

1.6.18.
 УДК 551.51

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ
 (ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Афанасьев И.С.,
 Слуцкая О.Ю.,
 Закинян Р.Г.

Северо-Кавказский федеральный университет,
 г. Ставрополь,
 Россия

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ АТМОСФЕРЫ
 ЮПИТЕРА И ВЕНЕРЫ

DOI: 10.37493/2308-4758.2022.4.5

Введение.

В статье проводится исследование колебательных режимов атмосфер двух планет (Юпитер, Венера) при учёте осевого вращения, которое оказывает влияние на возникновение биений и резонансов, сравниваются параметры атмосфер этих планет с параметрами атмосферы Земли.

Материалы и методы исследований.

Рассматриваются колебания в атмосфере, изначально находившейся в состоянии статики, вызванные начальным превышением температуры вблизи поверхности земли и суточным вращением Земли. Для их описания используется система, в которую входят уравнение движения в форме Эйлера и выражения, учитывающие распределение температуры и давления воздуха с высотой. Подробно рассматривается случай, когда вращение Земли вокруг своей оси приводит к значимым периодическим изменениям температуры.

Результаты исследований и их обсуждения.

Находятся значения основных параметров атмосферы Юпитера и Венеры с целью исследования колебательных режимов атмосфер на этих планетах и построения соответствующей математической модели. В начале мы находим стандартные параметры амплитуд скоростей, температур, частот Брента–Вяйсяля для того, чтобы рассчитывать величины, входящие в систему уравнений, описывающую колебания воздуха в атмосфере и строить соответствующие графики этих уравнений с целью их дальнейшего анализа. Получены решения для колебательных процессов, когда учитываются суточные изменения температуры воздуха.

Выводы.

Показано, что в стандартной атмосфере осевое вращение планеты не сказывается на колебательных процессах в атмосфере, при этом учитывается рельеф местности. Однако имеет место быть случай, когда разница между вышеуказанными частотами крайне мала или нулевая (это возможно при $\Delta \gamma = \Delta \gamma_{\text{станд}}$). Если частота Брента – Вяйсяля совпадает с частотой суточного вращения Земли или их разница незначительна, то возникают такие явления, как резонанс или биения, которые рассматриваются подробно.

Ключевые слова:

частота Брента–Вяйсяля, разность температур, разность градиентов температур, скорость, частота суточного вращения, амплитуда, биения, резонанс.

**Afanasyev I.S.,
Slutskaya O.Y.,
Zakinyan R.G.**

North Caucasus Federal University,
Stavropol,
Russia

Oscillatory Modes of the Atmosphere of Jupiter and Venus

Introduction. The article studies the oscillatory modes of the atmosphere of two planets (Jupiter, Venus), taking into account the influence of axial rotation, which affects the occurrence of beating and resonance, and comparing their parameters with the parameters of the Earth's atmosphere.

Materials and research methods. We consider fluctuations in the atmosphere, which was initially in a state of statics, caused by the initial temperature rise near the earth's surface and the daily rotation of the earth. To describe them, a system is used that includes the equation of motion in the Euler form and expressions that take into account the distribution of temperature and air pressure with height. The case when the rotation of the Earth around its axis leads to significant periodic temperature changes is considered in detail.

Research results and their discussion. The values of the main parameters of the atmosphere of Jupiter and Venus are found in order to study the oscillatory regimes of the atmospheres on these planets and build an appropriate mathematical model. At the beginning, we find the standard parameters of velocity amplitudes, temperatures, Brunt-Väisälä frequencies in order to calculate the quantities included in the system of equations describing the fluctuations of air in the atmosphere and build the corresponding graphs of these equations for the purpose of their further analysis. Solutions for oscillatory processes are obtained when daily changes in air temperature are taken into account.

Conclusions. It is shown that in the standard atmosphere the axial rotation of the planet does not affect the oscillatory processes in the atmosphere, while the terrain is taken into account. However, there is a case when the difference between the above frequencies is extremely small or zero (this is possible at). If the frequency of Brunt – Väisälä coincides with the frequency of the daily rotation of the Earth or their difference is insignificant, then phenomena such as resonance or beats occur, which are considered in detail.

Key words: Brunt – Väisälä frequency, temperature difference, temperature gradient difference, velocity, daily rotation frequency, ascending flows, amplitude, beats, resonance.

Введение

В статье проводится исследование колебательных режимов атмосфер двух планет (Юпитер, Венера) при учёте осевого вращения, которое оказывает влияние на возникновение биений и резонансов, сравниваются параметры атмосфер этих планет с параметрами атмосферы Земли.

Актуальность выбранной темы заключается в том, что в атмосфере планет периодически наблюдаются колебательные процессы высокой интенсивности. Мы хотим сравнить характеристики атмосфер двух планет, одна из которых принадлежит к планетам земной группы (Венера), а другая – к планетам-гигантам (Юпитер) с характеристиками земной атмосферы и сделать соответствующие выводы.

Задачей исследовательской работы является расчет основных параметров атмосферы Юпитера и Венеры с целью исследования колебательных режимов атмосфер на этих планетах и построения соответствующей математической модели. В начале мы находим стандартные параметры амплитуд скоростей, температур, частот Брента–Вяйсяля для того, чтобы рассчитывать величины, входящие в систему уравнений, описывающую колебания воздуха в атмосфере и строить соответствующие графики этих уравнений с целью их дальнейшего анализа.

Если происходит синхронизация колебательного режима атмосферы с осевым вращением планет, то наблюдаются такие явления, как биения и резонанс. Они довольно редкие на Земле, поэтому интересно узнать вероятность их возникновения на других планетах, их периодичность, особенности и характеристики. При расчетах и построении математической модели не будем учитывать сопротивление воздуха и рельеф (если он имеется).

Цель работы – изучение колебательных процессов, происходящих в атмосферах вышеуказанных планет, исследование таких явлений, как биения и резонанс, изучив условий их возникновения.

Материалы и методы исследования

Влияние суточного вращения планет

Вследствие вращения планеты вокруг своей оси возникают суточные колебания температур (по гармоническому за-

кону) [13;15]. Тогда для разности температур, исходя из зависимости (5), получим [1]:

$$\Delta T = \Delta_0 T + \Delta T_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0) - \Delta \gamma z, \quad (1)$$

где $\Delta_0 T = T_{i0} - T_{e0}$ – разность температур вблизи поверхности $z = 0$;
 T_{i0} – температура возникшего в атмосфере воздушного потока;

T_{e0} – статичная температура окружающей среды [10],

$\Delta_0 \gamma = \gamma_a - \gamma$ – разность сухадиабатического и вертикального градиента температур [9],

ψ_0 – начальная фаза, определяемая временем суток.

Учитывая зависимость (10), аналогично получим систему уравнений, описывающую колебания воздуха в атмосфере, исходя из уравнения движения сухого воздуха:

$$\frac{dw}{dt} = \alpha g \Delta T, \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -\Delta \gamma w - \omega_0 \Delta T_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0).$$

Тогда уравнения колебаний, учитывающие внешние воздействия, имеют вид:

$$\frac{d^2 \Delta T}{dt^2} + N_{BV}^2 \Delta T = -\omega_0^2 \Delta T_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0), \quad (3)$$

$$\frac{d^2 w}{dt^2} + N_{BV}^2 w = -\alpha g \omega_0 \Delta T_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0).$$

где $N_{BV} = \sqrt{\alpha g \Delta \gamma}$ – частота Брента – Вайсяля.

Решения уравнений (3) можно представить в виде:

$$\overline{\Delta T}(t) = \Delta_0 T \cos(N_{BV} t + \varphi_0) - \frac{\omega_0^2}{N_{BV}^2 - \omega_0^2} \Delta T_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0) \quad (4)$$

$$\bar{w}(t) = w_{\max} \sin(N_{BV} t + \varphi_0) - \frac{\omega_0}{N_{BV}^2 - \omega_0^2} \alpha g \Delta T_0 \sin(\omega_0 t + \psi_0). \quad (5)$$

Учитывая связь, удобно ввести параметр $\varepsilon = \frac{N_{BV}^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2}$, тогда уравнение колебаний разности температур (4) можно представить в виде:

$$\overline{\Delta T}(t) = \Delta_0 T \cos(N_{BV}t) - \frac{1}{\varepsilon} \Delta T_0 \cos(\omega_0 t). \quad (6)$$

Аналогично для скорости получим:

$$\overline{w}(t) = w_{\max} \sin(N_{BV}t) - \frac{1}{\varepsilon} \alpha g \Delta T_0 \sin(\omega_0 t). \quad (7)$$

Биения возникают в результате сложении двух колебаний с близкими по значению частотами [12]. При определенных значениях частоты Брента-Вайсяля в атмосфере планет могут наблюдаться биения. Для этого должно выполняться условие:

$$N_{BV} = \omega_0 + \Delta\omega, \quad \left| \Delta\omega / \omega_0 \right| = 1.$$

Если $N_{BV} = \omega_0$ (условие резонанса) [3], то $\Delta\omega = 0$, тогда для $\Delta\gamma_{\text{рез}}$ получим:

$$\Delta\gamma_{\text{рез}} = \frac{\omega_0^2}{\alpha g}. \quad (8)$$

С учётом (8), для ε можно также установить связь с разностью градиентов температур:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\gamma - \Delta\gamma_{\text{рез}}}{\Delta\gamma_{\text{рез}}}.$$

Основные параметры атмосфер

1. Градиент автоконвекции:

$$\gamma = g/R_d,$$

где R_d — удельная газовая постоянная для планеты,
 g — ускорение свободного падения.

Так как в состав атмосферы входят несколько химических элементов, то R_d будем рассчитывать для газовой смеси:

$$R_d = \sum \varphi_i R_i = R^* \sum \frac{\varphi_i}{M_i},$$

где φ – массовая доля отдельно взятого газа,
 M – молярная масса,
 R^* – универсальная газовая постоянная [2; 5; 20].

2. Коэффициент α – характеристика, обратная температуре. Для приземного слоя справедливо:

$$\alpha = \frac{1}{T_0},$$

где T_0 – температура на высоте $z = 0$.
 Для некоторого слоя атмосферы получаем среднее значение коэффициента $\bar{\alpha}$:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\bar{T}} = \frac{1}{\left(\frac{T_i + T_{i-1}}{2}\right)},$$

где T_i – температура верхней границы зоны,
 T_{i-1} – температура нижней границы зоны.

3. Сухоадиабатический градиент:

$$\gamma_a = \frac{g}{c_p},$$

где c_p – удельная теплоемкость смеси газов атмосферы планеты, которую мы будем искать по следующей формуле [4; 18]:

$$(c_p)_{\text{см}} = \frac{(c_p)_{\text{см}}}{M_{\text{см}}} = \frac{\sum \varphi_i c_{pi}}{M_{\text{см}}},$$

где $c_p = \frac{i+2}{2} R^*$.

4. Вертикальный градиент температуры: $\gamma = -\frac{dT}{dz}$.

5. Частота N_{BV} и период колебаний Брента-Вяйсяля.

Результаты исследований и обсуждение

Атмосфера Юпитера преимущественно состоит из водорода (89 %) и гелия (10 %), атмосфера Венеры – из углекислого газа (96,5 %) и азота (3,5 %) [8; 16]. Определим удельную газовую постоянную смеси газов, составляющих атмосферу планет.

Молярная масса водорода $M_{H_2} = 0,002$ кг/моль,
гелия – $M_{He} = 0,004$ кг/моль,
углекислого газа – $M_{H_2} = 0,002$ кг/моль,
азота – $M_{Ne} = 0,028$ кг/моль [14].

Массовые доли основных газов на Юпитере:

$$\varphi_{Ne} = 0,89, \varphi_{Ne} = 0,1,$$

$$\text{на Венере} - \varphi_{CO_2} = 0,965, \varphi_{N_2} = 0,035.$$

Для смеси газов в атмосфере Юпитера и Венеры соответственно получим:

$$R_d = 3905,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \text{ и } R_d = 192,64 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Ускорение свободного падения на Юпитере

$$g \approx 25,8 \text{ м/с}^2, \text{ на Венере} - g \approx 8,6 \text{ м/с}^2, \text{ тогда для гра-}$$

диента автоконвекции получим соответственно:

$$\gamma_A = 0,0066 \text{ К/м}, \gamma_A = 0,0446 \text{ К/м}.$$

Для того, чтобы определить численные значения градиента температуры, воспользуемся графиками зависимости температуры от высоты (рис. 1, а).

Рассмотрим параметры атмосферы Юпитера более подробно.

Условно разделим график (рис. 1, а) на три зоны:

- 1) 0 км – 182 км;
- 2) 182 км – 452 км;
- 3) 452 км – 1132 км.

Найдем температурный градиент для каждой из них.

Обозначим через T_1 температуру нижней границы зоны, а через T_2 – верхней границы. Направление движение по графику снизу-вверх.

Для первой области (0 км – 182 км) получим:

$$\gamma_1 = 0,0019 \text{ К/м};$$

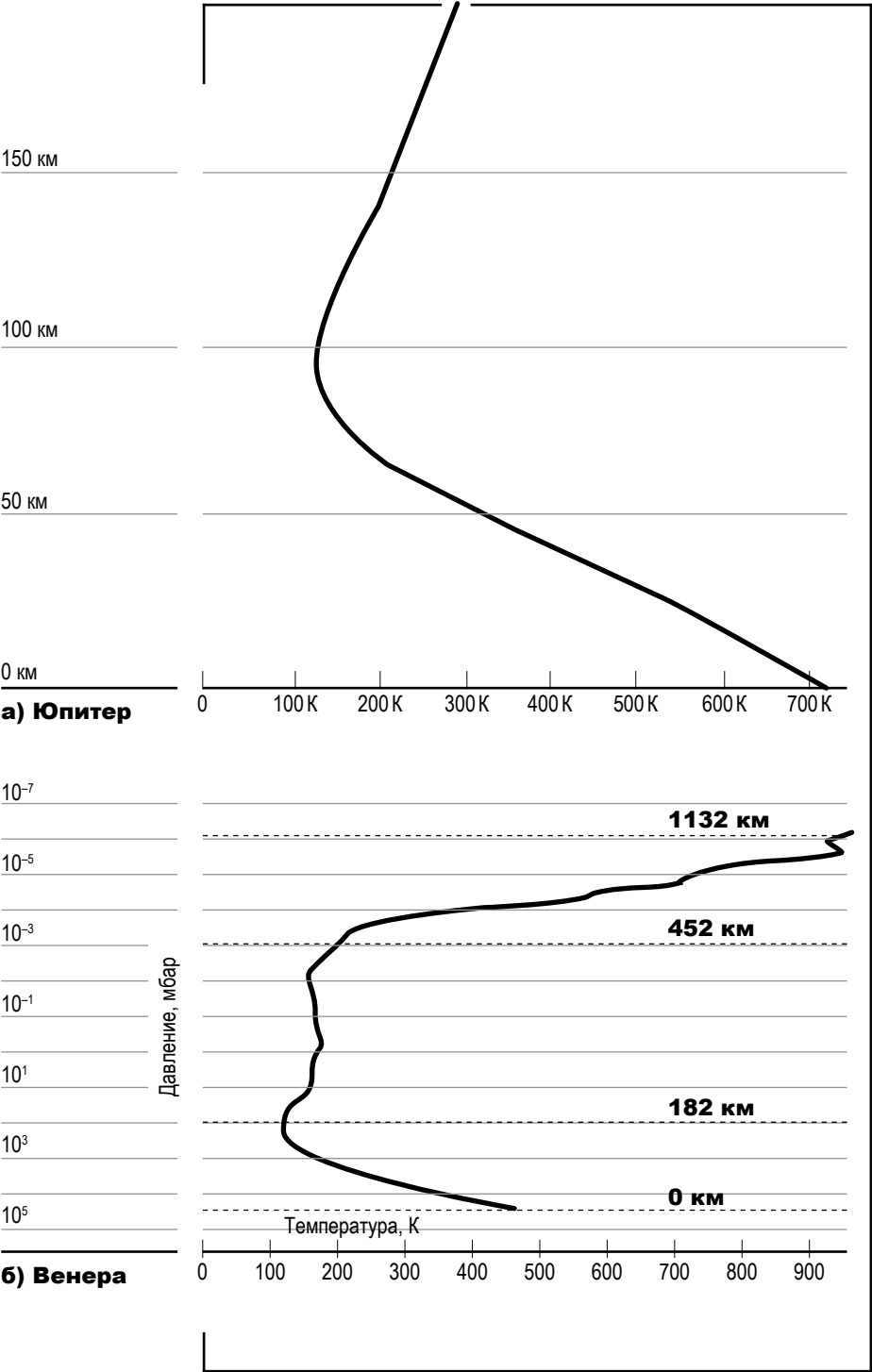


Рис. 1. Графики распределения температуры по высоте [17; 19].
Fig. 1. Temperature distribution graphs by height [17; 19].

Для второй области (182 км – 452 км) получим:

$$\gamma_2 = -0,00033 \text{ К/м};$$

Для третьей области (452 км – 1132 км) получим:

$$\gamma_3 = -0,00114 \text{ К/м}.$$

Можем видеть, что градиент изменяется, принимая как положительные, так и отрицательные значения [7].

Температура вблизи поверхности $T_0 \approx 470 \text{ К}$, следовательно $\alpha = 0,00212 \text{ К}^{-1}$. Молярная масса смеси газов – $M_{\text{см}} = 0,00212 \text{ кг/моль}$, отсюда удельная теплоемкость смеси $c_p = 10093,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, и тогда $\gamma_a = 0,0025 \text{ К/м}$.

Рассчитаем частоту Брента–Вяйсяля и период для каждой из выделенных на графике зон. В данном случае мы находим среднее значение $\bar{\alpha}$. Аналогично рассчитаем все параметры для Венеры. Температура из рисунка 1, б вблизи поверхности $T_0 \approx 720 \text{ К}$, тогда $\alpha = 0,0013 \text{ К}^{-1}$.

Определим вертикальный градиент температуры. Разобьем график (рис. 1, б) на две зоны и определим γ для каждой из них. Движение по графику аналогично будем осуществлять снизу-вверх. Для первой зоны (0 км – 100 км) получим: $\gamma_1 = 0,0061 \text{ К/м}$;

Для второй зоны (100 км – 150 км) получим: $\gamma_2 = -0,0022 \text{ К/м}$;

Рассчитаем значение сухоадиабатического градиента. Молярная масса смеси газов, составляющих атмосферу Венеры – $M_{\text{см}} = 0,0431 \text{ кг/моль}$. Удельная теплоемкость, согласно расчётам, $c_p = 767,8 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Тогда для сухоадиабатического градиента получим: $\gamma_a = 0,0112 \text{ К/м}$.

По аналогии предыдущим примером определим численные значения частоты Брента–Вяйсяля и периода для каждой из выделенных на графике зон. Все основные параметры атмосферы занесены в таблице 1.

При сравнении соответствующих зон у планет можем видеть, что частота Брента–Вяйсяля, коэффициент α и период колебаний меняются незначительно, разность градиента температуры у Юпитера меньше, чем у Венеры.

Угловые скорости суточного вращения Юпитера и Венеры соответственно равны:

Таблица 1.

ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЖДОЙ ЗОНЫ
АТМОСФЕРЫ ЮПИТЕРА И ВЕНЕРЫ
Table 1. Values of the main parameters of each zone of the Venus
atmosphere

Планета	Зона, км	α , К ⁻¹	Δy , К/м	N_{BV} , с ⁻¹	T_{BV} , МИН
Юпитер	0–182	0,0033	0,0006	0,00714	14,6
	182–452	0,00606	0,00283	0,02103	4,97
	452–1132	0,00165	0,00364	0,0124	8,44
Венера	0–100	0,00229	0,0051	0,01	10,4
	100–150	0,0055	0,0134	0,0392	2,67

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{Ю}} = 1,75 \cdot 10^{-4} \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{В}} = 2,991 \cdot 10^{-7} \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Разность температур определяется по формуле (4). Будем считать, что $\varphi_0 = 0$ и $\psi_0 = 0$ (учтем, что нет орографии). На Юпитере примем $\Delta_0 T = 10$ К. Далее определим $\Delta_0 T = \bar{T}_0 - \bar{T}_{e0}$, где $\bar{T}_0$ – температура поверхности днем, $\bar{T}_{e0}$ – температура поверхности ночью. Так как температура «поверхности» практически не меняется из-за того, что Юпитер находится на значительном расстоянии от Солнца, то примем $\Delta T_0 = 1$ К. У Венеры же разница дневной и ночной температур незначительна, поэтому примем

$$\Delta T_0 = 743-733 = 10 \text{ К [6].}$$

Определим значение w_{max} по следующей формуле:

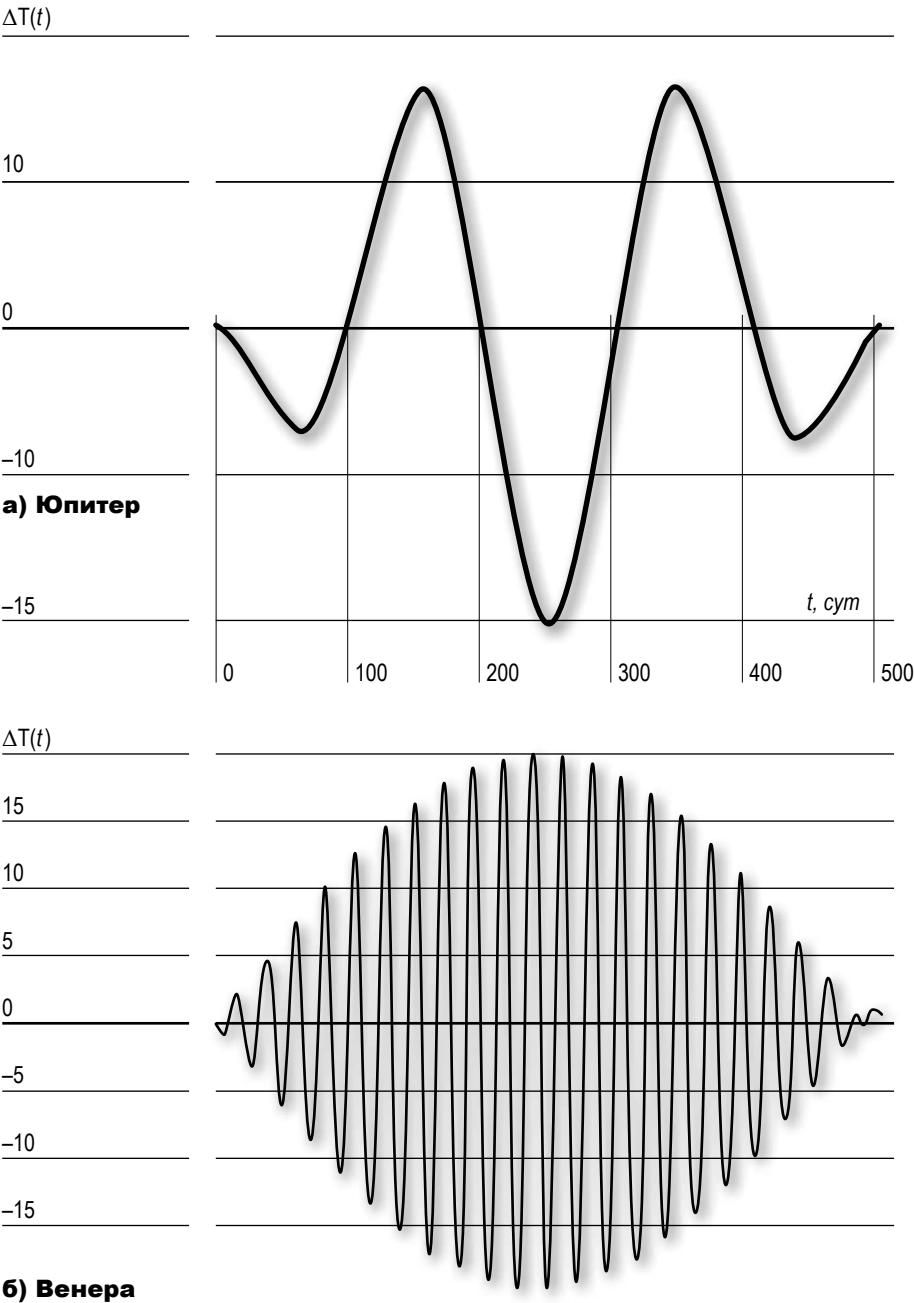


Рис. 2. Графики биения колебаний температуры при равных амплитудах (время по оси x в сутках).
Fig. 2. Graphs of beating temperature fluctuations at equal amplitudes (time along the x – axis per day).

$$w_{\max} = N_{\text{BV}} h_{T0} = \Delta_0 T \sqrt{\frac{\alpha g}{\Delta \gamma}},$$

где $h_{T0} = \frac{\Delta_0 T}{\Delta \gamma}$ – уровень выравнивания температур вертикального воздушного потока и окружающей атмосферы [11].

У Юпитера для первой зоны:

$$w_{\max 2} = 119,1 \text{ м/с};$$

$$\text{для второй зоны: } w_{\max 2} = 74,3 \text{ м/с};$$

$$\text{для третьей зоны: } w_{\max 3} = 34,3 \text{ м/с}.$$

$$\text{У Венеры для первой зоны: } w_{\max 1} = 19,6 \text{ м/с};$$

$$\text{для второй зоны: } w_{\max 2} = 18,7 \text{ м/с}.$$

Определим резонансную разность градиента температуры для Юпитера и Венеры по формуле (12).

$$\text{Для Юпитера: } \Delta \gamma_{\text{рез}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ К/м};$$

$$\text{для Венеры: } \Delta \gamma_{\text{рез}} = 8 \cdot 10^{-12} \text{ К/м}.$$

Проведем сравнение параметров

Юпитера и Венеры:

1. Угловая скорость суточного вращения Юпитера в 580 раз больше угловой скорости вращения Венеры вокруг своей оси.
2. Скорости перемещения вертикальных воздушных потоков на Юпитере значительно больше, чем на Венере. На это влияют следующие факторы: ускорение свободного падения (на Юпитере в 3 раза больше, чем на Венере), средняя разность градиента температур $\Delta \bar{\gamma}$ (на Венере в 3,9 раза больше, чем на Юпитере), градиент автоконвекции (на Юпитере в 4,48 раз меньше, чем на Венере). Коэффициент α примерно одинаков для обеих планет.
3. Так как резонансная разность градиента температуры связана с угловой скоростью суточного вращения, то на Юпитере $\Delta \gamma_{\text{рез}}$ в $6,8 \cdot 10^4$ раз больше, чем на Венере.

БИЕНИЯ ПРИ РАВНЫХ АМПЛИТУДАХ***Юпитер***

При биениях с равными амплитудами, описываемых в общем случае уравнением (4), справедливо равенство

$$\Delta_0 T = \frac{\omega_0^2}{N_{BV}^2 - \omega_0^2} \Delta T_0.$$

Выразим частоту Брента-Вайсяля и найдем $\Delta\omega$ для данного случая:

$$N_{BV} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta T_0}{\Delta_0 T}}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} N_{BV} &= 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}, \\ \Delta\omega &= 8,10^{-6} \text{ с}^{-1}, \\ \Delta\gamma &= 6,1 \cdot 10^{-7} \text{ К/м}, \\ \varepsilon &= 0,0935. \end{aligned}$$

Уравнение колебаний можно представить в виде:

$$\Delta T(t) = -2 \cdot \Delta_0 T \sin\left(\frac{\Delta\omega}{2} t\right) \sin(\omega_0 t) = 2 \cdot \Delta_0 T \sin\left(\frac{\varepsilon\omega_0}{4} t\right) \sin(\omega_0 t).$$

Определим период биений:

$$T_{\text{биен}} = 18,1 \text{ сут.}$$

Амплитуда биений меняется в пределах:

$$\Delta_0 T \pm \frac{1}{\varepsilon} \Delta T_0 = (10 \pm 10) \text{ К}.$$

Венера

Найдем частоту Брента-Вайсяля для данного случая при равных амплитудах:

тогда

$$\begin{aligned} N_{BV} &= 4,22 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}, \\ \Delta\gamma &= 1,59 \cdot 10^{-4} \text{ К/м}, \\ \varepsilon &= 0,989. \end{aligned}$$

Определим период биений: $T_{\text{биен}} = 3,2 \text{ года}.$

Амплитуда биений меняется в пределах:

$$\Delta_0 T \pm \frac{1}{\varepsilon} \Delta T_0 = (10 \pm 10) \text{ К}.$$

Так как амплитуды колебаний равны, то можем видеть четкое биение.

У Юпитера одно полное биение укладывается в несколько суток, на Венере – в несколько лет. Так как резонансные частоты Брента-Вяйсяля (или циклические частоты вращения планет) и соотношение разности температур отличаются, то различны условия биений. Однако амплитуды биений меняются в тех же диапазонах.

Резонанс

При резонансе частота Брента-Вяйсяля равна циклической частоте вращения планеты вокруг своей оси ($N_{BV} = \omega_0$), тогда уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{d^2 \Delta T}{dt^2} + \omega_0^2 \Delta T = -\omega_0^2 \Delta T_0 \cos(\omega_0 t + \psi_0). \quad (9)$$

При сдвиге ψ_0 на $\pi/2$ решение уравнения (9) представим в следующем виде (где $n = \frac{\Delta_0 T}{\Delta T_0}$):

$$\overline{\Delta T}(t) = \Delta_0 T \cos(\omega_0 t) - \frac{\omega_0 t}{2} \Delta T_0 \cos(\omega_0 t) = \Delta T_0 \left[n - \frac{\omega_0 t}{2} \right] \cos(\omega_0 t).$$

По графикам можем видеть резкое возрастание амплитуды при равенстве частоты Брента-Вяйсяля циклической частоте вращения планет вокруг своей оси. Так как мы не учитывали вязкость воздуха, то в нашей идеальной модели амплитуда растет до бесконечности. Скорость возрастания амплитуды на Юпитере во много раз больше скорости возрастания амплитуды на Венере.

Сравнение параметров атмосферы Юпитера и Венеры с параметрами атмосферы Земли

- 1) При разных частотах суточного вращения планет вокруг своей оси, будут отличаться и условия возникновения резонанса и биений.
- 2) Частоты Брента-Вяйсяля планет не имеют существенных отличий при стандартных условиях, хотя их составные характеристики (α , g , $\Delta\gamma$) различны.

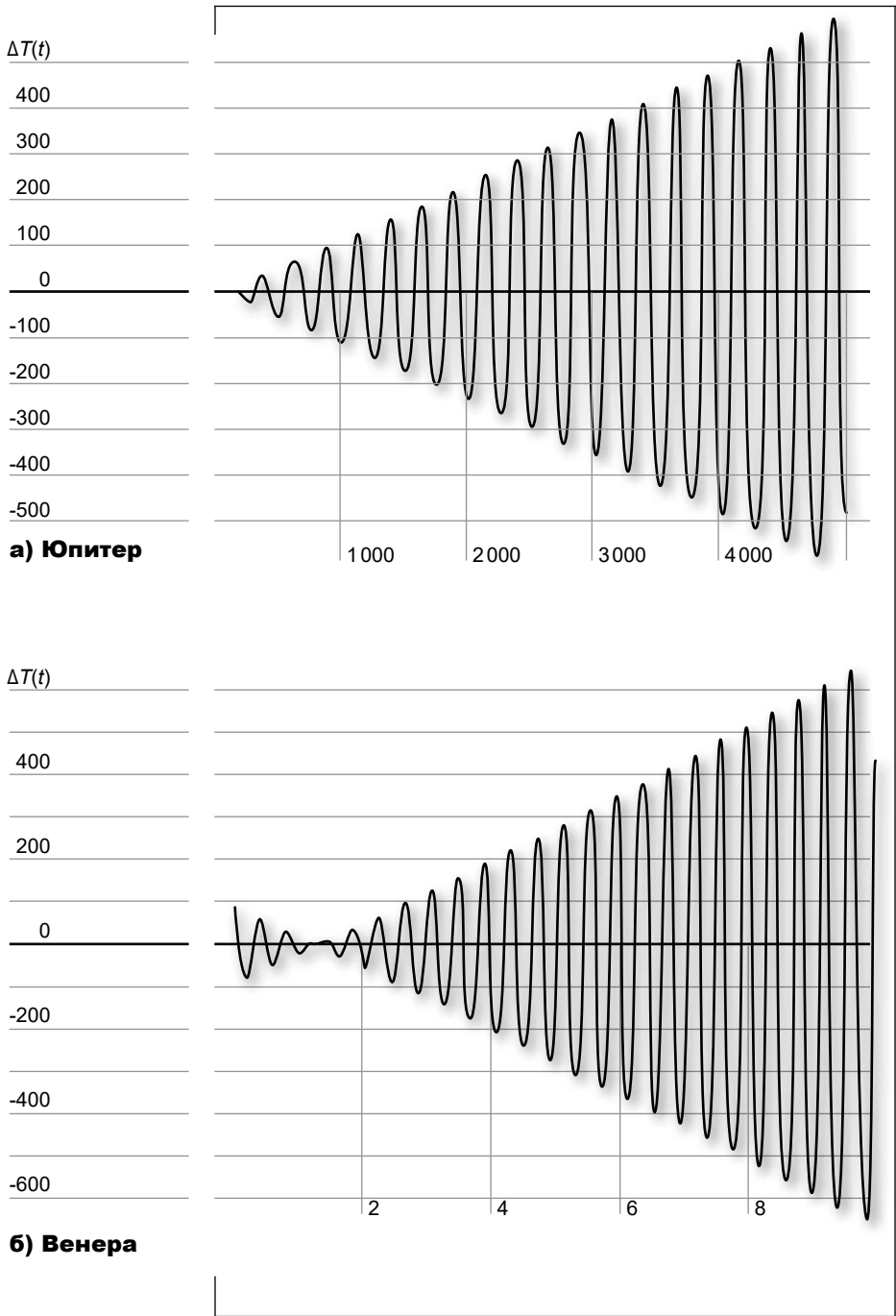


Рис. 3. Графики колебаний температуры при резонансе $N_{\text{BN}} = \omega_0$ (время по оси x в сутках).
Fig. 3. Graphs of temperature fluctuations during resonance (time along the x – axis per day).

Таблица 2. ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАНЕТ
Table 2. General parameters of planets

Планета	Юпитер	Венера	Земля
1. Циклическая частота суточного вращения вокруг своей оси, ω_0 (рад/с)	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$2,991 \cdot 10^{-7}$	$7,27 \cdot 10^{-5}$
2. Коэффициент $\alpha(K^{-1})$	0,00212	0,0013	0,0034
3. Сухоадиабатический градиент, $\gamma_a(K/m)$	0,0025	0,0112	0,0101
4. Градиент автоконвекции, $\gamma_A(K/m)$	0,0066	0,0446	0,035
5. Разность градиента температур, $\Delta \bar{\gamma}$	0,00235	0,00925	0,0018
6. Градиент разности температуры, $\bar{\gamma}$ (K/m)	0,000143	0,00195	0,0119
7. Частота Брента–Вяйсяля, $\bar{N}_{BV}(c^{-1})$	0,0106	0,0246	0,012
8. Разность частот, $\Delta \bar{\omega}(c^{-1})$	0,01042	0,02459	0,01192

Вывод

- 1) Атмосфера Юпитера более нестабильна, чем у планет земной группы, так как амплитуды скоростей вертикальных воздушных потоков гораздо выше;
- 2) Вероятность возникновения резонансов и биений у Венеры меньше по сравнению с Юпитером. Это связано с частотой суточного вращения планеты вокруг своей оси. Чем больше ω_0 , тем больше планета подвержена вышеуказанным явлениям.
- 3) Период биений при равных амплитудах у Венеры в 64,5 раза больше, чем у Юпитера, следовательно, биения на Венере происходят медленнее. При резонансе амплитуда у Юпитера растет с большей скоростью, чем у Венеры;
- 4) При стандартных условиях существенных различий колебаний в атмосфере нет, резонансы и биения сравнительно редки, их частоты зависят от расстояния планеты до Солнца в соответствии с третьим законом Кеплера;

- 5) Так как частоты вращения Земли и Юпитера не сильно отличаются (разница на один порядок) по сравнению с частотой вращения Венеры, то биения и резонансы будут происходить на Земле приблизительно с той же вероятностью и тем же периодом, что и на Юпитере.

Библиографический список

1. Афанасьев И.С., Закинян Р.Г. Колебания сухого воздуха в атмосфере // Наука. Инновации. Технологии. 2022. №1. С. 65–86.
2. Берд Г. Молекулярная газовая динамика. Москва: Мир, 1981. 320 с.
3. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. Москва: Наука, 1971. 896 с.
4. Вегенер А. Термодинамика атмосферы: перевод с немецкого и дополнения В. Белинского и Ш. Гофштейн. Москва: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР-главная редакция общетехнической литературы и номографии, 1935. 284 с.
5. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 192 с.
6. Кондратьев К.Я., Крупенин Н.Н., Селиванов А.С. Планета Венера. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 280 с.
7. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. Москва: Физматлит, 2011. 452 с.
8. Маров М.Я. Планеты Солнечной системы. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 320 с.
9. Полянская Н.Е., Закинян Р.Г. Исследование влияния рельефа Ставропольского края на динамику тепловой конвекции // Наука. Инновации. Технологии. 2013. №2. С. 35–42.
10. Рыжков Р.Д., Аванесян К.С., Смирнова Л.Н., Закинян Р. Г. Двумерная модель тепловой конвекции сухого воздуха в атмосфере // Наука. Инновации. Технологии. №1. 2019. С. 117–130.
11. Симахина М. А. Условия возникновения и методика расчета параметров конвекции в атмосфере: дис. ... кандида-

та физико-математических наук. Ставрополь: Высокогор. геофиз. ин-т., 2010. 181 с.

12. Сидоренков Н.С. Небесно-механические причины изменений погоды и климата // Геофизические процессы и биосфера. 2015. №3. Т. 14. С. 5–26.
13. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Weinheim. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 317 p.
14. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 1969. 645 с.
15. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли: обзор: наблюдение и механизмы формирования. Москва: Институт космических исследований, 2011. 58 с.
16. Чемберлен Дж. Теория планетных атмосфер. Москва: Мир, 1981. 352 с.
17. Galspace. Jupiter is a formidable giant [Электронный ресурс]. URL: <http://galspace.spb.ru/index515.html> (Дата обращения 25.02.2022).
18. Mydocx.ru. Statics and thermodynamics of the atmosphere [Электронный ресурс]. URL: <https://mydocx.ru/9-110945.html> (Дата обращения 14.02.2022).
19. V-kosmose. Atmosphere of Venus [Электронный ресурс]. URL: <https://v-kosmose.com/planeta-venera-interesnyie-fakty-i-osobennosti/atmosfera/>. (Дата обращения 28.02.2022).
20. X-Term.ru. Mixtures of gases [Электронный ресурс]. URL: https://x-term.ru/primer/tech_termodinam/raschet_smesi (Дата обращения 06.02.2022).

References

1. Afanasyev I.S., Zakinyan R.G. Fluctuations of dry air in the atmosphere // Nauka. Innovation. Technologies. 2022. No. 1, P. 65–86. (In Russ.).
2. Byrd G. Molecular gas dynamics. M.: Mir, 1981. 320 p. (In Russ.).
3. Blekhman I.I. Synchronization in nature and technology. M.: Nauka, 1971. 896 p. (In Russ.).
4. Wegener A. Thermodynamics of the atmosphere: translated from German and supplemented by V. Belinsky and S. Hofstein. M.: United Scientific and Technical Publishing House of the NKTP of the USSR – the main editorial office of general technical literature and nomography, 1935 284 p. (In Russ.).

5. Karol I.L., Rozanov V.V., Timofeev Yu.M. Gas impurities in the atmosphere. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 192 p. (In Russ.).
6. Kondratiev K.Ya., Krupenio N.N., Selivanov A.S. Planet Venus. L.: Hydrometeoizdat, 1987. 280 p. (In Russ.).
7. Mohanakumar K. Interaction of stratosphere and troposphere. M.: Fizmatlit, 2011. 452 p. (In Russ.).
8. Marov M.Ya. Planets of the Solar system. 2nd ed., reprint. and additional. M.: Nauka, Gl. ed. phys.-mat. lit., 1986. 320 p. (In Russ.).
9. Polyanskaya N.E., Zakinyan R.G. Research of influence of a relief of Stavropol Krai on dynamics of thermal convection // Science. Innovations. Technologies. 2013. No. 2. P. 35–42. (In Russ.). (In Russ.).
10. Ryzhkov R.D., Avanesyan K.S., Smirnova L.N., Zakinyan R.G. To the two-dimensional model of heat convection of dry air in the atmosphere // Science. Innovations. Technologies. 2019. No. 1. P. 117–130. (In Russ.).
11. Simakhina M.A. Conditions of occurrence and method of calculating the parameters of convection in the atmosphere: dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences: 25.00.30. Vysokogor. geophys. in-t]. Stavropol, 2010. 181 p. (In Russ.).
12. Sidorenkov N.S. Celestial-mechanical factors of the weather and climate change // Geophysical Processes and the Biosphere. 2015, No. 3. Vol. 14. P. 5–26. (In Russ.).
13. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes. Weinheim. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 317 p. (In Russ.).
14. Khragian A.H. Physics of the atmosphere. L., Gidrometeoizdat, 1969. 645 p.
15. Khairullina G.R., Astafyeva N.M. Quasi-two-year fluctuations in the Earth's atmosphere: review: observation and mechanisms of formation. Moscow: Institute of Space Research, 2011. 58 p. (In Russ.).
16. Chamberlain J. Theory of planetary atmospheres. M.: Mir, 1981. 352 p. (In Russ.).
17. Galspace. Jupiter is a formidable giant [Electronic resource]. <http://galspace.spb.ru/index515.html> (Accessed 25.02.2022).
18. Mydocx.ru. Statics and thermodynamics of the atmosphere. [Electronic resource]. <https://mydocx.ru/9-110945.html> (Accessed 14.02.2022).
19. V-kosmose. Atmosphere of Venus. [Electronic resource].

<https://v-kosmose.com/planeta-venera-interesnyie-faktyi-i-osobennosti/atmosfera/>. (Accessed 28.02.2022).

20. x-Term.ru. Mixtures of gases. [Electronic resource]. https://x-term.ru/primer/tech_termodinam/raschet_smesi (Accessed 06.02.2022).

Поступило в редакцию 06.09.2022,
принята к публикации 19.11.2022.

Об авторах

- Афанасьев** Игорь Сергеевич, студент направления 03.04.02 Физика, физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.
E-mail: afanasevigor278@gmail.com.
- Слущкая** Ольга Юрьевна, студент направления 03.03.02 Физика, физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.
E-mail: olgaslyscaya@bk.ru.
- Закинян** Роберт Гургенович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и математической физики физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.
E-mail: zakinyan@mail.ru.

About the authors

- Afanasyev** Igor Sergeevich, student of the direction 03.04.02 Physics, Faculty of Physics and Technology of the North Caucasus Federal University.
E-mail: afanasevigor278@gmail.com.
- Slutskaya** Olga Yuryevna, student of the direction 03.03.02 Physics, Faculty of Physics and Technology of the North Caucasus Federal University.
E-mail: olgaslyscaya@bk.ru.
- Zakinyan** Robert Gurgenovitch, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Theoretical and Mathematical Physics of the Faculty of Physics and Technology of the North Caucasus Federal University.
E-mail: zakinyan@mail.ru.