

Современная наука и инновации.  
2023. № 4 (44). С. 160-166.  
Modern Science and Innovations.  
2023; 4(44):160-166.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /  
TECHNICAL SCIENCE

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ / INFORMATICS, COMPUTER  
ENGINEERING AND MANAGEMENT

Научная статья / Original article

УДК 533.9.01/ 533.9-116/ 533.951  
<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.18>

**Николай Климович Шивидов**  
[Nikolay K. Shividov]<sup>1</sup>,  
**Арслан Константинович Балтыков**  
[Arslan K. Baltykov]<sup>2\*</sup>,  
**Тимофей Владимирович Велегурин**  
[Timofey V. Velegurin]<sup>3</sup>,  
**Галина Алексеевна Манкаева**  
[Galina A. Mankaeva]<sup>4</sup>,  
**Бадма Борисович Михальев**  
[Badma B. Mikhalyaev]<sup>5</sup>

**Моделирование распространения  
квазипериодических осцилляций в  
корональной плазме**

**The modeling of quasi-periodic oscillations  
propagation in the solar corona**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> *Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова,  
г. Элиста, Россия / Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, Elista, Russia*

*\*Автор, ответственный за переписку: Арслан Константинович Балтыков, balars90@yandex.ru /*  
*Corresponding author: Arslan K. Baltykov, balars90@yandex.ru*

**Аннотация.** В общей проблеме колебаний, наблюдаемых в солнечной короне, особенно интригующее место занимают квазипериодические осцилляции, которые часто наблюдаются в корональных дырах. Чаще всего периоды наблюдаются в парах близких значений. Среди возможных объяснений этого явления мы рассматриваем дисперсию акустических волн под влиянием теплопроводности. Возможность появления пар периодов может быть связана с существованием минимума на групповой скорости, который реализуется в условиях, имеющихся в короне. Мы показываем, как это работает, а также утверждаем, что данный механизм может служить для целей корональной сейсмологии для определения параметров корональной плазмы.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, квазипериодические осцилляции, физика плазмы, численное решение, звуковые волны, гидродинамика, дисперсия, волновые пакеты

**Для цитирования:** Шивидов Н. К., Балтыков А. К., Велегурин Т. В., Манкаева Г. А., Михальев Б. Б. Моделирование распространения квазипериодических осцилляций в корональной плазме // Современная наука и инновации. 2023. № 4 (44). С. 160-166. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.18>

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№075-03-2022-119/1 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

**Abstract.** In the general problem of oscillations observed in the solar corona, a particularly intriguing position is occupied by quasi-periodic oscillations, which are often observed in coronal holes. Most often, periods are observed in pairs of close values. Among the possible explanations of this phenomenon, we consider the dispersion of acoustic waves under the influence of thermal conductivity. The possibility of the appearance of pairs of periods may be due to the existence of a minimum at the group velocity, which is realized under the conditions available in the corona. We show how this works, and also claim that this mechanism can serve for the purposes of coronal seismology to determine the parameters of coronal plasma.

**Keywords:** computer modeling, quasi-periodic oscillations, plasma physics, numerical solution, acoustic waves, hydrodynamics, dispersion, wave packets

**For citation:** Shvidov NK, Baltykov AK, Velegurin TV, Mankaeva GA, Mikhalyaev BB. The modeling of quasi-periodic oscillations propagation in the solar corona. *Modern Science and Innovations*. 2023;4(44):160-166. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.18>

**Funding:** the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 075-03-2022-119/1 "Development of new observational and theoretical approaches in space weather forecasting based on ground-based observations").

**Введение.** В солнечной короне часто наблюдаются колебания на нескольких, чаще всего на двух частотах. В случае корональных петель обычно говорят, что происходят колебания корональных магнитных трубок на двух или нескольких модах [1]. Аналогичный ответ затруднителен в случае корональных дыр. Колебания регистрируются по вариациям интенсивности излучения и объясняются изменением плотности плазмы, поэтому их называют волнами сжатия. Krishna Prasad et al. [2] приводят примеры наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне на длинах волн 171, 193 и 211 Å. Условия формирования линий дают характерные значения температуры около 0.8, 1.25 и 1.6 МК. В большинстве случаев имеются пары периодов, близких по величине. Пары были следующими.

Для 171 Å: 24.3 и 13.2 мин, 18.7 и 12.1, 31.4 и 13.2, 18.7 и 11.1, 28.8 и 14.40, 26.4 и 12.1, 28.8 и 18.7, 24.3 и 14.4, 26.4 и 17.1, 18.7 и 12.1.

Для 193 Å: 28.8 и 12.1 мин, 20.4 и 17.1, 26.4 и 13.2, 22.2 и 10.2, 26.4 и 10.2, 24.3 и 17.1, 31.4 и 17.1, 24.3 и 14.4, 26.4 и 18.7, 18.7 и 11.1.

Gupta [3] приводит периоды 22.24 и 5.56 и 22.24 и 15.72.

Причины появления пар можно указать самые различные, в том числе упомянутые уже моды магнитных трубок. Мы предлагаем иной механизм, связанный с дисперсией акустической волны из-за теплопроводности плазмы. Квазипериодические колебания могут возникать в результате наложения волн, имеющих одну групповую скорость. Такая возможность возникает в случае, когда групповая скорость имеет минимум при некоторой длине волны. Здесь происходит наложение именно двух групп волн. Оказывается, под действием эффектов теплопроводности и нагрева-радиационных потерь появляется два подобных минимума, из которых для объяснения наблюдаемых периодов подходит теплопроводность. Другой эффект приводит к долгопериодическим колебаниям с периодами порядка нескольких часов.

**Материалы и методы исследований.** Математическая модель. Для описания волн используются уравнения одномерной газовой динамики с учетом эффектов теплопроводности и нагрева/радиационных потерь:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial v_x}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - (\gamma - 1) \rho (\rho \Lambda(T) - H),$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial v_x}{\partial x} = (\gamma - 1) \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - (\gamma - 1) \rho (\rho \Lambda(T) - H), \quad (3)$$

$$p = \rho \frac{RT}{M}, \quad (4)$$

где  $\gamma = 5/3$  – показатель адиабаты,  $M = 0.62$  г моль<sup>-1</sup> – молярная масса. Нагрев  $H$  считаем константой [5], определяемой из условия теплового баланса в равновесном состоянии:  $\rho_0 \Lambda(T_0) - H = 0$  [6]. Для коэффициента теплопроводности берется классическое спитцерское выражение

$$\kappa(T) = 2.28 \times 10^{-6} T^{5/2} \text{ эрг см}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-1}. \quad (5)$$

Для функции излучения  $\Lambda(T)$  мы используем приближенное аналитическое описание в виде кубических сплайнов, данное в работе [4]. Для анализа колебаний используется дисперсионное уравнение, приведенное в работе [6].

$$\tilde{\omega}^3 + iA\tilde{\omega}^2 - \tilde{C}_S^2 \tilde{k}^2 \tilde{\omega} + iB = 0 \quad (6)$$

$$A = A_1 \tilde{k}^2 + A_2, \quad B = \frac{1}{\gamma} (-A_1 \tilde{k}^2 - A_2 + A_3) \tilde{C}_S^2 \tilde{k}^2 \quad (7)$$

$$A_1 = \frac{(\gamma-1)Mm(k)}{R\rho_0 m(\omega)} \kappa(T_0), \quad A_2 = \frac{(\gamma-1)M}{R\rho_0 m(\omega)} \rho_0 \Lambda'(T_0), \quad A_3 = \frac{(\gamma-1)M}{RT_0 m(\omega)} \rho_0 \Lambda(T_0), \quad (8)$$

Масштабные коэффициенты  $m(k)$ ,  $m(\omega)$  выберем аналогично данным в работе [4].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Моделирование распространения волновых пакетов звуковых волн. В качестве примера рассмотрим волны в плазме с температурой  $T_0 = 1.25$  МК, что соответствует условиям наблюдения в линии  $193 \text{ \AA}$  [2-3]. На рисунках 1-4 показаны дисперсионные кривые для плотности частиц  $n_0 = 1.6 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Групповая скорость имеет два локальных минимума. Спектральное распределение  $F(k)$  исходного широкого пакета выбрано так, чтобы захватывать целую окрестность минимума групповой скорости, представлено на рисунке 5.

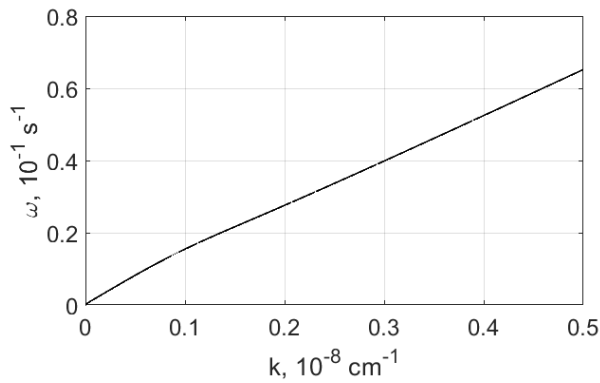


Рисунок 1 – Дисперсионная кривая в случае  $\tilde{T}_0 = 1.25$ ,  $\tilde{n}_0 = 1.6$  / Figure 1. The dispersion curve in the case of  $T_0=1.25, n_0=1.6$ .

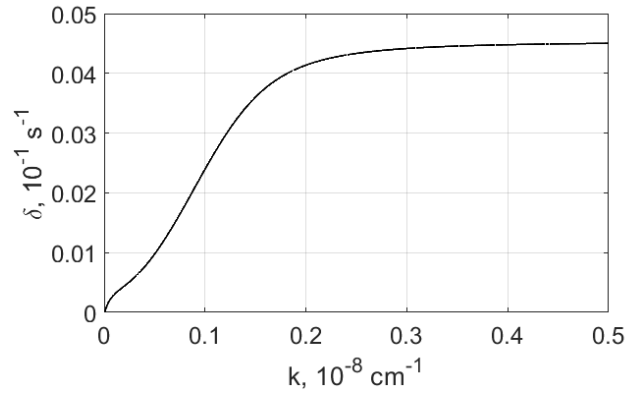


Рисунок 2 – Коэффициент затухания в случае  $\tilde{T}_0 = 1.25$ ,  $\tilde{n}_0 = 1.6$  / Figure 2. Attenuation coefficient in the case of  $T_0=1.25, n_0=1.6$ .

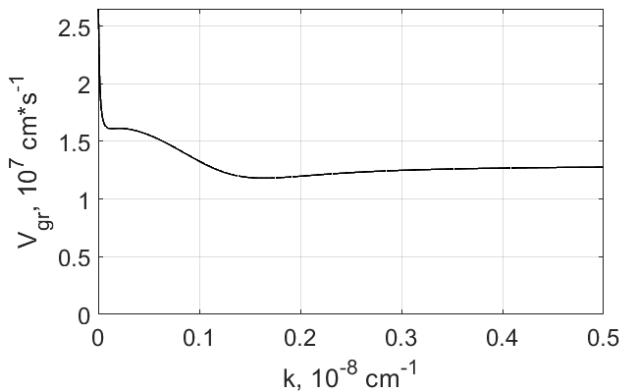


Рисунок 3 – Групповая скорость в случае  $\tilde{T}_0 = 1.25$ ,  $\tilde{n}_0 = 1.6$  / Figure 3. Group velocity in the case of  $T_0 = 1.25, n_0 = 1.6$ .

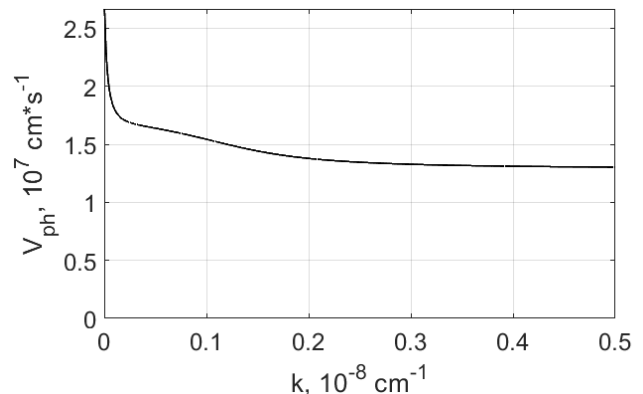


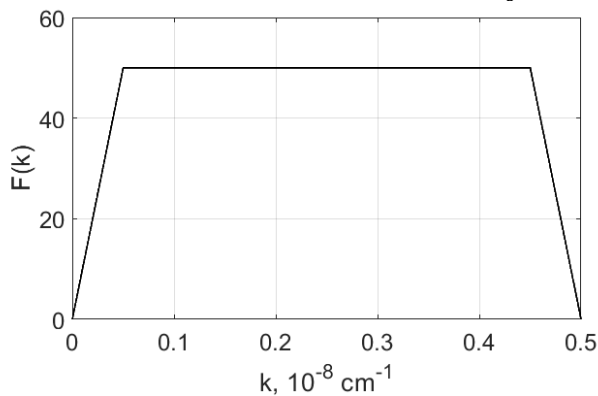
Рисунок 4 – Групповая скорость в случае  $\tilde{T}_0 = 1.25$ ,  $\tilde{n}_0 = 1.6$  / Figure 4. Group velocity in the case of  $T_0 = 1.25, n_0 = 1.6$ .

Поведение волнового пакета определяется интегралом Фурье, при этом учитываются как реальная (дисперсионная кривая, рис. 1), так и мнимая (коэффициент затухания, рис 2) части решения уравнения (6)

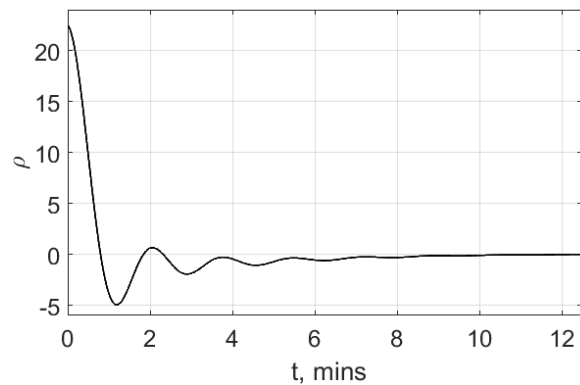
$$\tilde{\rho}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \int_0^{\tilde{k}_0} F(\tilde{k}) e^{\tilde{k}\tilde{x} - \tilde{\omega}\tilde{t}} d\tilde{k} \quad (9)$$

Моделирование волнового пакета производим, рассматривая 2 случая локализованного начального импульса, графики которых представлены на рисунках 6, 10.

$$\tilde{\rho}(0, \tilde{t}) = \int_0^{\tilde{k}_0} F(\tilde{k}) e^{-\tilde{\omega}\tilde{t}} d\tilde{k} \quad (10)$$

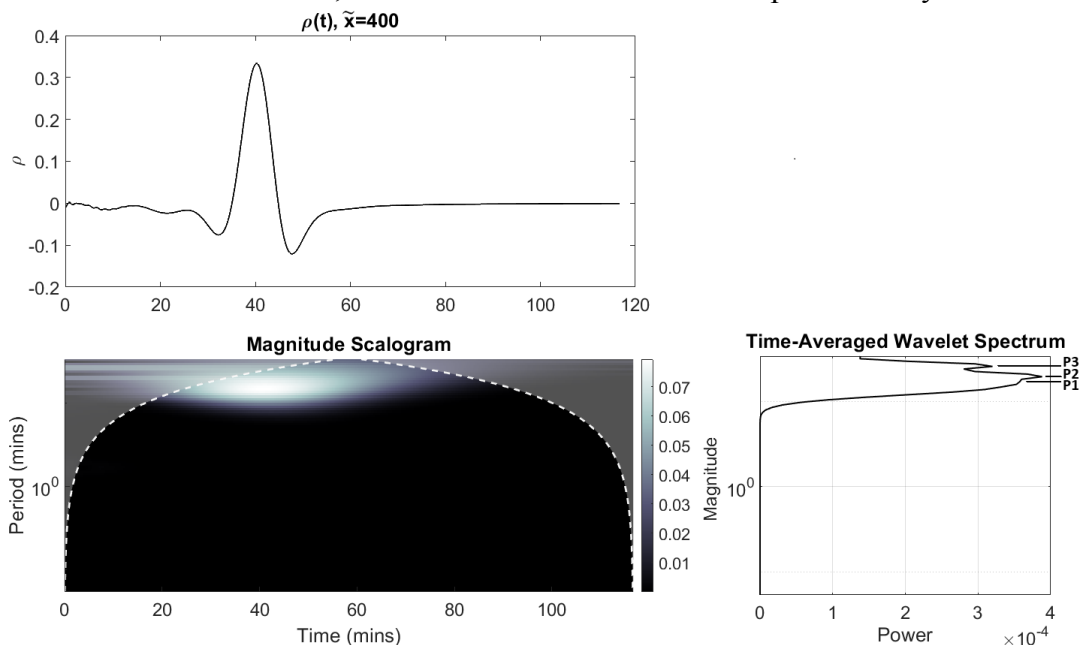


**Рисунок 5 – Спектральное распределение начального волнового пакета  $F(k)$**   
**Figure 5 – Spectral distribution of the initial wave packet  $F(k)$**



**Рисунок 6 – Кривая зависимости плотности от времени для координаты  $x=0$**   
**Figure 6 – The curve of density versus time for the coordinate  $x=0$**

Реально распространяющиеся колебания всегда имеют форму волновых пакетов, поэтому имеет смысл говорить о группе волн, распространяющихся с некоторой групповой скоростью. Доминирующую роль в пакете играет центральный максимум. С другой стороны, колебания, переносимые пакетом или группой волн, имеют частоту несущей волны, приходящуюся на центр спектра пакета. По обе стороны от минимума мы находим два подобных пакета, имеющих близкие значения периодов несущих частот.



**Рисунок 7 – Кривая зависимости плотности от времени для безразмерной координаты  $\tilde{x} = 400$  (сверху) и ее вейвлет (снизу слева). Спектральная мощность вейвлета (снизу справа), максимумы спектральной мощности вейвлета соответствуют периодам  $P1=16.9$  мин.,  $P2=19.6$  мин.,  $P3=25.7$  мин./**  
**Figure 7 – The time-density curve for the dimensionless coordinate  $x=400$  (top) and its wavelet (bottom left). Spectral power of the wavelet (bottom right), maxima of the spectral power of the wavelet correspond to periods  $P1=16.9$  min.,  $P2=19.6$  min.,  $P3=25.7$  min./**

The spectral power of the wavelet (bottom right), the maxima of the spectral power of the wavelet correspond to the periods P1=16.9 min., P2=19.6 min., P3=25.7 min.

На рисунке 7 мы приводим вейвлет-спектр колебаний, на удалении безразмерной координаты  $\tilde{x} = 400$  (масштабный коэффициент длины  $m(x) = 10^8$  см, аналогично работе [4]) генерируемых в результате дисперсии широкого пакета с учетом затухания, захватывающего целую окрестность минимума групповой скорости. Он позволяет выделить два основных максимума с периодами 16.9 (P1) и 19.6 мин (P2). Пакет построен при температуре  $T_0 = 1.25$  МК, при которой имеется наблюдение близких по величине периодов 20.4 и 17.1 мин в работе Krishna Prasad et al. [2]. Далее мы отмечаем, что расчетные периоды получены для плотности  $n_0 = 1.7 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Тем самым мы вводим в действие плотность, которая отсутствует в цитируемой работе.

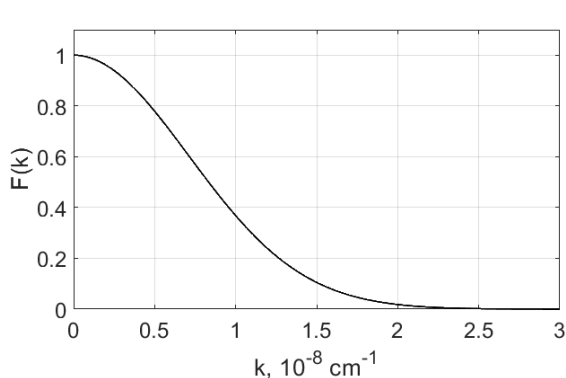


Рисунок 9 – Спектральное распределение начального волнового пакета  $F(k)$   
Figure 9 – Spectral distribution of the initial wave packet  $F(k)$

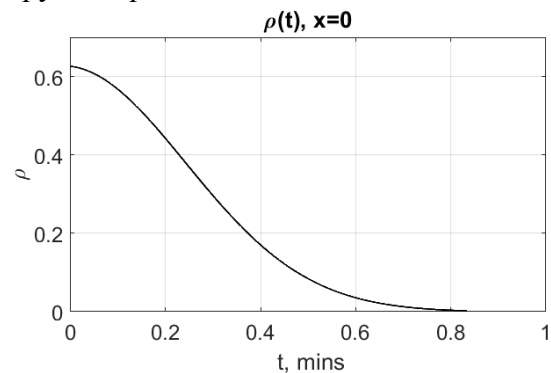


Рисунок 10 – Кривая зависимости плотности от времени для координаты  $x=0$ /  
Figure 10 – The curve of density versus time for the  $x=0$  coordinate

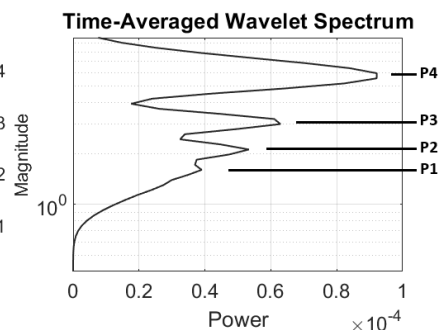
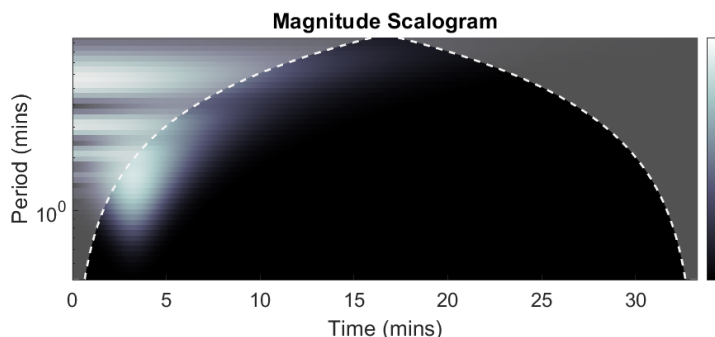
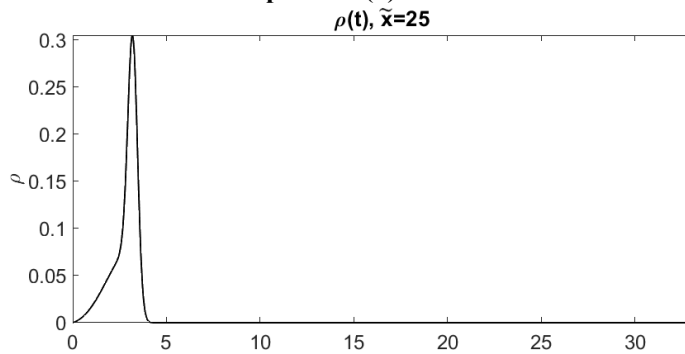


Рисунок 11 – Кривая зависимости плотности от времени для безразмерной координаты  $\tilde{x} = 25$  (сверху) и ее вейвлет (снизу слева). Спектральная мощность вейвлета (снизу справа), максимумы спектральной мощности вейвлета соответствуют периодам P1=1.6 мин., P2=2.1 мин., P3=3 мин, P4=5.8 мин./

Figure 11 – The time-density curve for the dimensionless coordinate  $x = 25$  (top) and its wavelet (bottom left). The spectral power of the wavelet (bottom right), the maxima of the spectral power of the wavelet correspond to the periods P1=1.6 min., P2=2.1 min., P3=3 min., P4=5.8 min.

На рисунке 11 мы приводим вейвлет-спектр колебаний, на удалении безразмерной координаты  $\tilde{x} = 25$  генерируемых в результате дисперсии узко локализованного волнового пакета, рисунок 10, с гауссовым распределением спектральной плотности, рисунок 9 с учетом затухания. Он позволяет выделить несколько основных максимумов с периодами 1.6 (P1), 2.1 мин (P2), 3 мин (P3) и 5.8 мин. (P4).

**Закключение.** Можно говорить, что проведенное нами на одном примере моделирование квазипериодических осцилляций позволяет восстановить один из ключевых параметров корональной плазмы – плотность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nakariakov V. M., Kolotkov D. Y. Magnetohydrodynamic Waves in the Solar Corona // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2020. Vol. 58. P. 441.
2. Krishna Prasad S., Banerjee D., Gupta G.R. Propagating intensity disturbances in polar corona as seen from AIA/SDO // Astronomy and Astrophysics. 2011. Vol. 528. P. L4.
3. Gupta G. R. Observations of dissipation of slow magneto-acoustic waves in a polar coronal hole // Astronomy and Astrophysics. 2014. Vol. 568. A96.
4. Derteev S., Shvidov N., Bembitov Dz., Mikhalyaev B. Damping and Dispersion of Non-Adiabatic Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma: A Radiative-Loss Function // Physics. 2023. Vol. 5. P. 215.
5. Priest E.R. Solar magnetohydrodynamics. Springer Netherlands. 2012. 469 p.
6. Mikhalyaev B., Derteev S., Shvidov N., Sapraliev M., Bembitov Dz. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma II. Damping and Instability // Solar Physics. 2023. Vol. 298. 102.

## REFERENCES

1. Nakariakov VM, Kolotkov DY. Magnetohydrodynamic Waves in the Solar Corona. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2020;58:441.
2. Krishna Prasad S, Banerjee D, Gupta GR. Propagating intensity disturbances in polar corona as seen from AIA/SDO. Astronomy and Astrophysics. 2011;528:L4.
3. Gupta GR. Observations of dissipation of slow magneto-acoustic waves in a polar coronal hole. Astronomy and Astrophysics. 2014;568:A96.
4. Derteev S, Shvidov N, Bembitov Dz, Mikhalyaev B. Damping and Dispersion of Non-Adiabatic Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma: A Radiative-Loss Function. Physics. 2023;5:215.
5. Priest ER. Solar magnetohydrodynamics. Springer Netherlands. 2012;469 p.
6. Mikhalyaev B, Derteev S, Shvidov N, Sapraliev M, Bembitov Dz. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma II. Damping and Instability. Solar Physics. 2023;298:102.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Николай Климович Шивидов** – ассистент кафедры теоретической физики, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79613955124, zhr550@mail.ru

**Арслан Константинович Балтыков** – старший преподаватель кафедры природообустройства и охраны окружающей среды, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79371951901, balars90@yandex.ru

**Тимофей Владимирович Велегурин** – ассистент кафедры теоретической физики, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79093955850, bnbgsdf@mail.ru

**Галина Алексеевна Манкаева** – старший преподаватель кафедры теоретической физики, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79061764200, mankaeva.galina@yandex.ru

**Бадма Борисович Михалев** – профессор кафедры теоретической физики, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, улица Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79613967444, bbmikh@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nikolay K. Shvidov** – Assistant of the Department of Theoretical Physics, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin St., Elista, Russia, +79613955124, zhr550@mail.ru

**Arslan K. Baltykov** – Senior Lecturer at the Department of Environmental Management and Environmental Protection, Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, 11, Pushkin St., Elista, Russia, +79371951901, balars90@yandex.ru

**Timofey V. Velegurin** – Assistant of the Department of Theoretical Physics, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin St., Elista, Russia, +79093955850, bnbg.dsf@mail.ru

**Galina A. Mankaeva** – Senior Lecturer at the Department of Theoretical Physics, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin St., Elista, Russia, +79061764200, mankaeva.galina@yandex.ru

**Badma B. Mikhalyaev** – Professor of the Department of Theoretical Physics, Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, Elista, 11, Pushkin St., Elista, Russia, +79613967444, bbmikh@mail.ru

**Вклад авторов:** все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию: 16.10.2023;*

*одобрена после рецензирования: 18.11.2023;*

*принята к публикации: 12.12.2023.*

*The article was submitted: 16.10.2023;*

*approved after reviewing: 18.11.2023;*

*accepted for publication: 12.12.2023.*