Штриховые линии – границы 95% вероятностного уровня.

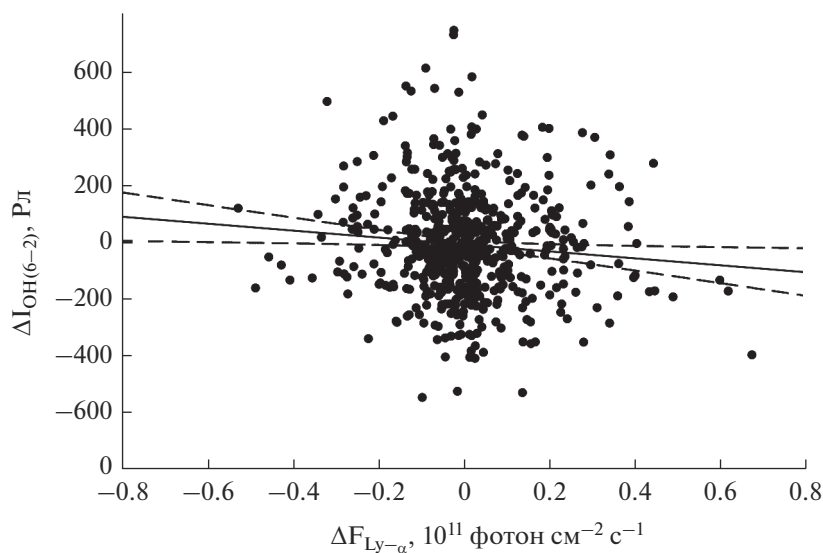


Рис. 3. Сравнение отклонений $\Delta I_{\text{OH}(6-2)}$ интенсивности полосы OH(6–2) и солнечного потока в линии Лайман-альфа от их сглаженных значений для временных интервалов с 1 октября по 31 марта 2000–2021 гг. Прямая линия – линейная регрессия (с коэффициентом -121 ± 106 Рл/(10^{11} фотон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$)). Пояснения к единицам измерения даны в подписи к рис. 2. Штриховые линии – границы 95% вероятностного уровня.

лений солнечной активности корреляционными и регрессионными методами возникает необходимость предварительного отфильтровывания более мощного сигнала медленной составляющей

временных рядов (например, через осреднение данных скользящим 35-суточным временным окном [24]). В спектре межсуточных колебаний индексов солнечной активности, а также характери-

стик области мезопаузы, выделяется в качестве наиболее мощного ~27-суточное колебание, связанное с периодом вращения Солнца [24, 25].

Для понимания механизмов воздействия солнечной активности на область мезопаузы важно выяснить, различаются ли они на межгодовом и внутрисезонном временных масштабах. Соответствующая проверка была проведена на основе 22-летних временных рядов интенсивностей инфракрасных эмиссий молекулярного кислорода (полоса $O_2A(0-1)$) и гидроксила (полоса $OH(6-2)$), вращательной температуры OH и переменных, характеризующих активность мезосферных облаков - число появлений, яркость [24, 26, 27]. Оказалось, что отклик некоторых из этих величин на изменение потока Лайман-альфа на внутрисезонном и межгодовом масштабах может иметь даже разные знаки. Так, интенсивность гидроксильной полосы в зимнее время имеет положительный отклик на межгодовое изменение потока Лайман-альфа (рис. 2). Если же из временных рядов исключить медленные изменения обеих сопоставляемых величин и сохранить лишь их внутрисезонные вариации, то наблюдается отрицательный отклик на внутрисезонное изменение потока Лайман-альфа (рис. 3). Обе зависимости статистически значимы с вероятностью не менее 95%.

Необходимо отметить, что для разрывных рядов наблюдений (разрывы вызваны отсутствием благоприятных погодных условий при измерениях свечения ночного неба) разделение рядов на быструю и медленную составляющие неоднозначно. Показанный на рис. 3 результат соответствует исключению сглаженных значений, рассчитанных с помощью суперпозиции нулевой и первых четырех годовых гармоник для каждого зимнего сезона. Похожая регрессионная зависимость получается при исключении медленной составляющей, рассчитанной с помощью сглаживания первичного ряда 34-суточным временным окном после интерполяционного заполнения пропусков в данных. Полученный результат свидетельствует о том, что на медленном межгодовом и быстром (с характерными периодами менее 35 суток) временных масштабах воздействие солнечной активности на среднюю атмосферу осуществляется различными механизмами. Так, в ходе 11-летнего солнечного цикла основным механизмом является прямое воздействие ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца на структуру газового состава области мезопаузы. Вследствие усиления диссоциации молекулярного кислорода с ростом УФ-излучения происходит увеличение содержания атомарного кислорода, продуктом рекомбинации которого является излучение гидроксила [1]. Таким образом, в результате ряда фотохимических процессов возникает прямая зависимость между солнечным УФ-излучением и интенсивностью излу-

чения гидроксила. В случае 27-суточных вариаций наиболее вероятным механизмом являются динамические изменения в области мезосферы и нижней термосферы [28].

4. ВЫВОДЫ

1. Проверена гипотеза Шефова и Семенова о существовании колебаний в области мезопаузы с периодами синодического лунного месяца и его половины на временных рядах различных характеристик области мезопаузы. Ее справедливость подтвердилась.

2. Рассмотрены возможные механизмы генерации этих колебаний, некоторые из них обсуждаются впервые.

3. С помощью анализа данных для зимнего времени показано, что некоторые измеряемые характеристики области мезопаузы дают статистически значимый отклик разного знака на изменение солнечной активности на внутрисезонном и межгодовом масштабах. Это свидетельствует о различии физических механизмов, осуществляющих воздействие солнечной активности на область мезопаузы на этих двух масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М., ГЕОС, 2006. 740 с.
2. Шефов Н.Н. Некоторые свойства гидроксильного излучения // Полярные сияния и свечение ночного неба. М.: Наука. 1967. № 13. С. 37–43.
3. Egedal J. The tides of the upper atmosphere and the heights of meteors // Nature. 1929. V. 124. № 3137. P. 913–914.
4. Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций гидроксильного излучения // Геомагнетизм и аэронавтика. 1996. Т. 36. № 4. С. 68–85.
5. Nagata T., Tohmatsu T., Kaneda E. Lunar time variation of the oxygen green line in the airglow // Rept. Ionosph. Space Res. Japan. 1961. V. 15. № 2. P. 253–262.
6. Glaume J. Influence des marées lunaires sur l'émission de la raie verte 5577 Å de l'oxygène // C. R. Acad. Sci. 1962. V. 254. № 19. P. 3399–3401.
7. Tohmatsu T., Nagata T. Dynamical studies of the oxygen green line in the airglow // Planet. Space Sci. 1963. V. 10. P. 103–116.
8. Покровский Г.Б., Тентин Г.М. Лунные приливы в верхней атмосфере по радиометеорным наблюдениям // Астр. Циркуляр. 1970. № 597. С. 5–7.
9. Шефов Н.Н. Лунные вариации гидроксильного излучения // Геомагнетизм и аэронавтика. 1974. Т. 14. № 5. С. 920–922.
10. Shefov N.N. Lunar tidal variations of hydroxyl emission // Indian Journal of Radio & Space Physics. 1974. V. 3. № 13. P. 313–314.

11. Кротопкина Е.П., Шефов Н.Н. Влияние лунных приливов на вероятность появления серебристых облаков // Изв. АН СССР. ФАО. 1975. Т. 11. № 11. С. 1184–1186.
12. Doodson A.T. The harmonic development of tide-generating potential // Proc. Roy. Soc. London. 1921. V. A100. P. 305–329.
13. Scheer J., Reisin E.R. Rotational temperatures for OH and O₂ airglow bands measured simultaneously from El Leoncito (31°48') // J. Atmos. Terr. Phys. 1990. V. 52. № 1. P. 47–57.
14. 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 аэронавигация. 2015. Т. 55. № 6. С. 839–848.
<https://doi.org/10.1134/S0016793215060109>
15. 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. — Atmospheres. 2017. V. 122.
<https://doi.org/10.1002/2017JD026509>
16. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли / Государственное издательство физико-математической литературы. 1958. 650 с.
17. Родионов С.Ф., Павлова Е.Н., Шолохова Е.Д. и др. Годичный ход инфракрасного излучения ночного неба. Докл. АН СССР. 1954. Т. 98. № 6. С. 957.
18. Васильев О.В. Астрофизические исследования серебристых облаков. М. Изд. Астросовета АН СССР. 1967.
19. Шефов Н.Н. Поведение гидроксильной эмиссии в течение солнечного цикла, сезонов и геомагнитных возмущений // Полярные сияния и свечение ночного неба. М.: Наука. 1973. № 20. С. 23–39.
20. Gruzdev A.N., Schmidt H., Brasseur G.P. The effect of the solar rotational irradiance variation on the middle and upper atmosphere calculated by a three-dimensional chemistry-climate model // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 595–614.
21. http://lasp.colorado.edu/data/timed_see/composite_lya/version3/.
22. Dalin P., Kirkwood S., Andersen H., Hansen O., Pertsev N., Romejko V. Comparison of long-term Moscow and Danish NLC observations: statistical results // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 2841–2849.
23. Robert C.E., von Savigny C., Rappoe N., Bovensmann H., Burrows J.P., DeLand M.T., Schwartz M.J. First evidence of a 27 day solar signature in noctilucent cloud occurrence frequency // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D00112.
<https://doi.org/10.1029/2009JD012359>
24. Dalin P., Pertsev N., Perminov V., Dubietis A., Zadorozhny A., Zalcik M., McEachran I., McEwan T., Černis K., Gronne J., Taustup T., Hansen O., Andersen H., Melnikov D., Manevich A., Romejko V., Lifatova D. Response of noctilucent cloud brightness to daily solar variations // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2018. V. 169. P. 83–90.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.025>
25. 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 аэронавигация. 2014. Т. 54. № 4. С. 540–552.
26. Dalin P., Perminov V., Pertsev N., Romejko V. Updated long-term trends in mesopause temperature, airglow emissions, and noctilucent clouds // J. Geophys. Res. — Atmospheres. 2020. 125, e2019JD030814.
<https://doi.org/10.1029/2019JD030814>
27. Перминов В.И., Перцев Н.Н., Далин П.А., Железнов Ю.А., Суходоев В.А., Орехов М.Д. Сезонные и многолетние изменения интенсивности атмосферного излучения O₂(b¹Σ) и OH(X²Π) области мезопаузы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2021. Т. 61. № 4. С. 532–543.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021040118>
28. Lednyts'kyy O., von Savigny C., Weber M. Sensitivity of equatorial atomic oxygen in the MLT region to the 11-year and 27-day solar cycles // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 162. P. 136–150.

Variability of the Mesopause Region Characteristics: Space Factors of Influence

N. N. Pertsev^{1, *}, V. I. Perminov^{1, **}, and P. A. Dalin^{2, 3, ***}

¹ A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences,
Pyzhevskiy pereulok, 3, Moscow, 119017 Russia

² Swedish Institute of Space Physics, Box 812, Kiruna, SE-981 28, Sweden

³ Space Research Institute Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia

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

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

***e-mail: pdalin@irf.se

The article discusses some important results on the lunar tidal and solar effects on the characteristics of the mesopause region, obtained at A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics with the participation of co-

authors from other organizations. Modern confirmations of the hypothesis of A.I. Semenov and N.N. Shefov about the existence of fluctuations with the period of the lunar synodic month and its half in the characteristics of the mesopause region are considered. Estimates of the amplitudes found by statistical analysis of measurement data are given, and possible mechanisms for generating these oscillations are proposed. Statistical results on the effect of solar activity on the mesopause region are discussed. It is shown that the influence of solar activity on some characteristics of the atmosphere on the interannual and intraseasonal time scales has a different sign, which indicates different physical mechanisms of solar-terrestrial relations acting on these frequency ranges.

Keywords: lunar tides, semidiurnal tide, diurnal tide, synodic month, mesopause region, solar-terrestrial relations