

Зависимость температурных режимов планетных атмосфер в Солнечной системе от продолжительности годового цикла

И.И. Мохов^{1,2,*}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

(Поступила в редакцию 25.03.2024; после доработки 11.04.2024; подписана в печать 19.04.2024)

Представлены результаты сравнительного анализа различных характеристик температурных режимов атмосфер планет Солнечной системы и их зависимости от орбитальных параметров, в частности от продолжительности и угловой частоты годового цикла. В том числе отмечена корневая зависимость от угловой частоты сухоадиабатического градиента температуры. Зависимость равновесной температуры планет в виде корня кубического угловой частоты годового цикла связана с третьим законом Кеплера. Для Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна проявляется корневая зависимость высоты однородной атмосферы и тропосферы от продолжительности годового цикла, отмечены особенности атмосфер наиболее удаленных от Солнца планет — Урана и Нептуна.

PACS: 96.00.00; 92.00.00 УДК: 523.4; 551.5.

Ключевые слова: Солнечная система, планетные атмосферы, равновесная температура, высота однородной атмосферы, тропосфера, сухоадиабатический градиент, годовой цикл.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2430802](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2430802)

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферы планет Солнечной системы, их циркуляционные и температурные режимы существенно различаются, что связано с особенностями орбит планет вокруг Солнца и атмосферным составом [1–6].

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа температурных режимов планетных атмосфер Солнечной системы с акцентом на анализ их зависимости от длительности годового цикла.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В данной работе анализировались данные для различных характеристик планет Солнечной системы, их орбит и атмосфер [1, 4, 5] (см. табл. 1–3).

В табл. 1 представлены безразмерные значения астрономических и атмосферных характеристик для планет Солнечной системы, включая P_{ac} — длительность годового цикла инсоляции (или угловую частоту $\omega_{ac} = 2\pi/P_{ac}$), g — гравитационное ускорение, μ — молекулярный вес, c_p — удельная теплоемкость, нормированные на соответствующие значения для Земли (P_{ac}/P_{ac_E} , g/g_E , μ/μ_E , c_p/c_{p_E}), с использованием данных [1, 5].

В табл. 2 с использованием данных [1, 5] приведены безразмерные значения различных характеристик температурного режима для планет Солнечной системы: равновесной температуры уходящего излучения T_e , сухоадиабатического температурного градиента $\gamma_a = g/c_p$, высоты однородной атмосферы $H_o = RT_e/\mu g$, нормированных на соответствующие значения для Земли (T_e/T_{e_E} , γ_a/γ_{a_E} , H_o/H_{o_E}).

В табл. 3 приведены безразмерные значения различных характеристик для планет Солнечной системы: H_{tr}/H_{tr_E} — высота тропопаузы H_{tr} , нормированная на высоту тропопаузы для Земли H_{tr_E} , по данным [4]; $\tau_r(\varepsilon = 0.3)/P_{ac}$ — отношение характерного времени радиационной релаксации $\tau_r(\varepsilon = 0.3)$ при $\varepsilon = 0.3$ по данным [6]; F_{int}/F_{s_abs} — соотношение внутреннего потока тепла F_{int} и поглощенной в планетной системе солнечной радиации F_{s_abs} в среднем за год при нулевом эксцентриситете планетных орбит, а также (в скобках) оценки вариаций F_{s_abs} в годовом годе (ΔF_{s_abs}) с использованием оценок вариаций ΔF_{s_abs} в афелии и перигелии [6].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для семи планет Солнечной системы (Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна) анализировалась, в частности, зависимость значений γ_a/γ_{a_E} с использованием данных [5] от соответствующих значений P_{ac}/P_{ac_E} (или зависимость

* E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru

Таблица 1. Значения безразмерных значений астрономических и атмосферных характеристик для планет Солнечной системы с использованием данных [5] и [1] (в скобках): P_{ac}/P_{ac_E} — длительности годового цикла инсоляции, g/g_E — гравитационного ускорения, μ/μ_E — молекулярного веса, c_p/c_{p_E} — удельной теплоемкости

	P_{ac}/P_{ac_E}	g/g_E	μ/μ_E	c_p/c_{p_E}
Венера	0.6 (0.6)	0.9 (0.9)	1.5 (1.5)	0.9 (0.9)
Земля	1 (1)	1 (1)	1 (1)	1 (1)
Марс	1.9 (1.9)	0.4 (0.4)	1.5 (1.5)	0.8 (0.9)
Юпитер	11.9 (11.9)	2.5 (2.5)	0.1 (0.1)	12.3 (10.0)
Сатурн	29.5 (29.5)	1.0 (1.0)	0.1 (0.1)	14.0 (10.0)
Уран	84.6 (84)	0.9 (0.9)	0.1 (0.1)	13.0 (13.0)
Нептун	166.2 (248)	1.1 (1.2)	0.1 (0.1)	13.0 (13.0)

Таблица 2. Безразмерные значения различных характеристик температурного режима для планет Солнечной системы с использованием данных [5] и [1] (в скобках): T_e/T_{e_E} — равновесной температуры уходящего излучения, γ_a/γ_{a_E} — сухоадиабатического температурного градиента, H_o/H_{o_E} — высоты однородной атмосферы

	γ_a/γ_{a_E}	T_e/T_{e_E}	H_o/H_{o_E}
Венера	1.1 (1.1)	0.9 (0.9)	0.7 (0.7)
Земля	1 (1)	1 (1)	1 (1)
Марс	0.5 (0.4)	0.8 (0.8)	1.4 (1.5)
Юпитер	0.2 (0.3)	0.5 (0.5)	2.6 (2.3)
Сатурн	0.1 (0.1)	0.4 (0.4)	4.9 (4.5)
Уран	0.1 (0.1)	0.2 (0.2)	3.2 (2.9)
Нептун	0.1 (0.1)	0.2 (0.1)	2.6 (1.5)

от пространственных параметров орбит планет в соответствии с законами Кеплера). Отмечена, в частности, значимая степенная зависимость

$$\gamma_a/\gamma_{a_E} = K_{\gamma P} (P_{ac}/P_{ac_E})^k, \quad (1)$$

$$\gamma_a/\gamma_{a_E} = 0.8 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.52} \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0.97$. Показатель степени k в (1) близок к величине $k_o = -1/2$:

$$\gamma_a/\gamma_{a_E} = K_{\gamma P} (P_{ac}/P_{ac_E})^{-1/2}. \quad (3)$$

При этом на основе регрессии

$$\gamma_a/\gamma_{a_E} = (\gamma_a/\gamma_{a_E})_o + K_{\gamma P} (P_{ac}/P_{ac_E})^{-1/2} \quad (4)$$

получено $K_{\gamma P} = 0.9(\pm 0.1)$ с коэффициентом корреляции $r = 0.98$ ($(\gamma_a/\gamma_{a_E})_o = 0$).

Аналогичный анализ проведен с использованием данных [1]. При этом получено

$$\gamma_a/\gamma_{a_E} = 0.8 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.46} \quad (5)$$

с коэффициентом корреляции $r = 0.96$ и (4) на основе (3).

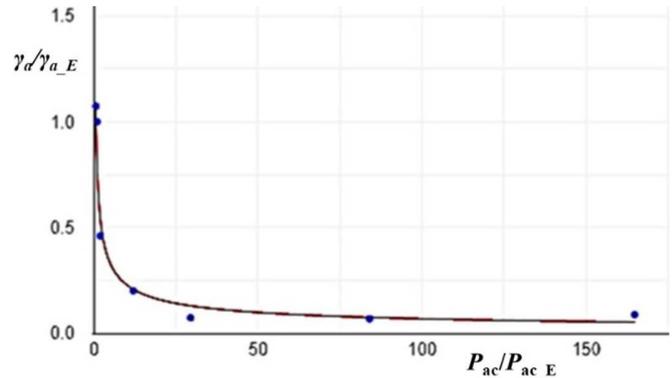


Рис. 1. Зависимость γ_a/γ_{a_E} от P_{ac}/P_{ac_E} по данным [5] для семи планет Солнечной системы. Кривая соответствует степенной аппроксимации (2)

Отмеченная зависимость, проявляющаяся для значений сухоадиабатического градиента $\gamma_a = g/c_p$, характеризующего атмосферную температурную стратификацию, включает зависимость от гравитационного ускорения планет g и от теплоемкости атмосферы при постоянном давлении c_p . В какой степени проявляется их зависимость от параметров орбит планет, в частности от P_{ac} ? Для планет Солнечной системы проявляется

Таблица 3. Безразмерные значения различных характеристик для планет Солнечной системы: H_{tr}/H_{tr_E} — высота тропопаузы H_{tr} , нормированная на высоту тропопаузы для Земли H_{tr_E} по данным [4]; τ_r/P_{ac} — отношение характерного времени радиационной релаксации τ_r ($\varepsilon = 0.3$) при излучательной способности $\varepsilon = 0.3$ по данным [6]; F_{int}/F_{s_abs} — соотношение внутреннего потока тепла F_{int} и поглощенной в планетной системе солнечной радиации F_{s_abs} в среднем за год при нулевом эксцентриситете планетных орбит, а также (в скобках) оценок вариаций F_{s_abs} в годовом ходе (ΔF_{s_abs}) с использованием данных [6]

	H_{tr}/H_{tr_E}	F_{int}/F_{s_abs} ($\Delta F_{int}/F_{s_abs}$)	τ_r/P_{ac}
Венера	3.8	0 (0)	$\sim 1 \times 10^{-2}$
Земля	1	$\sim 3 \times 10^{-4}$ ($\sim 4 \times 10^{-3}$)	$\sim 1 \times 10^{-1}$
Марс	2.6	0 (0)	$\sim 3 \times 10^{-3}$
Юпитер	7.3	$\sim 7 \times 10^{-1}$ (~ 3)	$\sim 4 \times 10^{-1}$
Сатурн	16.1	$\sim 8 \times 10^{-1}$ (~ 4)	$\sim 7 \times 10^{-1}$
Уран	7.5	$\sim 7 \times 10^{-2}$ ($\sim 3 \times 10^{-1}$)	~ 2
Нептун	5.4	~ 2 ($\sim 6 \times 10^1$)	$\sim 7 \times 10^{-1}$

значимая степенная зависимость от P_{ac} для $1/c_p$, в отсутствие подобной зависимости для другого множителя в $\gamma_a - g$:

$$c_{p_E}/c_p = 0.9 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.60} \quad (6)$$

при $r = 0.90$ по данным [5] и

$$c_{p_E}/c_p = 0.9 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.55} \quad (7)$$

при $r = 0.92$ по данным [1].

Межорбитальная дифференциация термодинамических характеристик планетных атмосфер должна зависеть от химического состава планетных атмосфер. Для величины μ для семи планетных атмосфер (Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна) в Солнечной системе проявляется, в частности, значимая степенная зависимость

$$\mu/\mu_E = 1.1 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.62} \quad (8)$$

при $r = 0.87$ по данным [5] и

$$\mu/\mu_E = 1.0 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.59} \quad (9)$$

при $r = 0.87$ по данным [1].

Для зависимости c_p от μ значимы степенные аппроксимации с показателем степени близким к -1 :

$$c_p/c_{p_E} = 1.2 (\mu/\mu_E)^{-1.0} \quad (10)$$

при $r = 0.99$ по данным [5] для 7 планет (рис. 1) и

$$c_p/c_{p_E} = 1.2 (\mu/\mu_E)^{-0.9} \quad (11)$$

при $r = 0.996$ по данным [1].

Отмеченная близкая к обратно пропорциональной зависимость c_p/c_{p_E} от μ/μ_E для планет Солнечной системы связана со слабой изменчивостью $\varkappa = c_p/c_v$ — отношения теплоемкости при постоянном давлении c_p к теплоемкости при постоянном

объеме c_v (см., напр., [1]) в следующем из уравнения для идеального газа выражении

$$c_p = [\varkappa/(\varkappa - 1)] R/\mu,$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Получены также соответствующие гиперболические аппроксимации зависимости c_p от μ . Для полученных на основе регрессий

$$c_p/c_{p_E} = (c_p/c_{p_E})_o + K_{c\mu}(\mu_E/\mu)$$

зависимостей $K_{c\mu} = 1.1(\pm 0.1)$, $(c_p/c_{p_E})_o = 0.1(\pm 0.6)$ при $r = 0.99$ по данным [5] и $K_{c\mu} = 0.94(\pm 0.03)$, $(c_p/c_{p_E})_o = 0.1(\pm 0.3)$ при $r = 0.997$ по данным [1].

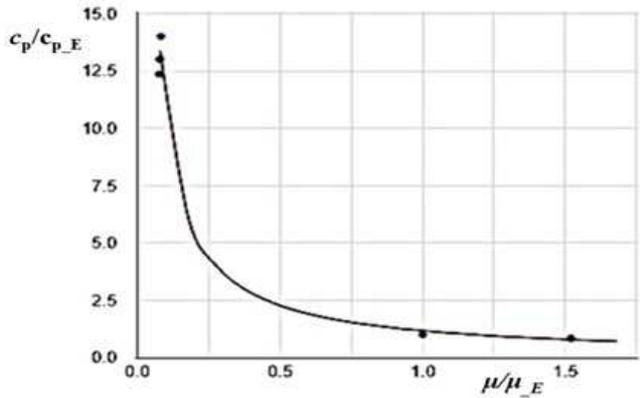


Рис. 2. Зависимость c_p/c_{p_E} от μ/μ_E по данным [5]. Кривая соответствует степенной аппроксимации (10)

На рис. 2 на фоне кривой — аппроксимации степенной зависимостью c_p/c_{p_E} от μ/μ_E для 7 планет Солнечной системы, кардинально различаются режимы атмосфер (отмеченные точками) для планет земной группы (Венеры, Земли и Марса) и для другой группы — Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

Что касается значений равновесной температуры теплового излучения планет T_e , то они определяются балансом поглощенной в планетной системе

солнечной радиации, зависящей от потока приходящей солнечной радиации Q_s , обратно пропорционального квадрату расстояния от Солнца, альбедо планетной системы α и потока уходящей тепловой радиации σT_e^4 :

$$Q_s(1 - \alpha)/4 = \sigma T_e^4. \quad (12)$$

Величина T_e зависит от расстояния от Солнца и, согласно закону Кеплера, от длительности годового цикла P_{ac} . Для значений T_e значима степенная зависимость от P_{ac}

$$T_e/T_{e_E} = 0.9 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.28} \quad (13)$$

с $r = 0.97$ по данным [5] и

$$T_e/T_{e_E} = 1.0 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.33} \quad (14)$$

с $r = 0.95$ по данным [1] для 7 планет Солнечной системы (Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна).

Соответствующий анализ проведен и для высот однородной атмосферы H_o тех же 7 планет Солнечной системы. При этом выявлены различные зависимости H_o от P_{ac} для планет от Венеры до Сатурна и от Сатурна до Нептуна. Для 5 первых планет зависимость H_o от P_{ac} значимо аппроксимируется степенной функцией

$$H_o/H_{o_E} = 0.9 (P_{ac}/P_{ac_E})^{0.47} \quad (15)$$

с $r = 0.99$ по данным [5] и

$$H_o/H_{o_E} = 1.0 (P_{ac}/P_{ac_E})^{0.43} \quad (16)$$

с $r = 0.98$ по данным [1]. Для последних 3 планет зависимость H_o от P_{ac} значимо аппроксимируется степенной функцией

$$H_o/H_{o_E} = 18.0 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.38} \quad (17)$$

с $r = 0.999$ по данным [5] и

$$H_o/H_{o_E} = 26.7 (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.52} \quad (18)$$

с $r = 0.99$ по данным [1].

Сравнительный анализ был проведен также для высот тропопазы H_{tr} для планет Солнечной системы с использованием данных [4].

Получены оценки зависимости высоты тропопазы H_{tr} (табл. 3) от длительности годового цикла P_{ac} (табл. 1) по данным для планет Солнечной системы с использованием различных регрессий H_{tr}/H_{tr_E} на P_{ac}/P_{ac_E} , в том числе степенной зависимости

$$H_{tr}/H_{tr_E} = K_{TrP} (P_{ac}/P_{ac_E})^k. \quad (19)$$

На основе регрессии (19) по данным для 7 планет получена оценка $k = 0.27$ при коэффициенте корреляции $r = 0.36$, по данным для 6 планет (без Нептуна) получена оценка $k = 0.38$ при коэффициенте корреляции $r = 0.61$. По данным для 5 планет

(Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна) получена степенная аппроксимация при коэффициенте корреляции $r = 0.94$:

$$H_{tr}/H_{tr_E} = 2.2 (P_{ac}/P_{ac_E})^{0.53}. \quad (20)$$

по данным для 4 планет (Венеры, Земли, Марса и Юпитера) получена оценка $k = 0.41$ при коэффициенте корреляции $r = 0.83$. Результат (20) по данным для 5 планет (трех планет земной группы, Юпитера и Сатурна) близок к модельному представлению с $H_{tr} \sim P_{ac}^{1/2}$ согласно [6–11].

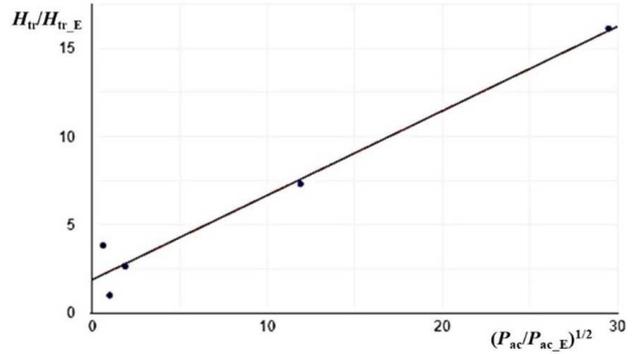


Рис. 3. Нормированная высота тропопазы H_{tr}/H_{tr_E} по данным [4] в зависимости от $(P_{ac}/P_{ac_E})^{1/2}$ для 5 планет Солнечной системы (Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн). Прямая соответствует линейной регрессии H_{tr}/H_{tr_E} на $(P_{ac}/P_{ac_E})^{1/2}$

Проведен соответствующий анализ по данным для 5 планет (Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна) с использованием линейной регрессии:

$$H_{tr}/H_{tr_E} = (H_{tr}/H_{tr_E})_o + K_{HtrP} (P_{ac}/P_{ac_E})^{1/2}.$$

По данным для этих 5 планет (без Нептуна и Урана) получено $K_{HtrP} = 2.9(\pm 0.5)$ при коэффициенте корреляции $r = 0.96$ (см. рис. 3). Для 4 планет (для Венеры, Земли, Марса и Юпитера) получено $K_{HtrP} = 1.9(\pm 0.8)$ при меньшем коэффициенте корреляции $R = 0.86$. Для 6 планет (без Нептуна) получено $K_{HtrP} = 1.0(\pm 0.7)$ при еще меньшем коэффициенте корреляции $r = 0.60$.

При этом для трех наиболее удаленных планет Солнечной системы (Нептуна, Урана и Сатурна) величина H_{tr} уменьшается с увеличением P_{ac} — с наименьшей H_{tr} для Нептуна и наибольшей — для Сатурна (см. рис. 4). Аппроксимационная кривая на рис. 4 соответствует степенной регрессии $H_{tr}/H_{tr_E} \sim (P_{ac}/P_{ac_E})^{-0.64}$ с $r = 0.996$ (при коэффициенте пропорциональности, равном 138).

На рис. 5 приведена также зависимость нормированной высоты тропопазы H_{tr}/H_{tr_E} по данным [4] в зависимости от $1000P_{ac_E}/P_{ac}$ для 3 планет Солнечной системы (Сатурн, Уран, Нептун). Прямая соответствует линейной регрессии H_{tr}/H_{tr_E} на P_{ac_E}/P_{ac} .

$$H_{tr}/H_{tr_E} = (H_{tr}/H_{tr_E})_o + K_{HP} (P_{ac_E}/P_{ac})$$

с $K_{HP} = 0.38(\pm 0.01)$, $r = 0.9998$.

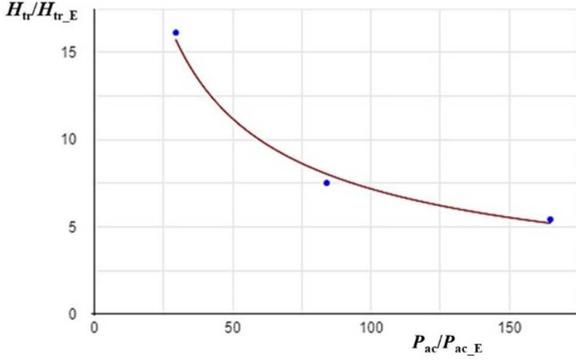


Рис. 4. Высота тропопазы H_{tr}/H_{tr_E} по данным [4] в зависимости от P_{ac}/P_{ac_E} для 3 планет Солнечной системы (Сатурн, Уран, Нептун). Кривая соответствует степенной регрессии (19) $H_{tr}/H_{tr_E}: (P_{ac}/P_{ac_E})^k$

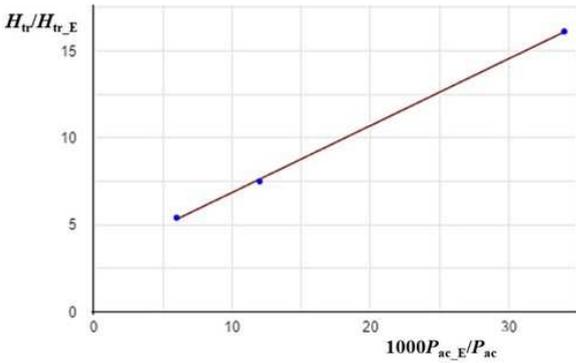


Рис. 5. Нормированная высота тропопазы H_{tr}/H_{tr_E} по данным [4] в зависимости от $1000P_{ac_E}/P_{ac}$ для 3 планет Солнечной системы (Сатурн, Уран, Нептун). Прямая соответствует линейной регрессии H_{tr}/H_{tr_E} на P_{ac_E}/P_{ac}

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная зависимость T_e от P_{ac} близка к степенной зависимости

$$T_e/T_{e_E} = K_{TP} (P_{ac}/P_{ac_E})^{-1/3}$$

— это связано с законом Кеплера, согласно которому $P_{ac}^2(M+m)/a^3 = \text{const}$, где a — длина большой полуоси эллиптической траектории планеты массы m вокруг Солнца массы M . При $m \ll M$ и малом эксцентриситете орбит планет Солнечной системы $P_{ac}^2 \sim R_o^3$, где R_o — среднее расстояние планеты от Солнца. В соответствии с (7) с точностью до вариаций альбедо

$$T_e \sim Q_s^{1/4} \sim R_o^{-1/2} \sim P_{ac}^{-1/3}.$$

При анализе выявлено различие зависимости высоты однородной атмосферы H_o и высоты тропосферы H_{tr} от длины годового цикла P_{ac} для планет от Венеры до Сатурна и от Сатурна до Неп-

туна. При этом для Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна характерна корневая зависимость H_o и H_{tr} от P_{ac} . Подобная зависимость согласуется с ранее полученными результатами для земной атмосферы [7–12]. В [7–10] на основе анализа температурной динамики в разных слоях атмосферы с использованием многолетних данных был сделан вывод о соответствии толщины тропосферы (высоты тропопазы) высоте температурного скин-слоя для атмосферы при циклическом прогреве от поверхности в связи с годовым ходом инсоляции. Позднее были проведены численные расчеты с климатической моделью общей циркуляции при разной продолжительности годового цикла [12]. Полученные модельные результаты подтвердили сделанный ранее на основе анализа климатических данных вывод о соответствии толщины тропосферы (высоты тропопазы) высоте температурного скин-слоя для атмосферы при циклическом прогреве от поверхности в связи с годовым ходом инсоляции. В частности, в модельных расчетах высота тропопазы при вдвое меньшей продолжительности годового цикла получена в $2^{1/2}$ меньше, чем при современной продолжительности годового цикла. Аналогичный температурный скин-слой (с характерной высотой H_{dc}) характерен и для суточного хода с периодом P_{dc} (в пределах пограничного слоя атмосферы). При этом соотношение для характерных высот тропопазы и температурного планетарного погранслоя близко к соотношению характерных высот годового (H_{ac}) и суточного (H_{dc}) температурных скин-слоев [8, 11]

$$H_{ac}/H_{dc} \sim (P_{ac}/P_{dc})^{1/2}.$$

По данным для планет Солнечной системы получено также, что величина сухоадиабатического градиента γ_a , характеризующего температурную стратификацию атмосферы, уменьшается с ростом P_{ac} по корневому закону. Это согласуется с корневой зависимостью H_{tr} от P_{ac} при $H_{tr} \sim \gamma_a^{-1}$.

В ходе определения причин отличия зависимости H_{tr} от P_{ac} от корневой для более удаленных от Солнца планет получено, что для Нептуна величина поглощенной солнечной радиации F_{s_abs} и ее вариации в годовом ходе ΔF_{s_abs} малы по сравнению с внутренним потоком тепла F_{int} , а для атмосферы Урана характерное время инерции радиационных процессов τ_r больше продолжительности годового цикла P_{ac} (см. табл. 3).

Полученные зависимости от продолжительности и угловой частоты годового цикла для планет Солнечной системы представимы также в виде соответствующих зависимостей от расстояния планет от Солнца — в соответствии с третьим законом Кеплера.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 24-17-00211.

- [1] Голицын Г.С. // Введение в динамику планетных атмосфер. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
- [2] Taylor F.W. // Meteorol. Appl. **17**. 393. (2010).
- [3] Catling D.C., Kasting J.F. // Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless Worlds. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2017.
- [4] Rees K.N., Garrett T.J. // The Astrophys. J. **879**, N 2. 126 (2019).
- [5] <https://pds-atmospheres.nmsu.edu/>
- [6] <https://nssdc.asfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
- [7] Мохов И.И. // Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993.
- [8] Мохов И.И. // Метеорол. гидрол. № 5. 80. (1985).
- [9] Мохов И.И. // Метеорол. гидрол. № 9. 38. (1985).
- [10] Мохов И.И. // Исследования вихревой динамики и энергетики атмосферы и проблема климата. Л.: Гидрометеиздат, 1990, С. 288.
- [11] Мохов И.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 3. 58. (2022). (Mokhov I.I. // [Moscow Univ. Phys. Bull.](#) // **77** 549 (2022)).
- [12] Мохов И.И., Тимажеев А.В. // ДАН. Науки о Земле. **494**, № 2. 48. (2020).

Dependence of Temperature Conditions of Planetary Atmospheres in the Solar System on the Length of the Annual Cycle

I.I. Mokhov

¹*Department of Atmospheric Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS
Moscow, 119017, Russia*

E-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru

The results of a comparative analysis of various characteristics of the temperature conditions of the planetary atmospheres in the Solar system and their dependence on orbital parameters, in particular on the length and angular frequency of the annual cycle, are presented. In particular, the root dependence on the angular frequency of the was noted. The dependence of the planetary equilibrium temperature in the cubic root form of the angular frequency of the annual cycle is associated with Kepler's third law. For Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, the root dependence of the scale height and tropospheric height on the length of the annual cycle is manifested, and the atmospheric features of the planets most distant from the Sun — Uranus and Neptune — are noted.

PACS: 96.00.00; 92.00.00.

Keywords: Solar system, planetary atmospheres, equilibrium temperature, troposphere, scale height, dryadiabatic lapse rate, annual cycle.

Received 25 March 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 3. Pp. .

Сведения об авторе

Мохов Игорь Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой физики атмосферы физического факультета МГУ, научный руководитель ИФА им. А.М. Обухова РАН; тел.: (495) 939-38-06, (495) 951-55-65, e-mail: mokhov_ii@physics.msu.ru, mokhov@ifaran.ru.