

**СТАТИСТИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫЕ ОЦЕНКИ
ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПЛАНЕТАРНЫЕ ВОЛНЫ
В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ
ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ МСВА**

**STATISTICALLY SIGNIFICANT ESTIMATES OF INFLUENCE
OF SOLAR ACTIVITY ON PLANETARY WAVES
IN THE MIDDLE ATMOSPHERE
OF THE NORTHERN HEMISPHERE AS DERIVED FROM MUAM MODEL DATA**

А.В. Коваль*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия, a.v.koval@spbu.ru***A.V. Koval***St. Petersburg State University,
Saint Petersburg, Russia, a.v.koval@spbu.ru*

Аннотация. Для зимнего периода в Северном полушарии с помощью численного моделирования изучается влияние изменений в термосфере, обусловленных уровнем солнечной активности (СА), на амплитуды долгопериодных планетарных волн (ПВ). Используется модель средней и верхней атмосферы (МСВА), позволяющая производить расчеты на высотах 0–300 км. Изменения СА в радиационном блоке МСВА задаются различными значениями потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см для высот более 100 км. Для учета влияния заряженных частиц в ионосфере на динамику нейтрального газа в МСВА включены ионосферные проводимости для различных уровней СА. Для повышения статистической достоверности результатов получены два ансамбля расчетов, состоящие из 16 модельных прогонов каждый и соответствующие минимуму и максимуму СА. Проведен расчет статистической значимости средних разностей амплитуд ПВ при высокой и низкой СА. Показано, что полученные результаты достоверны почти во всем диапазоне высот 0–300 км. Моделирование впервые показало, что в средней атмосфере Северного полушария статистически достоверные различия амплитуд долгопериодных ПВ могут составлять 10–15 % в зависимости от зонального волнового числа ПВ. При этом существенное влияние на распространение ПВ в средней атмосфере оказывает отражение волн на высотах нижней термосферы.

Ключевые слова: общая циркуляция, планетарные волны, численное моделирование, солнечная активность.

Abstract. Numerical simulation has been used to examine the effect of changes in solar activity (SA) in the thermosphere on amplitudes of long-period planetary waves (PW) for the winter period in the Northern Hemisphere. The model of the middle and upper atmosphere (MUAM) is used. It allows simulations of general atmospheric circulation at altitudes 0–300 km. In order to reproduce SA changes, different values of the solar radio flux at a wavelength of 10.7 cm at an altitude of more than 100 km are set in the MUAM radiation block. To take into account the effect of charged particles in the ionosphere on the neutral gas dynamics, ionospheric conductivities for different SA levels are included in MUAM. To improve the statistical reliability of the results, two ensembles of model simulations consisting of 16 runs corresponding to the minimum and maximum SA have been obtained. The statistical confidence of average differences in PW amplitudes between high and low SA has been calculated. The results are shown to be reliable in almost the entire altitude range 0–300 km. Results of the simulations have shown for the first time that statistically significant differences in amplitudes of long-period PWs can reach 10–15 % in the middle atmosphere of the Northern Hemisphere, depending on the zonal wave number. At the same time, reflection of PWs at altitudes of lower thermosphere has a significant effect on the PW structure in the middle atmosphere.

Keywords: general circulation, planetary waves, numerical simulation, solar activity.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие вычислительной техники и совершенствование численных алгоритмов моделей общей циркуляции атмосферы способствуют более подробному и всестороннему изучению различных аспектов динамических и тепловых процессов в атмосфере, создаваемых волновыми движениями, в частности планетарными волнами (ПВ), в разных слоях атмосферы. Согласно [Holton, 1975], крупномасштабные волновые процессы в атмосфере играют

важную роль в формировании динамического и температурного режимов атмосферы, а также ее состава. В последнее время много исследований (например, [Liu et al., 2004; Chang et al., 2014; Wang et al., 2017]) было посвящено численному моделированию ПВ, имеющих разные периоды и зональные волновые числа, в различных слоях атмосферы. Значительное влияние на пространственное распределение волновых структур в атмосфере может оказывать отражение ПВ в верхней атмосфере [Lu et al., 2017], обу-

словенные значительными градиентами температуры и скорости ветра в нижней термосфере.

Приходящая солнечная радиация и, как следствие, нагрев атмосферы зависят от солнечной активности (СА), которая испытывает циклические изменения с периодом ~11 лет (например, [Hathaway, 2010]). Изменения СА могут влиять на энергетику и динамику верхней атмосферы, способствуя изменению условий распространения и отражения ПВ [Geller, Alpert, 1980; Arnold, Robinson, 1998]. Связь между изменением потока солнечного излучения и волновой активностью с периодами 3–20 сут была обнаружена при анализе наблюдений скорости ветра на высотах мезосферы — нижней термосферы (МНТ) [Jacobi et al., 2008]. Моделирование влияния цикличности СА на изменения температуры и зонального ветра на высотах от 0 до 135 км показало важную роль ПВ, связывающих верхнюю атмосферу с нижележащими слоями [Кривоуцкий и др., 2015].

В данном исследовании используется численная модель средней и верхней атмосферы (МСВА) [Pogoreltsev et al., 2007], позволяющая рассчитывать общую циркуляцию атмосферы на высотах от земной поверхности до 300–400 км. В последние годы с использованием модели МСВА были получены значимые результаты, в частности, было показано, что СА существенно влияет на особенности распространения и отражения как бегущих на запад ПВ [Koval et al., 2018a], так и стационарных планетарных волн (СПВ) [Koval et al., 2018b]. Данная работа посвящена изучению влияния изменений в термосфере, вызванных изменениями СА, на амплитуды вариаций геопотенциальной высоты, обусловленные долгопериодными ПВ (с периодами более 15 сут), в средней атмосфере Северного полушария. Изменения СА учитывались в МСВА только на высотах более 100 км. На меньших высотах во всех расчетах использовались одинаковые условия, соответствующие среднему уровню СА. Этот подход применен для изучения влияния термосферы в чистом виде, без учета прямого воздействия солнечного излучения на химический состав, термические и динамические характеристики средней атмосферы.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Модель МСВА

МСВА является модификацией Кельнской модели средней атмосферы Института метеорологии Лейпцига COMMA-LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere — Leipzig Institute for Meteorology) [Fröhlich et al., 2003]. Основные характеристики и физические процессы, учитываемые МСВА, были описаны в работах [Гаврилов и др., 2005; Koval et al., 2018a]. В частности, в МСВА включены параметризации динамических и тепловых эффектов неорографических внутренних гравитационных волн [Gavrilov, 1997] и орографических волн [Гаврилов, Коваль, 2013]. На нижней границе амплитуды СПВ задавались на основе геопотенциальных высот в нижних слоях атмосферы для января, усредненных за 2005–2014 гг., из базы данных реанализа метеорологической информации JRA-55 (Japanese 55-year

Reanalysis) [Kobayashi et al., 2015]. Горизонтальная сетка МСВА имеет 36 узлов по широте и 64 узла по долготе. Вертикальная сетка имеет 56 уровней, соответствующих высотам от земной поверхности до 300 км. Дополнительно к стандартной радиационной схеме, используемой в оригинальной модели COMMA-LIM [Fröhlich et al., 2003], в МСВА включена параметризация нагрева термосферы за счет крайнего ультрафиолета. Солнечные потоки и коэффициенты поглощения для каждого спектрального интервала были рассчитаны с использованием модели [Richards et al., 1994].

Основные стадии инициализации МСВА описаны в работах [Pogoreltsev et al., 2007; Koval et al., 2018a]. В течение первых 120 дней в модели используются только среднесуточные скорости нагрева. Затем включаются суточные вариации солнечного нагрева и дополнительное прогностическое уравнение для геопотенциала на нижней границе. Это прогностическое уравнение должно удовлетворять нижнему граничному условию для волн, генерируемых внутренними источниками. Начиная с 300-го модельного дня в МСВА учитываются сезонные изменения солнечного нагрева, а следующие 90 дней считаются характерными для условий декабря–февраля. Изменение начального дня суточных вариаций солнечного нагрева в МСВА приводит к изменению фаз стратосферных вассилляций среднего зонального ветра и характеристик ПВ [Погорельцев, 2007]. Два ансамбля из 16 прогонов МСВА каждый (для высокого и низкого уровня СА соответственно) были получены за счет изменения начального дня суточных вариаций солнечного нагрева и прогностического уравнения для геопотенциала между 120-м и 135-м днем с шагом в один модельный день [Koval et al., 2018a, b]. Фоновые условия для всех модельных прогонов были идентичными. Кроме повышения статистической значимости полученных результатов усреднение по 16 модельным прогонам позволяет сгладить влияние таких экстремальных динамических эффектов, как внезапные стратосферные потепления, полученные в отдельных прогонах.

Учет СА в модели

В МСВА используется параметризация нагрева термосферы в области крайнего ультрафиолета. В качестве индикатора СА в радиационном блоке МСВА используется поток радиоизлучения Солнца с длиной волны 10.7 см ($F_{10.7}$). Для $F_{10.7}$ характерна цикличность с периодом основного 11-летнего цикла СА [Tapping, 1987; Бруевич, Якунина, 2015]. Изменения $F_{10.7}$ хорошо коррелируют с изменениями чисел Вольфа [Витинский и др., 1986]. На основании данных наблюдений за последние шесть солнечных циклов [<http://sidc.be/silso/datafiles>] для характеристики низкого, среднего и высокого уровня СА были выбраны значения $F_{10.7}$, равные 70, 130 и 220 sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$) соответственно. С целью изучения термосферного воздействия СА разные значения $F_{10.7}$ задавались в МСВА только выше уровня 100 км. Ниже 100 км в расчетах использовалось постоянное значение $F_{10.7}=130 \text{ sfu}$, соответствующее среднему уровню СА. Данный подход был применен для выделения влияния термосферы

на динамические процессы в атмосфере. Для учета влияния заряженных частиц на движение нейтрального газа на высотах ионосферы при разных уровнях СА в МСВА были интегрированы показатели магнитного закручивания и ионного трения, рассчитанные для января с учетом суточных вариаций для всех широт, долгот и 23 вертикальных уровней выше 100 км [Шевчук и др., 2018].

Оценка статистической значимости

С целью исследования статистической значимости влияния СА на амплитуды долгопериодных ПВ использовался парный *t*-критерий Стьюдента [Rice, 2006; Кобзарь, 2006], примененный к двум наборам значений амплитуд, соответствующих высокой и низкой СА. В каждой точке широтно-высотного распределения амплитуд проверялась гипотеза о том, что средние значения двух наборов данных, соответствующих высокой и низкой СА, отличаются друг от друга. Необходимо заметить, что использование парного *t*-критерия Стьюдента является корректным только в том случае, если исследуемые наборы данных имеют нормальное распределение. Для соответствующей проверки использовался критерий согласия χ^2 , модифицированный для проверки нормальности распределения [Кобзарь, 2006].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Амплитуды долгопериодных ПВ

Характеристики ПВ были рассчитаны на основе полей геопотенциальной высоты, моделируемых в МСВА, при этом каждый модельный прогон, охватывающий один и тот же временной интервал с середины декабря по конец февраля, был разделен на пять 15-дневных подынтервалов. Для каждого подынтервала амплитуды и фазы ПВ были рассчитаны на основе разложения в ряды Фурье по долготе. Это позволило нам оценить амплитуды и фазы ПВ с различными зональными волновыми числами и периодами, превышающими 15 дней, которые мы называем в данной работе долгопериодными ПВ. Параметры ПВ были усреднены по высотно-широтным кластерам, содержащим девять смежных точек сетки модели, т. е. амплитуды ПВ рассчитывались по 720 отдельным значениям в каждой точке по широте и высоте (16 (прогонов) \times 5 (подынтервалов) \times 9 (точек сетки)). Этот подход позволил нам получить статистически достоверные различия средних характеристик ПВ за счет воздействия СА.

На рис. 1 (левые панели) изображены широтно-высотные распределения амплитуд вариаций геопотенциальной высоты (в геопотенциальных метрах [гп. м]), вызванных долгопериодными ПВ с зональными волновыми числами $m = 1-4$ (ПВ1-4, *a-г* соответственно) при высокой СА, усредненные по 720 значениям для диапазона высот 0-270 км.

В целом структура распределения смоделированных амплитуд ПВ согласуется как со спутниковыми наблюдениями (например, [Forbes et al., 2002; Mukhtarov et al., 2010]), так и с нашими предыдущими расчетами [Koval et al., 2018b]. Некоторые отклонения от наблюдаемых распределений амплитуд

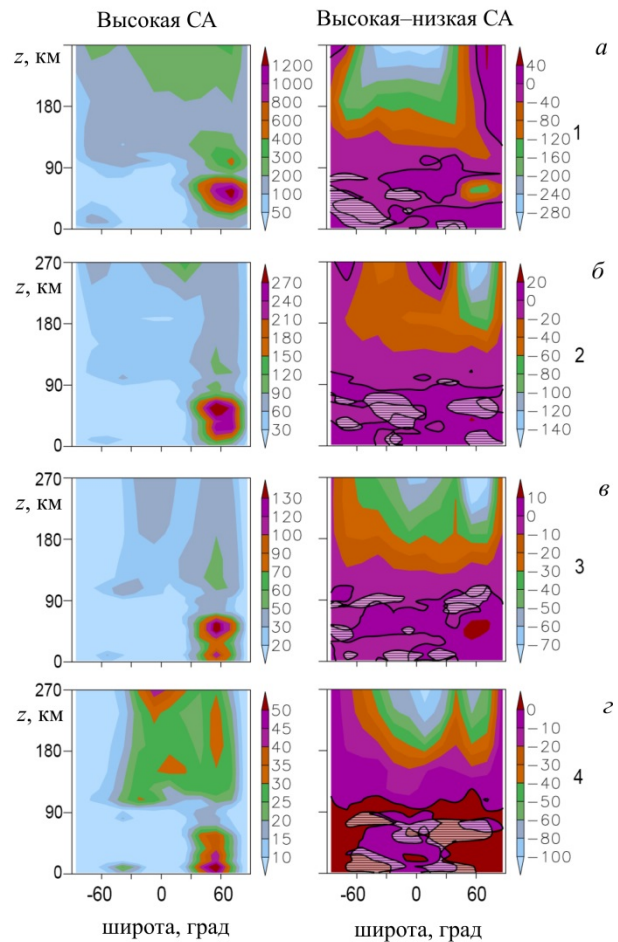


Рис. 1. Широтно-высотное распределение амплитуд вариаций геопотенциальной высоты (гп. м), вызванных долгопериодными ПВ с зональными волновыми числами 1-4 (*a-г* соответственно) при высокой СА (слева), и средние разности амплитуд ПВ при высокой и низкой СА (справа) на высотах 0-300 км. Сплошные контуры соответствуют нулевым значениям. Заштрихованные области обозначают статистически недостоверные разности в соответствии с парным *t*-критерием Стьюдента

ПВ в высокоширотной нижней термосфере могут быть связаны с отсутствием в МСВА параметризации нагрева авроральной термосферы за счет диссипации энергии, выделяемой при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли. Долгопериодные моды ПВ генерируются в нижней атмосфере и распространяются вверх. На рис. 1 слева видно, что на высотах ниже 90 км амплитуды ПВ больше в средних и высоких широтах Северного полушария. Это объясняется тем, что в Северном полушарии атмосферные циркуляционные потоки в зимней стратомезосфере направлены на восток, тогда как в Южном полушарии зональная циркуляция меняет свое направление с высотой, что приводит к барьерам в распространении ПВ на высотах, где ветер меняет знак [Charney, Drazin, 1961]. Выше 80-90 км ПВ могут проникать в Южное полушарие, распространяясь вдоль волноводов [Koval et al., 2018a, b]. С увеличением волнового числа волноводы сужаются и области распространения ПВ соответствующим образом уменьшаются, как и амплитуды ПВ. Изменения динамических и тепловых условий в термо-

сфере, вызванные воздействием СА, приводят к изменению амплитуд ПВ. Средние разности амплитуд ПВ при высокой и низкой СА показаны на правых панелях на рис. 1. Наиболее существенные разности амплитуд ПВ наблюдаются на высотах более 100 км: увеличение СА приводит, как правило, к их уменьшению до 50–60 %. Области со статистически недостоверными данными на уровне значимости 5 % обозначены штриховкой. Как мы видим, данные области возникают на высотах менее 100 км. Описание расчета статистической значимости представлено в следующей главе.

Поскольку в данной работе исследуются изменения характеристик долгопериодных ПВ в средней атмосфере, обусловленные воздействием изменений СА на высотах более 100 км, а существенные амплитуды ПВ в средней атмосфере наблюдаются в Северном полушарии, далее будут рассматриваться характеристики ПВ в Северном полушарии.

Оценка статистической значимости

Расчет статистической значимости разностей смоделированных амплитуд ПВ при разной СА проводился при помощи *t*-критерия Стьюдента [Rice, 2006; Кобзарь, 2006]. Однако его корректное применение возможно только в том случае, если рассматриваемые наборы данных имеют нормальное распределение. Для проверки наборов амплитуд на нормальность в каждой точке был применен модифицированный критерий χ^2 [Dahiya, Gurland, 1973; Кобзарь, 2006].

Для примера проведем проверку на нормальность набора амплитуд ПВ с $m=1$ в одной точке широтно-высотного распределения ($\varphi=62.5^\circ$ N, $h=8.4$ км) при высокой СА. Мы имеем набор из 720 значений амплитуд: 16 (прогонов МСВА) \times 5 (временных отрезков с середины декабря по конец февраля) \times 9 (смежных точек сетки МСВА).

Среднее арифметическое набора данных \bar{x} и среднеквадратическое отклонение s рассчитываются по формулам [Кобзарь, 2006]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$s = \sqrt{d} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где $n=720$ — объем исследуемого набора данных; d — дисперсия распределения; x_i — значение амплитуды ПВ в каждой точке. В нашем случае $\bar{x}=171.04$ гп. м, $s=74.63$ гп. м, $d=5570$ гп. м².

Совокупность данных разбивается на $k=10$ равновероятных интервалов, границы интервалов определяются как

$$\bar{x} + c_i s \quad (i = 0, \dots, 10), \quad (2)$$

а значения коэффициентов c_i , симметричные относительно нуля, берутся из таблицы [Dahiya, Gurland, 1973] для $k=10$.

На рис. 2 представлены гистограммы всех 720 значений амплитуд ПВ исследуемого набора: построенная на равномерных интервалах (вверху) и равновероятных интервалах (внизу), рассчитанных

по формуле (2). На верхней панели рис. 2 хорошо различима колоколообразная форма распределения, соответствующая нормальному распределению, с центром в точке \bar{x} . Критерий χ^2 рассчитывается по формуле [Кобзарь, 2006]

$$\chi^2 = \frac{k}{n} \sum_{i=1}^k m_i^2 - n, \quad (3)$$

где m_i — количество членов набора данных, попавшее в i -й равновероятный интервал. Если значение $\chi^2 < d_{\text{crit}}$ — критического значения статистики критерия на заданном уровне значимости, то гипотеза нормальности распределения рассматриваемого набора данных принимается. Таблица критических значений d_{crit} приведена в [Кобзарь, 2006]. Рассчитываем χ^2 по формуле (3), получаем $\chi^2 = 5.25$.

Согласно таблице критических значений d_{crit} [Кобзарь, 2006], на уровне значимости $\alpha=5\%$ $d_{\text{crit}} = 14.438$. Поскольку $\chi^2 < d_{\text{crit}}$, исследуемое распределение значений амплитуд долгопериодных ПВ можно считать нормальным.

Аналогичный расчет для амплитуд при малой СА, показавший нормальность распределения, а также сходность рассчитанной дисперсии, $d = 5551$,

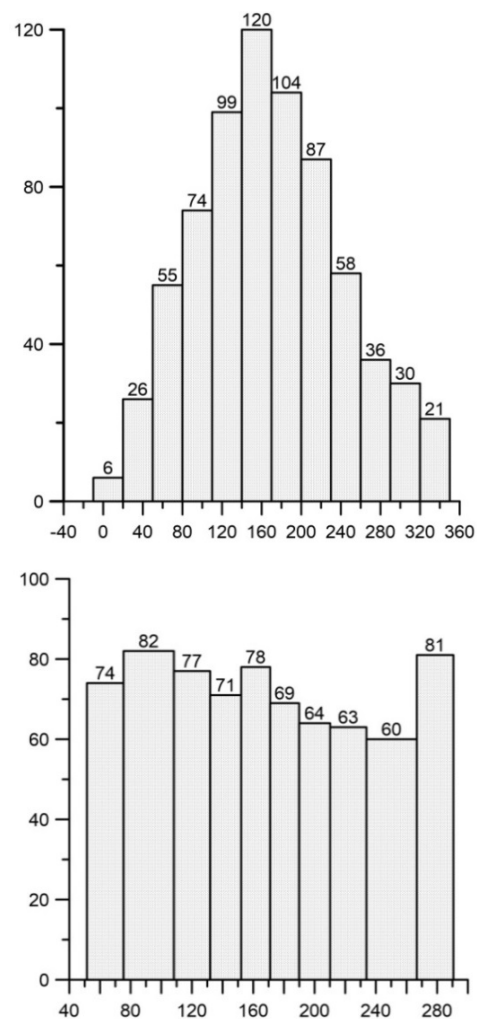


Рис. 2. Гистограммы 720 значений амплитуд ПВ в одной точке широтно-высотного распределения ($\varphi = 62.5^\circ$ N, $h=8.4$ км), построенные на равномерных интервалах (вверху) и равновероятных интервалах (внизу)

позволяет нам рассчитать статистическую значимость разности средних значений амплитуд ПВ с использованием t -критерия Стьюдента.

В связи с тем, что нами рассматриваются пары наборов значений амплитуд ПВ, взятые в одной и той же точке в одно и то же время при идентичных исходных и фоновых условиях, в данном исследовании был использован парный t -критерий Стьюдента для зависимых наборов исходных данных. Парный критерий Стьюдента для зависимых выборок считается по формуле [Rice, 2006]

$$t = \frac{\bar{X}_d}{s_d/\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где \bar{X}_d — среднее арифметическое разностей соответствующих пар значений амплитуд для высокой и низкой СА, s_d — среднеквадратическое отклонение этих разностей, n — количество пар значений. Ввиду того, что разности значений в девяти смежных точках сетки МСВА могут быть коррелированы, число степеней свободы $f=79$ (16 прогнозов МСВА) $\times 5$ (временных отрезков) -1).

Среднее арифметическое разностей \bar{X}_d и среднеквадратическое отклонение s_d рассчитываются по формулам (1), примененным к соответствующим разностям амплитуд в каждой точке. В нашем случае $n=720$; $\bar{X}_d=9.01$; $s_d=85.11$. Подставив эти значения в формулу (4), получаем $t=2.84$. Далее мы определяем на заданном уровне значимости $\alpha=5\%$ нулевую гипотезу H_0 о том, что разность средних значений амплитуд ПВ $\bar{X}_d=0$, и альтернативную H_1 , $\bar{X}_d \neq 0$.

Рассчитанное значение t -критерия Стьюдента сравниваем с критическим значением t -критерия для уровня значимости $\alpha=5\%$ [Дерффель, 1994]. При количестве степеней свободы $f>60$ критическое значение $t_{crit}=1.96$. Поскольку $t>t_{crit}$, мы можем говорить, что на уровне значимости 5% гипотеза H_0 отклоняется и принимается гипотеза H_1 , т. е. в рассмотренной нами точке широтно-высотного распределения представлена статистически достоверная ненулевая разность средних амплитуд с вероятностью 95% .

Аналогичные расчеты были проведены для всех точек широтно-высотного распределения разностей амплитуд вариаций долгопериодных ПВ, обусловленных изменения СА.

Амплитуды ПВ в средней атмосфере Северного полушария

На рис. 3 представлены рассчитанные в МСВА амплитуды вариаций геопотенциальной высоты, вызванных долгопериодными ПВ, в Северном полушарии при высокой СА (слева) на высотах 0–100 км, изменения амплитуд ПВ за счет изменений в термосфере (в центре), обусловленных уровнем СА, а также рассчитанный в каждой точке t -критерий (справа).

Рисунку 3, $a-g$ соответствуют ПВ1–4. Черным контуром на правых и центральных панелях обозначен критический уровень статистической значимости $t_{crit}=1.96$. На центральных панелях рис. 3 статистически недостоверные разности заштрихованы.

Для более детального анализа модельных расчетов амплитуд ПВ были рассчитаны векторы потока

Элиассена–Пальма (поток ЭП) $F_m = (F_m^{(\varphi)}, F_m^{(z)})$. Для квазигеострофических условий и лог-изобарической вертикальной координаты меридиональная и вертикальная компоненты потока ЭП (отнесенные к плотности) рассчитываются по формулам [Andrews et al., 1987]

$$\begin{aligned} F_m^{(\varphi)} &= -a \cos \varphi (\overline{u'v'}), \\ F_m^{(z)} &= af \cos \varphi (\overline{v'\theta'}) / \bar{\theta}_z, \end{aligned} \quad (5)$$

где штрихи обозначают возмущения, вызванные рассмотренными ПВ-модами, u и v — зональный и меридиональный ветер; z — вертикальная координата; θ — потенциальная температура; φ — широта; a — радиус Земли; f — параметр Кориолиса. Согласно формуле (5), направленный вверх поток ЭП соответствует направленному на север волновому потоку тепла ПВ $\overline{u'\theta'}$, а направленный на юг поток ЭП соответствует направленному на север потоку импульса $\overline{u'v'}$ ПВ. Дивергенция потока ЭП определяет ускорение среднесезонального потока, создаваемого ПВ. На рис. 4 изображены векторы потоков ЭП и их приращения за счет изменения СА, соответствующие ПВ1–4, представленным на рис. 3.

Как было показано выше, максимальные амплитуды ПВ наблюдаются на средних широтах зимнего (Северного) полушария. При этом максимальным амплитудам ПВ (рис. 3, $a-g$, левые панели) соответствуют максимальные потоки ЭП, направленные на юг и вверх (рис. 4, левые панели). Изменения амплитуд ПВ на высотах ниже 100 км за счет термосферных изменений СА могут достигать до 10–15% (рис. 3, средние панели). Существенным отличием ПВ1 (рис. 3, a) от остальных мод ПВ является уменьшение амплитуды на средних и высоких широтах и высотах больше 40 км при высокой СА. Это уменьшение сопровождается увеличением амплитуды ПВ на высоких широтах в термосфере (рис. 1, a , правая панель).

Такое поведение ПВ1 можно объяснить тем, что при высокой СА большая часть энергии ПВ1 переносится из средней атмосферы в термосферу, в отличие от ПВ2–4, для которых характерно усиление отражения на высотах нижней термосферы при высокой СА по сравнению с низкой СА. Это приводит к увеличению амплитуд этих мод в средней атмосфере и уменьшению в термосфере. Подобный эффект наблюдался и в предыдущих исследованиях (например, [Lu et al., 2017]). Помимо эффекта отражения влияние на изменения амплитуд ПВ оказывают изменения потоков ЭП. Направленные к северу и вниз вектора приращений потоков ЭП соответствуют ухудшению условий распространения ПВ на высотах 40–70 км (рис. 3, a, g , средние панели), что, в свою очередь, приводит к уменьшению амплитуд ПВ1 и ПВ4, в то время как направленные вверх и на юг вектора приращений потоков ЭП соответствуют улучшению условий распространения ПВ, что приводит к увеличению амплитуд ПВ. Ниже 40 км для всех рассмотренных мод ПВ характерно усиление до 5–10% на средних и высоких широтах Северного

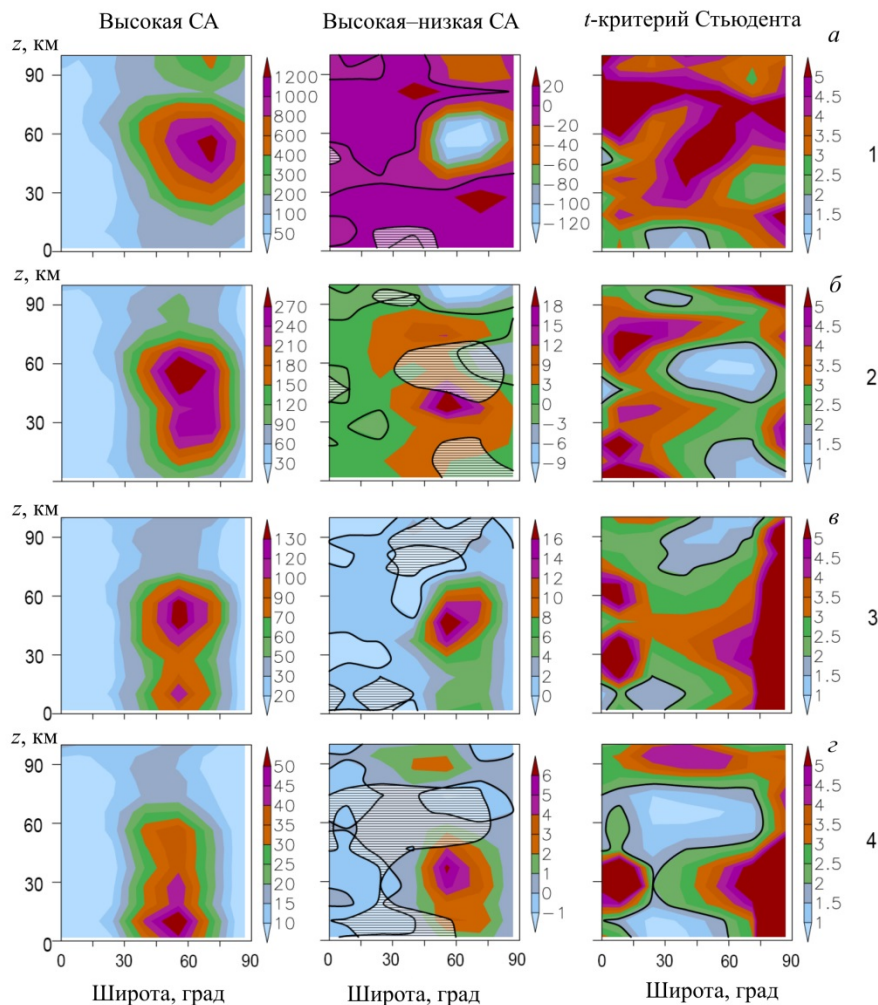


Рис. 3. Амплитуды вариаций геопотенциальной высоты (гп. м), вызванных долгопериодными ПВ с зональными волновыми числами 1–4 (а–г соответственно) при высокой СА (слева), разности амплитуд ПВ при высокой и низкой СА (в центре) и значения *t*-критерия Стьюдента, рассчитанные по 720 разностям пар значений (справа), для Северного полушария на высотах 0–100 км. Сплошными контурами обозначены нулевые значения. Сплошные контуры на правых панелях соответствуют заштрихованным областям на средних и обозначают статистически недостоверные разности

полушария при высокой СА, обусловленное, прежде всего, усилением восходящих потоков ЭП в этих областях. Расчет статистической значимости для ненулевых разностей амплитуд ПВ (рис. 3, средние панели) на уровне 5 % показал, что статистически значимые результаты получены для большей части областей рассмотренных распределений.

При анализе фаз ПВ был выявлен сдвиг фаз до 150° для ПВ1 на высотах 80–100 км, что подтверждает гипотезу о том, что ПВ распространяются в нижнюю ионосферу не напрямую, а либо через возбуждение вторичных волн в результате диссипации приливов [Laštovicka, 2006], либо в результате диффузии в ионосфере мезосферного атомарного кислорода [Pancheva, Lysenko, 1988].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием модели средней и верхней атмосферы МСВА проведено численное моделирование общей циркуляции атмосферы на высотах от поверхности до 300 км. Рассчитаны амплитуды вариаций геопотенциальной высоты, вызванных дол-

гопериодными ПВ. На базе двух ансамблей из 16 прогонов модели получены статистически достоверные результаты расчетов изменений амплитуд ПВ за счет изменения СА. С целью изучения термосферного воздействия СА в МСВА выше уровня 100 км задавались разные значения потока радиоизлучения Солнца с длиной волны 10.7 см, а также были интегрированы показатели магнитного закручивания и ионного трения, соответствующие разным уровням СА.

Численное моделирование показало, что учет увеличения СА для высот более 100 км приводит к статистически значимому уменьшению амплитуд долгопериодных ПВ до 60 % в термосфере и до 10–15 % в средней атмосфере. При этом существенный вклад в распространение ПВ2–4 при высокой СА оказывает отражение энергии ПВ на высотах МНТ, приводящее к увеличению амплитуд этих волн в средней атмосфере Северного полушария и к уменьшению амплитуд на высотах термосферы. Волновая энергия ПВ1 переносится из средней атмосферы в термосферу, способствуя ослаблению ПВ1 на средних и высоких широтах Северного полуша-

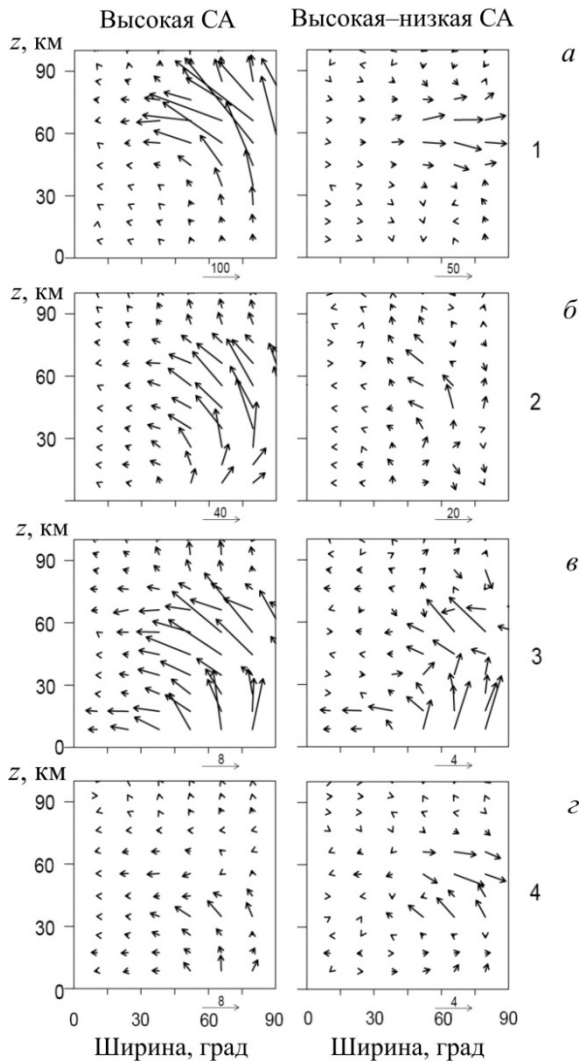


Рис. 4. Векторы потока Элиассена–Пальма (в $\text{м}^3/\text{с}^2$) для высокой СА (слева) и приращения потока за счет изменения СА (справа), соответствующие ПВ1–4 на рис. 3. Для наглядности вертикальная составляющая умножена на 200

рия в средней атмосфере и усилению в термосфере. Для лучшего понимания условий распространения ПВ были рассчитаны потоки ЭП, соответствующие рассматриваемым ПВ. Усиление восходящих и направленных на юг потоков ЭП сопровождается увеличением амплитуд ПВ в соответствующих регионах, а ослабление этих потоков сопровождается уменьшением амплитуд ПВ, особенно заметным для ПВ1.

Полученные результаты впервые с высокой степенью статистической достоверности показывают, что изменения динамического и теплового режима термосферы при изменениях СА существенно влияют на характеристики долгопериодных ПВ в средней атмосфере. При этом существенное влияние на распространение ПВ в средней атмосфере оказывает отражение волн на высотах МНТ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-77-00022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бруевич Е.А., Якунина Г.В. Циклическая активность Солнца по наблюдениям индексов активности на разных

временных шкалах // Вестн. МГУ. Сер. 3.: Физика, астрономия. 2015. Т. 4. С. 66–74. DOI: [10.3103/S0027134915040062](https://doi.org/10.3103/S0027134915040062).

Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 296 с.

Гаврилов Н.М., Коваль А.В. Параметризация воздействия мезомасштабных стационарных орографических волн для использования в численных моделях динамики атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 271–278. DOI: [10.7868/S0002351513030061](https://doi.org/10.7868/S0002351513030061).

Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Якоби К. Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 1. С. 14–24.

Дерффель К. Статистика в аналитической химии. М.: Мир, 1994. 268 с.

Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Дементьева А.В. и др. Глобальная циркуляция атмосферы земли на высотах от 0 до 135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэронаука. 2015. Т. 55, № 6. С. 808–828. DOI: [10.7868/S0016794015060061](https://doi.org/10.7868/S0016794015060061).

Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вадцилляциями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 463–475.

Шевчук Н.О., Ортиков М.Ю., Погорельцев А.И. Моделирование атмосферных приливов с учетом суточных вариаций ионосферных проводимостей // Химическая физика. 2018. Т. 37, № 5. С. 93–106. DOI: [10.7868/S0207401X18050126](https://doi.org/10.7868/S0207401X18050126).

Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. Middle Atmosphere Dynamics. New York: Acad. Press, 1987. 489 p.

Arnold N.F., Robinson T.R. Solar cycle changes to planetary wave propagation and their influence on the middle atmosphere circulation // Ann. Geophys. 1998. V. 16, iss. 1. P. 69–76. DOI: [10.1007/s00585-997-0069-3](https://doi.org/10.1007/s00585-997-0069-3).

Chang L.C., Yue L., Wang W., et al. Quasi two day wave-related variability in the background dynamics and composition of the mesosphere/thermosphere and the ionosphere // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119, iss. 6. P. 4786–4804. DOI: [10.1002/2014JA019936](https://doi.org/10.1002/2014JA019936).

Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // J. Geophys. Res. 1961. V. 66, N 1. P. 83–109.

Dahiya R.C., Gurland J. How many classes in the Pearson Chi-square test? // Journal of the American Statistical Association. 1973. V. 68, N 343. P. 707–712. DOI: [10.2307/2284803](https://doi.org/10.2307/2284803).

Forbes J. M., Zhang X., Ward W., Talaat E. R. Climatological features of mesosphere and lower thermosphere stationary planetary waves within ± 40 latitude // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, iss. D17, 4322. DOI: [10.1029/2001JD001232](https://doi.org/10.1029/2001JD001232).

Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model // Adv. Space Res. 2003. V. 32, iss. 5. P. 863–868. DOI: [10.1016/S0273-1177\(03\)00416-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00416-2).

Gavrilov N.M. Parameterization of momentum and energy depositions from gravity waves generated by tropospheric hydrodynamic sources // Ann. Geophys. 1997. V. 15, iss. 12. P. 1570–1580. DOI: [10.1007/s00585-997-1570-4](https://doi.org/10.1007/s00585-997-1570-4).

Geller M.A., Alpert J.C. Planetary wave coupling between the troposphere and the middle atmosphere as a possible Sun-weather mechanism // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. P. 1197–1215.

Hathaway D.H. The Solar Cycle // Living Rev. Solar Phys. 2010. V. 12, 4. DOI: [10.1007/lrsp-2015-4](https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4).

Holton J.R. The Dynamic Meteorology of the Stratosphere and Mesosphere. 1975. 218 p. (Meteorol. Monographs, V. 15, N 37).

- Jacobi Ch., Hoffmann P., Kurschner D. Trends in MLT region winds and planetary waves, Collm (52° N, 15° E) // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26, iss. 5. P. 1221–1232. DOI: [10.5194/angeo-26-1221-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1221-2008).
- Kobayashi S., Ota Y., Harada H., et al. The JRA-55 Reanalysis: general specifications and basic characteristics // *J. Meteorol. Soc. Japan*. 2015. V. 93, iss. 1. P. 5–48. DOI: [10.2151/jmsj.2015-001](https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001).
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Influence of solar activity on penetration of traveling planetary-scale waves from the troposphere into the thermosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018a. V. 123, iss. 8. P. 6888–6903. DOI: [10.1029/2018JA025680](https://doi.org/10.1029/2018JA025680).
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Propagation of stationary planetary waves to the thermosphere at different levels of solar activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018b. V. 173, P. 140–149. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.012).
- Laštovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68, iss. 3. P. 479–497.
- Liu H.L., Talaat E.R., Roble R.G., et al. The 6.5-day wave and its seasonal variability in the middle and upper atmosphere // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2004. V. 109, iss. D21, D21112. DOI: [10.1029/2004jd004795](https://doi.org/10.1029/2004jd004795).
- Lu H., Scaife A.A., Marshall G.J., et al. Downward wave reflection as a mechanism for the stratosphere-troposphere response to the 11-year solar cycle // *J. Clim.* 2017. V. 30, N 7. P. 2395–2414. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0400.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0400.1).
- Mukhtarov P., Pancheva D., Andonov B. Climatology of the stationary planetary waves seen in the SABER/TIMED temperatures (2002–2007) // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, A06315. DOI: [10.1029/2009JA015156](https://doi.org/10.1029/2009JA015156).
- Pancheva D., Lysenko I. Quasi-two-day fluctuations observed in the summer F region electron maximum // *Българско геофизично списание*. 1988. Т. 14, № 2. С. 41–51.
- Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69, iss. 17–18. P. 2083–2101. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.05.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.05.014).
- Rice J.A. Mathematical statistics and data analysis (3rd edition). Pacific Grove. Duxbury Press., 2006. 603 p.
- Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: a solar EUV flux model for aeronomic calculations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99, iss. A5. P. 8981–8992. DOI: [10.1029/94JA00518](https://doi.org/10.1029/94JA00518).
- Tapping K.F. Recent solar radio astronomy at centimeter wavelength: the temporal variability of the 10.7-cm flux // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1987. V. 92, iss. D1. P. 829–838. DOI: [10.1029/JD092iD01p00829](https://doi.org/10.1029/JD092iD01p00829).
- Wang J.C., Chang L.C., Yue J., et al. The quasi 2 day wave response in TIME-GCM nudged with NOGAPS-ALPHA // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122, iss. 5. P. 5709–5732. DOI: [10.1002/2016JA023745](https://doi.org/10.1002/2016JA023745).
- URL: <http://sidc.be/silso/datafiles> (дата обращения 18 ноября 2017).
- ionosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, iss. 6, pp. 4786–4804. DOI: [10.1002/2014JA019936](https://doi.org/10.1002/2014JA019936).
- Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1961, vol. 66, no. 1, pp. 83–109.
- Dahiya R.C., Gurland J. How many classes in the Pearson Chi-square test? *Journal of the American Statistical Association*. 1973, vol. 68, no. 343, pp. 707–712. DOI: [10.2307/2284803](https://doi.org/10.2307/2284803).
- Doerffel K. Statistika v analiticheskoj khimii [Statistics in analytical chemistry: translation from German]. Moscow, Mir, 1994. 268 p. (in Russian). (German edition: Doerffel K. Statistik in der analytischen Chemie. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982.)
- Forbes J. M., Zhang X., Ward W., Talaat E.R. Climatological features of mesosphere and lower thermosphere stationary planetary waves within ±40 latitude. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, iss. D17, 4322. DOI: [10.1029/2001JD001232](https://doi.org/10.1029/2001JD001232).
- Fröhlich K., Pogoreltsev A., Jacobi Ch. Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM model. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 32, iss. 5, pp. 863–868. DOI: [10.1016/S0273-1177\(03\)00416-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00416-2).
- Gavrilov N.M. Parameterization of momentum and energy depositions from gravity waves generated by tropospheric hydrodynamic sources. *Ann. Geophys.* 1997, vol. 15, iss. 12, pp. 1570–1580. DOI: [10.1007/s00585-997-1570-4](https://doi.org/10.1007/s00585-997-1570-4).
- Gavrilov N.M., Koval A.V. Parameterization of mesoscale stationary orographic wave forcing for use in numerical models of atmospheric dynamics. *Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys.* 2013, vol. 49, iss. 3, pp. 244–251. DOI: [10.1134/S0001433813030067](https://doi.org/10.1134/S0001433813030067).
- Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Jacobi Ch. Numerical modeling of the effect of latitude-inhomogeneous gravity waves on the circulation of the middle atmosphere. *Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys.* 2005, vol. 41, iss. 1, pp. 9–18.
- Geller M. A., Alpert J.C. Planetary wave coupling between the troposphere and the middle atmosphere as a possible Sun-weather mechanism. *J. Atmos. Sci.* 1980, vol. 37, pp. 1197–1215.
- Hathaway D.H. The Solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.* 2010, vol. 12, 4. DOI: [10.1007/lrsp-2015-4](https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4).
- Holton J.R. *The Dynamic Meteorology of the Stratosphere and Mesosphere*. 1975, 218 p. (Meteorol. Monographs, vol. 15, no. 37).
- Jacobi Ch., Hoffmann P., Kurschner D. Trends in MLT region winds and planetary waves, Collm (52° N, 15° E). *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, iss. 5, pp. 1221–1232. DOI: [10.5194/angeo-26-1221-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1221-2008).
- Kobayashi S., Ota Y., Harada H., Ebita A., Moriya M., Onoda H., Onogi K., et al. The JRA-55 Reanalysis: general specifications and basic characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan*. 2015, vol. 93, iss. 1, pp. 5–48. DOI: [10.2151/jmsj.2015-001](https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001).
- Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p. (In Russian).
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Influence of solar activity on penetration of traveling planetary-scale waves from the troposphere into the thermosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018a, vol. 123, iss. 8, pp. 6888–6903. DOI: [10.1029/2018JA025680](https://doi.org/10.1029/2018JA025680).
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Propagation of stationary planetary waves to the thermosphere at different levels of solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018b, vol. 173, pp. 140–149. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.012).
- Krivolutsky A.A., Cherepanova L.A., Dement'eva A.V., Repnev A.I., Klyuchnikova A.V. Global circulation of the Earth's atmosphere at altitudes from 0 to 135 km simulated with the ARM model. Consideration of the solar activity contribution. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, iss. 6, pp. 780–800. DOI: [10.1134/S0016793215060067](https://doi.org/10.1134/S0016793215060067).
- Laštovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, iss. 3, pp. 479–497.

REFERENCES

- Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B. *Middle Atmosphere Dynamics*. New York, Acad. Press, 1987. 489 p.
- Arnold N.F., Robinson T.R. Solar cycle changes to planetary wave propagation and their influence on the middle atmosphere circulation. *Ann. Geophys.* 1998, vol. 16, iss. 1, pp. 69–76. DOI: [10.1007/s00585-997-0069-3](https://doi.org/10.1007/s00585-997-0069-3).
- Bruevich E.A., Yakunina G.V. The cyclic activity of the sun from observations of the activity indices at different time scales. *Moscow University Physics Bulletin*. 2015, vol. 70, iss. 4, pp. 282–290.
- Chang L.C., Yue L., Wang W., Wu Q., Meier R.R. Quasi two day wave-related variability in the background dynamics and composition of the mesosphere/thermosphere and the

Liu H.L., Talaat E.R., Roble R.G., Lieberman R.S., Riggan D.M., Yee J.H. The 6.5-day wave and its seasonal variability in the middle and upper atmosphere. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2004, vol. 109, iss. D21, D21112. DOI: [10.1029/2004jd004795](https://doi.org/10.1029/2004jd004795).

Lu H., Scaife A.A., Marshall G.J., Turner J., Gray L.J. Downward wave reflection as a mechanism for the stratosphere-troposphere response to the 11-year solar cycle. *J. Clim.* 2017, vol. 30, no. 7, pp. 2395–2414. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0400.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0400.1).

Mukhtarov P., Pancheva D., Andonov B. Climatology of the stationary planetary waves seen in the SABER/TIMED temperatures (2002–2007). *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A06315. DOI: [10.1029/2009JA015156](https://doi.org/10.1029/2009JA015156).

Pancheva D., Lysenko I. Quasi-two-day fluctuations observed in the summer F region electron maximum. *Bulg. Geophys. J.* 1988, vol. 14, no. 2, pp. 41–51.

Pogorel'tsev A.I. Generation of normal atmospheric modes by stratospheric vacillations. *Izvestiya. Atmos. Ocean. Phys.* 2007, vol. 43, no. 4, pp. 423–435. DOI: [10.1134/S0001433807040044](https://doi.org/10.1134/S0001433807040044).

Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, iss. 17–18, pp. 2083–2101. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.05.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.05.014).

Rice J.A. *Mathematical Statistics and Data Analysis*. 3rd edition. Pacific Grove. Duxbury Press, 2006, 603 p.

Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: a solar EUV flux model for aeronomic calculations. *J. Geophys. Res.* 1994, vol. 99, iss. A5, pp. 8981–8992. DOI: [10.1029/94JA00518](https://doi.org/10.1029/94JA00518).

Shevchuk N.O., Ortikov M.Yu., Pogoreltsev A.I. Modeling of atmospheric tides with account of diurnal variations of ionospheric conductivity. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018, vol. 12, no. 3, pp. 576–589. DOI: [10.1134/S199079311803017X](https://doi.org/10.1134/S199079311803017X).

Tapping K.F. Recent solar radio astronomy at centimeter wavelength: The temporal variability of the 10.7-cm flux. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 1987, vol. 92, iss. D1, pp. 829–838. DOI: [10.1029/JD092iD01p00829](https://doi.org/10.1029/JD092iD01p00829).

Vitinsky Yu.I., Kopetsky M., Kuklin G.V. *Statistika py-atnoobrazovatel'noi deyatel'nosti Solntsa* [Statistics of sunspot-forming activity of the Sun]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 296 p. (In Russian).

Wang J.C., Chang L.C., Yue J., Wang W., Siskind D.E. The quasi 2 day wave response in TIME-GCM nudged with NOGAPS-ALPHA. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, iss. 5, pp. 5709–5732. DOI: [10.1002/2016JA023745](https://doi.org/10.1002/2016JA023745).

URL: <http://sidc.be/silso/datafiles> (accessed November 18, 2017).

Как цитировать эту статью

Коваль А.В. Статистически значимые оценки влияния солнечной активности на планетарные волны в средней атмосфере Северного полушария по данным модели МСВА. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 64–72. DOI: [10.12737/szf-54201907](https://doi.org/10.12737/szf-54201907).