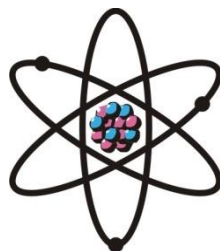


**ОТДЕЛЕНИЕ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ, ХИМИЧЕСКИХ,  
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Журнал основан  
в январе 1952 г.



№ 2 (195)  
2024 г.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Г.И.Кохирова** – главный редактор, член-корреспондент, доктор физико-математических наук; **С.А.Исхоков** – зам. главного редактора, член-корреспондент, доктор физико-математических наук, профессор; **С.Х.Абдулаева** – ответственный секретарь; **А.Бадалов** – член-корреспондент, доктор химических наук, профессор; **И.Н.Ганиев** – академик, доктор химических наук, профессор; **А.В.Девяткин** – доктор физико-математических наук; **М.И.Илолов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **У.М.Мирсаидов** – академик, доктор химических наук, профессор; **С.Х.Негматуллаев** – академик, доктор технических наук; **Д.Н.Низомов** – член-корреспондент, доктор технических наук, профессор; **Н.Р.Раджабов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **Ф.Рахими** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **З.Х.Рахмонов** – академик, доктор физико-математических наук, профессор; **Т.Х.Салихов** – член-корреспондент, доктор физико-математических наук, профессор; **А.Р.Файзиев** – член-корреспондент, доктор геолого-минералогических наук, профессор; **Д.Х.Халиков** – академик, доктор химических наук, профессор; **Ф.Шокир** – кандидат физико-математических наук.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**МАТЕМАТИКА**

**И.Курбанов, Х.П.Сайдалиев.** О точных решениях задач электродинамики для ферромагнитных и сегнетоэлектрических сред..... 7

**О.Х.Каримов, З.Дж.Хакимова.** Разделимость нелинейного эллиптического дифференциального оператора недивергентного вида..... 17

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

**Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, Д.Дж.Исвалиев, И.И.Каландарбеков.** Моделирование изгиба плит с защемленными краями методом сосредоточенных деформаций ..... 25

## **ФИЗИКА**

**Зафари Умар.** Влияние дополнительных двухвалентных активаторов на интенсивность люминесценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  легированного ионами  $\text{Mn}^{4+}$  ..... **33**

## **АСТРОНОМИЯ**

**Г.И.Кохирова, Ф.Д.Рахматуллаева.** Некоторые результаты оптических наблюдений активных астероидов в Таджикистане и зарубежом..... **42**

**Н.Н.Киселев.** Поляметрические исследования малых тел солнечной системы в Институте астрофизики Национальной академии наук Таджикистана..... **58**

**А.В.Девяткин, Д.Л.Горшанов, С.Н.Петрова, А.А.Мартюшева.** Наблюдения астероидов с экстремальными короткими периодами осевого вращения..... **70**

**Г.О.Рябова.** Анализ резонансов средних движений в метеороидном потоке Геминид на основе численного моделирования..... **74**

**Е.А.Жужулина, Н.Н.Киселёв, Д.В.Петров.** Сравнение фазовых зависимостей поляризации коротко- и долгопериодических комет..... **83**

**С.Р.Павлов, Ю.А.Чернетенко.** Орбитальная динамика кометы 103P/Хартли 2 на основе позиционных и радарных наблюдений..... **89**

**С.Н.Сафаров.** Теоретическая оценка обстоятельств сближений с Землей потенциально опасных астероидов (65803) Дидимос и (438908) 2009 ХО..... **99**

## **НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

**Т.Б.Холматов, И.М.Рахимов, Х.Р.Рахмонов, С.К.Кодирзода, Р.А.Рахимов.** Получение коагулянта для очистки вод разложением нефелиновых сиенитов смесью соляной и серной кислот ..... **111**

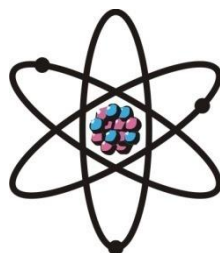
## **ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ**

**Р.О.Рахмонов, Ю.Ходжибаев, Ш.С.Шарипов, Б.Ф.Сафаров, М.Ф.Холиков.** Синтез имидазо[2,1-b][1,3,4]-тиадиазолов и изучение их спектральных характеристик ..... **118**

**ХРОНИКА** ..... **126**

**ШУЪБАИ  
ИЛМҲОИ ФИЗИКАЮ МАТЕМАТИКА,  
ХИМИЯ, ГЕОЛОГИЯ ВА ТЕХНИКА**

Маҷалла аз моҳи  
январӣ соли 1952  
нашр мешавад



№ 2 (195)  
с. 2024

---

**ҲАЙАТИ ТАҲРИРИЯ:**

**Кохирова Г.И.** – сармуҳаррир, узви вобаста, доктори илмҳои физикаю математика; **С.А.Исҳоқов** – муовини сармуҳаррир, узви вобаста, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **С.Ҳ.Абдулоева** – котиби масъул; **А.Бадалов** – узви вобаста, доктори илми химия, профессор; **И.Н.Ғаниев** – академик, доктори илми химия, профессор; **А.В.Девяткин** – доктори илмҳои физикаю математика; **М.И.Илолов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **Ҷ.М.Мирсаидов** – академик, доктори илми химия, профессор; **С.Ҳ.Неъматуллоев** – академик, доктори илмҳои техника; **Д.Н.Низомов** – узви вобаста, доктори илмҳои техника, профессор; **Ф.Раҳимӣ** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **З.Ҳ.Раҳмонов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **Н.Р.Рачабов** – академик, доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **Т.Ҳ.Салихов** – доктори илмҳои физикаю математика, профессор; **А.Р.Ғайзиев** – узви вобаста, доктори илмҳои геология ва минералогия, профессор; **Ҷ.Ҳ.Холиқов** – академик, доктори илми химия, профессор; **Ф.Шокир** – кандидати илмҳои физикаю математика.

**МУНДАРИҶА**

**МАТЕМАТИКА**

**И.Қурбонов, Ҳ.П.Сайдалиев.** Оид ба ҳалҳои аниқи масъалаҳои электродинамика барои муҳитҳои ферромагнети ва сегнетоэлектрики ..... 7  
**О.Ҳ.Каримов, З.Ҷ.Ҳакимова.** Чудошавандагии оператори ғайрихаттии эллиптикии намуди ғайридивергентӣ ..... 17

**МАТЕМАТИКА ВА МЕХАНИКА**

**Ҷ.Н.Низомов, И.Қ.Қаландарбеков, Д.Ҷ.Исвалиев, И.И.Қаландарбеков.** Моделкунонии масъалаи қатшавии плитҳо бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо ..... 25

**ФИЗИКА**

**Зафарӣ Умар.** Таъсири ионҳои дувалента ба интенсивнокии люминесенсияи  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  бо иони  $\text{Mn}^{4+}$  легиронидашуда ..... 33

## **АСТРОНОМИЯ**

<b>Г.И.Қоҳирова, Ф.Ч.Раҳматуллоева.</b> Як чанд натиҷаҳои мушоҳидаҳои оптикии астероидҳои фаъол дар Тоҷикистон ва хориҷ аз кишвар.....	<b>42</b>
<b>Н.Н.Киселёв.</b> Таҳқиқотҳои поляриметрии ҷирмҳои хурди системаи офтобӣ дар Институти астрофизикаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон .....	<b>58</b>
<b>А.В.Девяткин, Д.Л.Горшанов, С.Н.Петрова, А.А.Мартюшева.</b> Мушоҳидаҳои астероидҳо бо давраҳои хеле кӯтоҳи гардиши меҳвар.....	<b>70</b>
<b>Г.О.Рябова.</b> Таҳлили резонансҳои ҳаракатҳои миёна дар селҳои метеороидии Геминид дар асоси моделсозии рақамӣ .....	<b>74</b>
<b>Е.А.Жужулина, Н.Н.Киселёв, Д.В.Петров.</b> Муқоисаи вобастагии фазавии поляризацияи кометаҳои кутухдавр ва дароздавр.....	<b>83</b>
<b>С.Р.Павлов, Ю.А.Чернетенко.</b> Динамикаи орбиталии кометаи 103P/Хартли 2 дар асоси мушоҳидаҳои позитсионӣ ва радарӣ .....	<b>89</b>
<b>С.Н.Сафаров.</b> Баҳодиҳии назариявии оқибатҳои наздикшавии астероидҳои эҳтимолан хатарноки (65803) Дидимос ва (438908) 2009 ХО ба Замин .....	<b>99</b>

## **ХИМИЯИ ҒАЙРИОРГАНИКӢ**

<b>Т.Б.Холматов, И.М.Раҳимов, Х.Р.Раҳмонов, С.К.Қодирзода, Р.А.Раҳимов.</b> Ҳосил намудани коагулянт барои тоза намудани обҳои тарқиқ тачзияи сиенитҳои нефелинӣ бо омехтаи кислотаҳои хлорид ва сульфат.....	<b>111</b>
---	------------

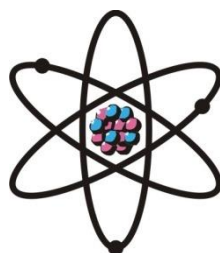
## **ХИМИЯИ ОРГАНИКӢ**

<b>Р.О.Раҳмонов, Ю.Ҳочибоев, Ш.С.Шарифов, Б.Ф.Сафаров, М.Ф.Холиқов.</b> Синтези имидазо[2,1-В][1,3,4]-тиадиазолҳо ва омӯзиши таснифоти спектралии онҳо.....	<b>118</b>
---	------------

<b>ХРОНИКА .....</b>	<b>126</b>
----------------------	------------

**DEPARTMENT OF  
PHYSICAL, MATHEMATICAL, CHEMICAL,  
GEOLOGICAL AND TECHNICAL SCIENCES**

The journal was established  
in January 1952



*№ 2 (195)*  
2024

---

**EDITORIAL BOARD**

**G.I.Kokhirova** Doctor of Physical and Mathematical, Editor-in-Chief; Prof. **S.A.Iskhokov**, Doctor of Physical and Mathematical, Deputy Editor-in-Chief; **S.H.Abdulaeva**, Secretary; Prof. **A.Badalov**, Doctor of Chemistry; **A.V.Devyatkin** – Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **A.R.Faysiev**, Doctor of Geology and Mineralogy; Prof. **M.I.Iolov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **I.N.Ganiev**, Doctor of Chemistry; Prof. **D.Kh.Khalikov**, Doctor of Chemistry; Prof. **U.M.Mirsaidov**, Doctor of Chemistry; **S.Kh.Negmatullaev**, Doctor of Engineering; Prof. **D.N.Nizomov**, Doctor of Engineering; Prof. **N.R.Rajabov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **F.Rakhimi**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **Z.Kh.Rakhmonov**, Doctor of Physical and Mathematical; Prof. **T.Kh.Salihov**, Doctor of Engineering; **F.Shokir** – Doctor of Physical and Mathematical.

**CONTENTS**

**MATHEMATICS**

- I.Kurbonov, H.P.Saydaliev.** On exact solutions of electrodynamics problems for a homogeneous medium with nonlinear material equations..... 7
- O.Kh.Karimov, Z.J.Hakimova.** Separability of a non-linear elliptic differential operator of non-divergent form..... 17

**MATHEMATICS AND MECHANICS**

- D.N.Nizomov, I.Q.Qalandarbekov, D.J.Isvaliev, I.I.Qalandarbekov.** Modeling the bending of plates with pinched edges by the method of concentrated deformations..... 25

**PHYSICS**

- Zafari Umar.** Influence of additional divalent activators on the luminescence intensity of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  doped with  $\text{Mn}^{4+}$  ions..... 33

## ASTRONOMY

<b>G.I.Kokhirova, F.D.Rahmatullaeva.</b> Some results of optical observations of active asteroids in Tajikistan and abroad .....	<b>42</b>
<b>N.N.Kiselev.</b> Polarimetric studies of small bodies of the solar system at the Institute of astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan .....	<b>58</b>
<b>A.V.Devyatkin, D.L.Gorshanov, S.N.Petrova, A.A.Martyusheva.</b> Observations of asteroids with extremely short periods of axial rotation .....	<b>70</b>
<b>G.O.Ryabova.</b> Analysis of mean motions resonances in the Geminid meteoroid stream based on numerical modelling.....	<b>74</b>
<b>E.A.Zhuzhulina, N.N.Kisilev, D.V.Petrov.</b> Comparison of phase dependences of polarization of short- and long-period comets .....	<b>83</b>
<b>S.R.Pavlov, Yu.A.Chernetenko.</b> Orbital dynamics of comet 103P/Hartley 2 based on positional and radar observations.....	<b>89</b>
<b>S.N.Safarov.</b> Theoretical assessment of the approaches circumstances of potentially hazardous asteroids (65803) Didymos and (438908) 2009 XO .....	<b>99</b>

## INORGANIC CHEMISTRY

<b>T.B.Kholmatov, I.M.Rakhimov, Kh.R.Rahmonov, S.K.Kodirzoda, R.A.Rahimov.</b> Obtaining a coagulant for water purification by decomposition of nepheline syenites with a mixture of hydrochloric and sulfuric acid .....	<b>111</b>
---	------------

## ORGANIC CHEMISTRY

<b>R.O.Rahmonov, Y.Khodzhibaev, Sh.S.Sharipov, B.F.Safarov, M.F.Kholiqov.</b> Synthesis of imidazo[2,1-b][1,3,4]-thiadiazoles and study of their spectral characteristics.....	<b>118</b>
--	------------

<b>CHRONICLE</b> .....	<b>126</b>
------------------------	------------

УДК 517.346.9:538.3

Специальность: 1.1.2 – Дифференциальные уравнения и математическая физика

И.КУРБАНОВ, Х.П.САЙДАЛИЕВ\*

**О ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДЛЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД**

*Российско-Таджикский (Славянский) университет,  
\*Бохтарский государственный университет имени Носира Хусрава*

*Поступила в редакцию 23.05.2024 г.*

*Одной из основных задач в теории электродинамики считается нахождение точных решений. В последнее время были разработаны разные методы для нахождения точных решений. В статье мы использовали метод разложения по эллиптической функции Якоби. В работе получены точные периодические решения задачи электродинамики для случаев нелинейных материальных уравнений.*

**Ключевые слова:** электродинамика, материальные уравнения, эллиптические функции, метод разложения.

Пусть дана система уравнений

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H}{\partial x} &= \frac{\partial(D(E))}{\partial t} + J(E) + J_{cm}, \\ \frac{\partial E}{\partial x} &= -\frac{\partial(B(H))}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

с материальными уравнениями вида

$$\begin{aligned} D(E) &= \varepsilon E, B(H) = \mu H^2 + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, J(E) = \delta \frac{\partial E}{\partial x}, \\ \mu &= const, \varepsilon = const, \delta = const. \end{aligned} \quad (2)$$

---

*Адрес для корреспонденции:* Курбанов Икром. 734031, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. М. Турсунзода, 30, Российско-Таджикский (Славянский) университет. E-mail: hudson90@mail.ru.

Всюду в дальнейшем  $E = E(x, t)$  – напряжение электрического поля,  $H = H(x, t)$  – напряжённость магнитного поля,  $D(E)$  – электрическая индукция,  $B(H)$  – магнитная индукция,  $J(E)$  – ток проводимости,  $J_{cm}$  – электрическая сила.

Систему (1) будем рассматривать при  $J_{cm} = 0$ . Итак, подставляя (2) в (1), приходим к системе квазилинейных уравнений

$$\begin{aligned} -\frac{\partial H}{\partial x} &= \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \delta \frac{\partial E}{\partial x}, \\ \frac{\partial E}{\partial x} &= -2\mu H \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial^3 H}{\partial x^2 \partial t}. \end{aligned} \quad (3)$$

В системе (3) с помощью замены переменных для функций  $H(x, t)$ ,  $E(x, t)$  переходим к функциям  $H(\xi)$ ,  $E(\xi)$ , где  $\xi = k(x - ct)$ , то есть

$$H(x, t) = H(\xi) \text{ и } E(x, t) = E(\xi), \quad \xi = k(x - ct). \quad (4)$$

В таком случае из системы (3) получаем обыкновенную систему дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} \frac{dH}{d\xi} - c\varepsilon \frac{dE}{d\xi} + \delta \frac{dE}{d\xi} &= 0, \\ \frac{dE}{d\xi} - 2\mu c H \frac{dH}{d\xi} + ck^2 \frac{d^3 H}{d\xi^3} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для получения решения системы (5) используем метод разложения по эллиптическим функциям Якоби. Подобный метод был использован в работе [1]. Методом разложения решение системы (4) будем искать в виде

$$E = a_0 + a_1 \operatorname{sn} \xi + a_2 \operatorname{sn}^2 \xi, \quad H = b_0 + b_1 \operatorname{sn} \xi + b_2 \operatorname{sn}^2 \xi, \quad (6)$$

где  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  и  $b_2$  – некоторые постоянные коэффициенты. Для вычисления производных  $E(\xi)$  и  $H(\xi)$  используем формулы из теории эллиптических функций [2],[5]

$$\begin{aligned} \frac{d(\operatorname{sn} \xi)}{d\xi} &= \operatorname{cn} \xi \operatorname{dn} \xi, \quad \frac{d(\operatorname{cn} \xi)}{d\xi} = -\operatorname{sn} \xi \operatorname{dn} \xi, \\ \frac{d(\operatorname{dn} \xi)}{d\xi} &= -m^2 \operatorname{sn} \xi \operatorname{cn} \xi, \quad \operatorname{cn}^2 \xi + \operatorname{sn}^2 \xi = 1, \\ \operatorname{dn}^2 \xi + m^2 \operatorname{sn}^2 \xi &= 1, \quad (\text{с модулем } 0 < m^2 < 1). \end{aligned} \quad (7)$$



Используя (7) для вычисления функций  $E$  и  $H$ , получаем

$$\begin{aligned}\frac{dE}{d\xi} &= (a_1 + 2a_2 \operatorname{sn}\xi) \operatorname{cn}\xi \operatorname{dn}\xi, \\ \frac{dH}{d\xi} &= (b_1 + 2b_2 \operatorname{sn}\xi) \operatorname{cn}\xi \operatorname{dn}\xi, \\ \frac{d^3H}{d\xi^3} &= \left( -(m^2 + 1)b_1 - 8b_2(m^2 + 1) \operatorname{sn}\xi + 6b_1 m^2 \operatorname{sn}^2 \xi + \right. \\ &\quad \left. + 24b_2 m^2 \operatorname{sn}^3 \xi \right) \operatorname{cn}\xi \operatorname{dn}\xi.\end{aligned}\tag{8}$$

Подставляя (8) и (6) в систему уравнений (5), получаем

$$\begin{aligned}(b_1 - (c\varepsilon - \delta)a_1) + (2b_2 - 2(c\varepsilon - \delta)a_2) \operatorname{sn}\xi &= 0, \\ (a_1 - 2\mu c b_0 b_1 - c k^2 b_1 (m^2 + 1)) + (2a_2 - 2\mu c (2b_0 b_2 + b_1^2) - \\ - 8C k^2 b_2 (m^2 + 1)) \operatorname{sn}\xi - (6\mu c b_2 + 6c k^2 b_1 m^2) \operatorname{sn}^2 \xi - \\ - (4\mu c b_2^2 - 24c k^2 b_2 m^2) \operatorname{sn}^3 \xi &= 0.\end{aligned}\tag{9}$$

В системе алгебраических уравнений (9), приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях функции  $\operatorname{sn}\xi$  к нулю, определяем неизвестные коэффициенты в виде

$$\begin{aligned}a_0 = 0, \quad a_1 = 0, \quad a_2 &= \frac{6k^2 m^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)}, \\ b_0 &= \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} - 4c k^2 (m^2 + 1) \right], \quad b_1 = 0, \quad b_2 = \frac{6k^2 m^2}{\mu}.\end{aligned}\tag{10}$$

Таким образом, определяем точное ограниченное решение системы уравнений (3) в виде

$$E = \frac{6k^2 m^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} \operatorname{sn}^2 \xi, \quad H = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} - 4c k^2 (m^2 + 1) \right] + \frac{6k^2 m^2}{\mu} \operatorname{sn}^2 \xi$$

при условиях  $\mu \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $c\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ .

Теперь, переходя к начальным переменным, получаем

$$\begin{aligned}
E(x,t) &= E(k(x-ct)) = \frac{6k^2m^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} \operatorname{sn}^2(k(x-ct)), \\
H(x,t) &= H(k(x-ct)) = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} - 4ck^2(m^2 + 1) \right] + \\
&+ \frac{6k^2m^2}{\mu} \operatorname{sn}^2(k(x-ct)), \text{ при } \mu \neq 0, c\varepsilon - \sigma \neq 0, c\varepsilon \neq 0, \sigma \neq 0.
\end{aligned} \tag{11}$$

Итак, доказана

**Теорема 1.** Пусть все коэффициенты системы уравнения (5) отличны от нуля, кроме того,  $\mu \neq 0, c\varepsilon - \sigma \neq 0$ . Тогда система уравнения (3) имеет точное периодическое решение вида (11).

Как нам известно, эллиптические функции связаны между собой соотношениями (7). Тогда решение системы (5) можно получить с помощью функции Якоби  $\operatorname{cn}\xi$  и  $\operatorname{dn}\xi$ . Таким образом, решение (5) будем искать в виде

$$E = a_0 + a_1 \operatorname{cn}\xi + a_2 \operatorname{cn}^2\xi, \quad H = b_0 + b_1 \operatorname{cn}\xi + b_2 \operatorname{cn}^2\xi. \tag{12}$$

Используя (7) для вычисления функций  $E$  и  $H$ , получаем

$$\begin{aligned}
\frac{dE}{d\xi} &= -(a_1 + 2a_2 \operatorname{cn}\xi) \operatorname{sn}\xi \operatorname{dn}\xi, \\
\frac{dH}{d\xi} &= -(b_1 + 2b_2 \operatorname{cn}\xi) \operatorname{sn}\xi \operatorname{dn}\xi, \\
\frac{d^3H}{d\xi^3} &= \left( (1-2m^2)b_1 + 8b_2(1-2m^2) \operatorname{cn}\xi + 6b_2m^2 \operatorname{cn}^2\xi + \right. \\
&\quad \left. + 24b_2m^2 \operatorname{cn}^3\xi \right) \operatorname{sn}\xi \operatorname{dn}\xi.
\end{aligned} \tag{13}$$

Подставляя (13) и (12) в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (5) и после несложных преобразований, определяем коэффициенты (12) в виде

$$\begin{aligned}
a_0 &= 0, \quad a_1 = 0, \quad a_2 = \frac{-6k^2m^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)}, \\
b_0 &= 0, \quad b_1 = 0, \quad b_2 = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{c\varepsilon - \sigma} - 4ck^2(1-2m^2) \right],
\end{aligned} \tag{14}$$

где  $\mu c \neq 0, c\varepsilon - \sigma \neq 0, \varepsilon \neq 0, \sigma \neq 0$ .

Тогда получаем следующее точное периодическое решение системы (3)

$$E = -\frac{6k^2m^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} cn^2\xi,$$

$$H = \frac{1}{2\mu} \left[ \frac{1}{c\varepsilon - \sigma} - 4ck^2(1-2m^2) \right] - \frac{6k^2m^2}{\mu} cn^2\xi,$$

где  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ .

Теперь, переходя к исходным переменным, получаем

$$E(x, t) = E(k(x - ct)) = -\frac{6k^2m^2}{\mu} cn^2(k(x - ct)),$$

$$H(x, t) = H(k(x - ct)) = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{c\varepsilon - \sigma} - 4ck^2(1-2m^2) \right] - \frac{6k^2m^2}{\mu} cn^2(k(x - ct)) \quad (15)$$

при  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ .

Таким образом, доказана следующая теорема

**Теорема 2.** Пусть все коэффициенты системы уравнений (5) отличны от нуля, кроме того,  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ . Тогда система уравнений (3) имеет точное периодическое решение вида (15).

Аналогичным образом будем искать решение системы уравнений (5) с помощью функций Якоби  $dn\xi$

$$E = a_0 + a_1 dn\xi + a_2 dn^2\xi, \quad H = b_0 + b_1 dn\xi + b_2 dn^2\xi. \quad (16)$$

С помощью формулы (7) вычисляем

$$\frac{dE}{d\xi} = -(a_1 + 2a_2 dn\xi) m^2 sn\xi cn\xi,$$

$$\frac{dH}{d\xi} = -(b_1 + 2b_2 dn\xi) m^2 sn\xi cn\xi, \quad (17)$$

$$\frac{\partial^3 H}{\partial \xi^3} = (b_1(m^2 - 2) + 8b_2(m^2 - 2) dn\xi + 6b_1 dn^2\xi - 24b_2 dn^3\xi) m^2 cn\xi sn\xi.$$

Поступая как выше, подставляя (17) и (16) в систему (5), определяем неизвестные коэффициенты  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  и  $b_2$  в виде

$$a_0 = 0, \quad a_1 = 0, \quad a_2 = \frac{6k^2 m^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)}, \quad (18)$$

$$b_0 = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{c\varepsilon - \sigma} - 4ck^2(m^2 - 2) \right], \quad b_1 = 0, \quad b_2 = \frac{6k^2}{\mu}$$

где  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ .

Итак, получаем следующий вид решения системы (3) с помощью функций Якоби  $dn\xi$

$$E = \frac{6k^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} dn^2 \xi, \quad H = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{c\varepsilon - \sigma} - 4ck^2(m^2 - 2) \right] + \frac{6k^2}{\mu} dn^2 \xi$$

при  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ .

Отсюда, переходя к начальным переменным, получаем

$$E(x, t) = E(k(x - ct)) = -\frac{6k^2}{\mu(c\varepsilon - \sigma)} dn^2(k(x - ct)),$$

$$H(x, t) = H(k(x - ct)) = \frac{1}{2\mu c} \left[ \frac{1}{c\varepsilon - \sigma} - 4ck^2(m^2 - 2) \right] + \frac{6k^2}{\mu} dn^2(k(x - ct)), \quad (19)$$

при  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ .

Итак, доказана следующая теорема

**Теорема 3.** Пусть все коэффициенты системы уравнений (5) отличны от нуля, кроме того,  $\mu c \neq 0$ ,  $c\varepsilon - \sigma \neq 0$ ,  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\sigma \neq 0$ . Тогда система уравнений (3) имеет точное периодическое решение вида (19.)

Аналогичным образом будем рассматривать системы (1) с определяющими уравнениями вида

$$B(H) = \mu H, \quad D(E) = \varepsilon E^2, \quad J(E) = \sigma \frac{\partial^3 E}{\partial x^3}, \quad J_{ct} = 0. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (1), переходим к следующей квазилинейной системе уравнений

$$-\frac{\partial H}{\partial x} = 2\varepsilon E \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma \frac{\partial^3 E}{\partial x^3}.$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (21)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (21) также будем искать в виде бегущей волны. Таким образом, с помощью преобразования вида (4) приходим к следующей обыкновенной системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\frac{dH}{d\xi} - 2\varepsilon c E \frac{dE}{d\xi} + \sigma k^2 \frac{d^3 E}{d\xi^3} &= 0, \\ \frac{dE}{d\xi} - \mu c \frac{dH}{d\xi} &= 0.\end{aligned}\tag{22}$$

Решение (22) будем искать в виде конечных рядов [1]

$$\begin{aligned}H &= a_0 + a_1 \operatorname{sn} \xi + a_2 \operatorname{sn}^2 \xi, \\ E &= b_0 + b_1 \operatorname{sn} \xi + b_2 \operatorname{sn}^2 \xi,\end{aligned}\tag{23}$$

где  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  и  $b_2$  пока неизвестные постоянные. Отсюда при помощи (7), подставляя (23) в (22), и после несложных преобразований определяем неизвестные постоянные в виде

$$\begin{aligned}a_0 &= 0, a_1 = 0, a_2 = \frac{6\sigma k^2 m^2}{\mu c^2 \varepsilon}, \\ b_0 &= \frac{1}{2\mu c^2 \varepsilon} - \frac{2\sigma k^2 (m^2 + 1)}{c\varepsilon}, b_1 = 0, b_2 = \frac{6\sigma k^2 m}{c\varepsilon}.\end{aligned}\tag{24}$$

Таким образом, определяем точное периодическое решение системы уравнений (22), при условии  $\mu \neq 0, c\varepsilon \neq 0$

$$H = \frac{6\sigma k^2 m^2}{\mu c^2 \varepsilon} \operatorname{sn}^2 \xi, \quad E = \frac{1}{2\mu c^2 \varepsilon} - \frac{2\sigma k^2 (m^2 + 1)}{c\varepsilon} + \frac{6\sigma k^2 m}{c\varepsilon} \operatorname{sn}^2 \xi.\tag{25}$$

Далее, переходя к начальным переменным, получаем следующий вид решений

$$\begin{aligned}H(x, y) &= H(k(x - ct)) = \frac{6\sigma k^2 m^2}{\mu c^2 \varepsilon} \operatorname{sn}^2(k(x - ct)), \\ E(x, t) &= E(k(x - ct)) = \frac{1}{2\mu c^2 \varepsilon} - \frac{2\sigma k^2 (m^2 + 1)}{c\varepsilon} + \\ &+ \frac{6\sigma k^2 m}{c\varepsilon} \operatorname{sn}^2(k(x - ct)),\end{aligned}\tag{26}$$

при  $\mu \neq 0, c\varepsilon \neq 0$ .

Итак, доказана

**Теорема 4.** Пусть все коэффициенты системы уравнения (22) отличны от нуля, кроме того,  $\mu \neq 0, c\varepsilon \neq 0$ . Тогда система уравнений (21) имеет точное периодическое решение вида (26).

Аналогичным образом будем искать решение (22) с помощью функций Якоби  $\operatorname{sn} \xi$  вида

$$H = a_0 + a_1 cn\xi + a_2 cn^2\xi, \quad E = b_0 + b_1 cn\xi + b_2 cn^2\xi. \quad (27)$$

Используя формулы (7) для вычисления производных функций  $H$  и  $E$  и подставляя (27) в системе (22), поступая как выше, находим решение при  $\mu \neq 0, c \neq 0, \varepsilon \neq 0$

$$\begin{aligned} H(x, t) &= H(k(x - ct)) = -\frac{6\sigma k^2 m^2}{\mu c^2 \varepsilon} cn^2(k(x - ct)), \\ E(x, t) &= E(k(x - ct)) = \frac{1}{2\mu c^2 \varepsilon} - \frac{2\sigma k^2(1 - 2m^2)}{c\varepsilon} - \\ &\quad - \frac{6\sigma k^2 m^2}{c\varepsilon} cn^2(k(x - ct)). \end{aligned} \quad (28)$$

Итак, доказана

**Теорема 5.** Пусть все коэффициенты системы уравнений (22) отличны от нуля, кроме того,  $\mu \neq 0, c \neq 0, \varepsilon \neq 0$ . Тогда система уравнений (21) имеет точное периодическое решение вида (28).

Решение (21) также можно получить с помощью  $dn\xi$  – функций Якоби. Таким образом, решение будем искать в виде

$$H = a_0 + a_1 dn\xi + a_2 dn^2\xi, \quad E = b_0 + b_1 dn\xi + b_2 dn^2\xi. \quad (29)$$

Аналогичным образом, поступая как выше, получаем следующее решение системы уравнений (21) в виде

$$\begin{aligned} H(x, y) &= H(k(x - ct)) = -\frac{6\sigma k^2}{\mu c^2 \varepsilon} dn^2(k(x - ct)), \\ E(x, t) &= H(k(x - ct)) = \frac{1}{2\mu c^2 \varepsilon} - \frac{2\sigma k^2(m^2 - 2)}{c\varepsilon} - \\ &\quad - \frac{6\sigma k^2}{c\varepsilon} dn^2(k(x - ct)), \end{aligned} \quad (30)$$

где  $\mu c^2 \varepsilon \neq 0$ .

Итак, доказана

**Теорема 6.** Пусть все коэффициенты системы уравнений (22) отличны от нуля, кроме того,  $\mu c^2 \varepsilon \neq 0$ . Тогда система уравнений (21) имеет точное периодическое решение вида (30).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Liu S.K., Fu Z.T., Liu S.D., Zhao Q. Jacobi elliptic function expansion method and periodic wave solutions of nonlinear wave equations. – J. Physics Letters A, Moscow, 2001, vol. 289, pp. 69-74.
2. Кудряшов Н.А. Аналитическая теория нелинейных дифференциальных уравнений. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 360 с.
3. Курбанов И. Краевые задачи электродинамики. – Киев: Ин-т математики АН УССР, 1989, с. 3-23.
4. Сафаров Д.С. Об одном обобщении КдФ-уравнения. Сб. научных трудов «Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения». – Киев, 1996, с. 240.
5. Сикорский Ю.С. Элементы теории эллиптических функций: с приложениями к механике. – М.: Ком Книга, 2006, 368 с.
6. Курбанов И., Сафаров Дж. Точное ограниченное и периодическое решение обобщенного уравнения Бюргерса-Кортевега-де Фриза с постоянными отклоняющимися аргументами. – ДАН РТ, т. 66, №7-8.

И.ҚУРБОНОВ, Ҳ.П.САЙДАЛИЕВ\*

## ОИД БА ҲАЛҲОИ АНИҚИ МАСЪАЛАҲОИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА БАРОИ МУҲИТҲОИ ФЕРРОМАГНИТИ ВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

*Донишгоҳи Тоҷикистону-Руссия (Славяни)*

*\*Донишгоҳи давлатии Бохтар ба номи Носири Хусрав*

Яке аз масъалаҳои асосӣ дар назарияи электродинамика ин муайян кардани ҳалҳои аниқ ба шумор меравад. Дар вақтҳои охир усулҳои гуногун барои ёфтани чунин ҳалҳо коркард карда шудаанд. Дар мақола усули паҳнкунӣ аз руи функсияҳои Якобиро истифода шудааст. Чунин намуди усул дар қорҳои [1-6] истифода шудааст. Дар қори мо ҳалҳои аниқу даври масъалаҳои электродинамика барои ҳолатҳои муодилаҳои ғайрихатии материали ёфта шудааст. Ҳалҳо бо ёрии функсияҳои эллиптикии Якоби ( $sn\xi, cn\xi, va dn\xi$ ) ёфта шудаанд.

**Калимаҳои калиди:** электродинамика, муодилаҳои материалӣ, функсияҳои эллиптикӣ, методи паҳнкунӣ.

I.KURBONOV, H.P.SAYDALIEV\*

## ON EXACT SOLUTIONS OF ELECTRODYNAMICS PROBLEMS FOR A HOMOGENEOUS MEDIUM WITH NONLINEAR MATERIAL EQUATIONS

*Russian-Tajik (Slavonic) University,*

*\*N.Khusrav Bokhtar State University*

One of the main problems in the theory of electrodynamics is considered to be finding exact solutions. Recently, various methods have been developed for finding exact solutions. In

the article we used the method of expansion by the Jacobi elliptic function. A similar method was used in works [1-6]. Our work obtained exact periodic solutions to the problem of electrodynamics, cases of nonlinear material equations. The solution was obtained using the Jacobian elliptic functions  $sn\zeta$ ,  $cn\zeta$ , and  $dn\zeta$ .

**Key words:** electrodynamics, material equations, elliptic functions, expansion method.

**Сведения об авторах:**

**Курбонов Икром** – доктор физико-математических наук, Российско-Таджикский (Славянский) университет, профессор кафедры математики и физики. E-mail: hudson90@mail.ru

**Сайдалиев Хомид Пирхонович** – кандидат физико-математических наук, Бохтарский государственный университет, старший преподаватель кафедры математического анализа и дифференциальных уравнений. E-mail: homid-1978@mail.ru.



УДК 517.948

Специальность: 1.1.1 – Вещественный, комплексный и функциональный анализ

О.Х.КАРИМОВ, З.ДЖ.ХАКИМОВА

**РАЗДЕЛИМОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА НЕДИВЕРГЕНТНОГО ВИДА**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт математики им. А.Джураева НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 15.04.2024г.*

*В работе получены коэрцитивные оценки для нелинейного эллиптического дифференциального оператора недивергентного вида, и на основе коэрцитивных оценок доказана его разделимость.*

**Ключевые слова:** эллиптический оператор недивергентного вида, коэрцитивные неравенства, нелинейность, разделимость, гильбертовы пространства.

1. В настоящей работе исследуется разделимость нелинейного эллиптического дифференциального недивергентного оператора вида

$$L[u] = - \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + V(x, u)u(x) = f(x), \quad u(x) \in W_{2,loc}^2(R^n),$$

где  $a_{ij}(x) \in C^2(R^n)$ , а  $V(x, z)$  – положительная функция.

Работа посвящена установлению коэрцитивных оценок и доказательств теорем разделимости нелинейного эллиптического дифференциального оператора недивергентного вида. Термин «разделимость» был введен английскими математиками В.Н.Эвериттом и М.Гирцом. Они подробно изучали разделимость оператора Штурма-Лиувилля и его степеней. Дальнейшее развитие этой теории принадлежит К.Х.Бойматову, М.Отелбаеву и их ученикам. Основная часть опубликованных работ по этой теории относится к линейным операторам. Существуют лишь отдельные работы, в которых

---

**Адрес для корреспонденции:** Каримов Олимджон Худойбердиевич. 734063, Республика Таджикистан, г.Душанбе, ул. Айни, 299/4, Институт математики НАНТ. E-mail: karimov\_olim@mail.ru

рассматриваются нелинейные дифференциальные операторы, представляющие собой слабые нелинейные возмущения линейных операторов. Настоящая работа посвящена случаю, когда исследуемый оператор нелинейный, то есть не представим в виде слабого возмущения линейного оператора и обобщает результаты работы [7] для нелинейного случая.

2. Введём пространство  $L_2(R^n)$  с конечной нормой

$$\|u; L_2(R^n)\| = \left\{ \int_{R^n} |u(x)|^2 dx \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Пространство  $L_2(R^n)$  является гильбертовым пространством, и в нём скалярное произведение определяется с помощью равенства

$$(u, v; L_2(R^n)) = \int_{R^n} u(x)\overline{v(x)}dx.$$

В пространстве  $L_2(R^n)$  рассматриваем дифференциальное уравнение

$$-\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} + V(x, u)u(x) = f(x), \quad u(x) \in W_{2,loc}^2(R^n), \quad (1)$$

где  $a_{ij}(x) \in C^2(R^n)$ , а  $V(x, z)$  – положительная функция.

**Определение 1.** Уравнение (1) (и соответствующий ему дифференциальный оператор) называются разделимыми в  $L_2(R^n)$ , если

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j}, \quad V(x, u(x))u(x) \in L_2(R^n)$$

для всех  $u(x) \in L_2(R^n) \cap W_{2,loc}^2(R^n)$  таких, что  $f(x) \in L_2(R^n)$ .

**Определение 2.** Оператор  $L[u]$  называется разделимым, если выполнено неравенство

$$\|Vu; L_2(R^2)\| + \left\| \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j} \right\| \leq M (\|L[u]; L_2(R^2)\| + \|u; L_2(R^2)\|).$$

В дальнейшем предположим, что  $V(x, z) \in C^1(R^n \times \mathbb{C})$ . Для формулировки основного результата введем функции

$$F(x, \xi, \eta) = V^{\frac{1}{2}}(x, z), \quad \xi = \operatorname{Re} z, \quad \eta = \operatorname{Im} z,$$

$$Q(x, \xi, \eta) = V(x, z), \xi = \operatorname{Re} z, \eta = \operatorname{Im} z.$$

Пусть для всех  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $\omega = (\xi + i\eta) \in \mathbb{C}$ ,  $\Omega = (\mu + i\nu) \in \mathbb{C}$  функция  $F(x, \xi, \eta)$  удовлетворяет условиям

$$\left\| a_{ij}^{-\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial a_{ij}(x)}{\partial x_i} F^{-1} \right\|^2 \leq \sigma_1, \quad (2)$$

$$\left\| a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) F^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial F}{\partial x_i} F^{-\frac{3}{2}} \right\|^2 \leq \sigma_2, \quad (3)$$

$$\left\| a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) F^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{\partial F}{\partial \xi} \mu + \nu \frac{\partial F}{\partial \eta} \right) \omega; \mathbb{C} \right\| \leq \delta_1 \left\| F^{\frac{1}{2}} \Omega; \mathbb{C} \right\|. \quad (4)$$

Также предполагается, что для всех  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $\omega = (\xi + i\eta) \in \mathbb{C}$ ,  $\Omega = (\mu + i\nu) \in \mathbb{C}$  выполнены неравенства

$$\left\| a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) F^{-1} \frac{\partial Q}{\partial x_i} F^{-2} \right\|^2 \leq \sigma_3, \quad (5)$$

$$\left\| a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) F^{-1} \left( \frac{\partial Q}{\partial \xi} \mu + \nu \frac{\partial Q}{\partial \eta} \right) \omega; \mathbb{C} \right\| \leq \delta_2 \|F\Omega; \mathbb{C}\|. \quad (6)$$

Сформулируем основной результат работы.

**Теорема 1.** Пусть выполнены условия (2)–(6) и пусть числа  $\sigma_j, (j = \overline{1, 3}), \delta_1, \delta_2$  такие, что

$$\sigma_1 < \frac{4}{3n^2}, \frac{2}{n^2(\sigma_1 + \sigma_3)} < 1 - \delta_1, \frac{2}{n^2(\sigma_1)} < 1 - \delta_2. \quad (7)$$

Тогда уравнение (1) разделяется в  $L_2(\mathbb{R}^n)$ , и для всех функций  $u(x) \in L_2(\mathbb{R}^n) \cap W_{2,loc}^2(\mathbb{R}^n)$  таких, что  $f(x) \in L_2(\mathbb{R}^n)$  справедливы включения

$$\sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j}, V(x, u(x))u(x) \in L_2(\mathbb{R}^n),$$

$$a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \in L_2(\mathbb{R}^n), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n.$$

При этом имеет место коэрцитивное неравенство

$$\begin{aligned} & \left\| \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j}; L_2(R^n) \right\| + \|V(x,u)u; L_2(R^n)\| + \\ & + \sum_{i,j=1}^n \left\| a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}}(x,u) \frac{\partial u}{\partial x_j}; L_2(R^n) \right\| \leq M \|f(x); L_2(R^n)\|, \end{aligned} \quad (8)$$

где положительное число  $M$  не зависит от  $u(x)$ ,  $f(x)$ .

Далее остановимся на основных моментах доказательства этой теоремы. Сначала сформулируем без доказательства две вспомогательные леммы (см.[17])

**Лемма 1.** Пусть в уравнении (1) функция  $f(x)$  принадлежит пространству  $L_2(R^n)$ , и функция  $u(x)$  принадлежит классу  $L_2(R^n) \cap W_{2,loc}^2(R^n)$ . Тогда функции  $V^{\frac{1}{2}}u(x)$ ,  $a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x)V^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j} \in L_2(R^n)$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) принадлежат пространству  $L_2(R^n)$ .

**Лемма 2.** Пусть выполнены условия (2) -(4), и пусть функция  $u(x)$  из класса  $L_2(R^n) \cap W_{2,loc}^2(R^n)$  является решением уравнения (1) с правой частью  $f(x) \in L_2(R^n)$ . Тогда функции

$$F^{\frac{3}{2}}(x, u(x))u(x), a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x)F^{\frac{1}{2}}(x, u(x)) \frac{\partial u}{\partial x_j}, j = 1, \dots, n,$$

принадлежат пространству  $L_2(R^n)$ .

**3.** Переходим к непосредственному доказательству теоремы 1. Из равенства

$$\begin{aligned} \langle f, \varphi_\varepsilon Q(x, \xi, \eta)u \rangle &= \left\langle - \sum_{i,j=1}^n a_{ij}(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_j}, \rho \varphi_\varepsilon Q(x, \xi, \eta)u \right\rangle + \\ &+ \langle V(x,u)u(x), \varphi_\varepsilon Q(x, \xi, \eta)u \rangle \end{aligned}$$

после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \langle f, \varphi_\varepsilon(x)Q(x,u)u \rangle &= \sum_{i,j=1}^n \left\langle a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}, \varphi_\varepsilon Q(x,u) \frac{\partial u}{\partial x_i} \right\rangle + A_1^{(\varepsilon)}(u) + A_2^{(\varepsilon)}(u) + \\ &+ A_3^{(\varepsilon)}(u) + A_4^{(\varepsilon)}(u) + \langle V(x,u)u, \varphi_\varepsilon(x)Q(x,u)u \rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$A_1^{(\varepsilon)}(u) = \sum_{i,j=1}^n \left\langle a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}, \frac{\partial \varphi_\varepsilon}{\partial x_i} Q(x,u)u \right\rangle,$$

$$A_2^{(\varepsilon)}(u) = \sum_{i,j=1}^n \langle a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}, \varphi_\varepsilon (\operatorname{Re} \frac{\partial u}{\partial x_i} \frac{\partial Q(x,u)}{\partial \xi} + \operatorname{Im} \frac{\partial u}{\partial x_i} \frac{\partial Q(x,u)}{\partial \eta}) u \rangle,$$

$$A_3^{(\varepsilon)}(u) = \sum_{i,j=1}^n \langle a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}, \varphi_\varepsilon \frac{\partial Q}{\partial x_i} u \rangle,$$

$$A_4^{(\varepsilon)}(u) = \sum_{i,j=1}^n \langle \frac{\partial u}{\partial x_j}, \varphi_\varepsilon \frac{\partial a_{ij}(x)}{\partial x_i} Q(x,u) u \rangle.$$

Здесь и далее значения  $F(x,u)$ ,  $\frac{\partial F(x,u)}{\partial x_i}$ ,  $\frac{\partial F(x,u)}{\partial \xi}$ ,  $\frac{\partial F(x,u)}{\partial \eta}$  взяты в точке

$$(x_1, \dots, x_n, \operatorname{Re} u(x), \operatorname{Im} u(x)).$$

Поочередно оценивая абсолютные значения функционалов  $A_j^\varepsilon(u)$ ,  $j = \overline{1,4}$ , находим, что функционал  $A_1^\varepsilon(u) \rightarrow 0$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

Относительно функционалов  $A_m^\varepsilon(u)$ ,  $m = \overline{2,4}$  получаем следующие оценки:

$$|A_2^\varepsilon(u)| = \left| \sum_{i,j=1}^n \langle a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}, \varphi_\varepsilon \frac{\partial Q}{\partial \xi} \operatorname{Re} \frac{\partial u}{\partial x_i} u + \frac{\partial Q}{\partial \eta} \operatorname{Im} \frac{\partial u}{\partial x_i} u \rangle \right| \leq$$

$$\leq \delta_2 \sum_{i,j=1}^n \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2,$$

$$|A_3^\varepsilon(u)| = \left| \sum_{i,j=1}^n \langle a_{ij}(x) \frac{\partial u}{\partial x_j}, \rho \varphi_\varepsilon \frac{\partial Q}{\partial x_i} u \rangle \right| \leq$$

$$\leq \sum_{i,j=1}^n \left\{ \frac{\beta_1}{2} \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2 + \frac{1}{2\beta_1} \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial Q}{\partial x_i} u \right\|^2 \right\} \leq$$

$$\leq \frac{\beta_1}{2} \sum_{j=1}^n \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2 + \frac{n^2 \sigma_3}{2\beta_1} \|\varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} V u\|^2,$$

$$\begin{aligned}
|A_4^\varepsilon(u)| &= \left| \sum_{i,j=1}^n \langle a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j}, a_{ij}^{-\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial a_{ij}(x)}{\partial x_i} \varphi_\varepsilon V^{\frac{1}{2}} u \rangle \right| \leq \\
&\leq \sum_{i,j=1}^n \left\{ \frac{\beta_1}{2} \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2 + \frac{1}{2\beta} \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{-\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial a_{ij}(x)}{\partial x_i} V^{-1} V u \right\|^2 \right\} \leq \\
&\leq \frac{\beta_1}{2} \sum_{i,j=1}^n \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2 + \frac{n^2 \sigma_1}{2\beta_1} \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} V u \right\|^2.
\end{aligned}$$

Здесь  $\beta_1$  – произвольное положительное число;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  и  $\delta_2$  – константы из условий (2), (5) и (6).

На основе полученных оценок из равенства (9) имеем

$$\begin{aligned}
|\langle f, \varphi_\varepsilon V u \rangle| &\geq \left( 1 - \frac{n^2(\sigma_1 + \sigma_3)}{2\beta_1} \right) \cdot \langle V u, \varphi_\varepsilon V u \rangle - |B_1^\varepsilon(u)| + \\
&+ \left( 1 - \frac{3}{2}\beta_1 - \delta_2 \right) \cdot \sum_{j=1}^n \left\| \varphi_\varepsilon^{\frac{1}{2}} a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2.
\end{aligned}$$

Применяя неравенство Коши-Буняковского и затем переходя к пределу при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , получим неравенство

$$\begin{aligned}
&\|f; L_{2,\rho}(R^n)\| \|Vu; L_{2,\rho}(R^n)\| \geq |(f, Vu)| \geq \\
&\geq \left( 1 - \frac{n^2(\sigma_1 + \sigma_3)}{2\beta_1} \right) \cdot (Vu, Vu) + \\
&+ \left( 1 - \frac{3}{2}\beta_1 - \delta_2 \right) \cdot \sum_{j=1}^n \left\| a_{ij}^{\frac{1}{2}}(x) V^{\frac{1}{2}} \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\|^2.
\end{aligned} \tag{10}$$

Далее подбираем положительное число  $\beta_1$  так, чтобы выполнялись условия

$$\frac{n^2(\sigma_1 + \sigma_3)}{2\beta_1} < 1, \quad 3\beta_1 + 2\delta_2 < 1.$$

Теперь из полученных неравенств после несложных преобразований имеем коэрцитивное неравенство (8). Из него следует разделимость нелинейного оператора (1) в пространстве  $L_{2,\rho}(R^n)$ .

Теорема 1 доказана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Everitt W. N., Gierz M. Some properties of the domains of certain differential operators. – Proc. London Math.Soc., 1971, vol. 23, pp. 301-324.
2. Everitt W.N., Gierz M. Some inequalities associated with certain differential operators. – Math. Z. 1972, vol. 126, pp. 308-326.
3. Everitt W.N., Gierz M. Inequalities and separation for Schrodinger -type operators in  $L_2(R^n)$ . – Proc. Roy. Soc. Edinburg, Sect A., 1977, vol. 79, pp. 149-170.
4. Бойматов К.Х. Теоремы разделимости, весовые пространства и их приложения. – Труды Математического института им. В.А.Стеклова АН СССР, 1984, т. 170, с. 37-76.
5. Бойматов К.Х. Коэрцитивные оценки и разделимость для эллиптических дифференциальных уравнений второго порядка ДАН СССР, 1988, т. 301, №5, с. 1033-1036.
6. Отелбаев М. Коэрцитивные оценки и теоремы разделимости для эллиптических уравнений в  $R^n$ . – Труды Математического института им. В.А.Стеклова АН СССР, 1983, т. 161, с. 195-217.
7. Mohamed A. S., H. A, Atia Separation of the general second elliptic differential operator potential in the weighted Hilbert spaces. – Applied Mathematics and Computation, 2005, №162, pp. 155-163.
8. Каримов О.Х. О коэрцитивных свойствах и разделимости бигармонического оператора с матричным потенциалом. – Уфимский математический журнал, 2017, т. 9, №1, с. 55-62.
9. Karimov O.Kh. On the separation property of nonlinear second-order differential operators with matrix coefficients in weighted spaces. – Journal of mathematical sciences, 2019, vol. 241, №5. pp. 589-595.
10. Каримов О.Х. Хакимова З.Дж. Коэрцитивные оценки, разделимость и коэрцитивная разрешимость нелинейных эллиптических дифференциальных уравнений недивергентного вида. – Чебышевский сборник, 2023, №24(2), с.197-213.
11. Каримов О.Х., Хакимова З.Дж. Коэрцитивные оценки и разделимость нелинейного эллиптического дифференциального оператора в весовом пространстве. – Известия НАНТ, Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук, 2022, №4(189), с. 47-55.

О.Х.КАРИМОВ, З.Ч.ХАКИМОВА

## ЧУДОШАВАНДАГИИ ОПЕРАТОРИ ҒАЙРИХАТТИИ ЭЛЛИПТИКИИ НАМУДИ ҒАЙРИДИВЕРГЕНТӢ

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,*

*Институти математикаи ба номи А.Ҷӯраеви АМИ Тоҷикистон*

Дар мақола баҳоҳои коэрцитивии оператори ғайрихаттии эллиптикии намуди ғайридивергентӣ татқиқ карда шуда, дар асоси баҳои коэрцитивӣ чудошавандагии ин оператор исбот шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** оператори эллиптикии намуди ғайридивергентӣ, нобаробариҳои коэрцитивӣ, ғайрихаттӣ, чудошавандагӣ, фазои Гилбертӣ.

O.Kh.KARIMOV, Z.J.HAKIMOVA

**SEPARABILITY OF A NON-LINEAR ELLIPTIC DIFFERENTIAL OPERATOR  
OF NON-DIVERGENT FORM**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
A.Juraev Institute of Mathematics, NAS of Tajikistan*

In this paper, coercive estimates are obtained for a nonlinear elliptic differential operator of a non-divergent type, and its separability is proved on the basis of coercive estimates.

**Key words:** elliptic operator of non-divergent form, coercive inequalities, nonlinearity, separability, Hilbert spaces.

**Сведения об авторах:**

**Каримов Олимджон Худойбердиевич** – доктор физ.-мат. наук, Институт математики им. А.Джураева НАН Таджикистана, заместитель директора. E-mail: karimov\_olim@mail.ru;

**Хакимова Зумрат Джамшедовна** – Институт математики им. Джураева НАН Таджикистана, научный сотрудник. E-mail: zumratmsu@mail.ru.



УДК 624.042

Специальность: 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Д.Н.НИЗОМОВ, И.К.КАЛАНДАРБЕКОВ\*, Д.ДЖ.ИСВАЛИЕВ\*,  
И.И.КАЛАНДАРБЕКОВ\*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА ПЛИТ С ЗАЩЕМЛЕННЫМИ КРАЯМИ МЕТОДОМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии  
НАН Таджикистана,*

*\*Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими*

*Поступила в редакцию 10.06.2024 г.*

*В статье рассматривается решение задачи изгиба плиты с жестко защемленными краями от действия равномерно распределённой нагрузки с применением метода сосредоточенных деформаций. Представлен алгоритм формирования матрицы жёсткости изгибаемой плиты, учитывающий граничные условия. На основе этого алгоритма разработана компьютерная программа на языке Фортран. Получены результаты численного моделирования при различных разбиениях плиты. На основе численных экспериментов исследованы вопросы сходимости и точности результатов расчета.*

**Ключевые слова:** кручение, изгиб, сдвиг, конечный элемент, граничные условия, матрица внутренней жесткости, матрица внешней жёсткости, распределенная нагрузка.

### **Введение**

Метод сосредоточенных деформаций (МСД), который был предложен профессором А.Р.Ржаницыным [1, 2], был развит в работах М.И.Додонова [3]. Дальнейшее развитие МСД, применительно к статическим и динамическим задачам балок, плит, пластинчатых систем и задач теории сейсмостойкости, получил в работах [4-6]. Метод сосредоточенных деформаций основывается на сосредоточении деформаций конечных элементов на их границах. Внутренние усилия также сосредотачиваются на контурах элементов. При этом

---

*Адрес для корреспонденции: Низомов Джахонгир Низомович. 734029, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 267, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана. E-mail: tiees@mail.ru, nizomov-jn@mail.ru.*

предполагается, что конечный элемент становится абсолютно жестким. Следовательно, каждый конечный элемент имеет по три степени свободы – две угловые и одна линейная. Если в методе конечных элементов напряженное состояние в пределах элемента имеет постоянный характер изменения, то в МСД оно имеет линейный характер.

### Основные зависимости

Напряженное состояние в конечных элементах МСД формируется исходя из основных зависимостей теории тонких плит [7], где нормальные и касательные напряжения, а также изгибающие и крутящие моменты представляются в виде

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{Ez}{1-\mu^2} \left( \frac{1}{r_x} + \mu \frac{1}{r_y} \right), & \sigma_y &= \frac{Ez}{1-\mu^2} \left( \frac{1}{r_y} + \mu \frac{1}{r_x} \right), \\
 u &= -(\partial w / \partial x)z, & v &= -(\partial w / \partial y)z, \\
 \tau_{xy} = \tau_{yx} &= G\gamma_{xy} = G \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{Ez}{1+\mu} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \\
 \tau_{xz} &= \frac{6Q_x}{h^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right), & \tau_{yz} &= \frac{6Q_y}{h^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right), \\
 M_x &= \int_{h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = D \left( \frac{1}{r_x} + \mu \frac{1}{r_y} \right), & M_y &= \int_{h/2}^{h/2} \sigma_y z dz = D \left( \frac{1}{r_y} + \mu \frac{1}{r_x} \right), \\
 H = M_{xy} = M_{yx} &= \int_{h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz = -D(1-\mu) \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $Q, M, H$  – поперечная сила, изгибающий и крутящий моменты,  $1/r_x$  и  $1/r_y$  – кривизны нейтральной поверхности в сечениях, параллельных соответственно плоскостям  $xz$  и  $yz$ ,  $D = Eh^3 / 12(1-\mu^2)$  – цилиндрическая жёсткость,  $h$  – толщина пластины,  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Из сопоставления правых частей представленных зависимостей (1) можно получить

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{12M_x z}{h^3}, & \sigma_y &= \frac{12M_y z}{h^3}, & \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \frac{12Hz}{h^3} = \frac{Hz}{I}, \\
 \tau_{xz} &= \frac{6Q_x}{h^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right), & \tau_{yz} &= \frac{6Q_y}{h^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right),
 \end{aligned}$$

где  $I = 1 \cdot h^3 / 12$  – момент инерции единичной ширины грани элемента.

### Жесткости фиктивных связей

Рассматривая отдельно напряженно-деформированные состояния при изгибе в двух вертикальных плоскостях, кручении и сдвиге, определим соответствующие жесткости фиктивных связей, которые будут расположены на гранях элементов. Потенциальная энергия деформации изгиба по всему объему конечного элемента  $V_i = a_i b_i h_i$ , при действии только нормальных напряжений  $\sigma_x$ , записывается в виде

$$U(M_{kx}) = \frac{1}{2} \int_{V_i} \frac{\sigma_{kx}^2}{E_{kx}} dV_i = \frac{M_{kx}^2 b_k^2 a_k}{2E_{kx} I_{kx}} (1 - \mu_{kx}^2). \quad (2)$$

Потенциальная энергия деформации изгиба в фиктивных связях (рис.1) по граням  $b_k$ , совершаемая изгибающими моментами на углы поворота  $\varphi_{kx} = M_{kx} b_k / \omega_{kx}$ , где  $\omega_{kx}$  – жесткость фиктивной связи, выражается как действительная работа

$$U(M_{kx}) = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot M_{kx} b_k \cdot \varphi_{kx} = \frac{M_{kx}^2 b_k^2}{\omega_{kx}}. \quad (3)$$

Из сопоставления (2) и (3) получаем значения коэффициента  $\omega_{kx}$ , а затем проведя аналогичную процедуру, получаем  $\omega_{ky}$ . Следовательно, коэффициенты жесткости фиктивных связей при изгибе элемента представляются в виде

$$\omega_{kx} = \frac{2E_{kx} I_{kx}}{a_k \cdot (1 - \mu_{kx}^2)}, \quad \omega_{ky} = \frac{2E_{ky} I_{ky}}{b_k \cdot (1 - \mu_{ky}^2)}. \quad (4)$$

Таким же образом получаем коэффициенты жесткости фиктивных связей, соответствующие деформациям кручению и сдвигу [5], которые представляются в виде

$$\psi_{kx} = \frac{4G_k I_{kx}}{a_k} = \frac{G_k b_k h_k^3}{3a_k}, \quad \psi_{iy} = \frac{4G_k I_{ky}}{b_k} = \frac{G_k a_k h_k^3}{3b_k}, \quad (5)$$

$$\xi_{ix} = \frac{5}{3} \frac{G_k b_k h_k}{a_k}, \quad \xi_{ky} = \frac{5}{3} \frac{G_k a_k h_k}{b_k}. \quad (6)$$

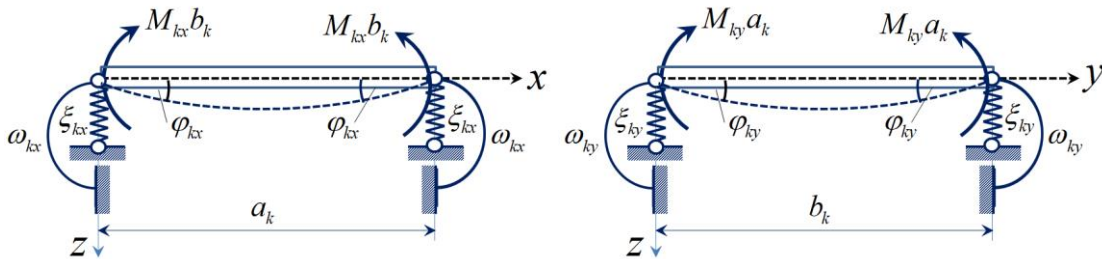


Рис. 1. Фиктивные связи, соответствующие деформациям изгиба и сдвига.

Полученные формулы (4)-(6) позволяют записать жесткости связей между элементами  $k$  и  $j$  (рис. 2):

$$\omega_{kj} = \left[ (\omega_{kx})^{-1} + (\omega_{jx})^{-1} \right]^{-1} = \omega_{kx} \omega_{jx} / (\omega_{kx} + \omega_{jx}). \quad (7)$$

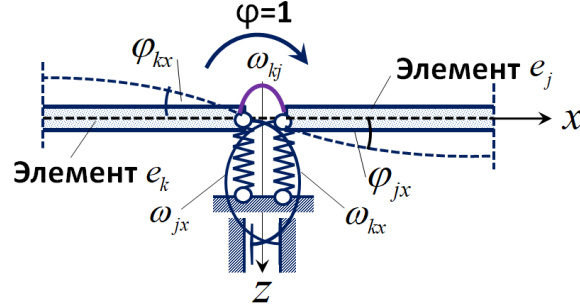


Рис. 2. Фиктивная связь между элементами, соответствующая деформации изгиба.

Из (7) следует, что для однотипных элементов размером  $a \times b \times h$ , где  $\omega_{kx} = \omega_{jx} = \omega_x$ , коэффициенты жесткости при изгибе на соответствующих гранях будут равны:

$$\omega_{kj} = \frac{\omega_x}{2} = \frac{2EI_x}{2a} = \frac{Ebh^3}{12a}, \quad \omega_{kn} = \frac{\omega_y}{2} = \frac{2EI_y}{2b} = \frac{Eah^3}{12b}. \quad (8)$$

Коэффициенты жесткости фиктивных связей при кручении и сдвиге, в случае однотипных элементов, записываются в виде

$$\psi_{kj} = \frac{\psi_x}{2} = \frac{GJ_x}{2a} = \frac{G\lambda_x bh^3}{2a}, \quad \psi_{kn} = \frac{\psi_y}{2} = \frac{GJ_y}{2b} = \frac{G\lambda_y ah^3}{2b}, \quad (9)$$

$$\xi_{kj} = \frac{\xi_x}{2} = \frac{5Gbh}{3 \cdot 2a} = \frac{5Gbh}{6a}, \quad \xi_{kn} = \frac{\xi_y}{2} = \frac{5Gah}{3 \cdot 2b} = \frac{5Gah}{6b}, \quad (10)$$

где  $\lambda_x, \lambda_y$  – числовые коэффициенты, зависящие от отношения сторон  $b/h$  и  $a/h$  соответственно [8].

На контурах жестко заземленной пластины, нормаль в которых соответственно параллельно осям  $x$  и  $y$ , коэффициенты жесткости представляются в виде

$$\omega_{x,o} = \frac{2EI_x}{a}, \quad \psi_{x,o} = \frac{GJ_x}{a}, \quad \xi_{x,o} = \frac{5Gbh}{3a}, \quad (11)$$

$$\omega_{y,o} = \frac{2EI_y}{b}, \quad \psi_{y,o} = \frac{GJ_y}{b}, \quad \xi_{y,o} = \frac{5Gah}{3b}. \quad (12)$$

Представленные коэффициенты жесткости (8)-(12) позволяют сформировать матрицу внутренней жесткости.

### Матрицы внутренней и внешней жесткости

Диагональная матрица внутренней жесткости для  $i$ -го элемента, который связан по четырем граням с элементами  $m, k, n, j$ , представляется в виде

$$\mathbf{C}_i = \text{diag}(\omega_{im}, \psi_{im}, \xi_{im} \mid \omega_{ik}, \psi_{ik}, \xi_{ik} \mid \omega_{in}, \psi_{in}, \xi_{in} \mid \omega_{ij}, \psi_{ij}, \xi_{ij}).$$

Если элемент  $i$  является угловым, где например, грани  $m$  и  $k$  совпадают с контурными линиями, то коэффициенты  $\omega_{im}, \psi_{im}, \xi_{im}$  и  $\omega_{ik}, \psi_{ik}, \xi_{ik}$  соответственно заменяются коэффициентами  $\omega_{x,o}, \psi_{x,o}, \xi_{x,o}$  и  $\omega_{y,o}, \psi_{y,o}, \xi_{y,o}$ . Если, например, левая грань  $i$ -го элемента совпадает с линией контура пластины, то коэффициенты  $\omega_{im}, \psi_{im}, \xi_{im}$  в матрице  $\mathbf{C}_i$  заменяются коэффициентами  $\omega_{x,o}, \psi_{x,o}, \xi_{x,o}$ , учитывающими граничные условия. Аналогичная замена производится при совпадении остальных граней этого элемента с контурными линиями. Полученные матрицы внутренней жесткости для отдельных элементов позволяют сформировать глобальную матрицу  $\mathbf{C}$ , которая также будет диагональной

$$\mathbf{C} = \text{diag}(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n),$$

где  $n$  – общее число элементов. Порядок матрицы  $\mathbf{C}$  определяется числом сечений, в которых сосредоточены по три фиктивных связи.

Матрица внешней жесткости формируется по формуле

$$\mathbf{K} = \mathbf{A} \mathbf{C} \mathbf{A}^T,$$

$\mathbf{K}$  – квадратная матрица  $3n$ -го порядка,  $\mathbf{A}$  – матрица коэффициентов размера  $3n \times 3m$ , где  $m$  – число сечений на гранях элементов, в которых сосредоточены внутренние усилия,  $\mathbf{A}^T$  – транспонированная матрица  $\mathbf{A}$ . Решение статической задачи плиты сводится к решающей системе алгебраических уравнений

$$\mathbf{K} \mathbf{W} = \mathbf{P}, \quad (13)$$

$\mathbf{W}, \mathbf{P}$  – векторы искомых перемещений и заданной нагрузки, состоящие из  $3n$  элементов. Из решения (13) определяется вектор перемещений, а затем последовательно вычисляются векторы деформаций и внутренних усилий [5].

Пример. Расчет плиты защемленными краями от действия равномерно распределенной нагрузки (рис. 3). На основе вышеизложенного алгоритма разработана компьютерная программа PLASTINA-R1 на языке Фортран и проведены численные эксперименты.

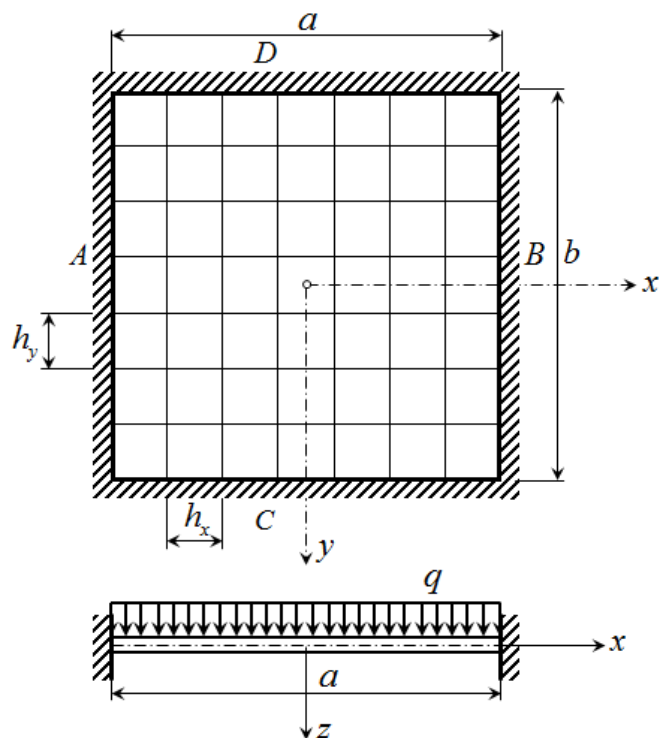


Рис. 3. К расчету плиты по МСД.

В таблице прогиб в центре квадратной плиты, полученный при различных разбиениях от действия равномерно распределенной нагрузки, сравнивается с аналитическим решением. Видно, что со сгущением сетки разбиения на конечные элементы МСД результаты последовательно приближаются к точному решению.

Таблица

Сопоставление результатов численного решения с аналитическим решением

Прогиб	Численное решение по МСД при различных разбиениях					[7]
	17x17	19x19	21x21	23x23	25x25	
$w_0 D/q_0 a^4$	0.001349	0.001337	0.001337	0.001331	0.001308	0.00126
Погрешность %	7.06	6.11	6.11	5.63	3.8	

**Вывод.** На основе полученных результатов можно заключить, что метод сосредоточенных деформаций может быть использован при расчете плит на стадии вариантного проектирования при различных видах статической нагрузки. Разработанные компьютерные программы позволяют проводить численные эксперименты и исследовать напряженно-деформированное состояние плиты при различных граничных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ржаницын А.Р. Расчет сплошных конструкций методом упругих сосредоточенных деформаций. – Строительная механика и расчет сооружений, 1980, №5, с. 15-20.
2. Ржаницын А.Р. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1991, 439 с.

3. Додонов М.И. Расчет изгибаемых пластин методом сосредоточенных деформаций. – Строительная механика и расчёт сооружений, 1986, №2, с. 22-25.
4. Низомов Д.Н., Каландарбеков И. Метод сосредоточенных деформаций в решении статических и динамических задач строительной механики. – Душанбе: Ирфон, 2005, 290 с.
5. Низомов Д.Н., Каландарбеков И. Метод сосредоточенных деформаций. – Душанбе: Дониш, 2015, 436 с.
6. Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А. Численное моделирование задача изгиба плит методом сосредоточенных деформаций. – Материалы межд. науч.-прак. конф. «Современные тенденции в архитектуре, строительстве и образовании в Республике Таджикистан» – Душанбе, 2014, с.250-255.
7. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М., 1966 г., 636 с.
8. Феодосьев В.И. Сопроотивление материалов. – М.: Физматгиз, 1963, 539с.

Ҷ.Н.НИЗОМОВ, И.Қ.ҚАЛАНДАРБЕКОВ\*, Д.Ҷ.ИСВАЛИЕВ\*, И.И.ҚАЛАНДАРБЕКОВ\*

## **МОДЕЛКУНОНИИ МАСЪАЛАИ ҚАТШАВИИ ПЛИТҲО БО МЕТОДИ МУТАМАРКАЗКУНОНИИ ДЕФОРМАТСИЯҲО**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти геология, сохтмони ба заминҷунбӣ тобовар ва сейсмологияи  
АМИ Тоҷикистон,*

*\*Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С.Осимӣ*

Дар мақола ҳалли масъалаи қатшавии тахтасанги ҳамаи тарафҳояш мазбӯтӣ аз таъсири борҳои баробар тақсимшуда бо методи мутамарказкунонии деформатсия дида баромада шудааст. Алгоритм барои тартибдиҳии матритсаҳои сахтии қатшавии тахтасанг бо баҳисобгирии шартҳои канорӣ нишон дода шудааст. Дар асоси ин алгоритм, барномаи компютерӣ ба забони Фортран коркард шудааст. Барои тақсимои гуногуни тахтасанг натиҷаҳои моделкунонии адади ба даст оварда шудааст. Дар асоси таҷрибаҳои ададӣ масъалаҳои наздикшавӣ ва сахтҳои натиҷаҳои ҳисобҳо таҳқиқ карда шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** тобхурӣ, қатшавӣ, ғечиш, унсури охиринок, шартҳои канорӣ, матритсаи дохилии сахтӣ, матритсаи берунаи сахтӣ, борҳои тақсимшуда.

D.N.NIZOMOV, I.Q.QALANDARBEKOV\*, D.J.ISVALIEV\*, I.I.QALANDARBEKOV\*

## **MODELING THE BENDING OF PLATES WITH PINCHED EDGES BY THE METHOD OF CONCENTRATED DEFORMATIONS**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
Institute of Geology, Earthquake Resistant Construction and Seismology, NAS of Tajikistan,  
\*M.S.Osimi Tajik Technical University*

The article considers the solution of the problem of bending a plate with rigidly pinched edges from the action of a uniformly distributed load by the method of concentrated deformations.

The algorithm of forming the stiffness matrix of the bent plate is given, taking into account the boundary conditions. Based on this algorithm, a computer program was developed in Fortran language. Numerical modeling results were obtained for various slab partitions. Based on numerical experiments, the issues of convergence and accuracy of calculation results were investigated.

**Key words:** torsion, bending, shear, finite element, boundary conditions, internal stiffness matrix, external stiffness matrix, distributed load.

**Сведения об авторах:**

**Низомов Д.Н.** – доктор технических наук, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана, заведующий лабораторией сейсмостойкости зданий и сооружений. E-mail: tiees@mail.ru; nizomov-jn@mail.ru

**Каландарбеков И.К.** – доктор технических наук, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, профессор. E-mail: kalandarbekov-55@mail.ru;

**Исвалиев Д.Дж.** – соискатель, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими. E-mail: disvaliev@mail.ru;

**Каландарбеков И.И.** – кандидат технических наук, Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, и.о. доцента. E-mail: iftikhor791@mail.ru



УДК 530.1

Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

ЗАФАРИ УМАР

**ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВУХВАЛЕНТНЫХ АКТИВАТОРОВ НА  
ИНТЕНСИВНОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  ЛЕГИРОВАННОГО  
ИОНАМИ  $\text{Mn}^{4+}$**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана  
Поступила в редакцию 22.04.2024 г.*

*В настоящей статье представлены результаты исследования геометрических, электронных и оптических свойств  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$ , легированного ионами  $\text{Mn}^{4+}$ . Установлено, что после легирования иона  $\text{Mn}^{4+}$  в матрицу  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  наиболее устойчивой позицией для иона  $\text{Mn}^{4+}$  является позиция атома Al4. Также, после легирования ионом  $\text{Mn}^{4+}$  в матрицу  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$ , в запрещенной зоне  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  появляются новые электронные состояния, в которых существенен вклад 3d иона  $\text{Mn}^{4+}$ . Исследовано влияние двухвалентных ионов  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  на интенсивность люминесценции  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$ , легированного ионами  $\text{Mn}^{4+}$ . Методом расчета энергии системы исследован захват позиций двухвалентных ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в структуре  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$ , когда ион  $\text{Mn}^{4+}$  фиксирован в стабильной и второй стабильной позициях. Установлено, что в обоих случаях  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  принимают стабильную позицию в позиции Al3. Методом геометрической оптимизации исследована локальная среда иона  $\text{Mn}^{4+}$  до и после легированного двухвалентными ионами  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ . Согласно полученных результатов интенсивность люминесценции  $\text{CaAl}_2\text{O}_9$  легированного ионами  $\text{Mn}^{4+}$  после активирования с двухвалентными ионами  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в два раза увеличивается.*

**Ключевые слова:** фосфор, теория функционала плотности, параметр кристаллического поля (10 Dq), энергия излучения, давление.

Нанокристаллические оксидные материалы, легированные ионами с  $3d^3$  электронной конфигурации ( $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ), являются перспективными материалами в связи с их потенциальным применением в голографии, оптоэлектронике, спинтронике, лазерной технологии, медицине, агротехнике, дозиметрии и т. д. [1-3]. В частности, нанокристаллические

---

**Адрес для корреспонденции:** Зафари Умар. 734025, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана.  
E-mail: zafari\_umar@mail.ru

материалы, легированные ионами  $Mn^{4+}$ , стали объектом интенсивного исследования в связи с их практическим использованием в качестве источника красного и инфракрасного излучения (люминофора) [4]. Например, в [5, 6] приведены результаты работ по синтезу, структуре и люминесцентным свойствам нанокристаллических оксидов и фторидов, легированных ионами  $Mn^{4+}$  и  $Cr^{3+}$ . В [7-12] нами были исследованы электронные структуры люминофоров, легированных ионами  $Mn^{4+}$  в рамках теории функционала плотности, а в [13] геометрическое, электронное и механическое свойства  $K_2SiF_6$ , легированного ионами  $Mn^{4+}$ , исследованы в рамках теории функционала плотности под давлением.

Для исследования электронной структуры  $CaAl_{12}O_{19}$ , легированного ионами  $Mn^{4+}$ , мы выполнили полную геометрическую оптимизацию с помощью программного пакета VASP. С учетом того, что ион  $Mn^{4+}$  может занимать один из пяти (M) позиций атома Al, оптимизацию приводили для всех вариантов по отдельности. Поскольку среди всех возможных вариантов размещения атомов в кристаллической структуре всегда реализуется тот, который при заданных термодинамических параметрах отвечает минимуму свободной энергии, то главным принципом при нахождении устойчивого варианта кристаллической структуры является минимизация его структурной энергии. Эта задача решается в рамках квантово-механических расчетов путем расчета энергии системы.

Анализ расчётов показывает, что для иона  $Mn^{4+}$  наиболее энергетически выгодно занять позицию октаэдрического Al4. Вторым наиболее стабильным вариантом оккупации иона  $Mn^{4+}$  является позиция Al5 (тоже октаэдрический). Энергетическая разница иона  $Mn^{4+}$  в позициях Al4 и Al5 составляет 0.185156 эВ. Надо отметить, что согласно теории кристаллического поля, ион  $Mn^{4+}$  именно в октаэдрическом окружении дает красную эмиссию. Энергетические характеристики  $Mn^{4+}$  для всех позиций Al приведены в табл. 1.

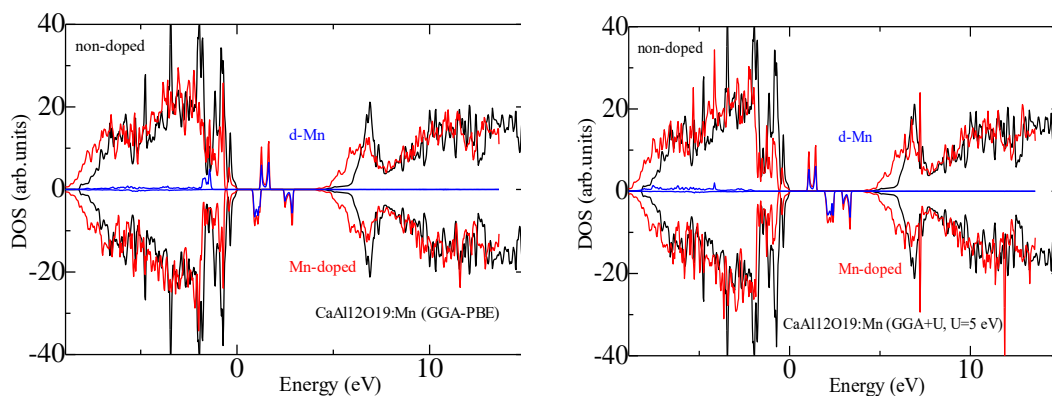
Таблица 1

Результаты расчёта свободной энергии Гиббса для  $CaAl_{12}O_{19}$ , легированного ионами  $Mn^{4+}$  для пяти (M) позиций атома Al

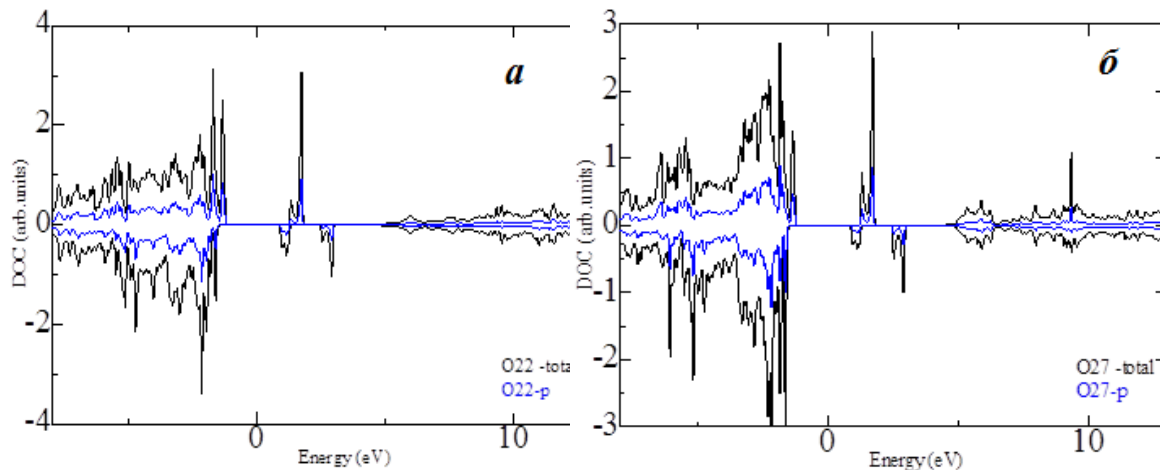
Тип позиции	E (эВ)	Энергетическая разница относительно минимальной энергии E (эВ)
$Mn^{4+}$ - Al(1)	-483.26067124	0.80640414
$Mn^{4+}$ - Al(2)	-483.43270323	0.63437215
$Mn^{4+}$ - Al(3)	-481.99714602	2.06992936
$Mn^{4+}$ - Al(4)	-484.06707538	0.00
$Mn^{4+}$ - Al(5)	-483.88191887	0.185156

Как было отмечено, для иона  $Mn^{4+}$  наиболее стабильной является оккупация позиции Al4. Далее, нами рассмотрен случай, когда ион  $Mn^{4+}$  занимает позицию Al4 и геометрическую оптимизацию провели для этого варианта до последнего шага. Ион  $Mn^{4+}$  окружен шестью ионами кислорода, которые образуют октаэдр  $[MnO_6]$ . Длина связи иона  $Mn^{4+}$  с ионами кислорода составляет 1.894 и 1.925 Å. При этом суперячейка состоит из 64 атомов. Такая система состоит из 36 неэквивалентных атомов в  $R3m1$  (#156) пространственной

группе. Расчеты основного электронного состояния проводились с помощью программного пакета WIEN2k с учетом спиновой поляризации. Радиусы МТ-сфер соответственно равны  $2.38a_0$  для атома Ca,  $1.64a_0$  для атома Al,  $1.90a_0$  для атома Mn и  $1.63a_0$  для атома O. Результаты квантово-механических расчетов плотности электронных состояний приведены на рис. 1-2. В запрещенной зоне  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  формируются новые спин-вверх и спин-вниз электронные состояния за счет  $3d$ -орбиталей иона  $\text{Mn}^{4+}$ . Однако  $t_{2g}$  орбитали иона  $\text{Mn}^{4+}$  расположены в области с отрицательным энергетическим значением внутри зонной проводимости. Энергетическая разница спин-вверх  $t_{2g}$  и  $e_g$  ( $10Dq$ ) состояний в рамках GGA-PBE расчетов равна 2.69 эВ.



**Рис. 1.** Плотность электронных состояний  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  по GGA и GGA+U ( $U=5\text{эВ}$ ) расчетам.



**Рис. 2.** Гибридизация  $3d$  -  $\text{Mn}^{4+}$  с  $2p$  -O22 (а) и O27 (б).

Многие люминесцентные свойства, в том числе, интенсивность и длина волны излучения могут зависеть от гибридизации иона  $\text{Mn}^{4+}$  с полями лигандов. В нашем случае наиболее сильная гибридизация  $3d$ -орбиталей иона  $\text{Mn}^{4+}$  наблюдается с  $2p$  орбиталями O22 и O27 (рис. 2).

Согласно [14] относительная интенсивность флуоресценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  на 1/20 меньше, чем у  $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ . В [15] исследовано влияние  $\text{CaF}_2$  и  $\text{MgF}_2$  на интенсивность флуоресценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ . В [16] сообщалось, что дополнительный соактиватор  $\text{Mg}^{2+}$  может увеличить интенсивность эмиссии  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ . Иными словами, интенсивность люминесценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ , полученного твердофазным методом, может быть улучшена путем введения в его состав дополнительных соактиваторов на основе двухвалентных ионов. Функция двухвалентных ионов в структуре кристаллофосфора заключается в образовании дополнительных искажений кристаллического поля решетки.

С целью исследования влияния дополнительных двухвалентных ионов, таких как  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$ , на интенсивность красной эмиссии  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  проводились ряд квантово-механических расчетов. С учетом ионных радиусов Al (67.5 пм), Mg (86 пм), Zn (88 пм), Ca (134 пм), Sr (144 пм), Cd (145 пм) предполагали, что ионы Sr (144 пм), Cd (145 пм) могут занять позиции Ca, а ионы  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  могут занять позиции Al. Для определения захвата ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  рассчитали свободную энергию Гиббса при фиксированной позиции иона  $\text{Mn}^{4+}$  с помощью программного пакета VASP [17] в рамках метода PAW [18] с использованием GGA-PBE [19]. Рассмотрен случай, когда ионы  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  размещены в пяти позициях Al, а ион  $\text{Mn}^{4+}$  фиксирован в позиции Al4 (стабильная позиция). Согласно полученным результатам наиболее стабильной позицией для ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  является позиция Al3. С учетом того, что после легирования дополнительных соактиваторов, ион  $\text{Mn}^{4+}$  может изменять свою позицию, рассмотрели случаи, когда ион  $\text{Mn}^{4+}$  переходит во вторую стабильную позицию –Al5. Расчет свободной энергии Гиббса показывает, что в этом случае тоже наиболее стабильной позицией для ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  является позиция - Al3. Результаты расчетов приведены в табл. 2-3.

Таблица 2

Результаты расчета для  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  с дополнительными со-активаторами  $\text{Mg}^{2+}$  для пяти (M) позиций атома Al, когда ион  $\text{Mn}^{4+}$  занят в позицию –Al4

Тип позиции Mg	E (эВ)	$\Delta E$ (эВ)
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(1) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-473.23660175	0.6283
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(2) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-473.33576128	0.52921106
<b><math>\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(3) \&amp; \text{Mn} @ \text{Al}(4)</math></b>	<b>-473.86497234</b>	<b>0.000</b>
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(4) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-472.12097038	1.74400196
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(5) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-472.47387639	1.39109595

Таблица 3

Результаты расчета для  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  с дополнительными со-активаторами  $\text{Mg}^{2+}$  для пяти (М) позиций атома Al, когда ион  $\text{Mn}^{4+}$  занят в позицию –Al5

Тип позиции Mg	E (эВ), эВ	$\Delta E$ (эВ)
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(1) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-473.11005845	0.51003151
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(2) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-471.55851000	2.06157996
<b><math>\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(3) \&amp; \text{Mn} @ \text{Al}(5)</math></b>	<b>-473.62008996</b>	<b>0.000</b>
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(4) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-471.76761829	1.85247167
$\text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}(5) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-472.47975552	1.14033444

В случае иона  $\text{Zn}^{2+}$ , в качестве дополнительного соактиватора тоже стабильная позиция иона  $\text{Zn}^{2+}$  относительно первой и второй оккупации  $\text{Mn}^{4+}$  не изменится. Результаты вычислений приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Результаты расчета для  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  с дополнительными соактиваторами иона  $\text{Zn}^{2+}$  для пяти (М) позиций атома Al, когда ион  $\text{Mn}^{4+}$  занят в позицию – Al4

Тип позиции Zn	E (эВ)	$\Delta E$ (эВ)
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(1) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-469.49859353	1.38511089
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(2) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-470.10363872	0.7800657
<b><math>\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(3) \&amp; \text{Mn} @ \text{Al}(4)</math></b>	<b>-470.88370442</b>	<b>0.000</b>
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(4) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-468.06790694	2.81579748
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(5) \& \text{Mn} @ \text{Al}(4)$	-468.92759271	1.95611171

Таблица 5

Результаты расчета для  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  с дополнительными допингами иона  $\text{Zn}^{2+}$  для пяти (М) позиций атома Al, когда ион  $\text{Mn}^{4+}$  занят в позицию –Al5

Тип позиции Zn	E (эВ), эВ	$\Delta E$ (эВ)
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(1) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-469.34945390	1.32056975
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(2) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-468.70779002	1.96223363
<b><math>\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(3) \&amp; \text{Mn} @ \text{Al}(5)</math></b>	<b>-470.67002365</b>	<b>0.000</b>
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(4) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-468.10535467	2.56466898
$\text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{Al}(5) \& \text{Mn} @ \text{Al}(5)$	-468.94657746	1.72344619

В табл. 6 приведено значение длины связи Mn-O в  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ )

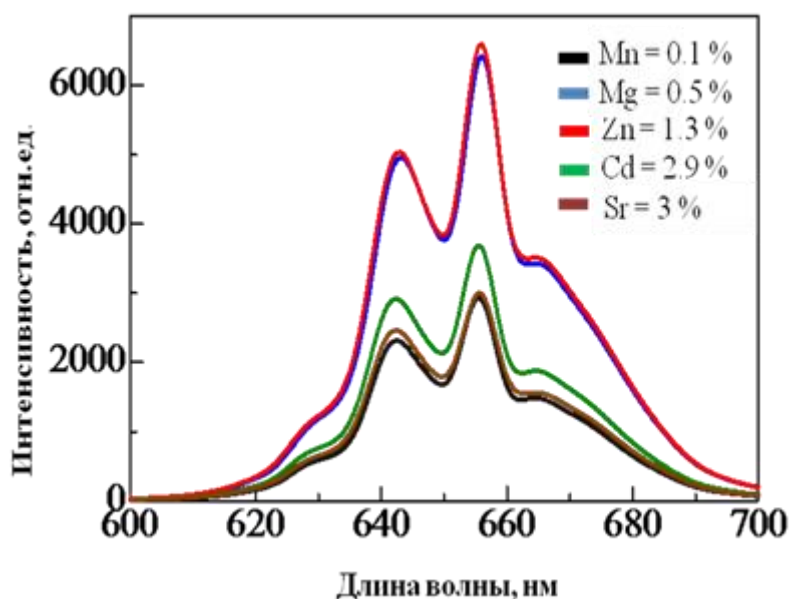
Таблица 6

Значения длины связи в  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ )

	Mn	Mg	Zn	Cd	Sr
O2	1.894	1.895	1.894	1.894	1.895
O6	1.894	1.895	1.894	1.894	1.895
O10	1.894	1.895	1.894	1.894	1.895
O25	1.926	1.974	1.975	1.926	1.928
O28	1.926	1.974	1.975	1.926	1.928
O29	1.926	1.974	1.975	1.926	1.928

Анализ полученных результатов показывает, что значительное изменение длины связи Mn-O в  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  наблюдается после легирования ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ . Ионы  $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$  заняты в позицию Ca, после легирования которых изменение длины связи Mn-O почти не наблюдается. Экспериментальные результаты подтверждают, что именно после легирования ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  наблюдается повышение интенсивности люминесценции в  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ .

На рис. 3 приведены спектры фотолюминесценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ , легированного с дополнительными двухвалентными ионами  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$ . Наглядно видно, что относительная интенсивность системы с ионами  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в три раза выше, чем системы с  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cd}^{2+}$ .

Рис. 3. Спектр люминесценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ , ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$ ).

Таким образом, легированные двухвалентные ионы, такие как  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  влияют на интенсивность люминесценции  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ . Согласно полученным результатам интенсивность люминесценции  $\text{CaAl}_{12(1-x)(1-y)}\text{O}_{19}\text{Mn}_x\text{Mg}_{12y}$  ( $y=0.001, 0.003, 0.005, 0.007$ ) имеет пик при концентрации  $y=0.005$ , а  $\text{CaAl}_{12(1-x)(1-y)}\text{O}_{19}\text{Mn}_x\text{Zn}_{12y}$  имеет пик при

концентрации  $y=0.015$ . Интенсивная люменесценция  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$ , после легирования ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в три раза увеличивается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Setlur A.A., Radkov E.V. et al. Energy efficient high color rendering LED lamps using oxyfluoride and fluoride phosphors. – Chem. Mater., 2010, № 22, pp. 4076-4082.
2. Loutts G.B., Warren M., Taylor L. et al. Manganese doped yttrium orthoaluminate: A potential material for holographic recording and data storage. – Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys., 1998, v.57, pp. 3706-3709.
3. Zhydachevskii Y., Galanciak D., Kobayakov S., Berkowski M., Kami A., Suchocki A. Y., Zakharko A. and Durygin A. Photoluminescence studies of  $\text{Mn}^{4+}$  ions in  $\text{YAlO}_3$  crystals at ambient and high pressure. – J. Phys.: Condens. Matter., 2006, v.18, №49, pp. 11385-11397.
4. Sadao A. Review— $\text{Mn}^{4+}$ -Activated Red and Deep Red-Emitting Phosphors. – ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020, (9), pp. 016001
5. Brik M.G., Camardello S.J., Srivastava A.M., Avram N.M. and Suchockic A. Spin-Forbidden Transitions in the Spectra of Transition Metal Ions and Nephelauxetic Effect. – ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2016, № 5 (1), pp.3067-3077.
6. Makoto S., Takayuki Y., Daisuke T., Yuui Y., Yoshisuke F., Yutaka F., Akira Y. Crystal growth and luminescence properties of Cr-doped  $\text{YAlO}_3$  single crystals. – Journal of Crystal Growth, 2013, v.362, pp. 157-161.
7. Умар З., Курбониён М.С., Ямамото Томоюки, Рахими Ф. Теоретическое моделирование электронного строения  $\text{LaScO}_3:\text{Mn}^{4+}$  в рамках теории функционала плотности. – ДАН РТ, 2019, т. 62, №3-4, с.175-181.
8. Mekhrdod S.Q., Umar Z., Tomoyuki Yamamoto. Electronic Structure Analysis of Mn-Doped  $\text{CaMO}_3$  Perovskites. – AMTC Letter (International Journal of Advanced Microscopy and Theoretical Calculations, (ISSN 1892-9465)), 2019, v. 6, pp. 256 -257.
9. Умар З., Курбониён М.С., Томоюки Ямамото, Рахими Ф. Квантово-механический расчет электронной структуры  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  в рамках теории функционала плотности. – ДАН РТ, 2020, т. 63, №1-2, с. 64-70.
10. Musashi S., Umar Z., Mekhrdod S., Srivastava A., William W., Mikhail B., Tomoyuki T. Theoretical and Experimental Investigations of  $\text{Mn}^{4+}$  Site Occupation in  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ . – ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2021, v.10, №7, pp. 076004.
11. Умар З., Шокир Ф., Рахими Ф., Субхони М., Ямамото Т. Электронная структура фосфорных материалов  $\text{SrZrO}_3$  и  $\text{SrHfO}_3$ , легированных ионами  $\text{Mn}^{4+}$ . – Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук, 2021, №1(182), с. 58-67.
12. Курбониён, М.С., Умар З., Томоюки Ямамото, Рахими Ф. Первопринципные расчеты электронной структуры  $\text{AMO}_3$  ( $A=\text{Ca}, \text{Sr}$ ;  $M=\text{Sn}, \text{Zr}, \text{Ti}, \text{Hf}$ ), легированного ионами  $\text{Mn}^{4+}$ . – Доклады Национальной академии наук Таджикистана, 2021, т. 64, №1-2, с.71-77.
13. Mekhrdod S., Umar Z. et al. Influence of Isostatic Pressure on the Elastic and Electronic Properties of  $\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}^{4+}$ . – Materials, 2022, v. 15, p.613.
14. Murata T., Tanou T., Iwasaki M., Morinaga K., Hase T. Fluorescence properties of  $\text{Mn}^{4+}$  in  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  compounds as red-emitting phosphor for white LED. – Journal of Luminescence, 2005, v.114, pp.207-212.
15. Shu W., Jiang L., Xiao S., Yang X., Ding J.  $\text{GeO}_2$  dopant induced enhancement of red emission in  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}:\text{Mn}^{4+}$  phosphor. – Mater. Sci. Eng. B., 2012, v. 177. pp. 274-277.

16. Lili Meng Lifang Liang, Yanxuan Wen. A novel red phosphor Na, Mn<sup>4+</sup> co-doped Sr<sub>4</sub>Al<sub>14</sub>O<sub>25</sub> for warm white light emitting diodes. – Materials Chemistry and Physics, 2015, v.153, pp.1-4.
17. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for Ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. – Phys. Rev. B 54., 1996, pp.11169-11186.
18. Perdew J.P. Restoring the density-gradient expansion for exchange in solids and surfaces. – Phys. Rev. Lett. 100, 2008, pp. 136406.
19. Blochl P.E. Projector augmented-wave method. – Phys Rev. B 50, 1994, pp.17953-17979.

ЗАФАРИ УМАР

## ТАЪСИРИ ИОНХОИ ДУВАЛЕНТА БА ИНТЕНСИВНОКИИ ЛЮМИНЕСЕНТСИЯИ CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> БО ИОНИ Mn<sup>4+</sup> ЛЕГИРОНИДАШУДА

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,*

*Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои нави АМИ Тоҷикистон*

Дар мақолаи пешниҳодшуда натиҷаҳои омӯзиши оид ба хосиятҳои геометрӣ, электронӣ ва оптикӣ CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, ки бо иони Mn<sup>4+</sup> легиридашуда аст пешниҳод шудааст. Мӯйян карда шудааст, ки пас аз иони Mn<sup>4+</sup> ба матрисаи CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> легиридан, мавқеи аз ҳама устувор барои иони иони Mn<sup>4+</sup> мавқеи атоми Al<sub>4</sub> мебошад. Ҳамчунин пас аз иони Mn<sup>4+</sup> ба матрисаи CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> легиридан дар соҳаи манъбудаи CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> ҳолатҳои нави электронӣ ба вуҷуд меоянд, ки дар онҳо саҳми қабати 3d-и Mn<sup>4+</sup> назаррас аст. Таъсири ионҳои дувалентаи Cd<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> ва Zn<sup>2+</sup> ба интенсивнокии люминесенсияи CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, ки бо иони Mn<sup>4+</sup> легиридашуда аст омӯхта шуд. Бо методи ҳисоби энергияи пурраи система механизми ҷойгирии ионҳои дувалентаи Mg<sup>2+</sup> ва Zn<sup>2+</sup> дар сохтори геометрии CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>, ки иони Mn<sup>4+</sup> дар мавқеи устувор ва устувори дуҷумин қарор дорад омӯхта шуд. Муайян карда шуда аст, ки барои ионҳои дувалентаи Mg<sup>2+</sup> ва Zn<sup>2+</sup> мавқеи устувор дар харду ҳолат ҳам мавқеи Al<sub>3</sub> мебошад. Мувофиқи натиҷаҳои ҳосилшуда пас аз легиридан ионҳои дувалентаи Mg<sup>2+</sup> ва Zn<sup>2+</sup> интенсивнокии люминесенсияи CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> бо иони Mn<sup>4+</sup> легиридашуда ду маротиба зиёд мешавад.

**Калимаҳои калидӣ:** фосфор, назарияи функционали зичӣ, параметри кристаллии майдон (10 Dq), энергияи афканишот, фишор.

ZAFARI UMAR

## INFLUENCE OF ADDITIONAL DIVALENT ACTIVATORS ON THE LUMINESCENCE INTENSITY OF CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> DOPED WITH Mn<sup>4+</sup> IONS

*National Academy of Sciences of Tajikistan,*

*Center for Innovative Development of Science and New Technologies of NAS Tajikistan*

This article presents the results of a study of the geometric, electronic and optical properties of CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> doped with Mn<sup>4+</sup> ions. It has been established that after doping the Mn<sup>4+</sup> ion in



the host of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ , the most stable position for the  $\text{Mn}^{4+}$  ion is the position of the Al4 atom. Also, after doping with  $\text{Mn}^{4+}$  ion into the host of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ , new electronic states appear in the band gap of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ , in which the contribution of the 3d  $\text{Mn}^{4+}$  ion is significant. The influence of  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  divalent ions on the luminescence intensity of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  doped with  $\text{Mn}^{4+}$  ions were studied. The total energy system calculation method examines the site-occupation of the divalent ions  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  in the structure of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  when the  $\text{Mn}^{4+}$  ion is fixed at the stable and second stable positions. It was found that in both cases, the  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  occupy a stable position at the Al3 site. Geometric optimization method for studying the local environment of the  $\text{Mn}^{4+}$  ion before and after doping with two valence ions  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  are study. According to the obtained results, the luminescence intensity of  $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$  doped with  $\text{Mn}^{4+}$  ions, after activation with divalent  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Zn}^{2+}$  ions increases twice.

**Key words:** phosphor, density functional theory, band gap, crystal field parameter (10 Dq), emission energy, pressure.

**Сведения об авторах:**

**Зафари Умар** – кандидат физико-математических наук, Центр инновационного развития науки и новых технологий НАН Таджикистана, научный сотрудник. E-mail: zafari\_umar@mail.ru.

УДК 523. 532

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Г.И.КОХИРОВА, Ф.Д.РАХМАТУЛЛАЕВА

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ АКТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ В ТАДЖИКИСТАНЕ И ЗАРУБЕЖОМ

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт астрофизики НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 22.05.2024 г.*

*В обзоре приведены результаты исследования активных астероидов на основе их оптических многоцветных наблюдений в обсерватории Санглох (Таджикистан), Крымской астрофизической обсерватории РАН (Россия), обсерватории Скальнате Плесо (Словакия) и станции Лесники (Украина) в 2011-2023 гг. Определены динамические и физические свойства, изучены морфологические особенности активности, рассмотрены возможные механизмы, обусловившие активность, сделаны выводы о природе и происхождении активных астероидов.*

**Ключевые слова:** астероид, телескоп, наблюдения, астрометрия, фотометрия, орбита, звездная величина.

### Введение

Семейство малых тел Солнечной системы образуют кометы, астероиды и продукты их распада – метеороиды. До недавнего времени считалось, что различие астероидов от комет не представляет никаких сложностей. По наземным наблюдениям они выглядят совершенно различно, комета имеет кому и хвост, астероид выглядит подобно звезде. По составу кометы – это ледяные тела, тогда как астероиды – каменные или железокаменные образования. Различаются они и орбитами, кометы двигаются по типичным кометоподобным орбитам, которые сильно отличаются от астероидных орбит. Динамические и физические свойства свидетельствуют о различных источниках происхождения комет и астероидов. Однако, в последние два десятилетия ситуация резко изменилась. С открытием совершенно новых объектов, таких как активные астероиды (АА), обнаруженные как среди

---

*Адрес для корреспонденции:* Кохирова Гулчехра Исроиловна, 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни, 299/5, Институт астрофизики НАНТ. E-mail: kokhirova2004@mail.ru.

астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), так и среди астероидов Главного пояса, кометы Главного пояса (КГП), кентавры, объекты с двойным статусом стало понятно, что сложившееся разделение комет и астероидов не столь однозначно, как подразумевалось. Присутствие АА, КГП, объектов с двойным статусом в Главном поясе астероидов указывает на более тесную связь астероидов и комет, чем это считалось ранее, а также свидетельствует о том, что ледяные тела из Главного пояса астероидов вполне могут быть потенциальными «поставщиками» воды [1].

Предполагается, что в отличие от других комет из пояса Койпера и облака Оорта, эти объекты нового класса образовались в более теплой области Солнечной системы, находящейся в пределах орбиты Юпитера и где расположен Главный пояс астероидов [2]. Изучение и сравнение объектов из трех резервуаров позволяют изучить протопланетный диск Солнца в трех соответствующих областях – Главный пояс астероидов, кометный пояс Койпера и кометное облако Оорта. В связи с этим активные малые тела имеют чрезвычайно важное место в астрономических исследованиях, их изучение обеспечивает получение более детальных сведений об условиях и процессах возникновения Солнечной системы в ее различных регионах, а также позволяет сделать предположение о возможных путях «доставки» воды на Землю. Эти моменты обуславливают фундаментальную значимость исследования активных малых тел Солнечной системы. Практическая значимость этой проблемы связана, в первую очередь, с проблемами астероидно-кометной опасности, для решения которой очень важно знать динамические и физические особенности объектов, представляющих потенциальную опасность столкновения с Землей. Сведения о природе таких тел крайне важны для учета в стратегиях предотвращения и смягчения опасных столкновений, поскольку последствия столкновений зависят от состава и структуры объекта. Другая особая важность этого направления связана с необходимостью решения новых проблем нашей планетной системы, таких как задача поиска принципиально новых источников сырьевых ресурсов в околоземном космическом пространстве.

Мы представляем некоторые обобщающие результаты исследования малых тел Солнечной системы, проявляющих не свойственную им активность. Объектами изучения явились активные астероиды, как из Главного пояса астероидов (ГПА), так и из популяции астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Целью явилось выявление или подтверждение активности (либо ее отсутствие) у объектов, определение динамических и физических свойств и возможных причин активности, установление их природы и происхождения. Исследование основано на использовании оптических многоцветных наблюдений избранных активных астероидов, проведенных в 2011-2023 гг. на телескопе Цейсс-1000 в Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики НАНТ, на телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории РАН (КрАО), на телескопе АЗТ-8 станции Лесники астрономической обсерватории КНУ им.Т.Г.Шевченко, а также на 1.3 м и 0.61 м телескопах обсерватории Скальнате Плесо Астрономического института Академии наук Словакии (АИ АНС). Наблюдения проводились по общепринятым методикам.

Первичная обработка выполнена по стандартной процедуре с учетом кадров “Flat”, “Dark” и “Bias”, позволяющим компенсировать различные технические ошибки. Проведена астрометрическая и фотометрическая обработка полученных изображений с использованием программных пакетов (ПП) Апекс II, Astrometrica, IDL, ПП IDL Sky, Astroart 8 и MaximDL 5 [3-7]. Для определения положений и звездных величин использовались каталог APASS, [8]. Для перехода от системы Слоан ( $g', r', i'$ ) к системе Джонсона-Козинса ( $BVRIU$ ) для соответствующих полос использованы уравнения перехода из работы [9]. Для анализа и интерпретации данных использованы современные ПП SAO Image DS9, Finson & Probststein diagram, rotational gradient method of Larson & Sekanina и др. Анализ результатов, полученных на основе их использования, и их сравнение с имеющимся данными показали приемлемую точность определения координат и звездных величин объектов, необходимые для вычисления орбит и нахождения физических параметров.

С помощью современных теорий и методик определены основные динамические и физические характеристики избранных активных малых тел, рассмотрены возможные механизмы, ответственные за наблюдаемую активность и сделаны выводы о возможной природе изученных объектов и причинах проявленной активности.

### **Исследование активных астероидов (596) Шейла, (3552) Дон Кихот, (248370) 2005 QN173 и (6478) Гольт**

#### **AA (596) Шейла**

Астероид (596) Шейла был обнаружен на фотографических пластинках 21 февраля 1906 г. А.Копфом из Гейдельберга. 596 находится в Главном поясе астероидов (ГПА) и имеет типично астероидную орбиту.

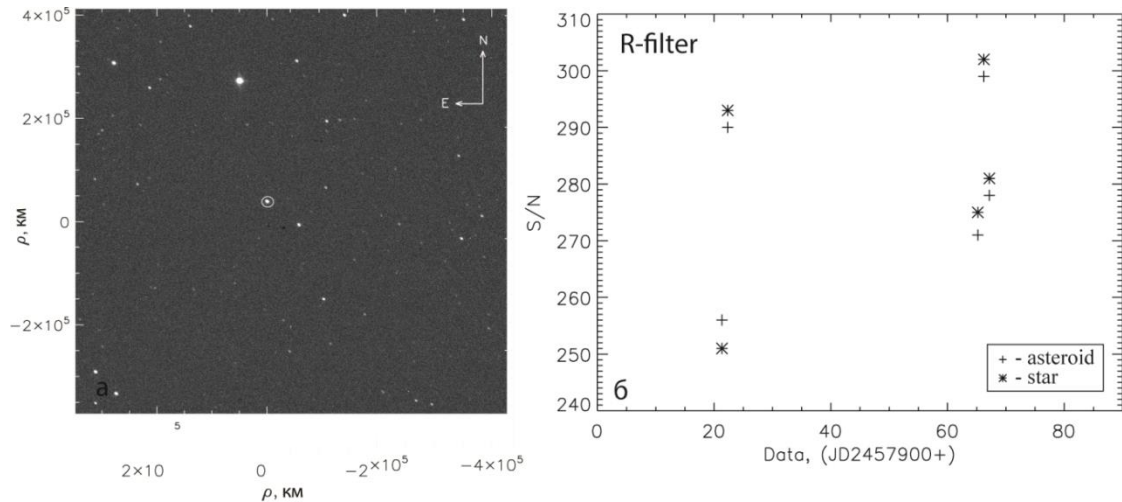
11 декабря 2010 г. во время наблюдений в обсерватории Маунт-Леммон в рамках Каталинского небесного обзора (Аризона, США) было обнаружено, что блеск астероида Шейла увеличился почти в два раза и у него, как у кометы, образовалась кома, и затем появились три пылевых хвоста [10, 11].

Из-за проявления признаков кометной активности объект был отнесен к группе активных астероидов. Зафиксированная кометная активность, не свойственная астероидам, сразу привлекла большое внимание к объекту. Исследования астероида проводились по наблюдениям космического аппарата Swift UV [12] и космического телескопа Хаббл [13], а также по наземным наблюдениям [14-16]. В спектре астероида обнаружено значительное покраснение в ультрафиолетовой области. Измерения показали, что вспышка астероида имела эпизодический характер и не связана с выделением газов характерных для комет CO, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, OH, NH, CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> [11]. Показано, что из астероида было выброшено  $6 \times 10^8$  кг пыли со скоростью 57 м/с. Уже в 2011 г. в качестве причины проявленной активности астероида Шейла было предположено столкновение с другим космическим телом [10, 11].

По наземным наблюдениям в декабре 2010 г. - мае 2011 г. было показано, что морфология вспышки астероида изменилась за этот период наблюдений, получены оценки диаметра и массы выброшенной пыли; а также предположено, что причиной вспышки могло

быть столкновение с крупным метеороидом, принадлежащим метеороидным роям, связанными с двумя периодическими кометами 127P и P/2005K3, вблизи орбит которых астероид прошел незадолго до вспышки [15].

С целью поиска новых признаков активности и уточнения ее причин нами проведены астрометрические и фотометрические в фильтрах *BVRI* наблюдения активного астероида (596) Шейла на телескопе АЗТ-9 КрАО в мае-июне 2011 г. и на телескопе Цейсс-1000 МАОС в июне-августе 2017 г. Обстоятельства наблюдений, параметры телескопов, обработка и детальные результаты приведены в [16]. Снимок астероида Шейла по наблюдениям в 2017 г. показан на рис. 1 (а). Для измерений изображений астероида и звезд поля использовалась апертура фиксированного радиуса, которая позволила охватить объект полностью. На рис. 1(б) представлена зависимость величины  $S/N$  (отношение сигнал/шум) астероида и звезды стандарта от даты наблюдений, для изображений, полученных в *R* фильтре.



**Рис. 1.** Изображение АА (596) Шейла в фильтре *R*, полученное в МАОС 16 июня 2017 г. (а) и отношение  $S/N$  для астероида и звезды стандарта для всего периода наблюдений (для изображений, полученных в фильтре *R*) (б).

Определены координаты объекта и орбиты, получены видимый блеск астероида в четырех фильтрах, абсолютный блеск в фильтрах *V* и *R*, и показатели цвета. Кривые блеска свидетельствуют об отсутствии значительных изменений яркости астероида в период наблюдений. Абсолютный блеск астероида в фильтрах *V* и *R* составил  $9.1 \pm 0.05$  и  $8.8 \pm 0.03$  зв. вел., соответственно. Среднее значение диаметра астероида составило  $119 \pm 2$  км. Средние значения показателей цвета  $B-V=0.72 \pm 0.05$ ;  $V-R=0.29 \pm 0.03$ ;  $R-I=0.31 \pm 0.03$  хорошо согласуются с имеющимися значениями и средними величинами для астероидов *P* и *D* типов. Величина периода вращения астероида, оцененная по фотометрическим наблюдениям, составила  $16.1 \pm 0.2$  часа. Анализ полученных данных показал, что астероид и в 2011 г. и в 2017 г. сохранил видимое и абсолютное значения блеска и другие характеристики, несмотря на столкновение с малым телом в декабре 2010 г., приведшем к вспышке и

появлению кометной активности астероида. Орбита объекта не претерпела значительных изменений. Вероятнее всего, объект является истинным астероидом, а его столкновение с малым телом не привело к катастрофическому изменению поверхности астероида или к его полному распаду [14, 16].

#### **AA (3552) Дон Кихот**

Астероид (3552) Дон Кихот (1983 SA) был открыт в 1983 г. [17]. Период обращения составляет 8.8 лет, и объект наблюдался в трех появлениях во время прохождения перигелия. Астероид имеет сильно вытянутую орбиту со значительным эксцентриситетом, пересекающую орбиты Марса и Юпитера, и не пересекающую орбиту Земли, вследствие чего объект классифицируется как астероид группы Амура. Однако, хотя орбита 3552 расположена за орбитой Земли, астероид в перигелии достаточно близко подходит к орбите Земли - до расстояния 0.2 а.е., что позволяет отнести его к астероидам, сближающимся с Землёй.

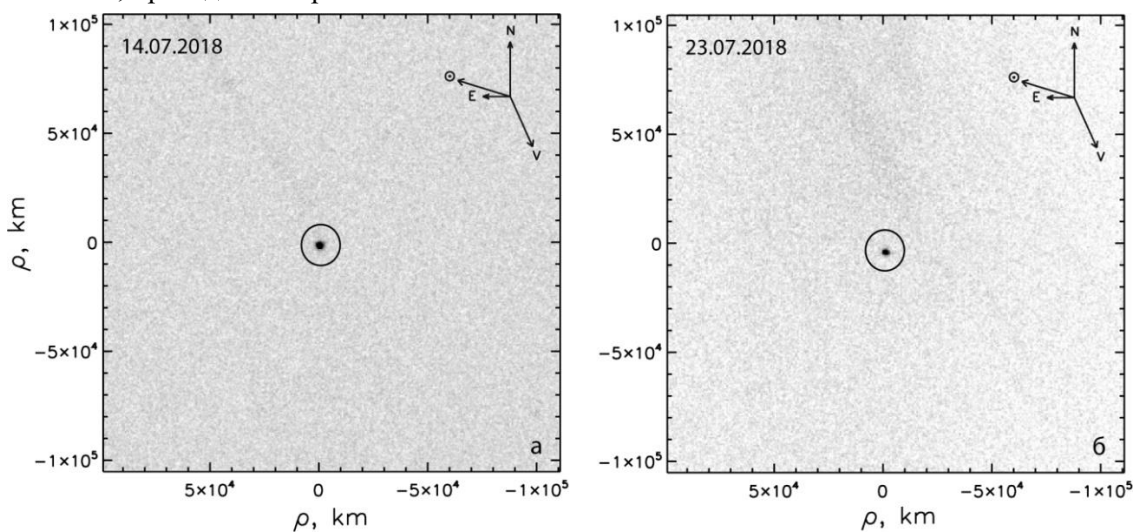
Параметр Тиссерана для астероида 3552 имеет значение 2.31, следовательно, его орбита классифицируется как типичная орбита короткопериодических комет и уже на этой основе можно предположить кометное происхождение объекта. Согласно [18] диаметр астероида составляет 18.7 км и его геометрическое альbedo в полосе  $V$  равно 0.02. Такое низкое значение альbedo является типичным для кометных ядер [19, 20] и согласуется с таксономической классификацией 3552 как астероид D типа [21, 22]. Астероидам примитивного P или D типа свойственна довольно низкая объемная плотность, в среднем  $\rho=2$  г/см<sup>3</sup> [23, 24], типичная для углистых хондритов [25, 26]. Кометное происхождение астероида было предсказано с очень высокой вероятностью и на основе динамического моделирования [26]. Однако на тот момент никаких признаков активности у астероида не было зарегистрировано, поэтому было предположено, что объект является ядром угасшей кометы [27].

Особый интерес к астероиду вновь возник после того, как 22 августа 2009 г. с помощью космического телескопа Спитцер у объекта в инфракрасном диапазоне спектра излучения на длине волны 4.5 мкм была зафиксирована кометная активность в виде небольшой комы и хвоста [28]. Данный волновой интервал соответствует эмиссии молекулярной полосы CO<sub>2</sub>. В октябре 2017 г. с помощью космического телескопа Спитцер вновь наблюдалась активность астероида 3552, подтвердившая ранее полученные результаты [29]. И, наконец, в марте 2018 г. с помощью 4.1 м телескопа (Southern Astrophysical Research Telescope) впервые выявили эпизодическую пылевую активность этого объекта и в оптическом диапазоне [30]. Анализируя результаты наблюдений [28], пришли к заключению, что астероид 3552 действительно является ядром угасшей кометы, которое вновь проявило активность. Регистрация излучения молекулярной полосы CO<sub>2</sub> свидетельствует о существовании ледяного CO<sub>2</sub> на астероиде 3552 и, следовательно, CO<sub>2</sub> может иметься в околоземном космическом пространстве в течение продолжительного времени.

Из вышеприведенных фактов следует, что объект 3552 представляет несомненный научный интерес, существует необходимость его дальнейшего изучения для получения

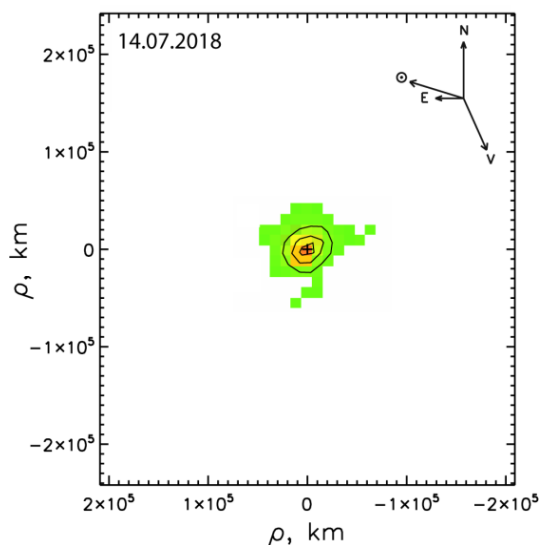
новых доказательств его происхождения. В этой связи целью новых наблюдений астероида 3552 является продолжение анализа его фотометрических характеристик – блеска, оценки диаметра, показателей цвета.

Как было отмечено, в марте 2018 г. у астероида 3552 по оптическим наблюдениям зарегистрирована кометная активность в виде слабой комы. 7 мая 2018 г. астероид прошел перигелий своей орбиты. Для поиска признаков активности 14, 23 и 24 июля 2018 г. нами были проведены наблюдения объекта на телескопе Цейсс-1000, снабженного ПЗС камерой FLI Proline PL16803, в МАОС. Обстоятельства мониторинга и обработки кадров, а также детальные результаты приведены в [31], изображения астероида 3552, полученные на Санглохе, приведены на рис.2.



**Рис. 2.** Изображения астероида Дон Кихот, полученные в обсерватории Санглох 14.07.2018 г. (а) и 23.07.2018 г. (б).

Полученные нами новые фотометрические данные показывают, что 14 июля 2018 г. нами зарегистрирована вспышечная активность астероида, об этом свидетельствует блеск, измеренный 14 июля, значительно отличающийся и от эфемеридного значения и от яркости, измеренной 23 и 24 июля. Наиболее близкое к эфемеридной величине значение яркости получено по наблюдениям 24 июля, на основании этого можно сказать, что после вспышки 14 июля яркость астероида падала и в конце наблюдений уже соответствовала эфемеридному блеску, то есть к этому моменту вспышка завершилась. Анализ суммарных изображений астероида 3552 также показал наличие слабой пылевой комы (рис. 3).



**Рис. 3.** Слабая кома астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Сангloch 14 июля 2018 г.

По результатам исследования сделано следующее заключение. По многоцветным оптическим наблюдениям астероида (3552) Дон Кихот в 2018 г. зарегистрирована его вспышечная активность, характерная для комет. Определены координаты и орбита, видимый и абсолютный блеск, показатели цвета, диаметр. Показатели цвета и зарегистрированная активность, наряду с кометоподобной орбитой и низким значением альбедо, указывают на то, что астероид с очень высокой вероятностью является ядром угасшей кометы. Завершение вспышки зарегистрировано на 10 сутки после ее начала. На основе характера активности, стабильности орбиты и физических параметров сделано предположение, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости, явились результатом столкновения астероида 3552 размером около 19 км с другим небольшим объектом или бомбардировки его поверхности мелкими метеороидами.

#### **AA (248370) 2005 QN173**

Астероид 248370 (2005 QN173) открыт в 2005 г. [32]. Объект находится во внешней области Главного пояса астероидов. Согласно критерию Тиссерана ( $T_j > 3.12$ ) астероид движется по типичной астероидной орбите. Этот факт и расположение астероида в ГП, как было принято считать до недавнего времени, однозначно подразумевают, что объект является исконным астероидом. Однако, 7 июля 2021 г. обзорный телескоп программы ATLAS зарегистрировал у астероида активность в виде длинного тонкого пылевого хвоста [33], затем наличие хвоста подтвердили наблюдения 4.3 м телескопа Лоувеловской обсерватории (Lowell Discovery Telescope (LDT)). Присутствие хвоста 11 июня 2021 г. выявлено из архивных наблюдений [34]. В июле 2021 г. длина хвоста составила более 720 тыс. км и ширина – 1.4 тыс. км [35]. В этот период астероид находился на гелиоцентрическом расстоянии 2.391 а.е. с истинной аномалией  $16^\circ.0$ , и совсем недавно 14 мая 2021 г. он прошел



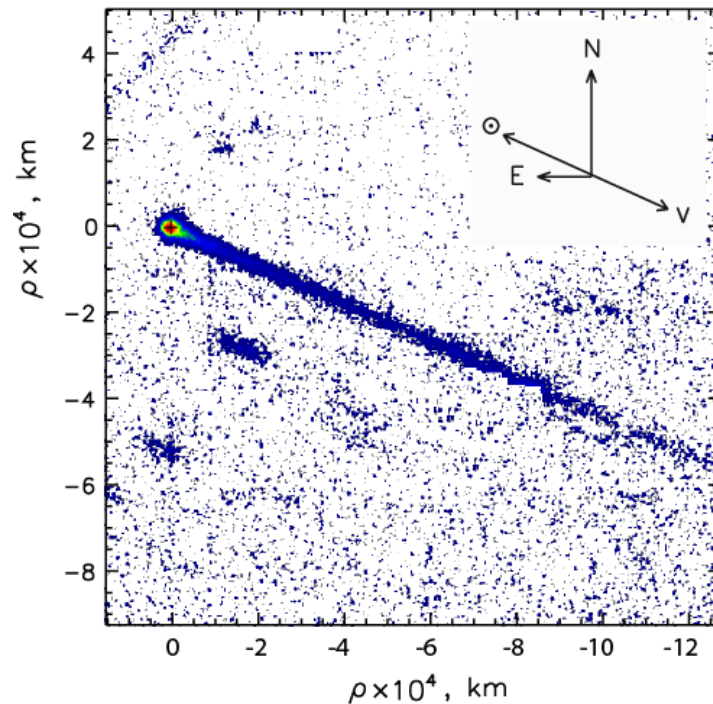
перигелий своей орбиты. Из-за внезапно проявленной активности объект, наряду с астероидным обозначением 248370, стал именоваться кометой 433Р.

Первоначально считалось, что впервые кометная активность у астероида появилась 7 июля 2021 г. Однако позже, активность астероида выявлена из архивных снимков по наблюдениям 22 июля 2016 г. [36]. В тот период объект имел истинную аномалию  $56^\circ.5$  и совсем недавно, 3 января 2016 г., прошел перигелий орбиты.

Вследствие того, что астероид 248370 движется по типично астероидной орбите, но проявляет признаки кометной активности, он был отнесен к классу объектов известных как активные астероиды [1].

Имеются несколько оценок диаметра астероида, а именно  $3.2 \pm 0.2$  км [35],  $3.6 \pm 0.2$  км [37]. Абсолютная звездная величина астероида в фильтре  $V$  составляет  $H=15.53^m$  [38] и его геометрическое альbedo в том же фильтре  $p_V=0.054$  [37].

Надежный период вращения АА 248370 пока не установлен, поэтому невозможно утверждать о каком-либо вкладе вращательной дестабилизации в наблюдаемую активность, как это было подтверждено для АА Гольт [39]. В то время как установление двух отдельных эпизодов проявления активности в районе перигелия, служит сильным аргументом в пользу того, что причиной наблюдаемой активности может служить сублимационный процесс на поверхности астероида [40, 41].

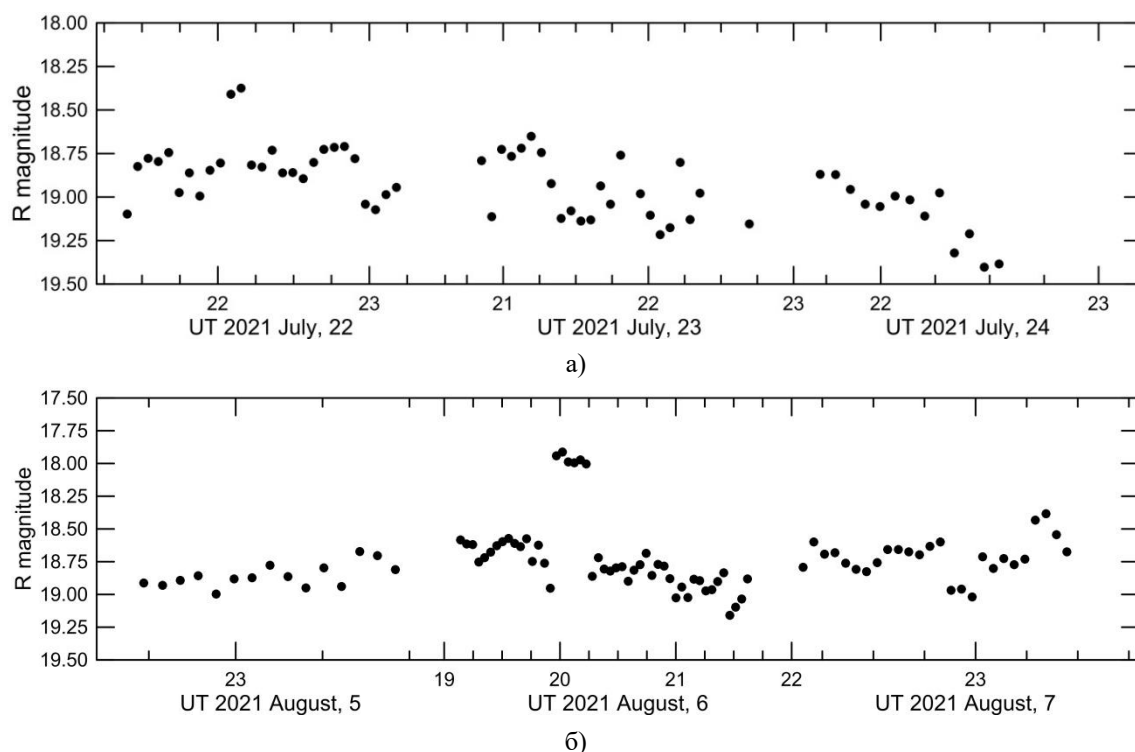


**Рис. 4.** Суммарное изображение астероида 248370 (2005 QN173), полученное в  $R$  фильтре 16 июля 2021 г. в обсерватории Скальнате Плесо.

В июле-августе 2021 г. астероид 248370 все еще продолжал проявлять заметную активность, с целью ее анализа и сопоставления с другими опубликованными данными, мы

провели квазисинхронный мониторинг астероида 248370. Наблюдения были проведены в течение 7 ночей – 16, 22-24 июля и 5-7 августа 2021 г. на 1.3-м телескопе обсерватории Скальнате Плесо АИ АНС и на телескопе Цейсс-1000 МАОС ИА НАНТ. Параметры телескопов, журнал наблюдений, детальное описание обработки материала, вычисления и результаты приведены в [42]. Суммарный снимок астероида 248370 в фильтре R приведен на рис. 4.

В результате квазисинхронных наблюдений АА 248370 (2005 QN173), проведенных в Словакии и Таджикистане в июле-августе 2021 г., получены фотометрические параметры: видимый и абсолютный блеск, параметр пылепродуктивности, оценка верхнего предела диаметра астероида. Кривые блеска по наблюдениям на Санглохе, 22-24 июля и 5-7 августа 2021 г., приведены на рис. 5 а) и б), соответственно, где по оси абсцисс указана дата в юлианских днях и по оси ординат – видимый блеск в фильтре *R*. Как видно из рис. 5, вариации яркости астероида за три ночи в июле показывают несколько (четыре или пять) пиков с малыми амплитудами. По наблюдениям в августе также выявлено наличие нескольких мелких пиков, однако 6 августа имеется резкое увеличение блеска с амплитудой в одну звездную величину. Небольшие кратковременные изменения яркости могут быть следствием вариаций альбедо и наличием крупных образований на поверхности. Вариация блеска 6 августа может быть обусловлена свежим единовременным (новым) локальным выбросом пыли.



**Рис. 5.** Кривая видимого блеска астероида 248370 (2005 QN173) в фильтре *R* по наблюдениям в обсерватории Санглох, а) в июле, б) в августе 2021 г.

Абсолютный блеск астероида в фильтре  $R$  по нашим измерениям находится в интервале от  $14.61^m \pm 0.16$  до  $14.88^m \pm 0.09$  и показывает слабую тенденцию к убыванию. Оценка уровня пылевой активности (параметр  $Afr$ ) астероида по нашим наблюдениям составила  $14-18/\pm 3$  см, и эти величины показывают низкий уровень активности объекта. При этом значения параметра близки к величинам для комет семейства Юпитера на больших гелиоцентрических расстояниях [43].

Фотометрические данные нашего мониторинга наряду с другими наблюдениями подтверждают активное состояние астероида в этот период. Отметим хорошую совместимость результатов наших квазисинхронных наблюдений, проведенных различными телескопами, а также их соответствие результатам других наблюдений.

Заключая, можно сказать, что новый активный астероид 248370 (2005 QN173) проявляет периодическую активность подобную кометной, с образованием компактной комы и длинного хвоста. Такая периодическая активность, может быть вызвана возможной сублимацией летучих компонентов [44] на поверхности при прохождении перигелия или бомбардировкой поверхности метеороидами во время возможного прохождения через метеороидный рой [39]. Другая возможная причина - столкновения с другими астероидами. Высокая вероятность такого события доказана в работе [45], где по наблюдениям активного астероида 457175/362P выявлены систематические орбитальные отклонения, предшествующие появлению у астероида кометной активности. Показано, что за 200-215 суток до прохождения перигелия, орбиты почти 19 тысяч нумерованных и ненумерованных астероидов имели с орбитой астероида 457175 минимальное расстояние (MOID) менее 0.01 а.е. Поэтому очень высока вероятность столкновения астероида 457175 с каким-либо малым телом вблизи восходящего узла его орбиты, что обусловило затем появление у астероида кометной активности.

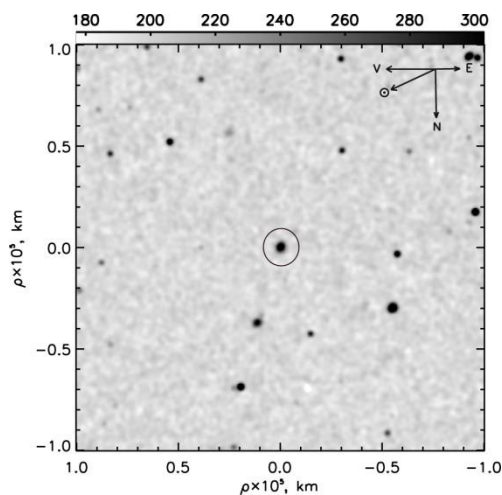
#### **AA (6478) Гольт**

Открытый в 1988 г. астероид (6478) Гольт имеет большую полуось орбиты и эксцентриситет, равные соответственно 2.305 а.е. и 0.1936, вследствие этого он включен в семейство Фокеи из Главного пояса астероидов, происхождение которого, предположительно, связано с объектами пояса Койпера [46]. Семейство Фокеи объединяет небольшую группу астероидов Главного пояса, орбиты которых имеют большие полуоси в промежутке от 2.25 до 2.50 а.е. и эксцентриситеты более 0.1.

Астероид 6478 проявляет эпизодическую вспышечную активность на протяжении нескольких лет наблюдений. По этой причине он включен в группу активных астероидов Главного пояса [1]. В 2018-2019 гг. у 6478 наблюдалась достаточно высокая активность [47-49]. Кометная активность астероида 6478 выявлена также из архивных снимков, начиная с 2013 г., когда вспышки происходили на расстоянии 2.68 а.е. вблизи афелия орбиты [50]. Это стало основанием для предположения, что активность астероида не связана с процессом сублимации летучих веществ, усиливающегося в перигелии орбиты, а происходит из-за сильного вращения тела [50]. Оценка периода вращения астероида 6478 на сегодняшний

день составляет 2.5 часа, что является достаточно коротким периодом, близким к пределу спинового барьера [51], используя наблюдения астероида в августе 2020 г., когда у него отсутствовала пылевая кома, подтвердили значение периода вращения и показали его соответствие критическому периоду вращательной неустойчивости непрочного (хрупкого) шара с объемной плотностью  $1.7 \text{ г/см}^3$ .

В 2020 г. по результатам ряда наблюдений 6478 показано, что признаки кометной активности у объекта отсутствовали [51-53]. Для подтверждения этого и использования возможности более надежного определения физических параметров астероида 6478 и, особенно, его размера в отсутствие пылевой комы, мы провели в 2020 г. новые квазисинхронные наблюдения объекта на телескопе Цейсс-1000 МАОС и на 1.3-м и 0.61-м телескопах обсерватории Скальнате Плесо АИ АНС. Обстоятельства наблюдений, параметры телескопов, результаты и их подробный анализ приведены в [54]. Суммарный снимок астероида 6478 приведен на рис. 6.



**Рис. 6.** Изображения астероида (6478) Гольт, полученные в  $R$  фильтре в МАОС 23 сентября 2020 г.

Обобщим результаты квазисинхронных наблюдений АА (6478) Гольт, проведенных в Таджикистане и Словакии в августе-октябре 2020 г. Нами показано:

- абсолютный блеск астероида составил  $14.42-15.05 (\pm 0.13)$  и  $14.87-15.49 (\pm 0.11)$  зв. величин в фильтре  $R$  и  $V$ , соответственно. По нашим изображениям, полученным через полтора года после проявления повышенной активности, блеск астероида значительно снизился, что дает нам основание заключить, что мы наблюдали его в неактивном состоянии. Наши измерения блеска согласуются с оценками других наблюдений этого периода;

- кривая блеска свидетельствует о неоднородной поверхности астероида, а верхний период вращения астероида составляет 2.7 часа. Подтверждена величина периода, близкая к пределу спинового барьера, свойственного критическому периоду вращательной неустойчивости объектов, имеющих плотность порядка  $2 \text{ г/см}^3$ ;

- показатели цвета астероида соответствуют астероидам Q-типа, которые по спектральным свойствам наиболее схожи с метеоритами, состоящими из обыкновенных хондритов;

- оценка диаметра астероида по нашим измерениям составляет от 2.5 до 3 ( $\pm 0.13$ ) км и хорошо согласуется с оценками других наблюдений в этот же период. С учетом проведения наблюдений в период отсутствия активности астероида, мы считаем эту оценку наиболее достоверной;

- фотометрические данные новых наблюдений подтверждают отсутствие активности астероида в период мониторинга. Результаты наших квазисинхронных наблюдений, проведенных различными телескопами, хорошо согласуются между собой.

### **Заключение**

1. На основе длительного ряда наблюдений активного астероида (596) Шейла установлено, что причиной вспышки и появления признаков кометной активности объекта в 2010 г. явилось столкновение с небольшим метеороидом. Учитывая кометоподобную орбиту, можно заключить, что объект является истинным астероидом.

2. Наблюдения астероида (3552) Дон Кихот, проведенные в целях поиска новых признаков активности в 2018 г., увенчались успехом – 14 июля нами зарегистрирована вспышка астероида. Такое явление в этот период больше никем не зафиксировано. Исследование новых фотометрических данных показало, что наиболее вероятной причиной вспышечной активности в 2018 г. является столкновение с небольшим объектом или бомбардировка поверхности мелкими метеороидами. Кометоподобная орбита и периодическая активность позволяют заключить, что астероид в действительности является ядром угасшей кометы.

3. AA 248370 (2005 QN173) проявляет периодическую активность подобную кометной, которая может быть вызвана возможной сублимацией летучих компонентов на поверхности при прохождении перигелия или бомбардировкой поверхности метеороидами во время возможного прохождения через метеороидный рой. Другая возможная причина - столкновения с другими астероидами. По-видимому, 248370,двигающийся по астероидной орбите, является истинным астероидом.

4. Фотометрические данные новых наблюдений AA Гольт подтверждают отсутствие активности астероида в период мониторинга. Результаты наших квазисинхронных наблюдений, проведенных различными телескопами, хорошо согласуются между собой. AA Гольт,двигающийся по астероидной орбите, с высокой вероятностью является истинным астероидом, эпизодическая активность, скорее всего, связана с достаточно быстрым вращением, период которого близок к спиновому барьеру.

Работа поддержана грантом проекта Президентского Фонда фундаментальных исследований, №КД 0123ТJ1535.

This work is also supported by the National Key R&D Intergovernmental Cooperation Program of China (2023YFE0102300).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. The active asteroids. – In: Asteroids IV (P. Michel et al., eds.), 2015, University of Arizona Press, Tucson, pp. 221-241.
2. Masiero J.R., Mainzer A.K. et al. Preliminary Analysis of WISE/NEOWISE 3-Band Cryogenic and Post-cryogenic Observations of Main Belt Asteroids. – The Astroph. J. Letters, 2012, v.759, id. L8, 5 p.
3. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «АПЕКС-I» и «АПЕКС-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений. – *Астрономический Вестник*, 2010, № 1, с. 74-87.
4. <http://iasc.cosmosearch.org/Home/Astrometrica>.
5. Landsman W.B. The IDL astronomy user's library. – Eds: Hanisch R.J., Brissenden R.J.V., Barnes J. – *Astron. Data Analysis Software and Systems II. A.S.P. Conference Series*. 1993. V. 52. pp. 246-248.
6. Henden A.A., Templeton M., Terrell D., et al. VizieR online data catalog: AAVSO photometric all sky survey (APASS) DR9 (Henden+, 2016), VizieR Online Data Catalog, 2016, II-336. <https://www.aavso.org/apass>.
7. Winfield, John. "MaximDL Utilities" – Режим доступа: <http://winfij.com/maximdl.html>.
8. Mallama A. Sloan magnitudes for the brightest stars. – *Journal of American Association of Variable Star Observer*, 2014, v.42, p. 443.
9. Larson S.M. (596) Scheila. – IAUC, 2010, 9188.
10. Larson S., Kowalski R., Sato H., Yoshimoto, K. Nakano S. 596 (Scheila). – *CBET*, 2010, 2583, 1.
11. Bodewits D., Kelley M. S., Landsman W.B., Besse S., Hearn F.A. Collisional Excavation of Asteroid (596) Scheila. – *Astrophys.J.*, 2011, v.733, id. L3, 5 p.
12. Jewitt D., Weaver H., Mutchler M., Larson S., Agarwal J. Hubble Space Telescope Observations of Main-belt Comet (596) Scheila. – *Astrophys. J.*, 2011, v.733, L4.
13. Betzler A.S., Novaes A. B., Santos A.C.P., Sobral E.G. et al. Cerqueira W. Photometric observation of 596 Scheila, and 23 minor bodies. – *Minor Planet Bulletin*, 2012, v.39, 5 p.
14. Киселев Н.Н., Рахматуллаева Ф.Д., Антонюк А.К., Пить Н. Относительная фотометрия астероида 596 Шейла. – *ДАН РТ*, 2014, т.57, № 11-12, с. 823-828.
15. Neslushan L., Ivanova O., Husarik M., Svoren J., Krisandova Z.S. Dust productivity and impact collision of the asteroid 596 (Scheila). -*Planetary and Space Sci.*, 2016, v.125, p. 37.
16. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.Dzh., et al. Results of Complex Observations of Asteroid (596) Scheila at the Sanglokh International Astronomical Observatory – *Solar System Research*, 2018, v. 52 (6), pp. 511-520.
17. JPL Small-Body Database – Режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov/ssdb.cgi> (дата обращения: 31.08.2017).
18. Veeder G. J., Hanner M. S., Matson D. L., Tedesco, E. F., Lebofsky, L. A., Tokunaga A. T. Radiometry of Near-Earth Asteroids. – *Astron. J.*, 1989, v.97, pp. 1211-1219.
19. Lamy P.L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A. The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei. – *Comets II/Eds. Festou M. C., Keller H. U., Weaver H.A.* – Tucson: Univ. Arizona Press, 2004. pp.223-264.
20. Jewitt D. Introductory report: Physical properties of cometary nuclei. – *Proc. Liege Inst. Astrophys. Colloq.*, v.30, 1992, pp. 85-111.
21. Hartman W.K., Tholen D.J., Cruikshank D.P. The relationship of active comets, extinct comets, and dark asteroids. – *Icarus*, 1987, v.69, pp. 33-50.
22. Binzel R.P., Rivkin A.S., Stuart J.S., Harris A.W., Bus S.J., Burbine T.H. Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes. – *Icarus*, 2004, v.170, pp. 259-294.

23. Dahlgren M., Lagerkvist C.I. A study of Hilda asteroids. I CCD spectroscopy of Hilda asteroids. – *Astron. Astrophys. J.*, 1995, v.302, pp.363-373.
24. Consolmagno G.J., Britt D.T. The density and porosity of meteorites from the Vatican collection. – *Meteoritics and Planetary Sci.*, 1998, v.33, pp.1231-1241.
25. Consolmagno G.J., Britt D.T., Macke R.J. What density and porosity tell us about meteorites? – *LPI Contrib.*, 2008, No.1391, p.1582.
26. Bottke W.F., Morbidelli A., Jedicke R., et al. Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. – *Icarus*, 2002, v.156. (2), pp. 399-433.
27. Weissman P.R., A. Hearn M.F., McFadden L.A., Rickman H. Evolution of comets into asteroids. – *Asteroids II/ Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S.* Tucson: Univ. Arizona Press, 1989, pp. 880-920.
28. Mommert M., Hora J.L., Harris A.W., Reach W.T., et al. The Discovery of Cometary Activity in Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote. – *Astrophys. J.*, 2014, v.781, Id.25, 10 p.
29. Mommert M., Trilling D., Knight M.M., et al. Systematic characterization and monitoring of potentially active asteroid: The case of Don Quixote. – *Americ.Astron.Soc.*, 2018a, DPS.meeting #50, id.505.05.
30. Mommert M., Polishook D., Moskovitz N. (3552) Don Quixote. – 2018b. CBET 4502: 20180329. [<http://www.cbat.eps.harvard.edu/index.html>].
31. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F. Dzh. Evidence of the Cometary Nature of Asteroid Don Quixote Provided by Observations at the Sanglokh Observatory. – *Solar System Research*, Vol. 55, 2021, No.1, pp. 61–70.
32. [https://www.minorplanetcenter.net/db\\_search/show\\_object?object.248370](https://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object.248370), MPS 141787.
33. Fitzsimmons A., Erasmus N., Thirouin A., et al. – *Central Bureau Electronic Telegrams*, 2021, 4995, 1.
34. Kelley M.S. Bolin B.T., Buzzi L., et al. – *Central Bureau Electronic Telegrams*, 2021, 4998, 1
35. Hsieh H.H., Chandler C.O., Denneau L., et al. Physical Characterization of Main-belt Comet (248370) 2005 QN173. – *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, v.922, Issue 1, id.6 L9, 10 p.
36. Chandler C.O., Trujillo C. A., Hsieh H.H. – *Central Bureau Electronic Telegrams* 2021a, 5005 1.
37. Mainzer A. K., Bauer J. M., Cutri R. M., et al. NEOWISE Diameters and Albedos V2.0. – *NASA Planetary Data System*, 2019, [https://sbn.psi.edu/pds/resource/doi/neowise\\_2.0.html](https://sbn.psi.edu/pds/resource/doi/neowise_2.0.html).
38. [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=248370](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=248370).
39. Ivanova O., Skorov Yu., Luk'yanyk I., et al. Activity of (6478) Gault during January 13 – March 28, 2019. – *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRS)*, 2020, v.496, Issue 3, pp. 2636-2647.
40. Chandler C.O., Trujillo C.A., Hsieh H.H. Recurrent Activity from Active Asteroid (248370) 2005 QN173: A Main-belt Comet. – *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, v.922, Issue 1, L8, 10 p.
41. Hsieh H., Yang B., Haghhighipour N. Optical and dynamical characterization of comet-like main-belt asteroid (596) Scheila. – *The Astrophysical Journal*, 2012, v.744, Issue 2, 9 p.
42. Кохи́рова Г.И., Рахматуллаева Ф.Дж., Хусарик М., Иванова А.В., Борисенко С.А. Фотометрические свойства активного астероида 248370 (2005 QN173) по наблюдениям в Словакии и Таджикистане. – *Доклады НАНТ*, 2023, Т.65, №11-12, с.737-747.
43. Snodgrass C., Lowry S.C., Fitzsimmons A. Optical observations of 23 distant Jupiter Family Comets, including 36P/Whipple at multiple phase angles. – *MNRAS*, 2008, v.385, Issue 2, pp. 737-756.
44. Kim Y. Agarwal J., Jewitt D., Mutchler M., et al. Sublimation origin of active asteroid P/2018 P3. – *Astronomy and Astrophysics*, 2022, v.666, A163, 8 p.
45. Чернетенко Ю.А. Причины активности астероида (457175) 2008GO98/362P. – *Астрофизический бюллетень*, 2023, т.78, №1, с.101-106.

46. Knezevic Z., Milani A. Proper element catalogs and asteroid families. – *Astronomy and Astrophysics*, 2009, v.403, pp.1165-1173.
47. Lin Z.-Y., Cheng Y.-L., Vincent J.-B. et al. A study of the physical properties of an active asteroid (6478 Gault). – *Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)*, 2020, v.72, Issue 5, id.79.
48. Ivanova O., Skorov Yu., Luk'yanyk, I. et al. Activity of (6478) Gault during January 13 – March 28, 2019. – *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRS)*, 2020, v.496, Issue 3, pp. 2636-2647.
49. Borysenko S., Baransky A., Simon A. et al. *Astronomische Nachrichten – Broadband photometry of asteroid 6478 Gault: Activity and morphology.* – *Astronomische Nachrichten*, 2020, v.341, Issue 4, pp. 395-401.
50. Chandler C.O., Kueny, J., Gustafsson A. et al. Six Years of Sustained Activity in (6478) Gault. – *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 877(1), L12.
51. Luu J.X., Jewitt D., Mutchler M., Agarwal J. et al. Rotational Mass Shedding from Asteroid (6478) Gault. – *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 910(2), L27.
52. Purdum J., Lin Z.-Y., Bolin B., Sharma K., et al. Time-series and Phase-curve Photometry of the Episodically Active Asteroid (6478) Gault in a Quiescent State Using APO, GROWTH, P200, and ZTF. – *Bulletin of the American Astronomical Society (BAAS)*, 2021, v.53, №7 e-id 2021n7i309p02.
53. Devolege M., Ferrais M., Jehin E. et al. (6478) Gault: physical characterization of an active main-belt asteroid. – *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRS)*, 2021, v.505, Issue 1, pp. 245-258.
54. Кохи́рова Г.И., Рахматуллаева Ф.Дж., Хусарик М., Иванова А.В., Борисенко С.А. Квазисинхронные наблюдения астероида (6478) Gault в Таджикистане и Словакии. – *Доклады НАНТ*, 2021, т.64, № 11-12, с. 666-676.

Г.И.ҚОҲИРОВА, Ф.Ҷ.РАҲМАТУЛЛОЕВА

## **ЯК ЧАНД НАТИЧАҶОИ МУШОҶИДАҶОИ ОПТИКИИ АСТЕРОИДҶОИ ФАЪОЛ ДАР ТОҶИКИСТОН ВА ХОРИҶ АЗ КИШВАР**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти астрофизикаи АМИ Тоҷикистон*

Як чанд чамъи натиҷаҳои омӯзиши астероидҳои фаъолро бо усули мушоҳидаҳои оптикии гуногунранг дар расадхонаи Санглох (Тоҷикистон), расадхонаи астрофизикии Қрим, Академияи илмҳои Русия (Русия), расадхонаи Скалнате-Плесо (Словакия) ва истгоҳи Лесники (Украина) барои солҳои 2011-2023 ба таври шаръ пешниҳод менамоем. Хусусиятҳои динамикӣ ва физикӣ муайян шуда, хусусиятҳои морфологии фаъолият ва механизмҳои имконпазире, ки фаъолиятро муайян мекунанд, дида баромада, дар бораи табиат ва пайдоиши астероидҳои фаъол хулосаҳо бароварда шуданд.

**Калимаҳои калидӣ:** астероид, телескоп, мушоҳидаҳо, астрометрия, фотометрия, мадор, бузургӣ.



G.I.KOKHIROVA, F.D.RAHMATULLAEVA

**SOME RESULTS OF OPTICAL OBSERVATIONS OF ACTIVE ASTEROIDS IN  
TAJIKISTAN AND ABROAD**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
Institute of Astrophysics, NAS of Tajikistan*

We present a survey of the results of a study of active asteroids based on their optical multicolor observations at the Sanglokh Observatory (Tajikistan), the Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences (Russia), the Skalnaté Pleso Observatory (Slovakia) and the Lesniki Station (Ukraine) in 2011-2023. The dynamic and physical properties were determined, the morphological features of the activity were studied, the possible mechanisms that determined the activity were considered, and conclusions were study about the nature and origin of active asteroids.

**Key words:** asteroid, telescope, observations, astrometry, photometry, orbit, magnitude.

**Сведения об авторах:**

**Кохирова Гулчехра Исроиловна** – доктор физико-математических наук, Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, заведующая Отделом межпланетных тел. E-mail: kokhirova2004@mail.ru.

**Рахматуллаева Фируза Джамшедовна** – кандидат физико-математических наук, Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, старший научный сотрудник Отдела межпланетных тел. E-mail: rahmat.firuza@gmail.com.

УДК 523.44, 523.64, 621

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Н.Н.КИСЕЛЕВ

**ПОЛЯМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ  
СИСТЕМЫ В ИНСТИТУТЕ АСТРОФИЗИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ТАДЖИКИСТАНА**

*Институт Астрономии РАН (ИНАСАН),  
Крымская астрофизическая обсерватория РАН*

*Поступила в редакцию 29.04.2024 г.*

*Обсуждаются основные этапы становления и развития поляриметрических исследований малых тел Солнечной системы – комет и астероидов в Институте астрофизики Национальной академии наук Таджикистана с конца 60-х годов прошлого века. Ученые Института астрофизики провели обширные поляриметрические наблюдения за многочисленными кометами и астероидами, в результате которых:*

- впервые открыта отрицательная ветвь поляризации излучения комет в области оппозиции, и определены параметры наиболее полных фазовых зависимостей поляризации комет, доступных для наблюдений с Земли;*
- впервые обнаружены две группы комет, различающихся максимальной степенью поляризации;*
- внесен значительный вклад в международный архив данных по комете Галлея, в рамках выполнения международной программы International Halley Watch (IHW);*
- впервые установлена величина и положение максимальной поляризации излучения астероидов S-типа;*
- активно занимались разработкой и созданием новых фотометров-поляриметров, методологией наблюдений, обработки и анализа апертурной и панорамной поляриметрии и фотометрии.*

*Ученые из Таджикистана внесли фундаментальный вклад в изучение комет, астероидов и других небесных тел.*

**Ключевые слова:** кометы, астероиды, фазовые зависимости поляризации, фотографическая поляриметрия, апертурная поляриметрия, поляриметрические методы, приборы.

## 1. Введение

Открытие электромагнитной волновой природы света Максвеллом дало возможность изучать не только скалярные характеристики света (интенсивность), но и его «векторные» параметры, то есть степень и ориентацию линейной поляризации и степень и направление вращения круговой поляризации. Различные типы рассеивающих свет частиц (например, аэрозоли, кристаллы льда, реголитовые поверхности безатмосферных тел, пылинки комет и околозвездного окружения различного состава и морфологии) проявляют характерные поляризационные свойства в рассеянном свете. Как следствие, поляриметрические наблюдения могут предоставить ценную информацию о природе рассеивающих частиц и физических процессах, которые не могут быть получены из других видов наблюдения. Этим определяется актуальность поляриметрических исследований различных астрофизических объектов, включая малые тела Солнечной системы – кометы и астероиды.

## 2. Поляриметрические исследования малых тел Солнечной системы

**2.1. Поляриметрия комет.** Кометы, наряду с Луной, были первыми небесными телами, у которых было обнаружено, что их излучение линейно поляризовано [1]. За почти 160-летний период изучения комет к 1976 году, было установлено, что поляризация в кометах возникает в результате резонансной флуоресценции молекул и рассеяния солнечного света на частицах пыли [2, 3]. Теоретическая фазовая зависимость поляризации (ФЗП) двухатомных молекул

$$P(\alpha) = P_{90} \sin^2\alpha / (1 + P_{90} \cos^2\alpha), \quad (1)$$

где  $P_{90} = P_{\max} = 7.7\%$ , использовалась для аппроксимации ФЗП пыли, несмотря на полное отсутствие поляризационных наблюдений комет на фазовых углах менее  $40^\circ$ . Таким образом, неявно предполагалось, что ФЗП континуума комет остается положительной на всем диапазоне фазовых углов  $\alpha$ .

Первые поляризационные наблюдения комет в Гиссарской обсерватории Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана были выполнены Р.С.Ошеровым. В августе 1966 г. автор с помощью тройного поляризационного астрографа наблюдал комету C/1966 P1 (Kilston), значение степени поляризации которой, приведенное к фазовому углу  $90$  градусов по формуле (1), оказалось равным  $44\%$  [4]. На этом астрографе Ошеров Р.С. провел наблюдения комет C/1968 N1 (Honda) и C/1969 Y1 (Bennett) [5, 6].

Тройной поляризационный астрограф представлял собой сочетание трех однотипных камер НАФА-6\50 укрепленных к параллактической установке АПШ-40. Перед

---

*Адрес для корреспонденции:* Киселев Николай Николаевич, 119017, Москва, Россия, Институт Астрономии РАН (ИНАСАН), ул. Пятницкая, 48. E-mail: kiselevnn42@gmail.com

объективами камер были установлены 3 поляроида. Тем самым был реализован метод В.Г.Фесенкова [7]. Для определения параметров поляризации  $P$  и  $\theta$  используются интенсивности  $I_0, I_{60}, I_{120}$ , прошедшие через поляроиды, оси пропускания которых ориентированы относительно друг к другу под углами 0, 60 и 120 градусов. Тогда:

$$I = \frac{2}{3} (I_0 + I_{60} + I_{120}),$$

$$Q = \frac{2}{3} (2I_0 - I_{60} - I_{120}), \quad q = \frac{Q}{I} 100 = \frac{2I_0 - I_{60} - I_{120}}{I_0 + I_{60} + I_{120}} 100\%, \quad (2)$$

$$U = \frac{2}{\sqrt{3}} (I_{60} - I_{120}), \quad u = \frac{U}{I} 100 = \sqrt{3} \frac{I_{60} - I_{120}}{I_0 + I_{60} + I_{120}} 100\%,$$

$$P = \sqrt{(q^2 + u^2)}, \quad \operatorname{tg} 2\theta = \frac{U}{Q} = \frac{u}{q} = \sqrt{3} \frac{I_{60} - I_{120}}{2I_0 - I_{60} - I_{120}},$$

$$\theta = 0.5 \operatorname{arctg} \left( \sqrt{3} \frac{I_{60} - I_{120}}{2I_0 - I_{60} - I_{120}} \right) + \Delta\theta_0,$$

где  $I$  – полная интенсивность,  $Q, q$  и  $U, u$  – ненормированные и нормированные параметры Стокса, соответственно, а  $\Delta\theta_0$  – поправка за нуль пункт позиционных углов для перехода от позиционных углов в инструментальной системе к экваториальной системе. Изображения кометы получались синхронно на несенсибилизированных фотопластинках в широком диапазоне длин волн от  $\approx 3200 \text{ \AA}$  до  $\approx 5000 \text{ \AA}$ . Выражения (2) записаны в предположении, что снимки кометы получены в одинаковых атмосферных условиях и на одной воздушной массе кометы.

Этот метод был использован Н.Н.Киселевым на 40-см астрографе Гиссарской обсерватории для получения пространственного распределения параметров поляризации ярких комет C/1968 N1 (Honda) и C/1969 Y1 (Bennett) [8, 9]. Для этого поляроид крепился в фокальной плоскости телескопа перед фотопластинкой. Соответственно, последовательно экспонировались три фотопластинки на позиционных углах 0, 60 и 120 градусов, и проводился учет атмосферной экстинкции и разность воздушных масс.

Метод фотографической поляриметрии позволяет получать распределение степени  $P$  и позиционного угла плоскости поляризации  $\theta$  по комете, но требует тщательной фотометрической калибровки трех фотопластинок и ограничен по проникающей силе из-за низкой чувствительности и малого динамического диапазона линейной области характеристической кривой фотографических эмульсий. Поэтому в Институте астрофизики в дальнейшем развивалась фотоэлектрическая поляриметрия. В 1968 году на 20-см менисковом телескопе АЗТ-7 был установлен электрофотометр АФМ-6 (производство ЛОМО), в составе которого был поляризационный блок. Механическая часть поляриметра была переделана

для использования измерений поляризации по методу В.А.Домбровского [10]. В этом методе оценивались интенсивности объектов, полученные для двух положений поляроида во внутренней оправе на углах  $\varphi$  и  $\varphi+90^\circ$ , в то время как на внешней оправе углы  $\varphi$  менялись от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $20^\circ$ . В результате измерений получалась косинусоида двойного угла (уравнение 3), максимум которой давал степень поляризации  $P$ , а положение максимума определяло угол плоскости поляризации  $\varphi_0$  в инструментальной системе позиционных углов:

$$P \cos 2(\varphi - \varphi_0) = \frac{n_\varphi - n_{\varphi+90}}{n_\varphi + n_{\varphi+90}} \times 100\%, \quad (3)$$

где отсчеты  $n_\varphi, n_{\varphi+90}$  освобождены от фона неба. Впоследствии измерение поляризации проводилось на углах  $\varphi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  и  $180^\circ$ . Метод фотоэлектрической апертурной поляриметрии позволял измерять поляризацию более слабых комет, но интегрально для области кометы, выделяемой выбранной диафрагмой фотометра. До 1974 г на апертурном поляриметре телескопа АЗТ-7 была измерена степень поляризации ярких комет C/1969 T1 (Tago-Sato-Kosaka), C/1969 Y1 (Bennett), и C/1970 N1 (Abe).

С 1974 по 1977 гг. апертурная поляриметрия комет проводилась по методике В.А.Домбровского на 70-см телескопе АЗТ-8.

С 1977 по 1982 гг. наблюдения комет проводились на новом поляриметре 70-см телескопа АЗТ-8, используя метод быстрого вращения поляроида [11]. В общей сложности на 70-см телескопе были получены фазовые зависимости поляризации (ФЗП) комет C/1973 E1 (Kohoutek), C/1974 C1 (Bradfield), 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova, C/1975 N1 (Kobayashi-Berger-Milon), C/1975 V1 (West), 29P/Schwassmann-Wachmann 1, C/1977 R1 (Kohler), 101P/Chernykh, 49P/Arend-Rigaux, 47P/Aschbrook-Jackson, C/1979 (Meier), C/1982 M1 (Austin) в фильтрах В, V [12].

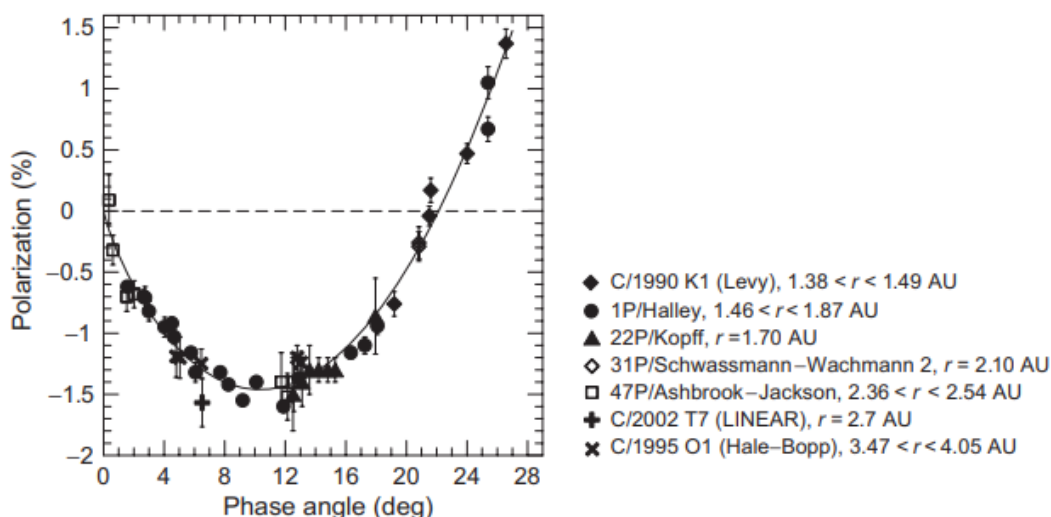
С 1983 по 1992 гг. наблюдения проводились на новом фотометре-поляриметре 1-м телескопа Высокогорной обсерватории Санглок [13]. Конструкция и методика измерений поляризации существенно изменились. Быстрое переключение измерений на углах  $\varphi$  и  $\varphi+90^\circ$  в методе В.А.Домбровского в основном обеспечивало учет атмосферной нестабильности, но получение полного цикла наблюдений (косинусоиды двойного угла по формуле (3)), было не одновременным. К тому же измерения проводились только в пределах углов  $\varphi$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Поэтому на фотометре-поляриметре 1-м телескопа использовалась методика быстрого вращения поляризатора (частота вращения около 33 Гц), обеспечивающая квазиодновременное измерение параметров Стокса  $q$  и  $u$ , и синхронная регистрация накопленных импульсов в памяти компьютера, в соответствии с углами поворота поляризатора. В качестве поляризатора использовалась четвертьволновая фазовая пластинка ( $\lambda/4$ ). С этим прибором был получен большой объем данных по фазовым зависимостям поляризации комет 22P/Kopff, 161P/Hartley-IRAS, 27P/Crommelin, 21P/Giacobini-Zinner, 1P/Halley, C/1987

P1 (Bradfield), C/1988 A1 (Liller), C/1989 X1 (Austin), C/1989 Q1 (Okazaki-Levy-Rudenko), C/1990 K1 (Levy), 4P/Faye, C/1991 T2 (Shoemaker-Levy) [14,15]. Сотрудники Института астрофизики координировали фотометрическую и поляриметрическую части советской программы наблюдений кометы Галлея (СОПРОГ) в 1983—1987 годах. Результаты фотометрических и поляриметрических наблюдений кометы на обсерватории Санглок составили значительный объем международного архива данных по комете Галлея, полученного по международной программе International Halley Watch (IHW). Дополнительно сотрудники Института астрофизики провели наблюдения поляризации комет 67P/Churyumov-Gerasimenko, и 1P/Halley на 1.25-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории и 23P/Brosen-Metcalf на 0.6-м телескопе обсерватории Santa Ana (Тариха, Боливия).

Обзоры результатов первых работ по фотографической поляриметрии и апертурной фотоэлектрической поляриметрии комет в Гиссарской обсерватории Института астрофизики приведены в работах [5, 6, 12, 16].

До 1975 года все приведенные выше кометы наблюдались в основном на больших фазовых углах  $\alpha \geq 40$  градусов. Степень их поляризации была высокой, и изменение степени поляризации с фазовым углом (ФЗП) мало чем отличалось от комет, наблюдававшихся ранее [2, 3]. В то время в литературе, по поляриметрии комет, было принято считать, что измерения поляризации комет следует проводить на больших фазовых углах, когда степень поляризации высокая, к тому же на этих углах кометы ярче, так как находятся вблизи Солнца и Земли.

Однако наблюдения кометы C/1975 V1 (West) Н.Н.Киселевым и Г.П.Черновой [17, 18] показали, что в области оппозиции, на фазовых углах  $\alpha < 20$  градусов ФЗП излучения рассеянного на пылевых частицах кометы морфологически похожа на отрицательную ветвь поляризации (ОВП) астероидов, открытую Лио [19] еще в 1934 году. В последствие в работах Киселева и Черновой [12, 20] было установлено, что отрицательная ветвь поляризации интегрального излучения пыли в атмосферах (комах) комет в области оппозиции является их неотъемлемым свойством, определяемым механизмами рассеяния света и физическими свойствами пылевых частиц (см. рис. 1). Этот эмпирический факт имел огромное значение для понимания свойств кометной пыли, а также механизма рассеяния света пылевыми частицами. Приоритет открытия этого свойства комет сотрудниками Института астрофизики был признан зарубежными исследователями [21].



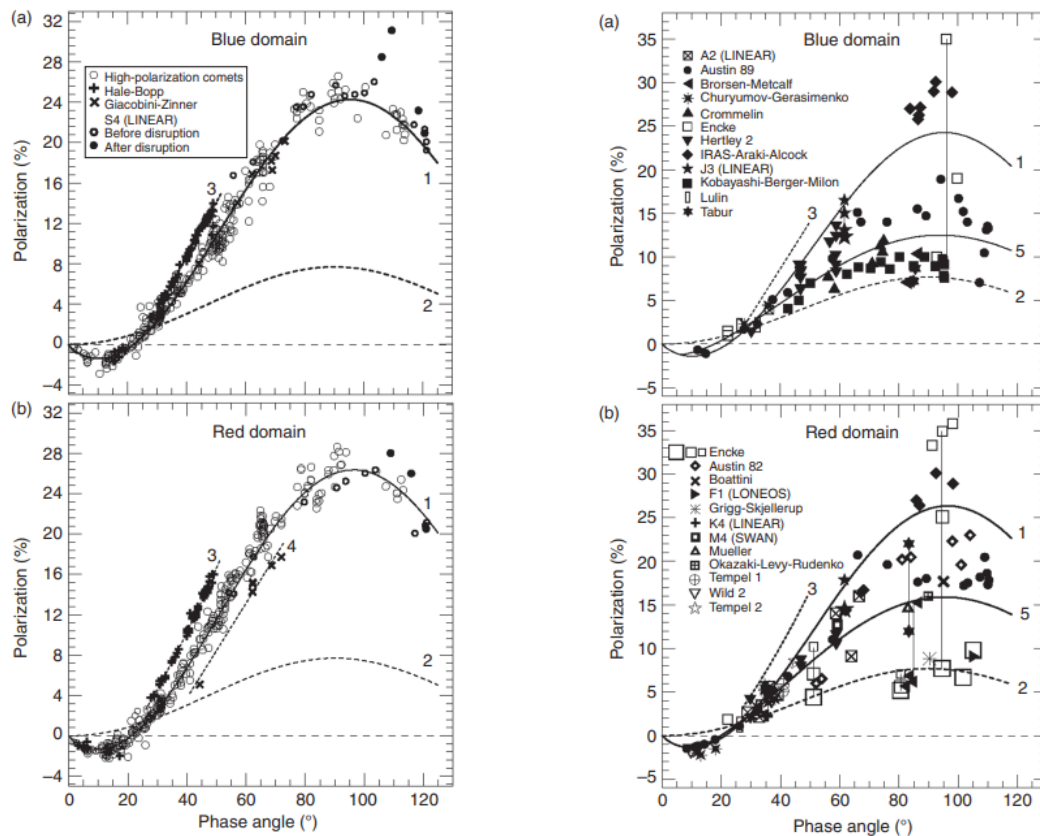
**Рис. 1.** Отрицательная ветвь поляризации ряда комет на разных расстояниях от Солнца [16] и ее аппроксимация тригонометрическим выражением  $P(\alpha) = b(\sin \alpha)^{c1} [\cos(\alpha/2)]^{c2} \sin(\alpha - \alpha_{inv})$  [22].

Первоначально не был понятен механизм возникновения отрицательной поляризации у физически разных тел - безатмосферных объектов Солнечной системы (ASSB) (астероиды и спутники планет) и атмосфер комет. Не была понятной взаимосвязь отрицательной ветви поляризации малых тел Солнечной системы с фотометрическим оппозиционным эффектом (ФОЭ), который был обнаружен у Луны Н. П. Барабашевым [23], у астероидов [24] и спутников планет [25, 26] и позже у комет [20, 27]. Накопление поляриметрических, фотометрических наблюдательных данных и лабораторных измерений стимулировали развитие теоретических исследований механизмов возникновения поляризованного излучения и методов компьютерного моделирования. Принято считать, что доминирующими механизмами, которые определяют характеристики рассеянного излучения (интенсивность и поляризация) на малых фазовых углах, являются: теневой механизм, когерентное обратное рассеяние, эффекты ближнего поля, и анизотропное рассеяние на одиночных частицах. Механизм интерференции многократно рассеянных волн, прошедших один и тот же путь по цепочке частиц в прямом и обратном направлениях, предложенный Ю.Г. Шкуратовым [28, 29], К. Муинонем [30, 31] и М.И. Мищенко [32], является эффективным для формирования ветви отрицательной поляризации для слабо поглощающей или разреженной среды или системы кластеров. Ожидается, что ветвь отрицательной поляризации несимметрична с минимумом, сдвинутым в направлении оппозиции.

Эффекты ближнего поля доминируют в системах частиц или средах заметно поглощающих, с размерами частиц порядка длины волны. Ветвь отрицательной поляризации тоже не симметричная, а с минимумом, сдвинутым в направлении к углу инверсии  $\alpha_{inv}$ , где степень поляризации меняет знак. Вместе эти два механизма дают примерно симметричную ветвь поляризации, если это среда или довольно большая по сравнению с длиной волны система частиц. В каких пропорциях эти

механизмы работают и где у них границы применения - вопрос до сих пор открытый. Таким образом, установление точной формы отрицательной ветви поляризации по наблюдениям комет и ASSB может прояснить эффективность какого-либо механизма возникновения ОВП и выявить физические свойства частиц.

Анализ всех имеющихся поляриметрических наблюдений комет привел авторов работ [12, 33, 34] к заключению о делении комет на две группы – с высоким максимумом степени поляризации  $P_{\max} \approx 25\%$  и с низким максимумом степени поляризации  $P_{\max} \approx 10 - 20\%$  на больших фазовых углах  $\alpha \approx 90$  градусов (рис.2). Так возникла идея классификации комет на основе сходства и различия их поляриметрических характеристик [35, 36].



**Рис. 2.** Левая панель – ФЗП комет с высоким отношением пыль/газ. Правая панель – ФЗП комет с низким отношением пыль/газ. Степень поляризации этих комет более высокая вблизи ядра (маленькие диафрагмы). Штриховая кривая (2) – ФЗП двухатомных молекул. Прямые 3 и 4 показывают особенные ФЗП комет C/1995 01 (Hale- Bopp) и 21P/Giacobini–Zinner.

Поскольку большинство наблюдений комет проводилось с широкополосными фильтрами, которые пропускают излучение континуума и молекулярных полос, то это различие интерпретировалось влиянием более низкой степени поляризации молекулярных эмиссий  $P_{\max} = 7.7\%$ , которая накладывается на поляризацию континуума комет [21, 12, 35]. Прямые доказательства «дилуции» поляризации континуума в результате эффекта “gas



contamination” были получены для, так называемых, газовых комет, у которых наблюдается низкое отношение интенсивностей пыль/газ [35, 37, 38, 39]. Было показано [35], что отношение потока, измеренного в полосе эмиссии  $C_2 \lambda 5140 \text{ \AA}$ , к потоку в соседнем участке континуума, выделяемым фильтром  $\lambda 4845 \text{ \AA}$ , можно использовать в качестве численного параметра, разделяющего кометы на две поляризационные группы.

Следует отметить, что существует и другое объяснение деления комет на два семейства, отличающихся величиной максимальной поляризации. Так, Зубко и др. [40] пришли к заключению, что большой диапазон степени поляризации, наблюдаемый в кометах около максимума поляризации, не может быть объяснен эффектом “gas contamination”, и предположили, что наблюдаемая дисперсия  $P$  на фазовых углах  $\alpha \approx 90$  градусов является результатом различных свойств кометной пыли разных комет, а именно, разным относительным изобилием слабо и сильно поглощающих частиц.

**2.2. Поляриметрия астероидов.** В середине 70-х годов прошлого века в Советском Союзе начали активно развиваться астрофизические методы исследования астероидов. В кооперации с харьковскими (Д.Ф.Лупишко) и крымскими (Н.М.Шаховской, Ю.С.Ефимов) коллегами сотрудники Института астрофизики проводили программу поляриметрических и фотометрических наблюдений астероидов Главного пояса и астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), на 70-см телескопе Гиссарской обсерватории, а позже и на 1-м телескопе Высокогорной обсерватории Санглок. Первым астероидом, поляризация которого была измерена стал (433) Eros, во время его сближения с Землей в 1975г [41 и ссылки там]. Эта программа продолжается до настоящего времени и на Высокогорной обсерватории Санглок, и на 1.25-м и 2.6-м телескопах КрАО (см., например, [42]).

В результате получены данные о поляризации ряда астероидов, которые значительно дополнили Поляриметрический банк астероидных данных (ПБАД) [43], содержащий данные около 130 малых планет. Основные направления исследований направлены на построение полных фазовых зависимостей поляризации и определения параметров ФЗП ( $P_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{inv}$ ,  $h$ ,  $P_{\max}$  и  $\alpha_{\max}$ ) астероидов разных таксономических классов. Одним из результатов стало уточнение численности и свойств астероидов М-класса в рамках интенсивных наблюдений по программе СМЕУ [44,45]. Впервые были определены максимальная степень поляризации астероидов S-типа ( $P_{\max} = 8.5\%$  и  $\alpha_{\max} = 110^\circ$ ) [46]. Для определения альbedo астероидов использовались эмпирические зависимости “поляриметрический наклон  $h$  – альbedo”, “ $P_{\min}$  – альbedo” и “ $P_{\max}$  – альbedo”. Список наблюдавшихся астероидов и их альbedo приведены в табл. 1, где указаны названия астероида, диапазон фазовых углов, параметры фазовых зависимостей поляризации ( $P_{\min}$ ,  $h$ ,  $P_{\max}$ ), альbedo  $\rho$  и таксономический класс.

Таблица 1

## Обстоятельства поляриметрических наблюдений и физические характеристики АСЗ

АСЗ	$\alpha$ , град	$P_{\min}$ ,%	$h$ , %/град	$P_{\max}$ ,%	$\rho$	Класс
433 Эрос	8.7–44.3	–0.60	0.09			S
1685 Торо	47.0–106.3		0.099	8.5	0.142	S
1036 Ганимед	9.7–37.7	–0.82	0.124		0.156	S
1627 Ивар	34.4–64.1		0.13		0.14	S
1566 Икар	31.4–57.7		0.085			?

Созданные в Институте астрофизики приборы и разработанные методы поляриметрических исследований малых тел Солнечной системы активно применялись для наблюдений других небесных объектов – звезд Ae – Хербига, Т Тельца, Новых и других переменных звезд.

**Выводы**

Показано, что сотрудники Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, начиная с конца 60-х годов прошлого века, внесли весомый фундаментальный вклад в изучение комет, астероидов, в создание приборов и методов поляриметрических исследований.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Arago F. – *Astronomie Populaire*, 1854–1857, 1–4, Gide et Baudry, Paris.
2. Öhman Y. – *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 1939, 99, pp.624-634.
3. Öhman Y. – *Stockholms Observatoriums Annaler*, 1941, 13, pp.1-20.
4. Ошеров Р.С. – Докл. АН Тадж.ССР. 1967, 10, с. 9-12.
5. Ошеров Р.С. Фотометрия комет в естественном и поляризованном свете. Дис... канд. физ.- мат. наук – Душанбе, 1971, 172 с.
6. Ошеров Р.С. – *Кометы и метеоры* 1976, № 25, с. 44-52.
7. Fessenkoff B. – *Astron. J.* 1935, 12 (4), pp.309–323.
8. Киселев Н.Н. – *Кометы и метеоры* 1970, № 19, с.14-16.
9. Киселев Н.Н. – *Кометы и метеоры* 1973, № 22, с.8-12.
10. Домбровский В.А. – *АЖ*, 1953, 30, 60.
11. Киселев Н.Н., Дуднев В.А., Чернова Г.П., Нарижная Н.В. – *Бюлл. Ин-та астроф. АН Тадж.ССР*. 1987, № 77, с.29-36.
12. Киселев Н.Н. Поляриметрические и фотометрические исследования комет. Дис... канд. физ.- мат. наук – Душанбе, 1981, 239 с.
13. Каюмов В.В., Киселев Н.Н., Пушнин П.А., и др. – *Бюлл. Ин-та астроф. АН Тадж.ССР*. 1989, № 78, с.10-16.
14. Chernova G.P., Kiselev, N.N., Jockers K. – *Icarus*, 1993, 103, pp.144-158.
15. Chernova G.P., Ahmedzhyanov M., Kiselev N.N. – *Planet. Space Sci.* 1994, 42, pp.623-625.
16. Mishchenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N., et al. 2010. Polarimetric remote sensing of solar system objects. – *Kyiv. Akademperiodyka*. 291 p.
17. Киселев Н.Н., Чернова Г.П. – *Астрон. Циркуляр*, 1976, № 931, с.5-7.
18. Киселев Н.Н., Чернова Г.П. – *Астрон. журн.* 1978, 55, № 5, с.1064-1071.

19. Lyot B. Polarisation des petites planets. – C.R. Acad. Sci. Paris, 1934, 199, pp.774-782.
20. Kiselev N.N., Chernova G.P. – Icarus, 1981, 48, pp.473-481.
21. Myers R.V., Nordsieck K.H. – Icarus, 1984, 58, pp.431-439.
22. Lumme K., Muinonen K. – Asteroids, Comets, Meteors, 1993, IAU Symp., 160, 194.
23. Barabashev N.P. – Astron Nachr., 1922, 217, 445.
24. Gehrels T. – Astrophys. J.1956, 123, 331.
25. Domingue D.L., Hapke B.W., Lockwood G.W., Thompson. – Icarus, 1991, 90, 30
26. Thompson D.T., Lockwood G.W. – Journ. Geophys. Research. 1992, 97, 1476
27. Millis R. L., A’Hearn M.F., Thompson D.T. – AJ, 1982, 87, 1310
28. Шкуратов Ю.Г. – Астрон. циркуляр, 1985, № 1400, с.3-6.
29. Шкуратов Ю.Г. – Астрон. вестн., 1991, 25, № 2, с.152-161.
30. Muinonen K. – 1990. Ph. D. Thesis. Helsinki. Univer. Helsinki.
31. Muinonen K. – Waves Random Media, 2004, 14, pp. 365-388.
32. Mishchenko, M.I. – The Astrophysical Journal, 1993, 411, pp.351-361.
33. Dobrovolsky O.V., Kiselev N.N., Chernova G.P. Earth, Moon, and Planets. 1986, 34, pp.189–200.
34. Kiselev N., Rosenbush V., Levasseur-Regourd A.-Ch., Kolokolova L. 2015. Comets. In *Polarimetry of Stars and Planetary Systems* – Cambridge University Press, Cambridge, pp. 379–404.
35. Киселев Н.Н. Рассеяние света на пылевых частицах комет, астероидов и околозвездных оболочек: наблюдения и интерпретация. Дис... д. физ.-мат. наук. – Харьков. 2003, 276 с .
36. Kolokolova L., Kimura H., Kiselev N., Rosenbush V. – Astron. and Astrophys. 2007, 463, pp.1189-1196.
37. Kiselev N.N., Jockers K., Bonev T. – Icarus. 2004, 168, pp.385–391.
38. Jockers K., Kiselev N., Bonev T., et al. – Astron. and Astrophys. 2005, 441, pp.773–782.
39. Kiselev N.N., Rosenbush V.K., Afanasiev V.L., et al. – Earth, Planets and Space. 2013, 65, pp.1151-1157.
40. Zubko E., Videen G., Hines D., and Shkuratov G. – Planet and Space Sci., 2016, 123, 63.
41. Киселев Н.Н., Нарижная Н.В. – Астрон. вестник, 1980, 14, с.61–63.
42. Абдуллоев С.Х., Киселев Н.Н., Шамсиддинов Ш.Ш. – Астрон. вестник, 2021, 55, с.1–5.
43. Lupishko D. (Ed.). – 2019. Asteroid Polarimetric Database V10.0. EAR-A-3-RDR-APD-POLARIM-ENTRY-V10.0. NASA Planetary Data System.
44. Бельская И.Н., Киселев Н.Н., Лупишко Д.Ф., Чернова Г.П. – Кинематика и физика неб. тел, 1987, 3, с. 19-21.
45. Бельская И.Н., Киселев Н.Н., Лупишко Д.Ф., Чернова Г.П. – Кинематика и физика неб. тел, 1991, 7, с.11-14.
46. Киселев Н.Н., Лупишко Д.Ф., Чернова Г.П., Шкуратов Ю.Г. – Кинематика и физика небес. тел, 1990, 6, с.77–82.

Н.Н.КИСЕЛЁВ

**ТАҲҲИҚОТҲОИ ПОЛЯРИМЕТРИИ ЧИРМҲОИ ХУРДИ СИСТЕМАИ  
ОФТОБӢ ДАР ИНСТИТУТИ АСТРОФИЗИКАИ АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ  
ИЛМҲОИ ТОҶИКИСТОН**

*Институти астрономияи Академияи илмҳои Россия (ИНАСАН),  
Расадхонаи астрофизикии Қрими Академияи илмҳои Россия*

Марҳилаҳои асосии тадқиқотҳои ташаккулёбии ва рушди таҳқиқотҳои поляриметрии чирмҳои хурди системаи Офтобӣ -кометаҳо ва астероидҳо, ки солҳои 60-уми асри гузашта дар Институти астрофизикаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон (ИА АМИТ) гузаронида шудаанд, муҳокишо гардиданд. Дар ин раванд, олимони ИА АМИТ лимони Институти астрофизика мушоҳидаҳои васеи поляриметрии кометаҳо ва астероидҳои сершуморро гузаронидаанд, ки дар натиҷа:

- бори аввал шоҳаи манфии поляризатсияи шуоъҳои думдор дар минтақаи муҳолиф кашф ва параметрҳои вобастагии фазаҳои мукаммали поляризатсияи кометаҳо, ки баърои мушоҳидаҳо аз Замин дастрасанд, муайян карда шуданд;
- бори аввал ду гурӯҳи кометаҳо кашф карда шуданд, ки аз ҷиҳати дараҷаи максималии поляризатсия фарқ мекунанд;
- дар доираи барномаи байналмиллалӣ International Halley Watch (IHW) дар бойгонии байналмиллалӣ маълумот дар бораи кометаи Ҳаллей саҳми назаррас гузошт;
- бори аввал миқдор ва мавқеи поляризатсияи максималии шуоъ аз астероидҳои типии S муқаррар карда шуд;
- дар бунёди фотометр-поляриметрҳои нав, методологияи мушоҳида, коркард ва таҳлили поляриметрия ва фотометрия саҳм гузоштанд.

Олимони Тоҷикистон дар тадқиқоти кометаҳо, астероидҳо ва дигар чирмҳои осмонӣ саҳми бунедӣ.

**Калимаҳои калидӣ:** кометаҳо, астероидҳо, вобастагии фазавии поляризатсия, поляриметрияи фототрафӣ, поляриметрияи диафрагма, усулҳои поляриметрии, асбобҳо.

N.N.KISELEV

**POLARIMETRIC STUDIES OF SMALL BODIES OF THE SOLAR SYSTEM  
AT THE INSTITUTE OF ASTROPHYSICS OF THE NATIONAL ACADEMY  
OF SCIENCES OF TAJIKISTAN**

*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,  
Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences*

The main stages in the formation and development of polarimetric studies of small bodies of the Solar System – comets and asteroids at the Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan since the late 60s of the last century are discussed. Scientists of the Institute of Astrophysics conducted extensive polarimetric observations of numerous comets and asteroids, resulting in:

- the negative branch of polarization of comet radiation in the opposition region were discovered for the first time. The parameters of the most complete phase dependences of comet polarization, available for observations from the Earth, were determined;
- for the first time, two groups of comets were discovered, differing in the maximum degree of polarization;
- made a significant contribution to the international data archive on Halley's Comet, as part of the International Halley Watch (IHW) program;
- for the first time, the magnitude and position of the maximum polarization of radiation from S-type asteroids was established;
- actively engaged in the development and creation of new photometers-polarimeters, observation methodology, processing and analysis of aperture and panoramic polarimetry and photometry.

Scientists from Tajikistan have made fundamental contributions to the study of comets, asteroids and other celestial bodies.

**Key words:** comets, asteroids, phase dependences of polarization, photographic polarimetry, aperture polarimetry, polarimetric methods, instruments.

**Сведения об авторах:**

**Киселев Николай Николаевич** – доктор физико-математических наук, Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Крымская астрофизическая обсерватория РАН, зав. лабораторией малых тел Солнечной системы КрАО. E-mail: kiselevnn42@gmail.com

УДК 523.44, 523.64, 621

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

А.В.ДЕВЯТКИН, Д.Л.ГОРШАНОВ, С.Н.ПЕТРОВА, А.А.МАРТИЮШЕВА  
**НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДОВ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ КОРОТКИМИ  
ПЕРИОДАМИ ОСЕВОГО ВРАЩЕНИЯ**

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН*

*Поступила в редакцию 29.04.2024 г.*

*На телескопах ГАО РАН в 2023 г. были проведены астрометрические и фотометрические наблюдения двух астероидов 2023 BU и 2023 DZ2. По данным кривых блеска определены периоды их осевого вращения, которые равны 1.30 минуты для 2023 BU и 6.28 минуты для 2023 DZ2.*

**Ключевые слова:** астероиды, быстрое осевое вращение.

**Введение**

По результатам определения периодов осевого вращения [1] более 8300 астероидов около двадцати из них имеют экстремально короткие периоды. В 2023 г. на двух автоматизированных телескопах Пулковской обсерватории ЗА-320М[2] и МТМ-500М[3] были проведены астрометрические и фотометрические наблюдения двух астероидов 2023 BU и 2023 DZ2, которые имеют экстремальные короткие периоды осевого вращения.

Астероид 2023 BU был открыт 21 января 2023 года российским ученым Г.В.Борисовым в поселке Научный (Крым) за несколько дней до его тесного сближения с Землей [4]. Этот астероид не является потенциально опасным, т.к. имеет диаметр около 6 метров. Однако, он прошел на рекордно близком расстоянии около 3600 км от поверхности Земли.

Астероид 2023 DZ2 был открыт 27 февраля 2023 г. в рамках проекта EURONEAR [5]. Принадлежит группе Аполлонов и до 21 марта 2023 г. состоял в списке объектов, имеющих повышенную вероятность столкновения с Землей [6]. 25 марта 2023 г. астероид прошёл на расстоянии около 175000 км от Земли и около 518000 км от Луны [7].

Изучение таких немногочисленных объектов в Солнечной системе позволяет понять природу их возникновения.

---

*Адрес для корреспонденции:* Девяткин Александр Вячеславович Российская федерация, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН. E-mail: a9kin@mail.ru.

В результате данного исследования были построены кривые блеска астероидов и уточнены значения периодов их осевого вращения.

### Наблюдения и их обработка

Астероид 2023 BU наблюдался на Горной астрономической станции ГАО РАН с 25 января по 28 января 2023 года на телескопе МТМ-500М. Было получено более 1500 наблюдений астрометрических и фотометрических наблюдений в интегральной полосе телескопа. Обработка наблюдений была выполнена с использованием помощью программного пакета АПЕКС-II [8], разработанного в Пулковской обсерватории. Отправленные в MPC наблюдения составляют 83% всех мировых наблюдений этого астероида. По результатам всех наблюдений в MPC была уточнена орбита астероида.

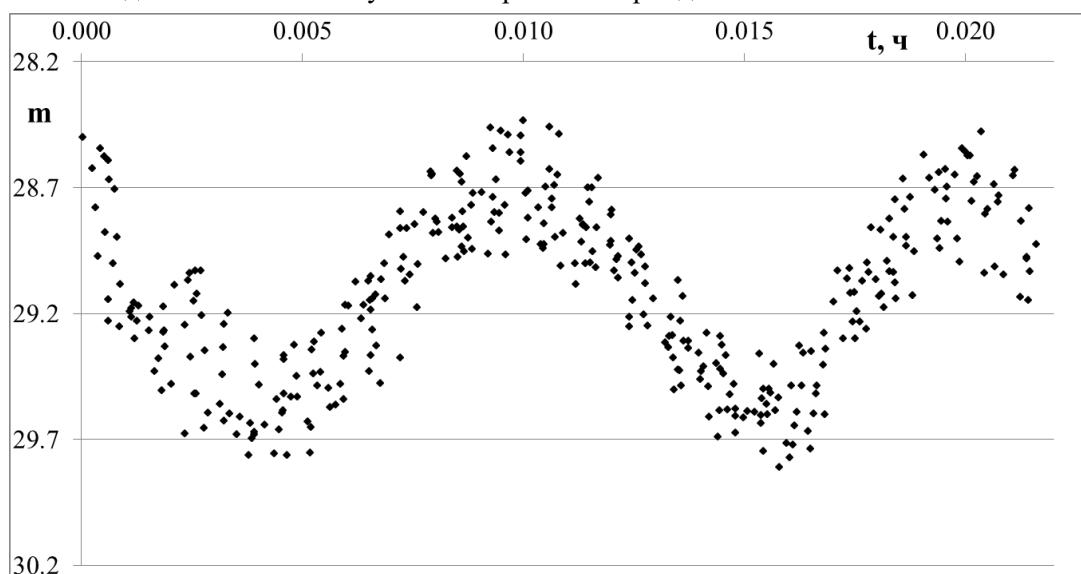
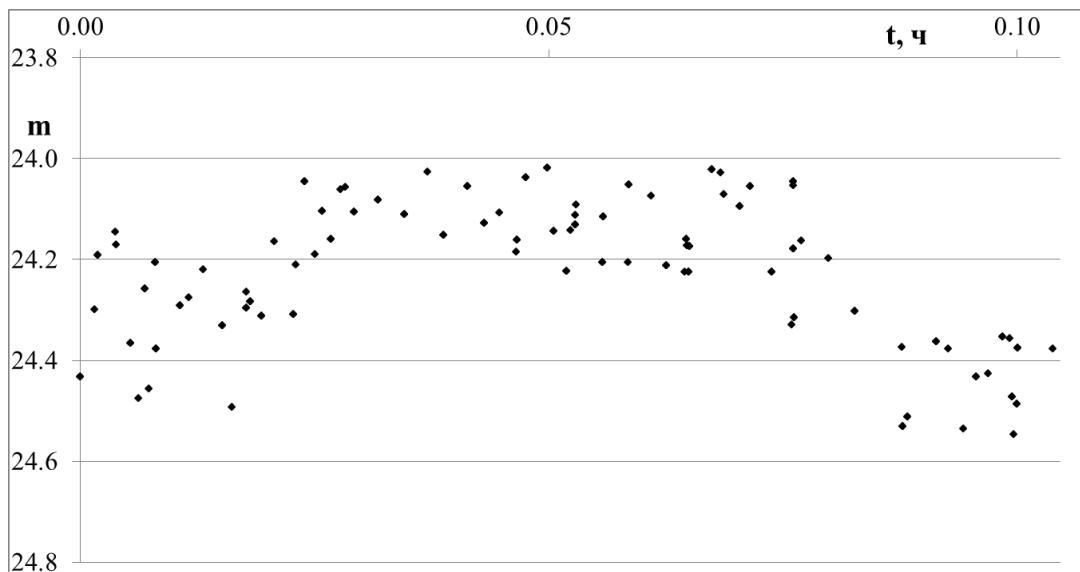


Рис. 1. Кривая блеска астероида 2023 BU.

На рис.1 представлена кривая блеска астероида 2023 BU после всех редукиций. Были использованы наблюдательные данные, полученные 26 января 2023 г. на телескопе МТМ-500М. Метод Скаргла [9] был применен для уточнения периода осевого вращения астероида 2023 BU, который составляет  $0.0216 \pm 0.0005$  ч. (то есть около 1.30 мин).

Наблюдения астероида 2023 DZ2 были произведены на телескопе ЗА-320М в Пулковско 23 марта 2023г. Фотометрическая обработка полученных данных также была выполнена с помощью АПЕКС-II. На рис. 2 представлена кривая блеска астероида 2023 DZ2 после всех редукиций. Для построения использованы наблюдательные данные, полученные 23 марта 2023 г. на телескопе ЗА-320М. Определённый методом Скаргла [9] период осевого вращения астероида составляет  $0.1046 \pm 0.0015$  ч. (около 6.28 мин.).



**Рис. 2.** Кривая блеска астероида 2023 DZ2.

### Заключение

На основе полученных фотометрических наблюдений в интегральной полосе астероидов 2023 BU и 2023 DZ2 на автоматизированных телескопах ГАО РАН определены периоды их осевого вращения, которые равны 1.30 минуты для 2023 BU и 6.28 минуты для 2023 DZ2. Наши результаты позволили увеличить количество астероидов, имеющих короткие периоды осевого вращения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. [https://alcddef.org/php/alcddef\\_aboutLightcurves.html](https://alcddef.org/php/alcddef_aboutLightcurves.html)
2. Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С. (2004) Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320. II. - Изв. ГАО, 2004, № 217, с. 505-530.
3. Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б. Ибрагимов Ф.М, Куприянов В.В., Верещагина И.А., Шумахер А.В. (2009) Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М. - Изв. ГАО, 2009. № 219. Вып. 1, с. 192-218.
4. [https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons\\_batch.cgi?batch=1&COMMAND=%272023+BU%27&START\\_TIME=%272023-01-26%2021:17%27&STOP\\_TIME=%272023-01-27%27&STEP\\_SIZE=%271%20day%27&QUANTITIES=%2719,20,22,39%27](https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons_batch.cgi?batch=1&COMMAND=%272023+BU%27&START_TIME=%272023-01-26%2021:17%27&STOP_TIME=%272023-01-27%27&STEP_SIZE=%271%20day%27&QUANTITIES=%2719,20,22,39%27)
5. <https://minorplanetcenter.net/mpec/K23/K23F12.html>
6. <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/removed.html>
7. [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=2023%20DZ2&view=OPC](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=2023%20DZ2&view=OPC)
8. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений. - *Астрономический вестник*, 2010, том 44, №1, с. 74-87.
9. Scargle J. D. "Studies in Astronomical Time Series Analysis. II. Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data", *Astrophysical Journal*, 263, pp. 835–853, 1982



А.В.ДЕВЯТКИН, Д.Л.ГОРШАНОВ, С.Н.ПЕТРОВА, А.А.МАРТИЮШЕВА  
**МУШОҲИДАҲОИ АСТЕРОИДҲО БО ДАВРАҲОИ ХЕЛЕ КЎТОҲИ  
ГАРДИШИ МЕҲВАР**

*Саррасадхонаи астрономии (Пулковои) Академияи илмҳои Россия*

Соли 2023 бо истифода аз телескопҳои Саррасадхонаи астрономии (Пулковои) Академияи илмҳои Россия мушоҳидаҳои астрометрӣ ва фотометрии ду астероид 2023 BU ва 2023 DZ2 гузаронида шуданд. Дар асоси маълумоти хатои қачи рӯшноӣ, давраҳои гардиши меҳвари онҳо муайян карда шуданд, ки ба 1.30 дақиқа барои 2023 BU ва 6.28 дақиқа барои 2023 DZ2 баробар ҳастанд.

**Калимаҳои калидӣ:** астероидҳо, гардиши босуръати меҳвар.

A.V.DEVYATKIN, D.L.GORSHANOV, S.N.PETROVA, A.A.MARTYUSHEVA  
**OBSERVATIONS OF ASTEROIDS WITH EXTREMELY SHORT PERIODS  
OF AXIAL ROTATION**

*The Central (Pulkovo) Astronomical Observatory of RAS*

Astrometric and photometric observations of two asteroids, 2023 BU and 2023 DZ2, were carried out using telescopes of CAO RAS in 2023. Based on the light curve data, the periods of their axial rotation were determined, which are equal to 1.30 minutes for 2023 BU and 6.28 minutes for 2023 DZ2.

**Key words:** asteroids, rapid axial rotation

**Сведения об авторах:**

**Девяткин Александр Вячеславович** – доктор физико-математических наук, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, зав. лабораторией. E-mail: a9kin@mail.ru.;

**Горшанов Денис Леонидович** – кандидат физико-математических наук, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, старший научный сотрудник. E-mail: dengorsh@mail.ru.;

**Петрова Светлана Николаевна** – Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, научный сотрудник. E-mail: stalkered@yandex.ru.;

**Мартюшева Александра Андреевна** – E-mail: alex.mart13@gmail.ru

УДК 536.6: 52–17

Специальность: 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Г.О.РЯБОВА

## АНАЛИЗ РЕЗОНАНСОВ СРЕДНИХ ДВИЖЕНИЙ В МЕТЕОРОИДНОМ ПОТОКЕ ГЕМИНИД НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Институт прикладной математики и механики*

*Томского государственного университета*

*Поступила в редакцию 26.04.2024 г.*

*При анализе численных моделей метеороидного потока Геминид было обнаружено восемь орбитальных резонансов: 1:2, 2:5, 3:7, 3:8 и 4:9 с Венерой, 2:3 и 5:7 с Землёй и 7:1 с Юпитером. Оказалось, что резонансные «струи» в потоках стабильны и компактны и состоят из больших (0.003 – 0.3 з) частиц, остающихся в резонансе до 2 тысяч лет. Однако количество захваченных в резонанс частиц невелико, не более 0.1%, что вряд ли приведёт к существенному увеличению пространственной плотности вещества.*

**Ключевые слова:** метеор, метеороид, метеороидный поток Геминид, астероид (3200) Phaethon, орбитальный резонанс, математическая модель.

### Введение

Известно, что орбитальные резонансы (резонансы средних движений) могут, как рассеивать частицы, образуя щели в потоке, так и концентрировать их, образуя рои или струи (trails). Рои или струи проявляют себя при наблюдениях как всплеск активности или даже метеорный шторм. С практической точки зрения концентрация метеороидов в пространстве может представлять опасность для КА. С другой стороны, резонансные рои/струи имеют вполне определённые орбитальные параметры, если известно какой именно резонанс породил их. Поэтому их наблюдения можно использовать для усовершенствования физической теории метеоров. Цель настоящей работы состоит в исследовании орбитального пространства метеороидного потока Геминид в поисках именно струй (роёв). С этой целью построены и проанализированы две динамические модели. Одна из них представляет поток кометного происхождения. Вторая — его малую компоненту, образованную повторяющимися перигелийными выбросами вещества из астероида (3200) Фаэтон, открытые с помощью космической обсерватории STEREO в 2009 году.

*Адрес для корреспонденции:* Рябова Галина Олеговна, г. Томск, Россия НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, E-mail: galina.ryabova@mail.tsu.ru

Введём некоторые обозначения, используемые далее в разделе, а именно Кеплеровы элементы ( $a, e, i, \Omega, \omega, M$ ) — суть большая полуось, эксцентриситет, наклон, долгота восходящего узла, аргумент перигелия и средняя аномалия. Долгота перигелия есть  $\varpi = \omega + \Omega$ . Средняя долгота есть  $\lambda = M + \varpi$ , а  $n$  есть среднее движение.

### Численное моделирование

Метод численного моделирования метеороидных потоков хорошо известен, и кратко его можно описать следующим образом. Для каждой пробной частицы мы (1) выбираем точку выброса на орбите родительского тела, (2) находим его вектор скорости выброса с помощью генератора псевдослучайных чисел, (3) вычисляем орбиту частицы и (4) вычисляем эволюцию орбиты. Детальное описание метода можно найти в работе [1].

В нашей модели точки выброса были распределены по истинной аномалии вокруг опорной орбиты пропорционально  $r^{-4}$ , где  $r$  — гелиоцентрическое расстояние. Векторы скорости выброса были равномерно распределены в освещенном солнцем полушарии ядра, и скорость выброса была рассчитана по формуле Уиппла [2].

Возраст потока оценивался примерно в 2000 лет [3], то есть около 1400 оборотов астероида (3200) Фазтон. Орбита Фазтона, проинтегрированная до момента JD1720165.2248 (прохождение перигелия), использовалась в качестве опорной. Предполагалось, что поток генерировался за один оборот.

Для данного исследования мы использовали 5 масс метеороидов:  $m_1 = 3 \times 10^{-1}$  г,  $m_2 = 2 \times 10^{-2}$  г,  $m_3 = 3 \times 10^{-3}$  г,  $m_4 = 3 \times 10^{-4}$  г и  $m_5 = 3 \times 10^{-5}$  г. Мы интегрировали 60 000 частиц (сферических с плотностью 1 г/см<sup>3</sup>) каждой массы. Конечная эпоха для модели была принята JD 2453363.5 = 24 декабря 2004 г. Учитывались гравитационные возмущения от всех планет, Луны и Плутона, а также световое давление и эффект Пойнтинга–Робертсона вместе с его корпускулярной частью.

Эта модель предполагает кометное происхождение потока, поскольку наблюдаемая структура потока Геминид с ней согласуется [1, 4].

### Поиск резонансных зон

Для обнаружения возможных резонансных зон в области движения потока использовался код SUPERATLASV2, разработанный Галлардо [5–6] и доступный по адресу <http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/atlas/>. Код основан на полуаналитической модели, которая, в свою очередь, основана на численной оценке резонансной возмущающей функции. Он пригоден для орбит с произвольными эксцентриситетами и наклонениями, что очень важно для потока Геминид, имеющего большой эксцентриситет (около 0.9). Помимо других важных параметров (положение, ширина, период либрации, центры либрации) метод Галлардо оценивает силу резонанса (SR). Галлардо [7] отмечает, что значения SR являются точными и они одни и те же для всех резонансных аргументов.

Код обнаружил 75 резонансов низкого порядка и для дальнейшего анализа мы выбрали 24 резонанса с шириной  $\geq 0.002$  а.е. и  $SR > 1 \times 10^{-11}$ .

Критический угол (или резонансный аргумент) запишем в нотации Галлардо [6]

$$\sigma = k\lambda - k_p\lambda_p + k_1\varpi + k_2\varpi_p + k_3\Omega + k_4\Omega_p. \quad (1)$$

Здесь резонанс среднего движения  $k_p : k$  означает соизмеримость  $k_p n_p \approx kn$ , где  $k_p$  и  $k$  — положительные целые числа, не имеющие общих делителей. Индекс «р» относится к планете. Коэффициенты  $k_1, \dots, k_4$  должны удовлетворять следующим условиям, проистекающим из правила Даламбера

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = k_p - k,$$

$$|k_3 + k_4| = 0, 2, 4, \dots$$

Таким образом, уравнение (1) определяет набор резонансных аргументов. Как отмечает Галлардо [7], для орбит с небольшими наклонами и эксцентриситетами лучше использовать критический аргумент, который далее мы будем называть *главным*

$$\sigma = k\lambda - k_p \lambda_p + (k - k_p)\varpi.$$

Поток Геминид имеет высокоэксцентричные орбиты, поэтому, казалось бы, мы не можем ограничиться главным аргументом. С другой стороны, временной интервал, который мы анализируем (2 тысячи лет), очень мал по сравнению с периодом аргумента перигелия и долготы восходящего узла (около 40 тысяч лет), поэтому последние четыре члена в (1) можно рассматривать как постоянные. Вот почему, кроме одного особого случая, а именно резонанса 7:1 с Юпитером, мы анализируем только главный аргумент.

Прежде, чем анализировать  $\sigma$ , разумно и практично сделать предварительный отбор орбит, проверяя близость большой полуоси к номинальному значению точного резонанса. Расстояние от «точного» значения резонанса  $\tau$  можно определить как

$$\tau = k_p n_p - kn.$$

Слово «точное» взято в кавычки, ибо равенство  $\tau = 0$  даёт только приблизительное положение резонанса. Точный резонанс определяется как  $\dot{\sigma} = 0$ , но мы используем  $\tau$  только для предварительного отбора. В русской литературе этот параметр обычно называют «резонансная щель».

В конечном итоге мы нашли некоторое количество частиц в восьми возможных орбитальных резонансах. В табл. 1 представлена сводка по численности резонансных метеороидов.

Таблица 1

Число резонансных метеороидов на 10 000 модельных метеороидов

Резонанс	Масса метеороида		
	$m_1$	$m_2$	$m_3$
V1:2	3	89	54
V2:5	125	6	—
V3:7	29	—	—
V3:8	13	—	—
V4:9	25	—	—
E2:3	6	—	—
E5:7	3	—	—
J7:1	4	2	—

## Резонансы с Венерой

Начнём с резонанса V1:2. Мы нашли 530 резонансных частиц  $m_2$ , 325 частиц  $m_3$  и несколько частиц  $m_1$ . Рассмотрим самую многочисленную  $m_2$ -группу. На рис. 1 показано типичное поведение резонансной  $m_2$ -частицы. Её главный резонансный аргумент  $\sigma$  явно либрирует, подтверждая присутствие венерианского резонанса 1:2. Расстояние  $\tau$  также либрирует в пределах  $\pm 7''$ /сутки, оставаясь в очень узком интервале. Большая полуось находится в пределах 0.002 а.е. Большинство частиц ведёт себя именно так. Назовём их частицами типа А. Эти частицы изначально выбрасывались на резонансные орбиты. Некоторые частицы (около 7%) ведут себя немного иначе (рис. 1b): они входят в зону резонанса в течение первых 500–550 лет, большая их полуось остается в пределах ширины резонанса, но амплитуда либрации  $\tau$  примерно вдвое выше. Назовем их частицами типа В. Эти частицы были захвачены в резонанс.

Метеороиды  $m_3$  ведут себя аналогично. Интересно, что они присутствуют только в одном из восьми резонансов. Все они принадлежат типу В.

Резонанс V2:5 выглядит так же плотно населённым, как и V1:2, только, в основном, частицами  $m_1$ . Здесь частицы типа В составляют 20%. Частица, показанная на рис. 2а, держится в резонансной зоне ( $\Delta a < 0.001$  а.е.). Её либрации в  $\sigma$  нерегулярны, что типично для частиц типа А, находящихся в резонансе V2:5. Интересно, что частицы типа В, напротив, имеют регулярные либрации в  $\sigma$ , но с большими амплитудами (до  $160^\circ$ ).

Резонансы V3:7, V3:8 и V4:9 заполнены частицами типа В, которые после захвата остаются в пределах ширины резонансной зоны. Для частицы, показанной на рис. 2b  $\Delta a < 0.001$  а.е., для частицы на рис. 2c  $\Delta a < 0.002$  а.е., и  $\Delta a < 0.001$  а.е. для частицы на рис. 2d.

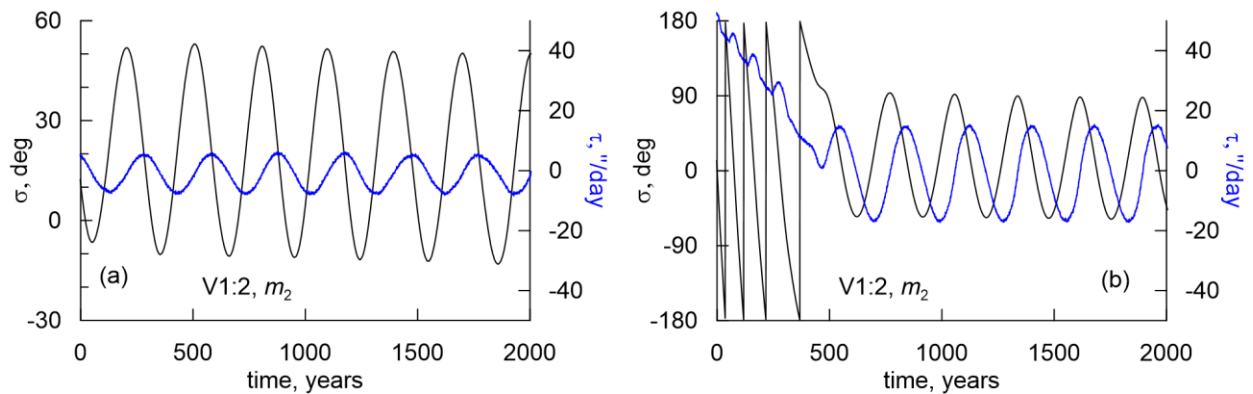
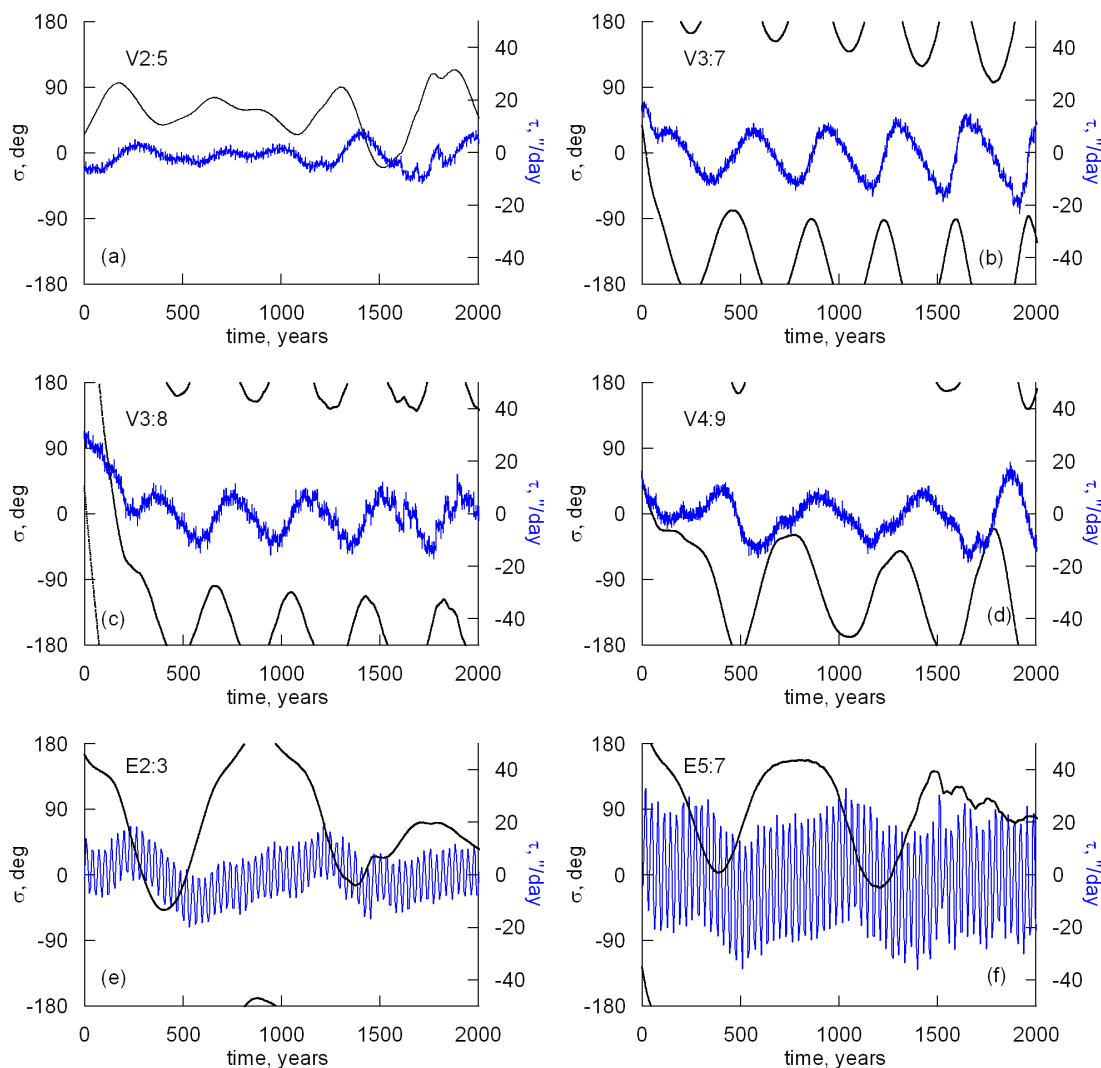


Рис. 1. Резонанс 1:2 с Венерой.

На рисунке показаны главный аргумент  $\sigma$  (чёрным цветом) и расстояние  $\tau$  (синим цветом) для двух тестовых частиц: (а) частицы типа А и (б) частицы типа В. Масса частиц  $m_2$ . Цветные рисунки доступны в электронной версии статьи.



**Рис. 2.** Различные резонансы частиц массы  $m_1$  с Венерой и Землёй.

Эволюция главного аргумента  $\sigma$  (чёрным цветом) и расстояния  $\tau$  (синим цветом).

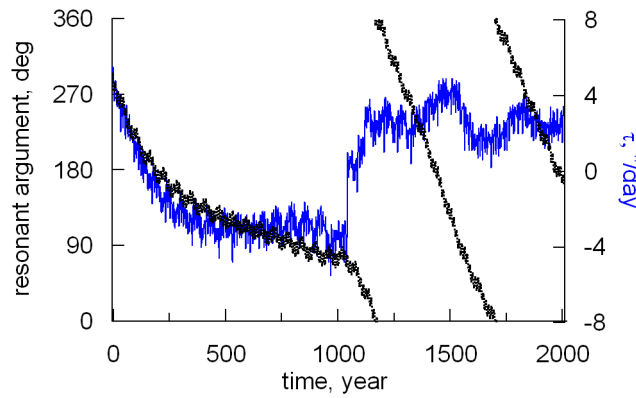
### Резонансы с Землёй

Мы обнаружили очень небольшое количество частиц, захваченных в резонансы E2:3 и E5:7. В обоих случаях либрации  $\sigma$  нерегулярны. Половина частиц E2:3 и все частицы E5:7 относятся к типу В. Тем не менее, они находятся в резонансной зоне:  $\Delta a < 0.002$  а.е. для частицы на рис. 2e и  $\Delta a < 0.001$  а.е. для частицы, показанной на рис. 2f.

### Резонанс 7:1 с Юпитером

Этот случай не так очевиден, как резонанс V1:2, но в некотором смысле более интересен. Большинство из 44 возможных резонансных аргументов, включая главный, явно циркулируют, но 4 аргумента ведут себя иначе. Типичное поведение одного из таких аргументов ( $k_1 = k_3 = k_4 = 0, k_2 = 6$ ) показано на рис. 3. В течение первой тысячи лет эволюция аргумента происходила очень медленно, претерпевая короткопериодические колебания. Затем он начинает циркулировать, но с наложением короткопериодических колебаний малой

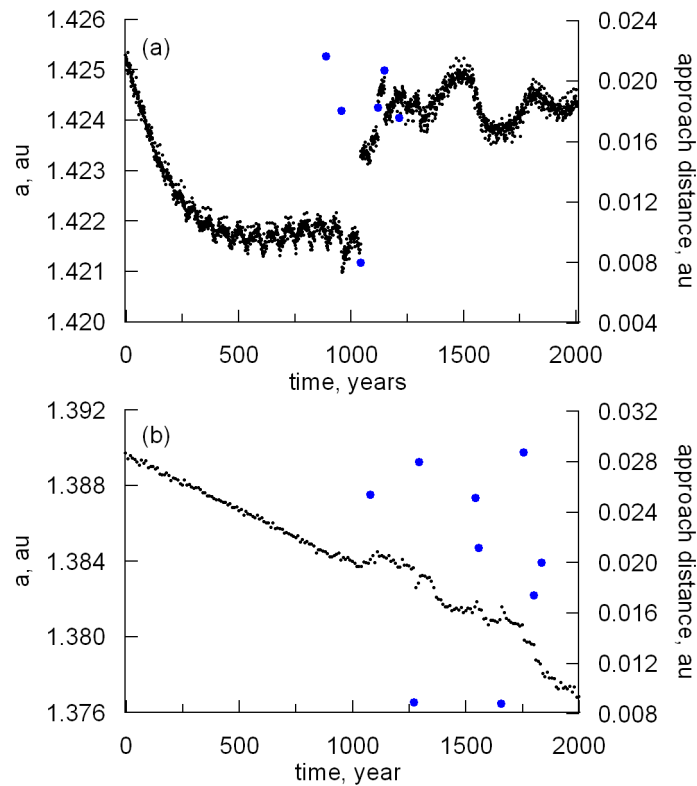
амплитуды.  $\tau$  остается в пределах  $\pm 4''$  /сутки в течение 2 тыс. лет. Остальные три упомянутых аргумента ведут себя аналогичным образом.



**Рис. 3.** Резонанс 7:1 с Юпитером.

Эволюция резонансного аргумента  $\sigma$  ( $k_1 = k_3 = k_4 = 0, k_2 = 6$ ) показана чёрным цветом. Расстояние  $\tau$  показано синим цветом. Масса частицы  $m_1$ .

Для 6 резонансных  $m_1$ -частиц изменения в  $a$  укладываются в 0.005 а.е., что соответствует ширине резонансной зоны. Типичное поведение одной такой частицы показано на рис. 4а. Большие полуоси остальных 22 частиц держатся в коридоре 0.008 а.е. Тем не менее, все 28 частиц образуют устойчивый след.



**Рис. 4.** Сравнительное поведение метеороидов в резонансе и вне резонанса.

Экспериментируя с  $\Delta t$  и произвольно увеличивая его с 12 "/сутки, соответствующих ширине резонанса, до 40 "/сутки, мы обнаружили 108 резонансных тестовых частиц. Удивительно, но они также образуют устойчивый компактный след (рис. 5), покрывающий почти всю орбиту. Финальное значение  $\Delta M = 318^\circ$ , а исходное  $\Delta M$  составляло всего  $0.75^\circ$ . Большие полуоси частиц держатся в пределах 0.012 а.е. Пылевой след пересекает плоскость эклиптики на расстоянии около 0.25 а.е. от орбиты Земли.

Эволюция большой полуоси  $a$  для двух частиц  $m_1$ : (а) резонансной J7:1, той же самой, что и на рис. 3, и (б) нерезонансной. Сближения с Венерой показаны синими точками.

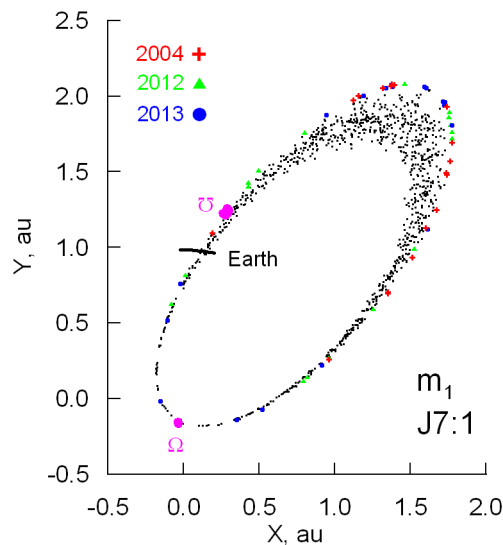


Рис. 5. Модельные метеороиды в проекции на плоскость эклиптики.

Модельный поток метеороидов  $m_1$  в проекции на плоскость эклиптики в эпоху 24 декабря 2004 года. 1000 случайных нерезонансных метеороидов показаны чёрными точками. Положения 20 метеороидов, находящихся в резонансе J7:1, в различные годы показаны различными символами. Узлы резонансных частиц показаны розовыми пятнами и соответственными обозначениями.

Особый интерес представляет расположение данного следа за пределами потока, точнее, у внешнего края потока (рис. 5). Причина этого — эффект Пойнтинга–Робертсона, уменьшающий большие полуоси нерезонансных метеороидов. Резонанс удерживает частицу на своей орбите (рис. 4а), а нерезонансные метеороиды движутся по спирали к Солнцу (рис. 4б). Тесные сближения с Венерой вызывают лишь небольшие ( $\leq 0.002$  а.е.) скачки в  $a$  (рис. 4б).

Аналогично ведут себя резонансные частицы с массой  $m_2$ .

Можно сделать вывод, что в модельном потоке Геминид присутствуют резонансные частицы J7:1. Однако необходимо провести дальнейшие исследования, сосредоточив внимание на влиянии солнечного ветра и эффекта Пойнтинга–Робертсона на динамику частиц, находящихся в орбитальном резонансе.



## Заключение

Мы исследовали орбитальное пространство модельного потока метеороидов Геминид, состоящего из метеороидов с массами 0.00003 – 0.3 г. Вычисляя эволюцию орбит метеороидов численно, мы показали, что метеороиды могут оставаться около 2000 лет в восьми орбитальных резонансах: 1:2, 2:5, 3:7, 3:8 и 4:9 с Венерой; 2:3 и 5:7 с Землёй и 7:1 с Юпитером. Резонансные метеороиды образуют в потоке пылевые следы, а не концентрированные рои. Число захваченных в резонанс частиц невелико, не превышает 0.1%, поэтому они вряд ли могут дать какое-либо увеличение пространственной плотности.

Результаты были получены для модели [1], которая не вполне соответствует реальным Геминидам по местоположению и используется в качестве первого приближения. Эти результаты предполагают повторение исследования для наблюдаемых Геминид, когда позволит точность определения орбит. Однако следует отметить, что резонансные следы могут находиться далеко от орбиты Земли.

Результаты данного исследования впервые были опубликованы в работе [8]. Доклад, подготовленный для конференции и представленный в настоящем сборнике, является переводом [8] на русский язык с некоторыми сокращениями и изменениями. Доклад подготовлен при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2024-0005).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ryabova G.O. A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream. – Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 2016, vol. 456. pp. 78-84.
2. Whipple F.L. A comet model. II. Physical relations for comets and meteors. – The Astrophysical Journal, 1951, vol. 113, №3. pp. 134-141.
3. Рябова Г.О. Возраст метеорного потока Геминид. – *Астрономический вестник*, 1999, т.33, №3, с. 258-273.
4. Ryabova G.O. Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream. – Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 2007, vol. 375, №4. pp. 1171-1180.
5. Gallardo T. Orbital stability in the Solar system for arbitrary inclinations and eccentricities: planetary perturbations versus resonances. – Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 2019, vol. 487, pp. 1709-1716.
6. Gallardo T. Three-dimensional structure of mean motion resonances beyond Neptune. – *Celestial Mech. Dyn. Astron.*, 2020, vol. 132, Art. id. 9.
7. Gallardo T. Strength, stability and three dimensional structure of mean motion resonances in the solar system. – *Icarus*, 2019, vol. 317, pp. 121-134.
8. Ryabova G.O. On mean motion resonances in the Geminid meteoroid stream. – *Planet. Space Sci.*, 2022, vol. 210, Art. id. 105378.

Г.О.РЯБОВА

## ТАҲЛИЛИ РЕЗОНАНСҲОИ ҲАРАКАТҲОИ МИЁНА ДАР СЕЛҲОИ МЕТЕОРОИДИИ ГЕМИНИД ДАР АСОСИ МОДЕЛСОЗИИ РАҚАМӢ

*Институти математика ва механикаи амалии Донишгоҳи давлатии Томск*

Ҳангоми таҳлили моделҳои адабии селҳои метеороидии Геминид ҳашт резонанси мадорӣ кашф карда шуд: 1:2, 2:5, 3:7, 3:8 ва 4:9 бо сайёраҳои Зухра, 2:3 ва 5:7 бо Замин ва 7:1 бо Муштарӣ. Маълум шуд, ки резонансҳои «фавра» дар ҷараёнҳо устувор ва паймон буда, аз зарраҳои калон (0.003 – 0.3 г) иборатанд, ки то 2 ҳазор сол дар резонанс мемонанд. Аммо шумораи заррачаҳое, ки дар резонанс гирифта мешаванд, кам аст, на бештар аз 0.1%, ки ин боиси хеле зиёд шудани зичии фазои модда мегардад.

**Калимаҳои калидӣ:** метеор, метеороид, селҳои метеороидии Геминид, астероид (3200) Phaethon, резонанси мадорӣ, модели математикӣ.

G.O.RYABOVA

## ANALYSIS OF MEAN MOTIONS RESONANCES IN THE GEMINID METEOROID STREAM BASED ON NUMERICAL MODELLING

*Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University,  
Russian Federation*

Analysing numerical models of the Geminid meteoroid stream we obtained eight mean motion resonances: 1:2, 2:5, 3:7, 3:8 and 4:9 with Venus, 2:3 and 5:7 with the Earth and 7:1 with Jupiter. The trails are stable and compact, and consist of large (0.003–0.3 g) meteoroids remaining in resonance for up to 2 thousand years. The number of captured particles is small, not exceeding 0.1 percent, so they hardly can produce any space density enhancement.

**Key words:** meteor, meteoroid, Geminid meteoroid stream, asteroid (3200) Phaethon, mean motion resonance, mathematical model.

### **Сведения об авторах:**

**Рябова Галина Олеговна** – доктор физико-математических наук, НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, главный научный сотрудник.  
E-mail: galina.ryabova@mail.tsu.ru

УДК 523.64

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Е.А.ЖУЖУЛИНА<sup>1</sup>, Н.Н.КИСЕЛЁВ<sup>1,2</sup>, Д.В.ПЕТРОВ<sup>1</sup>

## СРАВНЕНИЕ ФАЗОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ КОРОТКО- И ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

<sup>1</sup> *Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия,*

<sup>2</sup> *Институт астрономии РАН, Москва, Россия.*

*Поступила в редакцию 04.05.2024 г.*

*В работе представлены результаты анализа фазовых зависимостей поляризации (ФЗП) для коротко- и долгопериодических комет. ФЗП комет были построены на основе поляриметрической базы данных комет и результатов наблюдений в КраО и обсерватории пик Терскол на двухканальных фотоэлектрических поляриметрах. Показано, что степень линейной поляризации короткопериодических комет на углах  $\alpha \geq 40^\circ$  выше, чем у долгопериодических.*

**Ключевые слова:** кометы, поляриметрия

### Введение

Изучение комет тесно связано с решением такой фундаментальной проблемы, как происхождение и эволюция Солнечной системы. В связи с тем, что кометы не проходили стадию теплового разогрева и дифференциации вещества, можно предполагать, что физико-химический состав комет близок к составу протопланетного облака. Соответственно, изучение физико-химических свойств комет может дать дополнительную информацию о механизмах возникновения и эволюции Солнечной системы.

Наиболее информативным дистанционным методом изучения физических свойств комет является изучение поляризации комет.

Характеристики света, рассеянного кометной пылью, сильно зависят от структуры, размеров, морфологии и химического состава частиц, составляющих кометную пыль. Поэтому изучение света, рассеянного частицами кометной пыли, может дать богатую информацию как о физических характеристиках, так и о химическом составе кометной пыли. Одним из наиболее эффективных способов изучения рассеивающих свойств является

---

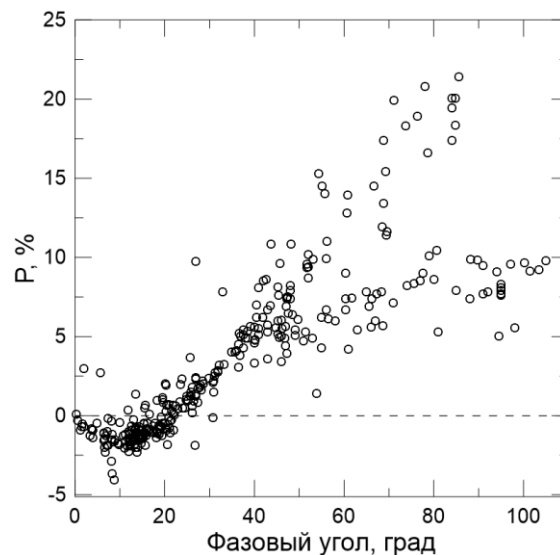
*Адрес для корреспонденции: Жужулина Елена Анатольевна, Крым, Россия. Крымская астрофизическая обсерватория, пос. Научный. E-mail: zhuzhulina.alena@yandex.ru.*

поляриметрия. Свет, падающий на частицу, неполяризован, но после процесса рассеяния становится частично поляризованным. В связи с этим вводится специальный параметр  $P_r$ , называемый степенью линейной поляризации, по отношению к плоскости рассеяния, определяемый следующим соотношением:

$$P_r = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}.$$

Здесь  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  – интенсивности рассеянного света, поляризованного в плоскости рассеяния и поляризованного в плоскости, перпендикулярной плоскости рассеяния, соответственно. Степень линейной поляризации  $P_r$  зависит от фазового угла  $\alpha$  (угла между направлениями комета-Солнце и комета-наблюдатель). Зависимость  $P_r(\alpha)$ , называемая также фазовой зависимостью поляризации (ФЗП), у объектов Солнечной системы имеет характерные особенности. В области оппозиции на малых фазовых углах ( $\alpha \leq 20^\circ$ )  $P_r < 0$  (отрицательная ветвь ФЗП), на больших фазовых углах ( $\alpha > 20^\circ$ )  $P_r > 0$  (положительная ветвь ФЗП). Морфологический вид фазовой кривой и ее параметры ( $P_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$ , поляриметрический наклон  $h$ ,  $P_{\max}$ ,  $\alpha_{\max}$ ) различаются для разных объектов. Таким образом, фазовая зависимость степени линейной поляризации является удобным и информативным параметром для изучения физических свойств и химического состава рассеивающих объектов [1].

Построение фазовых зависимостей поляризации (ФЗП) комет осложняется следующей проблемой: как правило, кометы наблюдаются в ограниченном диапазоне фазовых углов, следовательно, невозможно получить непрерывную фазовую зависимость на всем диапазоне фазовых углов, доступных для наблюдений с Земли, для одной кометы. На рис. 1 приведены фазовые зависимости поляризации, полученные по данным наблюдений многих комет в широкополосном фильтре V.



**Рис. 1.** Фазовые зависимости поляризации комет, полученные по поляриметрической базе комет (DBCP) [2] в широкополосном фильтре V.

Общеизвестно, что кометы, принадлежащие к разным динамическим классам, имеют различное происхождение. Поэтому представляется актуальным выяснить различаются ли поляризационные характеристики комет разных динамических классов.

Для поиска сходства и различия ФЗП комет, принадлежащих к разным динамическим семействам, лучше сравнивать синтетические (средние) фазовые кривые поляризации и их параметры.

В работе [3] было сделано предварительное заключение о том, что ФЗП долгопериодических комет отличаются от ФЗП короткопериодических комет. Данная статья является продолжением и развитием исследований [3].

## **2. Аппаратура для наблюдений и база данных.**

Одним из источников поляриметрических данных для построения синтетических ФЗП комет явилась Поляриметрическая База Данных Комет (DBCP) [2]. Она содержит 3441 измерение линейной и круговой поляризации для 95 комет, данные по которым получены в период 1881-2016 гг. К этим данным были добавлены результаты наблюдений комет, проведенных в 2018-2023 годах.

В 2018 г. в КрАО были созданы новые идентичные двухканальные фотоэлектрические поляриметры для телескопа 2.6 м ЗТШ и 2 м телескопа обсерватории Пик Терскол. Эти приборы позволили существенно расширить диапазон блеска наблюдаемых комет до 16 mag. В большинстве случаев кометы были слабыми, поэтому наблюдения проводились в полосах V R I. Поляризация некоторых ярких комет проводилась не только в стандартных фильтрах UBVRI, но и в узкополосных кометных фильтрах. Более подробно аппаратура и методика наблюдений описаны в работе [4].

Всего с 2018 года по начало 2024 были проведены наблюдения 43 комет (18 короткопериодических и 25 долгопериодических) в диапазоне фазовых углов  $1.2^\circ$  -  $104.9^\circ$  и на гелио- и геоцентрических расстояниях 0.243-6.331 а.е. и 0.193-6.504 а.е. соответственно. Большинство из этих комет наблюдалось впервые.

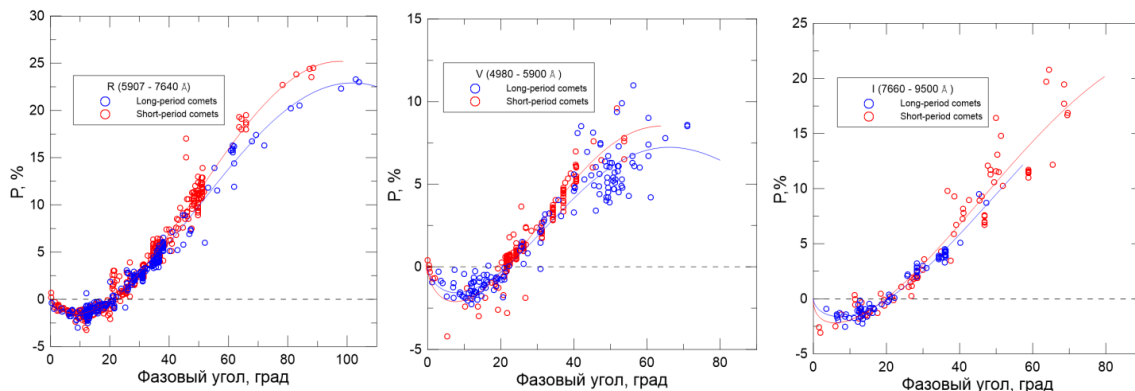
## **3. Построение синтетических ФЗП комет и аппроксимация данных.**

Как видно из рис. 1 ФЗП комет на фазовых углах больше  $50^\circ$  разделяются на две группы. Деление комет на такие две группы обусловлено двумя разными механизмами возникновения поляризованного излучения в кометах: это рассеяние света на частицах пыли и резонансная флуоресценция молекулярных эмиссий [5 и ссылки там].

Для построения синтетических ФЗП комет разных динамических групп мы отобрали кометы, более богатые пылью. Такой выбор был обусловлен тем, что вклад молекулярных эмиссий в суммарное излучение и, следовательно, деполаризующее влияние эмиссий на изменяемую поляризацию будет незначительным. Также из списка данных для построения и анализа синтетических ФЗП были исключены кометы с определенно индивидуальными характеристиками, такие как C/1995 O1 (Hale- Bopp), C/1965 S1 (Ikeya-Seki) и другие.

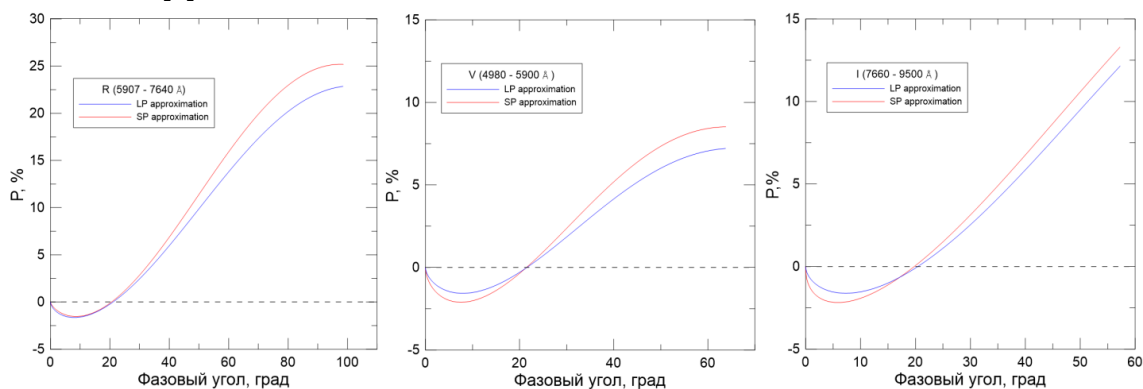
Так как DVSP содержит данные, полученные в разных фотометрических системах, а также некоторое количество данных в несистемных фильтрах, мы не привязывались к определенной системе фильтров, а включили в анализ данные, попадающие в определенный диапазон длин волн. Были отобраны данные, полученные в широкополосных фильтрах: R (5907 – 7640 Å), V (4980 – 5900 Å) и I (7660 – 9500 Å).

На рис. 2 представлены синтетические ФЗП короткопериодических и долгопериодических комет, в атмосферах которых преобладает пыль.



**Рис. 2.** Синтетические фазовые зависимости поляризации коротко- и долгопериодических комет в широкополосных фильтрах R (5907 – 7640 Å), V (4980 – 5900 Å) и I (7660 – 9500 Å).

Также мы провели аппроксимацию данных в соответствующих фильтрах, которые представлены на рис. 3. Аппроксимация проводилась при помощи тригонометрического многочлена [6].



**Рис. 3.** Аппроксимационные зависимости поляризации для долгопериодических (синие кривые) и короткопериодических (красные кривые) комет в широкополосных фильтрах R (5907 – 7640 Å), V (4980 – 5900 Å) и I (7660 – 9500 Å).

Для корректного сравнения, аппроксимационные кривые строились для диапазона фазовых углов общих для коротко- и долгопериодических комет для каждого конкретного фильтра.

Из рис. 2 и 3 следует, что на сопоставимых диапазонах фазовых углов ФЗП короткопериодических и ФЗП долгопериодических комет отличаются: а именно, степень

линейной поляризации короткопериодических комет систематически выше, чем степень поляризации долгопериодических комет.

### **Заключение**

В период 2018 – 2023 гг. проведены поляриметрические наблюдения 43 комет, существенно дополнившие поляриметрическую базу данных комет. На основе полученных результатов и существующей базы данных DVCP, построены синтетические фазовые зависимости в широкополосных фильтрах R (5907 – 7640 Å), V (4980 – 5900 Å) и I (7660 – 9500 Å) и проведена их аппроксимация.

Показано, что степень линейной поляризации короткопериодических комет выше степени линейной поляризации долгопериодических комет на сопоставимых диапазонах фазовых углов  $\alpha \geq 40$  градусов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Bohren C.F., Huffman D.R. 2004. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co (530 p.)
2. Kiselev N., Shubina E., Velichko S., Jockers K., Rosenbush V., Kikuchi S. – NASA Planetary Data System, 2017
3. Киселев Н.Н., Жужулина Е. А., Петров Д. В., Карпов Н. Синтетические фазовые зависимости поляризации комет в широкополосных и узкополосных кометных полосах. – VIII Бредихинские чтения : научная конф. с междунар. участием, 04-08 сен. 2023 г., Заволжск, Россия: тезисы. – Заволжск, Россия: ИНАСАН, 2023. с. 12.
4. Kiselev N. N., Rosenbush V., Leppala E., Savushkin A. et al. New Polarimetric Data for the Galilean Satellites: Io and Ganymede Observations and Modeling. – The Planetary Science Journal, 2024, vol. 5, №. 1, id.10, 16 p.
5. Kiselev N., Rosenbush V., Lévassieur-Regourd A.-Ch., Kolokolova L. 2015. Comets in Polarimetry of Stars and Planetary Systems. – Cambridge University Press, Cambridge, pp. 379-404.
6. Lumme K., Muinonen K. A two-parameter system for linear polarization of some Solar system objects. – IAU Symp. 160: Asteroids, Comets, Meteors, LPI Contribution 810. Houston: LPI, 1993, pp. 194-197.

Е.А.ЖУЖУЛИНА<sup>1</sup>, Н.Н.КИСЕЛЁВ<sup>1,2</sup>, Д.В.ПЕТРОВ<sup>1</sup>

### **МУҚОИСАИ ВОБАСТАГИИ ФАЗАВИИ ПОЛЯРИЗАТСИЯИ КОМЕТАҲОИ КУТОҲДАВР ВА ДАРОЗДАВР**

<sup>1</sup>*Расадхонаи астрофизикии Қрим, Научный, Қрим, Россия,*

<sup>2</sup>*Институту астрономияи Академияи илмҳои Россия, Москва, Россия*

Дар мақола натиҷаҳои таҳлили вобастагии фазавии поляризацсия (ВЗП) барои кометаҳои кӯтоҳдавр ва дароздавр оварда шудаанд. ВЗП кометаҳо дар асоси маҳзани асосии поляриметри кометаҳо ва натиҷаҳои мушоҳидаҳо дар Расадхонаи астрономии Қрим ва расадхонаи Терскол бо ёрии поляриметрҳои дуқанали фотоэлектрикӣ сохта шудаанд. Исбот

шудааст, ки дараҷаи қутбшавии ҳаттии кометаҳои қутоҳдавр дар кунҷи  $\alpha \geq 40^\circ$  нисбат ба кометаҳои дароздавр баландтар аст.

**Калимаҳои калидӣ:** кометаҳо, поляриметрия.

E.A.ZHUZHULINA<sup>1</sup>, N.N.KISILEV<sup>1,2</sup>, D.V.PETROV<sup>1</sup>

## COMPARISON OF PHASE DEPENDENCES OF POLARIZATION OF SHORT- AND LONG-PERIOD COMETS

<sup>1</sup>*Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Crimea, Russia,*

<sup>2</sup>*Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia.*

The paper presents the results of the analysis of the phase dependence of polarization (PDP) for short- and long-period comets. The PDPs of comets were constructed based on the polarimetric database of comets and the results of observations at CrAO and the Terskol Peak Observatory using two-channel photoelectric polarimeters. It has been shown that the degree of linear polarization of short-period comets at angles  $\alpha \geq 40^\circ$  is higher than that of long-period comets.

**Key words:** comets, polarimetry.

### **Сведения об авторах:**

**Жужулина Елена Анатольевна** – Крымская астрофизическая обсерватория РАН, соискатель;

**Киселев Николай Николаевич** – доктор физико-математических наук, Институт Астрономии РАН (ИНАСАН); Крымская астрофизическая обсерватория РАН, зав. лабораторией малых тел Солнечной системы КрАО, E-mail: kiselevnn42@gmail.com

**Петров Дмитрий Владимирович** – Крымская астрофизическая обсерватория РАН.



УДК 52-17::521.182::523.44

Специальность: 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

С.Р.ПАВЛОВ, Ю.А.ЧЕРНЕТЕНКО

## ОРБИТАЛЬНАЯ ДИНАМИКА КОМЕТЫ 103P/ХАРТЛИ 2 НА ОСНОВЕ ПОЗИЦИОННЫХ И РАДАРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Институт прикладной астрономии РАН*

*Поступила в редакцию 04.05.2024 г.*

*В данной работе мы объединили имеющиеся позиционные и радиолокационные наблюдения кометы 103P/Хартли 2 во всех появлениях в одну орбиту. Это оказалось возможным благодаря определению негравитационных ускорений (НУ) и смещения фотоцентра (СФ). Среднеквадратическая ошибка представления наблюдений ( $\sigma$ ) составила 0.34. Для позиционных наблюдений она составила 0.68 угл. сек. Мы определяли НУ в пяти появлениях, при этом в позиционных наблюдениях 2010 г. присутствовали значительные систематические отклонения от вычисленной орбиты (О–С), «прижатой» к более точным радиолокационным наблюдениям, имеющимся в этом появлении. Учет СФ в наблюдениях 2010–2011 гг. позволил избавиться от значительных отклонений. Величина СФ на этом интервале хорошо определялась как функция, обратно пропорциональная квадрату гелиоцентрического расстояния ( $1/r^2$ ). В отсутствие радарных наблюдений в других появлениях СФ не определялось. Вычисления показали, что величина НУ от появления к появлению медленно уменьшается, СФ направлено преимущественно вдоль радиус-вектора от Солнца.*

**Ключевые слова:** комета 103P/Хартли 2, кометы семейства Юпитера, негравитационные ускорения, смещение фотоцентра, орбитальная динамика.

### Введение

Комета 103P является короткопериодической кометой семейства Юпитера. Она была открыта в 1986 г. и наблюдалась во всех последующих появлениях. В октябре 2010 г. комета прошла на расстоянии 0.12 а.е. от Земли, когда удалось получить ее радиолокационные наблюдения. В ноябре 2010 г. она была сфотографирована КА Деер Импакт (миссия ЕРОХИ) с расстояния 700 км. Фотографии Деер Импакт показали, что ядро кометы 103P/Хартли 2 двудольное, вытянутое, близко к осесимметричному, с большой осью около

---

*Адрес для корреспонденции:* Павлов Сергей Романович Москва, Россия, Институт прикладной астрономии РАН, E-mail: sr.pavlov@iaaras.ru.

2.33 км, и по форме напоминает арахис [1]. Поверхность холмистая, диаметры холмов менее 40 м, имеются гладкие участки неправильной формы и гладкая «талиа» между двумя долями. Такая форма может быть эволюционным продуктом инсоляции, сублимации и временного осаждения вещества. Средняя плотность кометы составляет 200–400 кг/м<sup>3</sup>.

В работе [2] показано, что в 2010-2011 гг. наблюдалось значительное вековое снижение производства воды и всех других наблюдаемых газов по сравнению с уровнями 1991 и 1997-1998 гг. Пик их производства приходится на 10 сут. после перигелия, а скорость производства значительно выше после перигелия. В [3] отмечается, что комета 103P/Хартли 2 во многом отличается от 9P/Tempel 1 и является идеальным примером сверхактивной кометы, производящей больше H<sub>2</sub>O за единицу времени, чем это возможно при сублимации с площади поверхности ее ядра. Суперлетучие вещества, особенно CO<sub>2</sub> в случае с Хартли 2, являются основными движущими силами сублимации. Эти вещества выбрасывают фрагменты почти чистого водяного льда, которые затем сублимируют, обеспечивая большую часть общего выхода H<sub>2</sub>O кометы. В целом, результаты исследований подтверждают выводы других авторов о том, что «гиперактивность» Хартли 2 вызвана ледяными частицами различных размеров, которые поднимаются над поверхностью и распадаются в коме, значительно увеличивая эффективную площадь рассеивающей поверхности. Результаты миссии ЕРОХI и сопутствующие наблюдения Хартли 2 показали, что это необычная комета, которая очень активна по сравнению с аналогичными кометами такого же диаметра.

Результаты радарных наблюдений добавили Хартли 2 в растущий список комет с радиолокационными зерновыми комами. Отдельный отраженный сигнал был обнаружен от больших гранул, размером более см, выбрасываемых анизотропно со скоростями до десятков м/с. Сильная деполяризация эха зерновой комы говорит о том, что зерна Хартли 2 имеют тенденцию быть больше, чем у других схожих комет. Это свидетельствует в поддержку идеи о том, что выброс крупных гранул является общим свойством комет и может составлять значительную или доминирующую долю от их общей потери массы [4]. Кроме того результаты [4] подтверждают, что Хартли 2 является крупным производителем обломков вещества во время прохождения перигелия. Исследование этой кометы тем более актуально, что она принадлежит к телам, сближающимся с Землей.

Цель настоящей работы состояла в получении параметров орбиты и физических параметров, наилучшим образом представляющих радарные и оптические наблюдения кометы 103P/Хартли 2. Это тем более интересно, что нам не известны опубликованные результаты успешного представления одной орбитой радарных и позиционных наблюдений кометы, даже в одном появлении 2010-2011 гг.

### **Наблюдения и модель движения**

Мы использовали позиционные наблюдения кометы 103P из каталога Международного центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>) и радарные наблюдения – из каталога Лаборатории реактивного движения НАСА (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sb/radar.html>) по

состоянию на 20.03.2024. Информация о них, число и интервал наблюдений, приводится в табл. 1.

Таблица 1

Информация о наблюдениях

Год	1986	1991	1997	2004	2008	2010	2017	2023
N <sub>obs</sub>	18	166	464	267	103	5992 +6 рад.	108	2633
dT (сут.)	82	347	707	365	30	1155	495	329

В улучшении орбиты использовались уравнения движения в форме Энке, интернированные методом Эверхарта [5]. Координаты и массы возмущающих планет вычислялись в соответствии с эфемеридой DE440 [6].

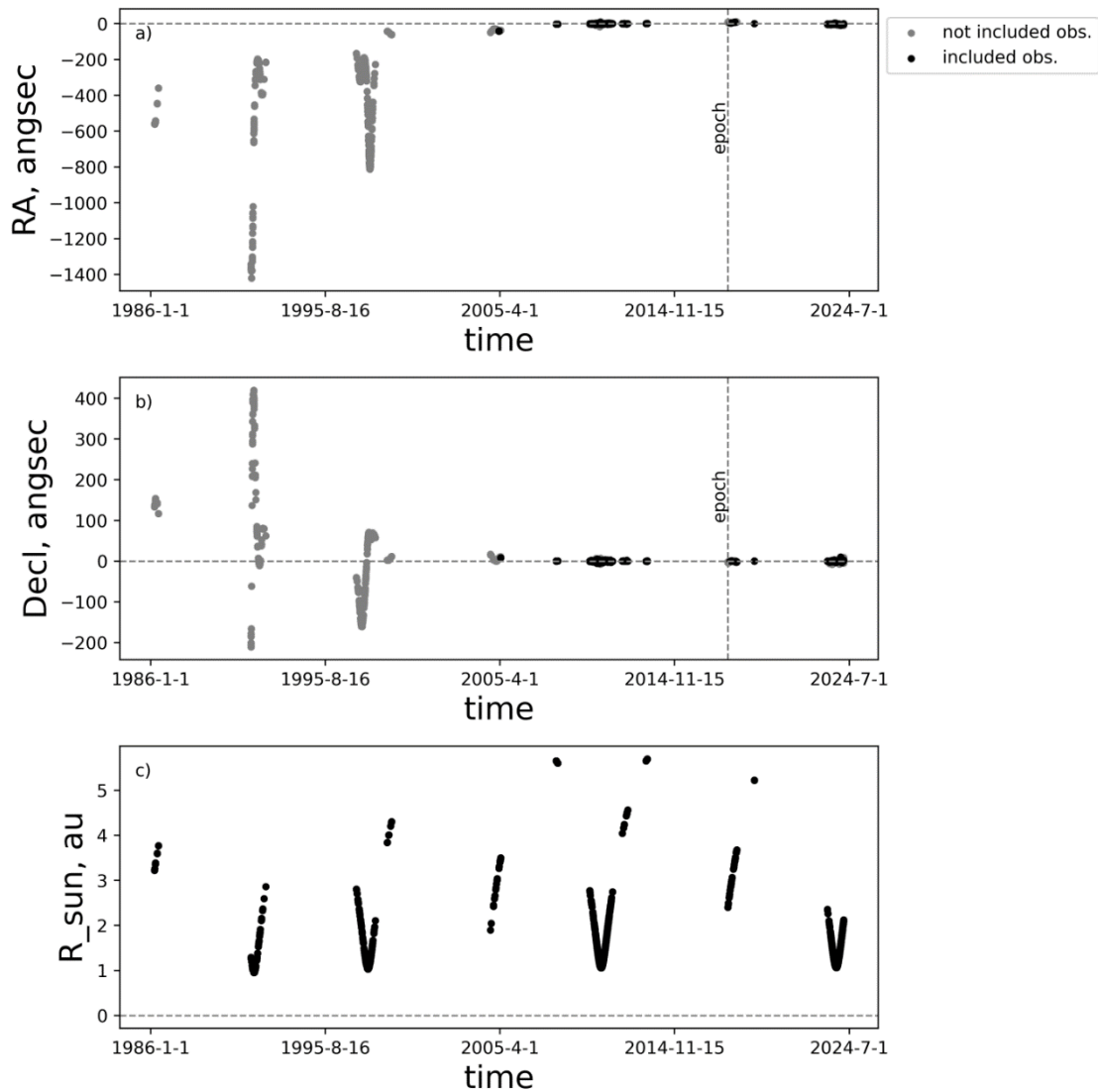
Для учета негравитационных ускорений (НУ) использовался метод Марсдена. В его основе лежат модель ледяного кометного ядра и предположение о непрерывном действии негравитационных сил, величина которых зависит от гелиоцентрического расстояния  $r$  (а.е.) и симметрична относительно перигелия. Форма этой зависимости основана на эмпирически полученной формуле скорости испарения водяного льда и определяется безразмерной функцией  $g(r)$  [7]. Радиальная, трансверсальная и нормальная составляющие НУ обозначаются как  $A_1g(r)$ ,  $A_2g(r)$ ,  $A_3g(r)$ , где параметры  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  определяются из наблюдений совместно с параметрами орбиты и имеют размерность ускорения (а.е./сут<sup>2</sup>). В появлении 2010 г., когда имеются точные радиолокационные наблюдения, в позиционных наблюдениях учитывалось также смещение фотоцентра кометы (СФ), то есть смещение центра яркости относительно ее центра инерции. Величина СФ определялась обратно пропорционально гелиоцентрическому расстоянию  $S=S_0/r^2$  (км). СФ также представлялось тремя составляющими, связанными с положением тела на орбите. Радиальная ( $R$ ), трансверсальная ( $T$ ) и нормальная ( $N$ ) компоненты вектора смещения  $S_0$ , определенного на расстоянии 1 а.е., вычислялись методом наименьших квадратов совместно с уточнением других параметров.

### Результаты вычислений

Мы провели серию улучшений орбиты кометы 103P/Хартли 2 на эпоху 2017.10.21. Улучшение только 6 параметров орбиты кометы – координат и скоростей ( $\mathbf{X}, \mathbf{V}$ ) – позволяет объединить одним решением наблюдения не более чем трех появлений, при этом в отклонениях наблюдений от орбиты (O–C) проявляется тренд (рис. 1).

Добавление в число улучшаемых параметров негравитационных ускорений в каждом из появлений 1991, 1997, 2004, 2010 и 2017 гг. и смещения фотоцентра в появлении 2010 г., позволяет объединить наблюдения во всех появлениях одной орбитой и, таким образом, проследить за величиной изменения негравитационных ускорений от появления к появлению. Смещение фотоцентра определяется только в появлении 2010 г., в котором имеются высокоточные радиолокационные наблюдения. Высокая корреляция между НУ и СФ

не позволяет получить оценки СФ в остальных появлениях. На рис. 2 показаны вычисленные О–С для данного варианта улучшения.



**Рис. 1.** Уклонения О–С наблюдений кометы 103P/Хартгли 2 после улучшения координат и скоростей на эпоху 2017.20.21. Улучшение проводилось по позиционным и радиолокационным наблюдениям. На панелях а) и б) показаны уклонения прямого восхождения (RA) и склонения (Decl) соответственно. На панели с) показаны гелиоцентрические расстояния в а.е.

Так как радарные наблюдения существенно точнее позиционных, они позволяют «прижать» орбиту к себе за счет назначения им больших весов. Благодаря этому появляется возможность определить величину и направление смещения фотоцентра, что не удается сделать для других появлений, не имеющих радарных наблюдений. Веса радарным наблюдениям назначались обратно пропорционально их ошибкам. В табл. 2 представлены веса, назначавшиеся соответствующим наблюдениям.

Таблица 2

## Веса, назначавшиеся наблюдениям

Наблюдения	Вес
Позиционные (ПЗС)	1
Позиционные (Фотографические)	0.1
Радарное 2010-10-24.32638 (Доплер)	200
Радарное 2010-10-24.33472 (Задержка)	25
Радарное 2010-10-25.31527 (Задержка)	66.667
Радарное 2010-10-26.39305 (Задержка)	50
Радарное 2010-10-27.31944 (Задержка)	33.333
Радарное 2010-10-29.39861 (Задержка)	33.333

СФ направлено преимущественно вдоль радиальной компоненты в сторону от Солнца. Это может быть связано с тем, что в коме из ледяных гранул происходит освобождение пыли, которая в дальнейшем движется под воздействием солнечного давления. Данный результат согласуется с выводами из [4], указывающими на то, что выброс гранул концентрируется в конусе шириной  $90^\circ$  с центроидом, направленным на  $110^\circ$  от линии комета-Земля. Поскольку угол Солнце-комета-Земля в среднем составлял  $58^\circ$  в течение радиолокационных наблюдений, центр тяжести конуса должен был быть направлен, по крайней мере, на  $52^\circ$  от Солнца.

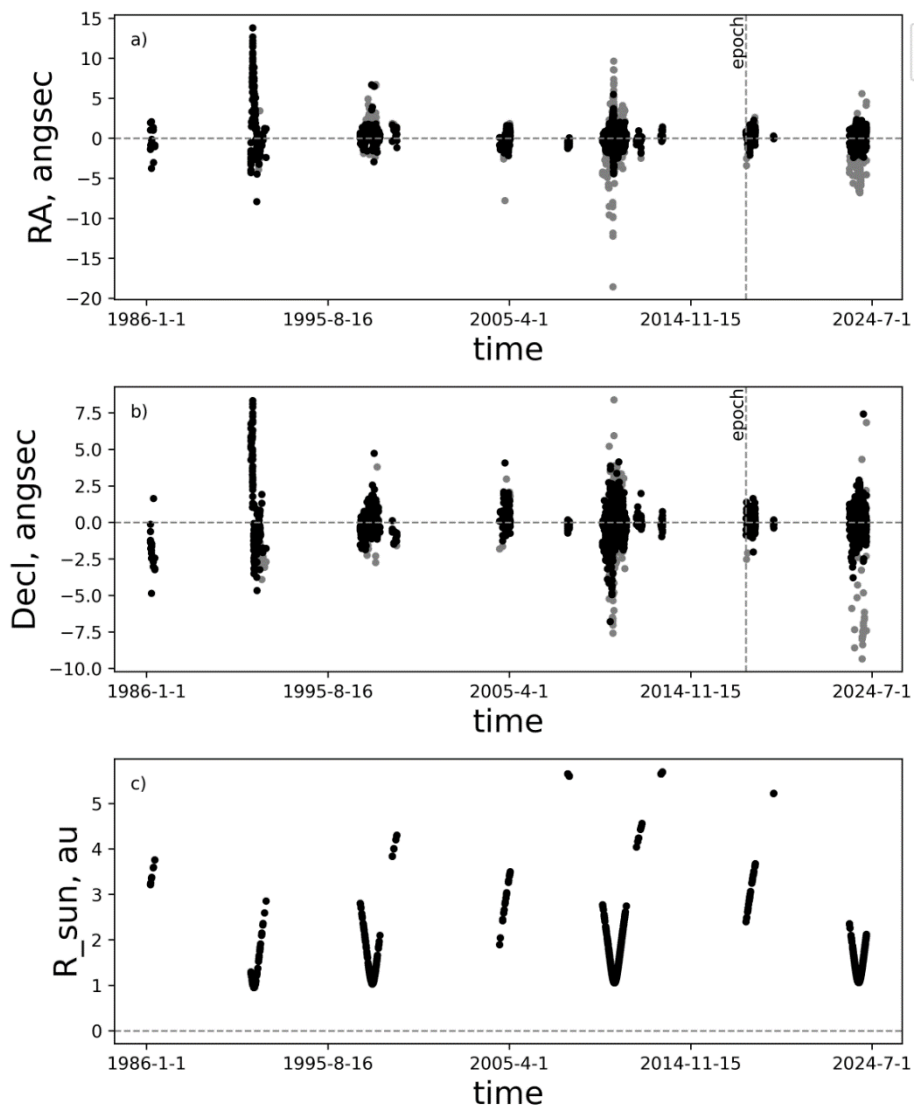
Анализируя изменения НУ от появления к появлению, можно сказать, что абсолютная величина НУ постепенно, но незначительно, уменьшается. Трансверсальная составляющая НУ, определяющаяся лучше всего, уменьшается монотонно. Радиальная составляющая уменьшается в последних появлениях. В табл. 3 представлены результаты улучшения координат, скоростей, НУ и СФ. Среднеквадратическая ошибка наблюдений составила 0.34. Среднеквадратическая ошибка позиционных наблюдений составила 0.68 угл. сек. Средняя ошибка радиолокационных наблюдений задержек составила 0.49 микросек., а Доплеровских наблюдений (сдвига частоты) 0.12 Гц.

Таблица 3

## Результаты улучшения координат, скоростей, НУ и СФ кометы 103P/Хартли 2

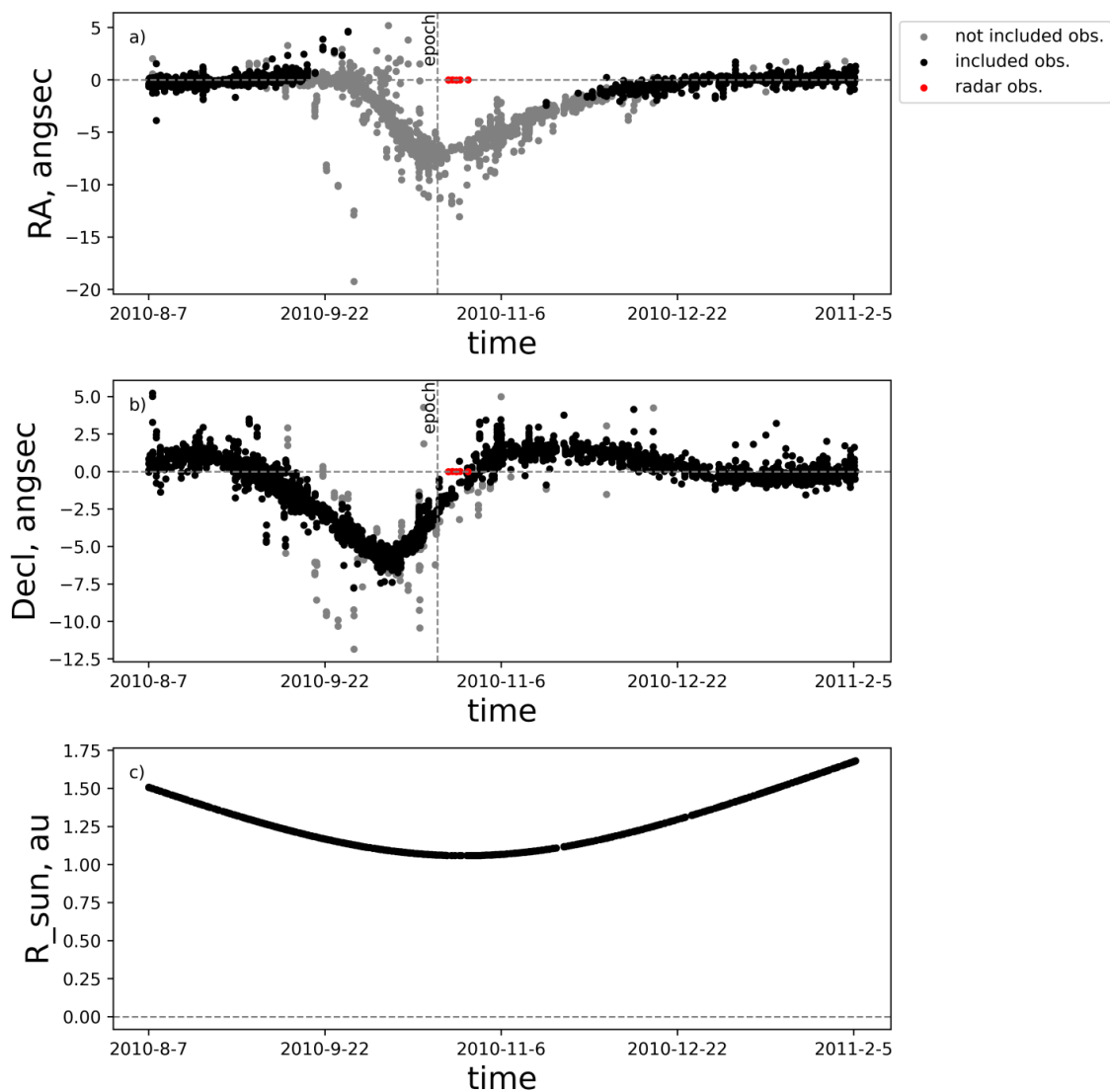
Интервал	Параметр орбиты	Величина	Ошибка	Единицы
Координаты и компоненты скорости	x	-2.082552624	0.208E-05	а.е.
	y	1.197361266	0.666E-06	а.е.
	z	-0.050289949	0.492E-06	а.е.
	vx	-0.011758049	0.764 E-08	а.е./сут.
	vy	-0.003934979	0.427 E-08	а.е./сут.
	vz	-0.002734151	0.583 E-09	а.е./сут.
[1991-1-1:1996-1-1]	$A_1 \cdot 10^{-8}$	1.507	0.118E+00	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_2 \cdot 10^{-8}$	0.071	0.254E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_3 \cdot 10^{-8}$	-0.057	0.710E-01	а.е./сут. <sup>2</sup>
[1997-1-1:2000-1-1]	$A_1 \cdot 10^{-8}$	0.389	0.694E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_2 \cdot 10^{-8}$	0.026	0.111E-03	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_3 \cdot 10^{-8}$	0.095	0.691E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>
[2004-1-1:2009-1-1]	$A_1 \cdot 10^{-8}$	0.046	0.735E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_2 \cdot 10^{-8}$	0.029	0.167E-03	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_3 \cdot 10^{-8}$	-0.049	0.659E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>

Интервал	Параметр орбиты	Величина	Ошибка	Единицы
[2010-1-1:2014-1-1]	$A_1 \cdot 10^{-8}$	0.181	0.154E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_2 \cdot 10^{-8}$	0.026	0.117E-03	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_3 \cdot 10^{-8}$	0.057	0.130E-02	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$R$	264	0.599E+01	км
	$T$	7	0.461E+01	км
	$N$	-116	0.522E+01	км
[2017-1-1:н.в.]	$A_1 \cdot 10^{-8}$	0.125	0.764E-03	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_2 \cdot 10^{-8}$	0.019	0.185E-03	а.е./сут. <sup>2</sup>
	$A_3 \cdot 10^{-8}$	0.020	0.880E-03	а.е./сут. <sup>2</sup>

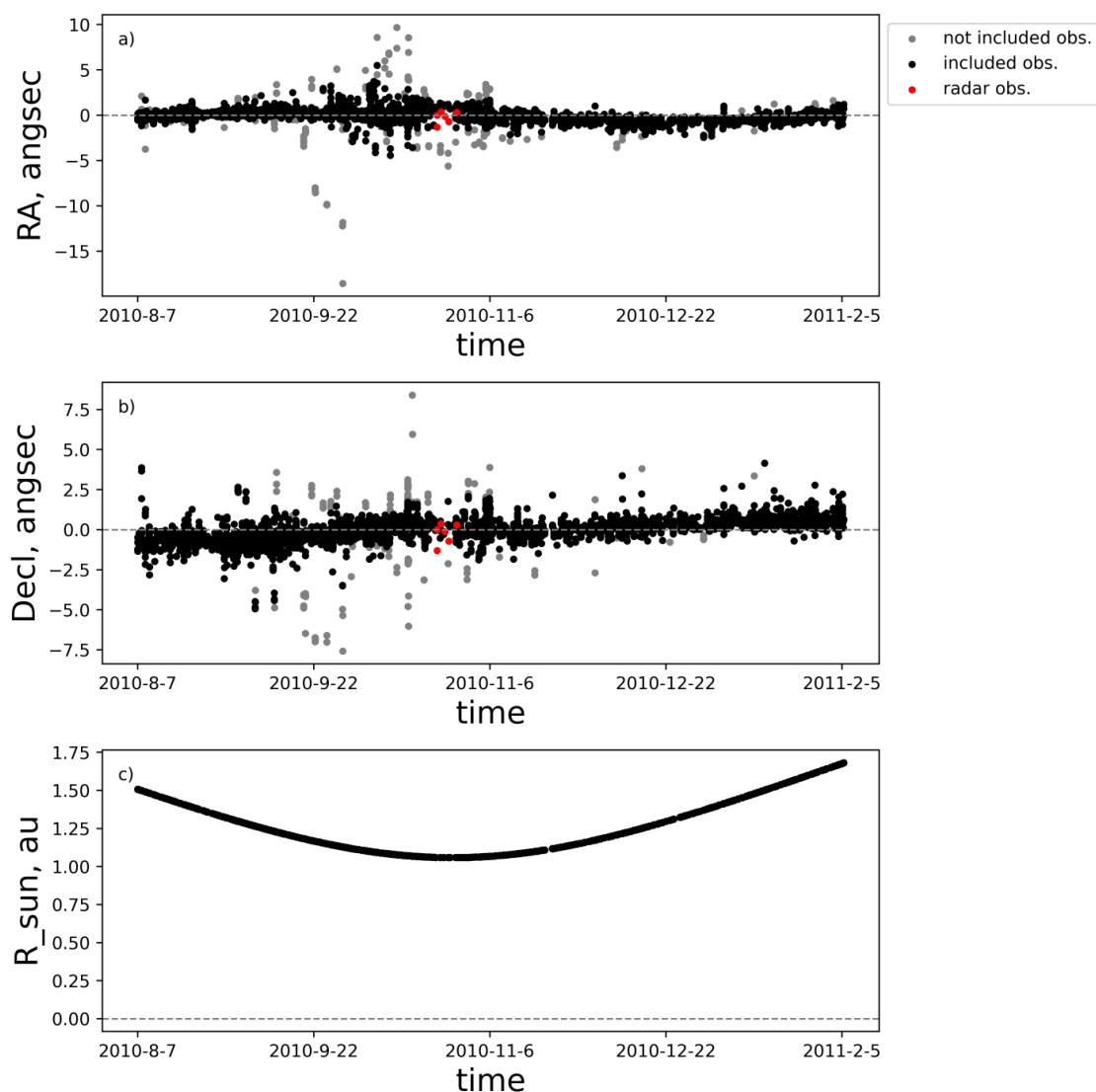


**Рис. 2.** Уклонения О–С наблюдений кометы 103P/Хартли 2 после улучшения координат, скоростей, НУ в появлениях 1991, 1997, 2004, 2010, 2017 гг. и смещения фотоцентра в появлении 2010 г. на эпоху 2017.20.21. Улучшение проводилось по позиционным и радиолокационным наблюдениям. На панелях а) и б) показаны уклонения прямого восхождения (RA) и склонения (Decl) соответственно. На панели с) показаны гелиоцентрические расстояния в а.е.

Отметим, что определение СФ в появлении 2010 г. позволяет избавиться от существенного увеличения О–С вблизи перигелия, которое в противном случае возникает из-за отличий в позиционных и радиолокационных наблюдениях: позиционные наблюдения относятся к центру яркости изображения, а радиолокационные – к центру тяжести, см. рис. 3. Добавив СФ в число улучшаемых параметров, мы получили О–С в данном появлении практически с отсутствием систематических уклонений. На рис. 4 подробнее показаны результаты улучшения в окрестности 2010-2011 гг.



**Рис. 3.** Уклонения О-С наблюдений кометы 103P/Хартли 2 в окрестности 2010-2011 гг. после улучшения координат, скоростей и НУ в пяти появлениях на эпоху 2017.20.21. Улучшение проводилось по позиционным и радиолокационным наблюдениям. На панелях а) и б) показаны уклонения прямого восхождения (RA) и склонения (Decl) соответственно. На панели с) показаны гелиоцентрические расстояния в а.е.



**Рис. 4.** Уклонения О-С наблюдений кометы 103P/Хартли 2 в окрестности 2010-2011 гг. после улучшения координат, скоростей, НУ в пяти появлениях и смещения фотоцентра в появлении 2010 г. на эпоху 2017.20.21. Улучшение проводилось по позиционным и радиолокационным наблюдениям. На панелях а) и б) показаны уклонения прямого восхождения (RA) и склонения (Decl) соответственно. На панели с) показаны гелиоцентрические расстояния в а.е.

### Выводы

В данной работе нам удалось объединить наблюдения во всех появлениях кометы 103P/Хартли 2 в одну орбиту. Для этого мы определяли не только координаты и компоненты скорости кометы на выбранную эпоху, но и параметры НУ в пяти появлениях, а также СФ в позиционных наблюдениях 2010-2011 гг. Анализ НУ в разных появлениях позволяет судить об изменении активности кометы. Мы выяснили, что НУ постепенно уменьшаются по абсолютной величине. Использование для учета зависимости СФ от гелиоцентрического



расстояния функции  $1/r^2$  оказалось вполне удовлетворительным. Нам удалось избавиться от систематических уклонений и трендов в O–C, возникающих в случае определения только координат и скоростей. Определение СФ в 2010 г. оказалось возможным благодаря наличию радарных наблюдений, свободных от смещения центра яркости кометы на изображении относительно положения центра тяжести. СФ оказалось направлено в основном вдоль радиус-вектора от Солнца.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas P.C. et al. Shape, density, and geology of the nucleus of Comet 103P/Hartley 2. – Icarus, 2013, vol. 222, № 2, pp. 550-558.
2. Knight M.M., Schleicher D.G. The Highly Unusual Outgassing of Comet 103P/Hartley 2 from Narrowband Photometry and Imaging of the Coma. – Icarus, 2013, vol. 222, № 2, pp. 691-706.
3. Harmon J.K. et al. Radar Observations of Comet 103P/Hartley 2. ApJL. – The American Astronomical Society, 2011, vol. 734, № 1, P. L2.
4. A'Hearn M.F. et al. EPOXI at comet Hartley 2. – Science, 2011, vol. 332, № 6036, pp. 1396-1400.
5. Everhart E. Implicit Single-Sequence Methods for Integrating Orbits. – Celestial Mechanics, 1974, vol. 10, pp. 35-55.
6. Park R.S. et al. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 – AJ. The American Astronomical Society, 2021, vol. 161, № 3, p. 105.
7. Marsden B.G., Sekanina Z., Yeomans D.K. Comets and nongravitational forces. V – The Astronomical Journal, 1973, vol. 78, p. 211.

С.Р.ПАВЛОВ, Ю.А.ЧЕРНЕТЕНКО

### ДИНАМИКА И ОРБИТАЛИИ КОМЕТАИ 103P/ХАРТЛИ 2 ДАР АСОСИ МУШОҲИДАҶОИ ПОЗИТСИОНӢ ВА РАДАРӢ

*Институти астрономияи амалии Академияи илмҳои Россия*

Дар кори мазкур мушоҳидаҳои мавқеӣ ва радарии кометаи 103P/Hartley 2-ро дар ҳама намуди зоҳирӣ дар як мадор муттаҳид намудем. Ин барои муайян кардани шитобҳои ғайриҷозоба (ШҶ) ва ҷойи фотомарказ (ҶМ) имкон дод. Ҳамаи миёнаи квадратии реша дар пешниҳоди мушоҳидаҳо ( $\sigma$ ) 0,34 аст. Барои мушоҳидаҳои мавқеӣ он 0,68 сонияи камонӣ баробар аст. Мо ШҶ-ро дар панҷ ҳодиса муайян кардем, дар ҳоле ки дар мушоҳидаҳои мавқеӣ соли 2010 аз мадори ҳисобшуда (O–C) дурравиҳои назарраси системавӣ ба мушоҳида мерасанд, ки ба мушоҳидаҳои дақиқтари радарӣ дар ин ҳодиса “фишор овардаанд”. Баҳисобгирии ҶМ дар мушоҳидаҳо дар солҳои 2010-2011 имкон дод, ки аз канарагирии ҷиддӣ ҳалос шаванд. Ҳисобкуниҳо нишон доданд, ки бузургии ШҶ аз зоҳиран кам шуда ҶМ асосан дар баробари вектори радиус аз Офтоб равона шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** комета 103P/Хартли 2, кометаҳои оилавии Юпитер, шитобҳои ғайриҷозобавӣ, ҷойи фотомарказ, динамикаи мадор.

S.R.PAVLOV, YU.A.CHERNETENKO

## ORBITAL DYNAMICS OF COMET 103P/HARTLEY 2 BASED ON POSITIONAL AND RADAR OBSERVATIONS

In this study we have combined the available positional and radar observations of comet 103P/Hartley 2 in all apparitions with a single orbit. This turned out to be possible due to the determination of non-gravitational accelerations and photocentre offset. RMSE of the observations ( $\sigma$ ) was 0.34 and 0.68 ang-sec. for positional observations. We determined non-gravitational accelerations in five apparitions, however there were significant systematic deviations (O–C) in the positional observations in 2010 from the calculated orbit, which was due to the differences in the center of light and the center of mass of the comet. Accounting for photocentre offset in the observations of 2010-2011 allowed to get rid of deviations. The photocentre offset in observations in this apparition was well defined as a function inversely proportional to the square of the heliocentric distance ( $1/r^2$ ). In the absence of radar observations photocentre offset was not determined. Calculations have shown that the magnitude of non-gravitational accelerations decreases slowly from apparitions to apparitions and photocentre offset is directed mainly along the radius vector from the Sun.

**Key words:** comet 103P/Hartley 2, Jupiter-family comets, non-gravitational acceleration, photocentre offset, orbital dynamics.

### Сведения об авторах:

**Павлов Сергей Романович** – Институт прикладной астрономии РАН, соискатель.  
E-mail: sr.pavlov@iaaras.ru;

**Чернетенко Юлия Андреевна** – доктор физико-математических наук, Институт прикладной астрономии РАН.

УДК 523. 532

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

С.Н.САФАРОВ

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОБСТОЯТЕЛЬСТВ СБЛИЖЕНИЙ  
С ЗЕМЛЕЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ  
(65803) ДИДИМОС И (438908) 2009 ХО**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт астрофизики НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 22.05.2024 г.*

*Вычислены вековые изменения элементов орбит потенциально опасных астероидов (65803) Дидимос и (438908) 2009 ХО за 200 лет (до 2200 года) и установлено количество близких подходов к Земле. Определены моменты и минимальные расстояния сближений, а также теоретические параметры возможного входа объектов в земную атмосферу. С учетом их размеров и структуры построена модель последствий удара. Показана маловероятность столкновений до 2200 года.*

**Ключевые слова:** астероид, орбита, эволюция, метод Эверхарта, сближение, расстояние, радиант.

**Введение**

Настоящая работа является продолжением наших исследований потенциально опасных для Земли астероидов. Это направление современной околоземной астрономии имеет как фундаментальный характер, так и прикладной. Изучение динамических и физических свойств ПОА имеет ключевое значение в решении космогонических и космологических проблем Солнечной системы и, наряду с этим, такие сведения крайне необходимы для решения задач, связанных с астероидно-кометной опасностью [1].

Напомним, что среди астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), имеется группа астероидов размерами свыше 140 м, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или 7.5 млн. км. В международных базах данных они классифицируются как потенциально опасные астероиды (ПОА), число известных на

---

*Адрес для корреспонденции:* Сафаров Сангин Ниёзович. 734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни, 299/5, Институт астрофизики НАНТ. E-mail: safarov.sangin@mail.ru.

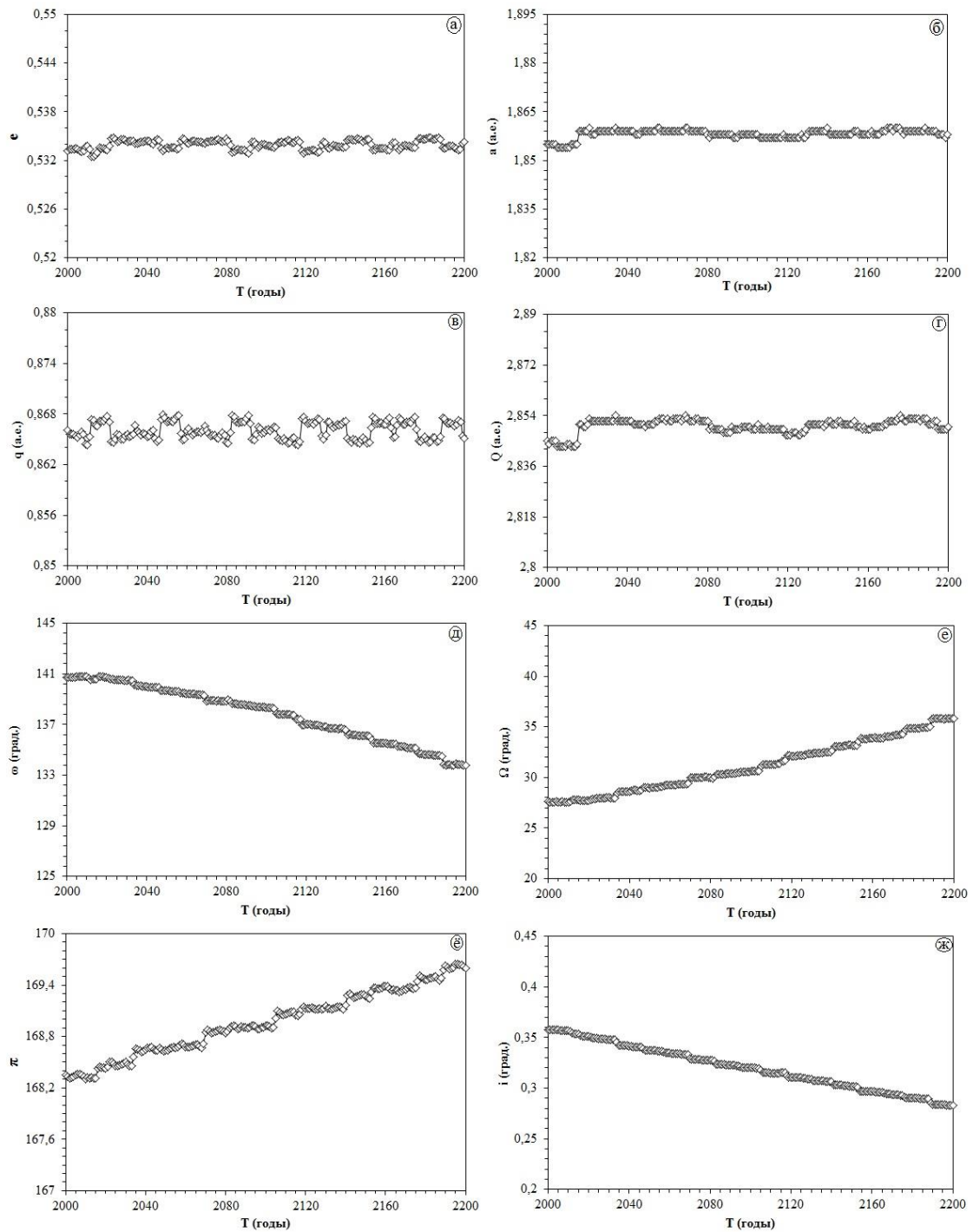
текущий момент ПОА составляет 2413 [2]. Настоящая классификация основана на потенциальной угрозе этих астероидов для Земли из-за возможных вторжений в ее атмосферу. Как известно, столкновение с потенциально опасными космическими телами могут иметь значительные и даже катастрофические последствия для Земли. Примерами таких событий служат Тунгусское событие 1908 г. [3], а также Челябинское явление 2013 г. [4]. Для разработок стратегий предотвращения или смягчения возможных угроз необходимы сведения о динамических и физических свойствах потенциально опасных объектов. Поэтому весьма важно изучение таких тел наблюдательными, теоретическими методами, а также с помощью космических миссий.

Ранее в ГисАО ИА НАНТ нами были проведены наблюдения ПОА (52768) 1998OR<sub>2</sub>, (438908) 2009 ХО и (65803) Дидимос, в результате которых определены или уточнены их динамические и физические свойства [5-7]. Затем мы промоделировали движение ПОА (52768) 1998OR<sub>2</sub> и выявили условия его сближений с Землей в ближайшие 300 лет, а также сделали прогноз последствий его возможного столкновения с Землей [8]. В данной работе, используя разработанный теоретический подход [8], мы представляем результаты модельной оценки условий сближения с Землей ПОА (438908) 2009 ХО и (65803) Дидимос.

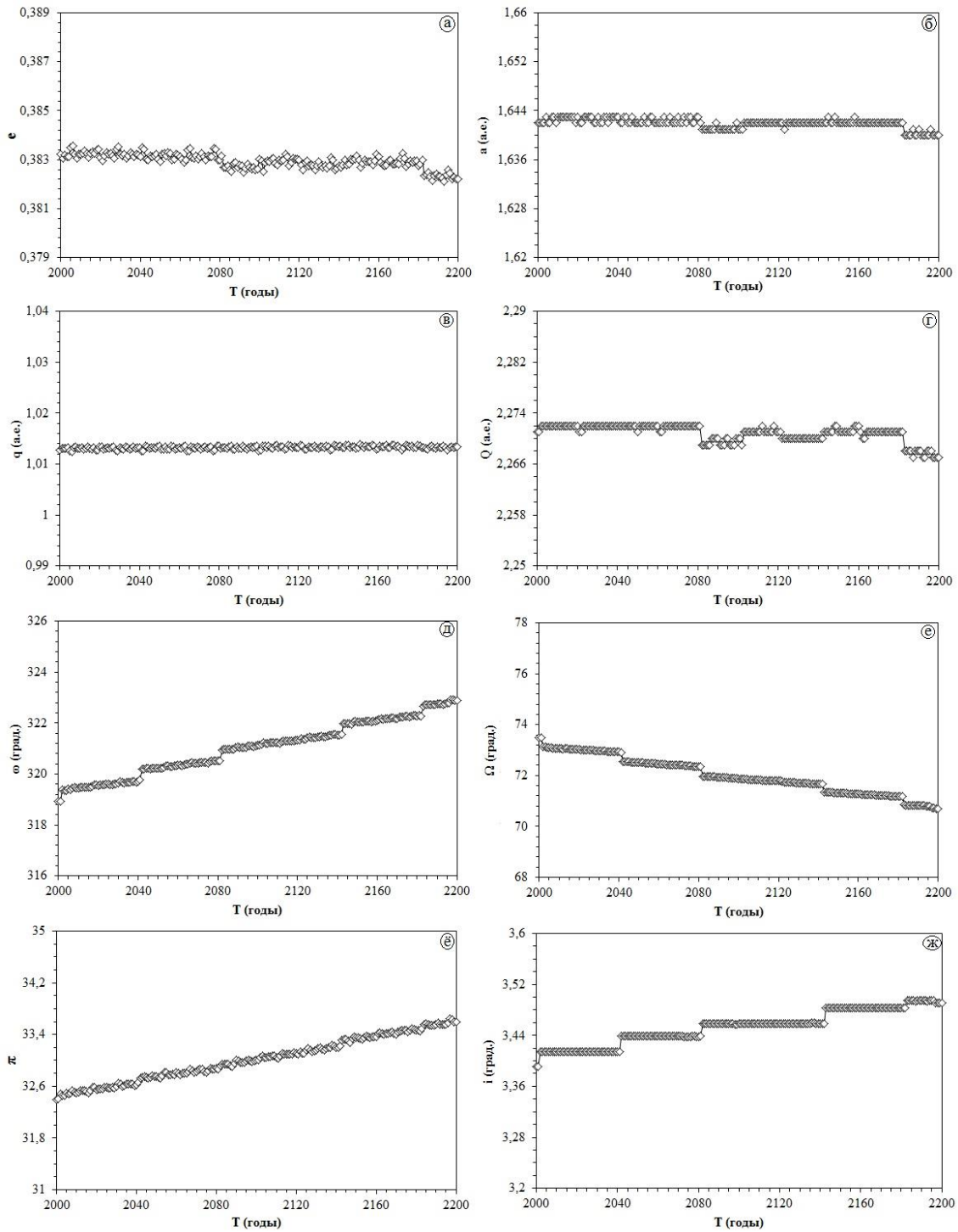
#### **Вычисление эволюции орбит ПОА (438908) 2009 ХО и (65803) Дидимос**

Астероид, сближающийся с Землей (АСЗ), (438908) 2009 ХО был открыт в 2009 г. в обсерватории Ла-Сагра в Испании [9]. Достоверных сведений о размере астероида в базах данных не имеется. С использованием значения абсолютного блеска  $H=20.65$  звездных величин [9] и в предположении оптического альbedo 20% диаметр астероида оценен как 0.24 км. Астероид может сближаться с Землей до расстояний порядка 275 тысяч км (0.001833 а.е.) [9], что, наряду с его размером, стало основанием для включения 2009 ХО в группу ПОА [10].

АСЗ (65803) Дидимос является двойной системой, имеет размер 0.78 км [11] и может сближаться с Землей на расстоянии 0.0403 а.е. (менее пороговых 7.5 млн. км), что явилось основанием для его включения в категорию ПОА. Дидимос был обнаружен в 1996 г. в Национальной обсерватории Китт-Пик в Аризоне, США. Двойная структура астероида была выявлена позже. Анализируя эхо-сигналы, полученные радиотелескопом обсерватории Голдстоун, сделано предположение о бинарности Дидимоса, которое затем подтвердилось анализом оптической кривой блеска, а также радиолокационными изображениями астероида, полученными радиотелескопом Аресибо 23 ноября 2003 г.



**Рис. 1.** Эволюция элементов орбиты ПОА 2009 ХО за период 2000-2200 гг.: а) эксцентриситет, б) большая полуось, в) расстояния перигелия, г) расстояния афелия, д) аргумент перигелия, е) долгота восходящего узла, ё) долгота перицентра, ж) наклонение.



**Рис. 2.** Эволюция элементов орбиты ПОА Дидимос за период 2000-2200 гг.: а) эксцентриситет, б) большая полуось, в) расстояния перигелия, г) расстояния афелия, д) аргумент перигелия, е) долгота восходящего узла, ё) долгота перицентра, ж) наклонение.

Для выявления будущих сближений ПОА (438908) 2009 ХО и (65803) Дидимос с Землёй и оценки условий возможных столкновений мы использовали методику [8]. На

первом этапе вычислена эволюция элементов их орбит на период времени 200 лет, начиная с 2000 г. по 2200 г. При вычислении эволюции, в качестве первоначальных, использованы элементы орбит астероидов из базы данных [9, 12] на эпоху 25.04.24, которые приведены в табл. 1 (в равноденствии 2000.0). Здесь  $M$  – средняя аномалия,  $q$  – расстояния перигелия,  $a$  – большая полуось,  $e$  – эксцентриситет,  $\omega$  – аргумент перигелия,  $\Omega$  – долгота восходящего узла  $i$  – угол наклона орбиты. Эволюция орбит ПОА вычислена методом Эверхарта RADAU19 [13,14] с учетом гравитационных возмущений от больших планет. Как отмечалось, временной интервал численного интегрирования составил 200 лет с выводом результатов с шагом один год.

Таблица 1

Первоначальные элементы орбит ПОА 2009 ХО и Дидимос (J2000.0)

ПОА	$M^o$	$q, a.e.$	$a, a.e.$	$e$	$\omega^o$	$\Omega^o$	$i^o$
2009 ХО	209.752	0.848	1.858	0.544	140.552	27.934	0.349
Дидимос	246.307	1.013	1.643	0.383	319.592	72.987	3.414

Вековые изменения элементов орбит астероидов 2009 ХО и Дидимос: эксцентриситета, большой полуоси, перигелийного расстояния, афелийного расстояния, аргумента перигелия, долготы восходящего узла, долготы перицентра и наклона приведены на рис.1 и 2, соответственно. Как видно, за 200 лет наблюдаются весьма незначительные изменения всех элементов орбит, что указывает на стабильность и предсказуемость движения астероидов в этот период.

### Выявление сближений ПОА 2009 ХО и Дидимос с Землей

По результатам вычисления эволюции орбит можно выявить сближения астероидов с Землей, планетами земной группы, Юпитером и Луной. Изменения взаимных расстояний “астероид – Земля” на промежутке времени в два столетия для ПОА 2009 ХО и Дидимос приведены на рис. 3 и 4. Как видно из этих графиков, имеется достаточно устойчивое поведение расположения объектов относительно Земли, и видны периодические сближения с Землей. Однако тесных сближений (менее порогового значения 0.05 а.е.) для 2009 ХО насчитывается всего два. Это наглядно демонстрирует рис. 5, где тесные сближения приведены в увеличенном масштабе. Видно, что одно из них приходится на 7 мая 2020 г. на расстоянии 0.02268 а.е., самый близкий подход ожидается 7 мая 2096 г. в 14 ч. 10.мин. (UT) на расстоянии 0.01106 а.е. Аналогичный график для Дидимоса приведен на рис.6. У Дидимоса с учетом даты 13 октября 2184 г., когда расстояние от Земли будет чуть больше установленного предела 0.05317 а.е., произойдет 3 тесных сближения с Землей. Очередное тесное сближение астероида с Землей ожидается 20 октября 2062 г. на расстоянии 0.04173 а.е., самый близкий подход ожидается 4 ноября 2123 г. в 5 ч. 42 мин. (UT). Для сравнения на рис. 5 и 6 приведены аналогичные сведения согласно базе данных [9, 12]. Как видно, графики находятся в удовлетворительном согласии между собой, некоторые незначительные

расхождения связаны с различием в первоначальной орбите, использованной для вычисления эволюции.

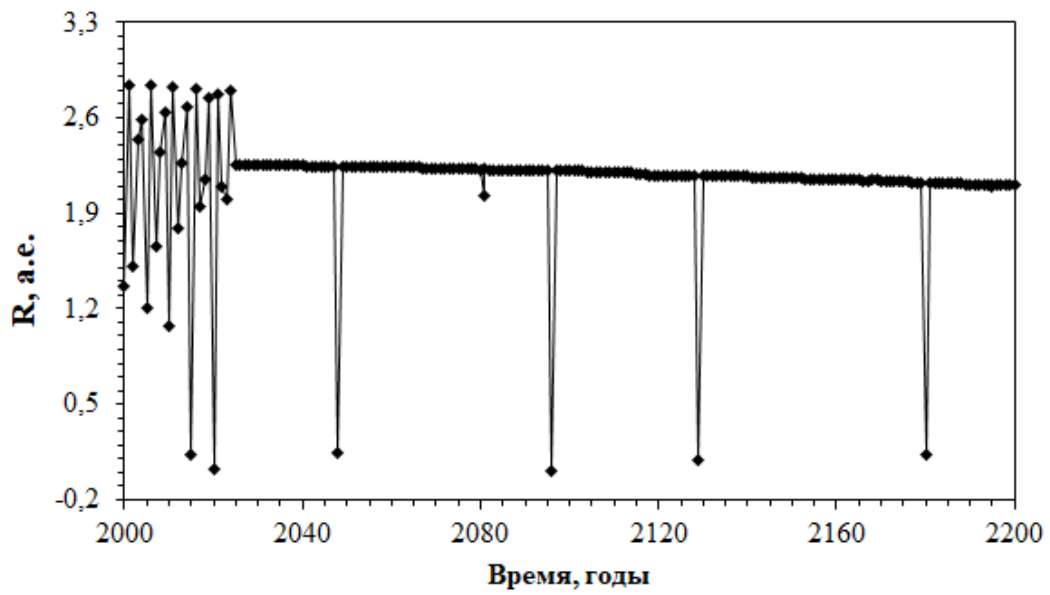


Рис. 3. Результат расчёта изменения расстояний “астероид 2009 XO — Земля” со временем.

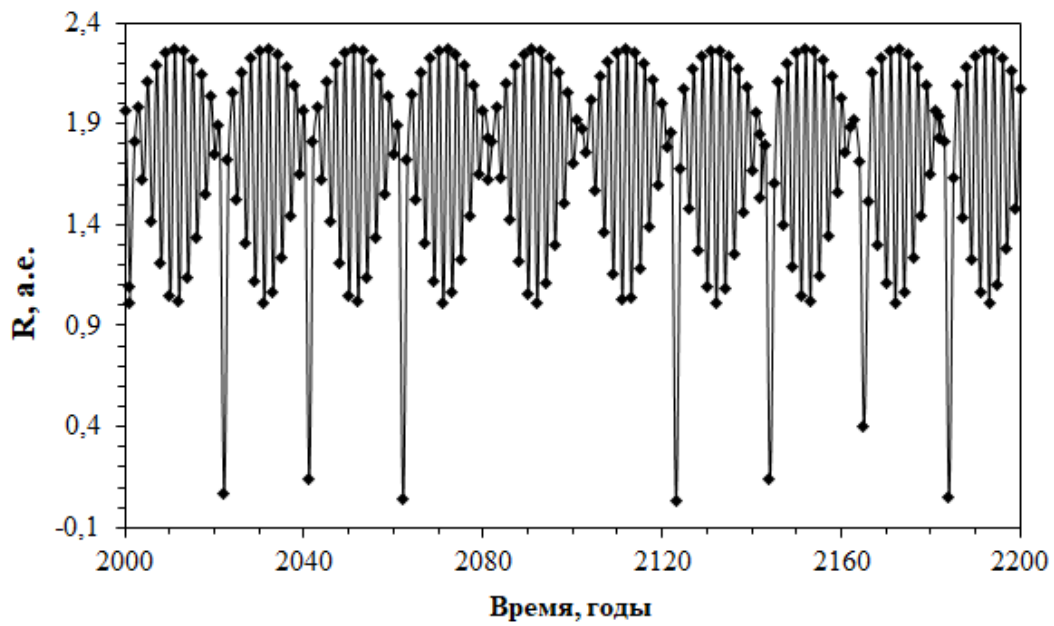


Рис. 4. Результат расчёта изменения расстояний “астероид Дидимос — Земля” со временем.



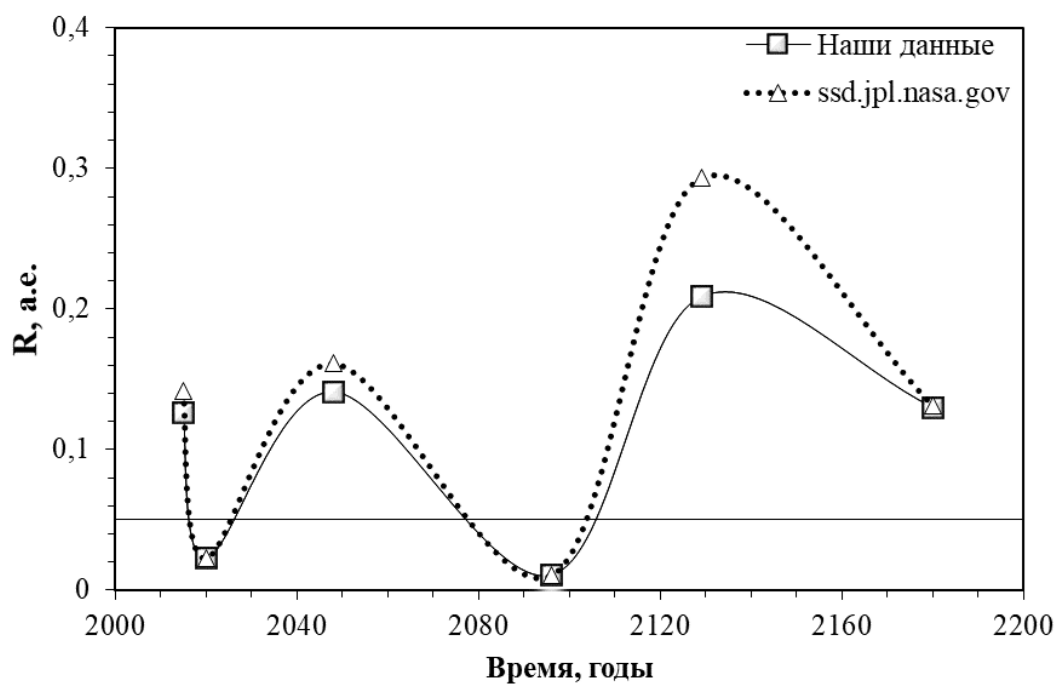


Рис. 5. Тесные сближения ПОА 2009 ХО по нашим данным и [ssd.jpl.nasa.gov](http://ssd.jpl.nasa.gov).

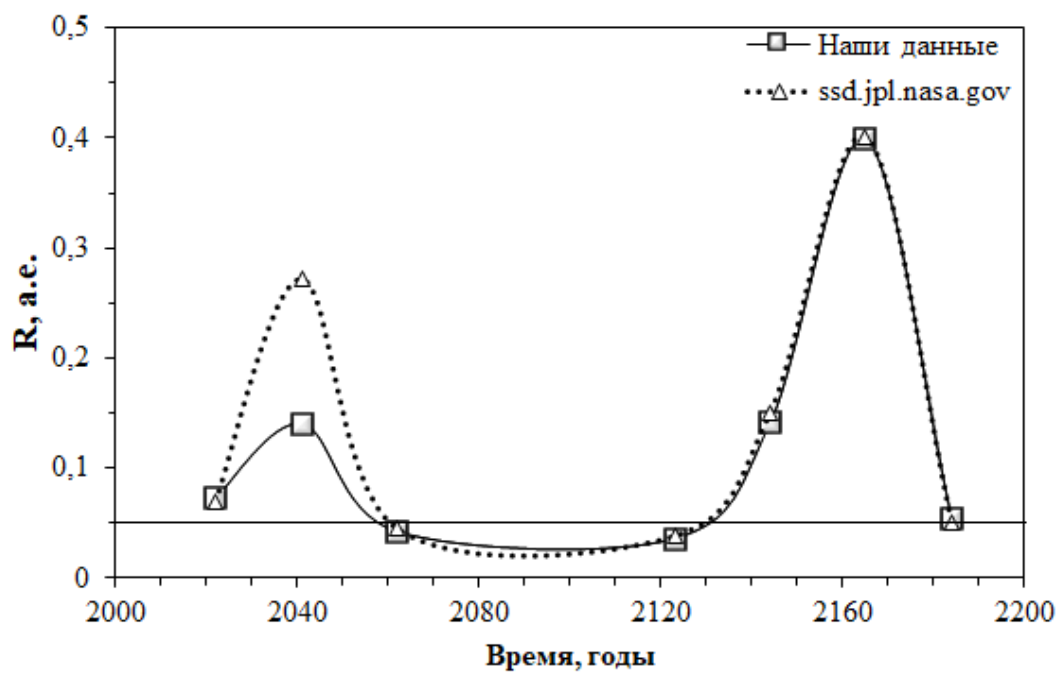


Рис. 6. Тесные сближения ПОА Дидимос по нашим данным и [ssd.jpl.nasa.gov](http://ssd.jpl.nasa.gov).

## Оценка условий возможных столкновений ПОА 2009 ХО и Дидимос с Землёй

Имея набор элементов орбиты астероида в моменты сближений с Землей, мы можем по известным соотношениям [15] вычислить теоретические координаты геоцентрических радиантов, то есть точки на небесной сфере, откуда объект войдет в земную атмосферу, геоцентрическую скорость входа астероида в земную атмосферу, а также долготы Солнца или дату вероятного события. Упомянутые данные ПОА 2009 ХО и Дидимос, вычисленные для моментов их сближений с Землей, приведены в табл. 2 и 3, где самые тесные сближения выделены жирным шрифтом.

Таблица 2

Теоретические элементы орбиты, координаты радианта, скорость и долгота Солнца ПОА (438908) 2009 ХО в моменты сближений с Землей

Дата	a, а.е.	e	q, а.е.	i°	$\Omega^\circ$	$\omega^\circ$	$\alpha^\circ$	$\delta^\circ$	Vg, км/с	$L_0^\circ$
2015 03 04	1.855	0.5329	0.8665	0.353	27.750	140.556	56.5	21.1	9.9	27.75
2020 05 07	1.859	0.5332	0.8677	0.350	27.726	140.699	56.7	21.2	9.8	27.73
2048 01 04	1.859	0.5331	0.8679	0.337	28.989	139.662	57.3	21.2	10	28.99
2096 05 07	1.858	0.5336	0.8664	0.320	30.538	138.354	57.8	21.3	10.2	30.54
2129 01 20	1.857	0.5342	0.8649	0.309	32.327	136.803	58.5	21.3	10.4	32.33
2180 02 24	1.859	0.5345	0.8652	0.290	34.837	134.621	59.7	21.5	10.7	34.84

Таблица 3

Теоретические элементы орбиты, координаты радианта, скорость и долгота Солнца ПОА (65803) Дидимос в моменты сближений с Землей

Дата	a, а.е.	e	q, а.е.	i°	$\Omega^\circ$	$\omega^\circ$	$\alpha^\circ$	$\delta^\circ$	Vg, км/с	$L_0^\circ$
2022 10 04	1.642	0.3832	1.0129	3.414	72.997	319.562	293.6	-37.0	8.2	252.99
2041 09 01	1.642	0.3835	1.0125	3.414	72.907	319.756	293.6	-37.0	8.2	252.91
2062 10 20	1.642	0.3828	1.0133	3.438	72.453	320.331	293.6	-37.2	8.1	252.45
2123 10 30	1.641	0.3828	1.0128	3.458	71.737	321.376	293.6	-37.4	8.0	251.74
2144 12 01	1.642	0.3828	1.0137	3.483	71.346	321.971	293.7	-37.6	8.0	251.35
2165 12 16	1.642	0.3829	1.0133	3.483	71.235	322.178	293.7	-37.7	8.0	251.24
2184 10 13	1.640	0.3823	1.0131	3.495	70.831	322.725	293.7	-37.8	7.9	250.83

Теперь можно теоретически оценить условия возможных столкновений. Если в момент самого близкого подхода 2009 ХО к Земле 7 мая 2096 г. в 4 ч. 18 мин. (UT) в результате каких-либо непредвиденных воздействий, например, гравитационных резонансов с Юпитером, астероид вторгнется в земную атмосферу, то экваториальные координаты точки входа будут следующие: прямое восхождение 57.8°, склонение 21.3°. Этим координатам соответствуют следующие горизонтальные координаты, вычисленные нами по известным формулам перехода от экваториальных к горизонтальным координатам [15]: азимут 29.1° и

зенитное расстояние 115.9°. Геоцентрическая скорость входа составит 15.1 км/с, долгота Солнца 30.5° соответствует дате и моменту сближения.

Во время самого тесного сближения Дидимоса с Землей 30 октября 2123 г. теоретические экваториальные координаты точки входа будут иметь прямое восхождение 293.6° и склонение –37.4°; этим координатам соответствуют следующие горизонтальные координаты: азимут 84.0° и зенитное расстояние 158.1°. Геоцентрическая скорость входа составит 13.7 км/с, долгота Солнца 251.74° соответствует дате 30 октября и моменту 10 ч. 45 мин.

Имея такой прогноз, можно заранее выработать соответствующие превентивные меры для предотвращения столкновения или смягчения последствий возможного удара в случаях, когда вероятность события очень высока.

В таких прогнозах крайне важно знать также точный размер и состав опасного астероида. Поскольку эти данные не для всех ПОА установлены надежно, то и здесь исследователи используют модели для теоретических расчетов последствий столкновений.

С помощью программы Impact Earth [16] мы оценили последствия возможных столкновений ПОА 2009 ХО и Дидимос с Землей. Моделирование события для 2009 ХО основано на использовании начальной высоты 100 км и угла входа 116°, геоцентрической скорости 15 км/с, диаметра 240 м и плотности 3000 кг/м<sup>3</sup> (каменное тело). Смоделированные последствия представлены в табл. 4.

Таблица 4

Модель последствий столкновения ПОА (438908) 2009 ХО с Землей

Энергия до входа в атмосферу	2.44 x 10 <sup>18</sup> Дж или 5.84 x 10 <sup>2</sup> мегатонн в тротиловом эквиваленте
Глобальные изменения в результате удара	Земля теряет незначительную массу. Удар не вызывает заметного изменения наклона земной оси (менее 5 сотых градуса) и не смещает заметно орбиту Земли.
Кратеры	Диаметр и глубина последнего кратера: 2.38 км, 841 м. Диаметр и конечная глубина последнего кратера: 2.97 км и 633 м. Образовавшийся кратер имеет простую форму.
Термические эффекты	При скорости удара 15 км/с испарение происходит незначительно; огненный шар не создается, следовательно, нет повреждений от теплового излучения.
Сейсмические эффекты	Основное сейсмическое сотрясение произойдет примерно через 20 секунд после удара. Магнитуда по шкале Рихтера: 6.3. Повреждения от сейсмического эффекта: незначительный ущерб в зданиях; значительные повреждения с частичным обрушением плохо построенных или плохо спроектированных сооружений.
Выброс	Выброс произойдет примерно через 2 минуты после удара в виде мелкой пыли (300 микрон) и более крупных фрагментов (порядка 2 см).
Воздушный поток	Воздушная волна появится примерно через 5 минут после удара. Пиковое избыточное давление: 5080 Па. Максимальная скорость ветра: 11.7 м/с. Интенсивность звука: 74 дБ (громко, как при интенсивном движении). Описание повреждения: могут разбиться стекла окон.

Моделирование события для Дидимоса основано на использовании начальной высоты 100 км и угла входа 158°, геосцентрической скорости 14 км/с, размера 780 м и плотности 3000 кг/м<sup>3</sup>. Смоделированные последствия представлены в табл. 5.

Таблица 5

Модель последствий столкновения ПОА (65803) Дидимос с Землей

Энергия до входа в атмосферу	7.31 x 10 <sup>19</sup> Дж или 1.75 x 10 <sup>4</sup> мегатонн в тротиловом эквиваленте.
Глобальные изменения в результате удара	Земля теряет незначительную массу. Удар не вызывает заметного изменения наклона земной оси (менее 5 сотых градуса) и не смещает заметно орбиту Земли.
Кратеры	Диаметр и глубина последнего кратера: 8.46 км и 2.99 м. Диаметр и конечная глубина последнего кратера: 11.2 км и 613 м. Образовавшийся кратер имеет сложную форму. Объем кратера 0.595 км <sup>3</sup> .
Термические эффекты	При скорости удара 14 км/с (менее 15 км/с) испарение происходит незначительно; огненный шар не создается, следовательно, нет повреждений от теплового излучения.
Сейсмические эффекты	Основное сейсмическое сотрясение произойдет примерно через 20 секунд после удара. Магнитуда по шкале Рихтера: 7.4. Повреждения от сейсмического эффекта: имеется незначительный ущерб в зданиях хорошей конструкции и проектирования; значительные повреждения с частичным обрушением плохо построенных или плохо спроектированных сооружений. Наблюдается падение заводских труб, колонн, памятников, стен.
Выброс	Выброс произойдет примерно через 3 минуты после удара. Средняя толщина выброшенной пыли и диаметр фрагментов: 4.6 см, 7.1 см.
Воздушный поток	Воздушная волна появится примерно через 5 минут после удара. Пиковое избыточное давление: 43000 Па. Максимальная скорость ветра: 86.6 м/с. Интенсивность звука: 93 дБ (может вызвать боль в ушах). Описание повреждения: Многоэтажные несущие стены рухнут. Деревянные каркасные здания почти полностью рухнут. Стекла окон разобьются. Повалено до 90 процентов деревьев.

### Заключение

Для оценки условий столкновений с Землей потенциально опасных астероидов 2009 ХО и Дидимос вычислена эволюция их орбит на временном интервале с 2000 по 2200 годы. В результате выявлено:

- за 200 лет прогнозируется 6 сближений 2009 ХО с Землей, самый близкий подход на расстоянии 1.65 млн. км ожидается 7 мая 2096 г., у Дидимоса ожидается 7 сближений, из которых самое тесное произойдет 10 октября 2123 г. на расстоянии 5.8 млн. км;

- за исследуемый период орбиты астероидов стабильны, значительных изменений в орбитальных элементах не выявлено, что дает основания говорить о предсказуемости движения;

-получен прогноз условий сближений, определены геоцентрические и горизонтальные параметры и даты возможных столкновений;

- оценены последствия возможных столкновений астероидов с Землей.

Можно заключить, что в ближайшие 200 лет вероятность столкновения ПОА 2009 ХО и Дидимос с Землей невысока. Модель последствий столкновения с Землей свидетельствует о значительном ущербе инфраструктуры в результате удара с этими телами, особенно с Дидимосом. Для улучшения прогноза необходим регулярный мониторинг динамических и физических характеристик астероидов.

Автор выражает благодарность члену – корреспонденту НАН Таджикистана Г.И. Кохировой за ценные советы, обсуждение результатов и помощь в подготовке работы.

Работа поддержана грантом проекта Президентского Фонда фундаментальных исследований, №КД 0123ТJ1535.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, с. 372.
2. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. URL: <https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>, дата обращения 06.05.2024.
3. Бронштэн В.А. Тунгусский метеорит. В кн. «Метеоры, метеориты, метеороиды», гл. 4. – М.: Наука, 1987, 173 с. <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/1/BronstenMMM/Glava4/>.
4. Лобановский Ю.И. Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов. – Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып.7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1497>.
5. Кохирова Г.И., Буриев А.М., Сафаров С.Н. Определение некоторых особенностей потенциально опасного астероида 1998 OR2 по наблюдениям в Таджикистане. – Доклады НАНТ, 2024, т. 66, № 9-10, с. 540-549.
6. Кохирова Г.И., Буриев А.М., Сафаров С.Н., Сатторзода А.А. Динамика и физические особенности потенциально опасного астероида 2009 ХО по наблюдениям в Гиссарской астрономической обсерватории. – Труды ИНАСАН, вып. 2, 2022, том. 7, с. 106-114.
7. Кохирова Г.И., Буриев А.М., Сафаров С.Н. Наблюдения двойного астероида (65803) Дидимос и его динамико-физические характеристики по результатам оптического обзора. – Доклады НАНТ, 2024, т. 67, № 3-4, с. 132-144.
8. Кохирова Г.И., Сафаров С.Н., Хамроев У.Х., Буризода А.М. Моделирование движения потенциально опасного астероида 1998 OR2 и прогноз условий его сближений с Землей. – Изв. НАНТ. ОФМХГТН, №1, 2024, т. 194, с. 32-40.
9. JPL Small-Body Database Browser. URL: [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=438908](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=438908) Дата обращения 06.05.2024.
10. Jet Propulsion Laboratory – CNEOS (Center of Near Earth Object Studies): NEO Earth Close Approaches. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/> Дата обращения 06.05.2024.
11. Naidu S.P., Benner L.A.M., Brozovic M., Nolan M.C., Ostro S.J., Margot J.L., Giorgini J. D., Hirabayashi T., Scheeres D.J., Pravec P., Scheirich P., Magri C., Jao J.S. Radar observations and a physical model of binary near-Earth asteroid 65803 Didymos, target of the DART mission – ICARUS 348 – 2020, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113777>.
12. JPL Small-Body Database Browser. URL: [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=52768](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=52768), дата обращения 06.05.2024.
13. Everhart E. Implicit Single-Sequence Methods for Integrating Orbits. – Celestial Mechanics, 1974, v. 10, pp. 35-55.

14. Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И. Метеорные потоки, астероидов, пересекающих орбиту Земли. – Душанбе: Дониш, 2009, 185 с.
15. Бабаджанов П.Б., Крамер Е.Н. Методика и некоторые результаты фотографических исследований метеоров. – М.: Изд-во АН СССР, 1963, 17 с.
16. Collins, G.S., Melosh, H.J., and Marcus, R.A., Earth impact effects program: a webbased computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. – Meteorit. Planet. Sci., 2005, vol. 40, pp. 817–840.

С.Н.САФАРОВ

**БАҶОДИҶИИ НАЗАРИЯВИИ ОҚИБАТҶОИ НАЗДИКШАВИИ  
АСТЕРОИДҶОИ ЭҶТИМОЛАН ХАТАРНОКИ (65803) ДИДИМОС ВА  
(438908) 2009 ХО БА ЗАМИН**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институти астрофизикаи АМИ Тоҷикистон*

Тағйироти асрии элементҳои мадори астероидҳои эҳтимолан хатарноки (65803) Дидимос ва (438908) 2009 ХО дар давоми 200 сол (то 2200) ҳисоб карда шуда, шумораи наздикшавӣ ба Замин муайян карда шуд. Лаҳзаҳо ва масофаҳои минималии наздикшавӣ, инчунин параметрҳои назариявии ба атмосфераи Замин дохил шудани ҷирмҳо муайян карда шуданд. Бо назардошти андоза ва сохтори онҳо модели оқибатҳои бархурд сохта шудааст. Пешгуии натиҷавӣ, эҳтимолияти ками бархурдро то соли 2200 нишон медиҳад.

**Калимаҳои калидӣ:** астероид, мадор, таҳаввул, усули Эверхарт, наздикшавӣ, масофа, радиант.

S.N.SAFAROV

**THEORETICAL ASSESSMENT OF THE APPROACHES CIRCUMSTANCES  
OF POTENTIALLY HAZARDOUS ASTEROIDS (65803) DIDYMOS AND  
(438908) 2009 XO**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
Institute of Astrophysics, NAS of Tajikistan*

Secular changes in the orbital elements of potentially hazardous asteroids (65803) Didymos and (438908) 2009 XO were calculated for 200 years (up to 2200) and the number of close approaches to the Earth was determined. The moments and minimum distances of approach are determined, as well as the theoretical parameters of the possible entry of objects into the Earth's atmosphere are determined. Taking into account their size and structure, a model of the consequences of the impact was built. The improbability of collisions before 2200 is shown.

**Key words:** asteroid, orbit, evolution, Everhart method, approach, distance, radiant.

**Сведения об авторах:**

**Сафаров Сангин Ниёзович** – PhD докторант ИА НАНТ, Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, младший научный сотрудник Отдела физики комет и астероидов. E-mail: safarov.sangin@mail.ru

УДК 546: 628.16

Специальность: 1.4.1 – Неорганическая химия

Т.Б.ХОЛМАТОВ, И.М.РАХИМОВ, Х.Р.РАХМОНОВ, С.К.КОДИРЗОДА, Р.А.РАХИМОВ  
**ПОЛУЧЕНИЕ КОАГУЛЯНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОД РАЗЛОЖЕНИЕМ  
НЕФЕЛИНОВЫХ СИЕНИТОВ СМЕСЬЮ СОЛЯНОЙ И СЕРНОЙ КИСЛОТ**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт химии им.В.И.Никитина НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 26.04.2024 г.*

*Представлены результаты получения коагулянта для очистки вод разложением нефелиновых сиенитов смесью минеральных кислот. Определены оптимальные условия процесса получения смешанных коагулянтов, содержащих одновременно ионы хлора и сульфата наряду с катионами алюминия и железа.*

**Ключевые слова:** нефелиновые сиениты, коагулянт, соляная кислота, серная кислота, технологическая схема.

Эффективная очистка природных и промышленных сточных вод от взвешенных и коллоидно-дисперсных веществ с применением коагулянтов позволила рационально решить вопрос комплексной переработки минерального сырья, значительно увеличить водные ресурсы, вовлекая в хозяйственную деятельность новые источники водоснабжения, благодаря созданию и внедрению в производство технологических схем с замкнутым водооборотом [1-4].

При очистке воды от взвешенных веществ возникают большие затруднения, обусловленные малым размером частиц и высокой агрегативной и седиментационной устойчивостью системы. Интенсификация этих процессов во многих случаях может быть достигнута за счёт укрупнения частиц в агрегатах под действием коагулянтов и флокулянтов и особенно их смесей. Перспектива возрастающего потребления этих реагентов сохранится и на будущее, благодаря простоте, универсальности и надёжности данного метода.

---

*Адрес для корреспонденции: Холматов Туйчи Бурхонович. 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2, Институт химии НАНТ. E-mail: 988090937@mail.ru*

Разработка рациональных технологических решений и применение новых более эффективных коагулянтов с целью ускорения разделения фаз дисперсных систем при минимальном расходе и стоимости реагентов – проблемы актуальные и важные [5-7].

Применяемые в качестве коагулянтов для очистки воды соли алюминия и железа способны гидролизироваться с образованием хлопьевидного осадка, увлекающего с собой содержащиеся в воде взвешенные вещества и бактерии. Наибольшее распространение получили алюминийсодержащие коагулянты. Используемый для этой цели сульфат алюминия получают преимущественно из гидроксида алюминия, который является дефицитным и дорогостоящим продуктом. В себестоимости сульфата алюминия стоимость сырья составляет 60-80%. В связи с этим, основным направлением научных исследований за последние годы стала разработка новых технологий получения коагулянтов из таких дефицитных и широко распространённых видов природного алюминий-содержащего сырья, как нефелины, каолины, алуниты, низкокачественные бокситы и др. Запасы этого сырья огромны.

Из отечественного сырья более предпочтительными для производства коагулянтов являются нефелиновые руды, поскольку их использование имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами сырья, а именно:

- а) большие масштабы запасов нефелиновых руд, обуславливающие их доступность и низкую стоимость;
- б) достаточно высокая стабильность химического, минералогического и гранулометрического составов;
- в) отсутствие затрат на предварительную подготовку перед подачей в производство (сушка, обжиг и т.п.);
- г) высокие скорости их разложения минеральными кислотами;
- д) возможность получения наряду с коагулянтom других ценных продуктов, например, алюминиевых квасцов.

Именно поэтому многие авторы уделяли основное внимание вопросам технологии производства коагулянтов из нефелиновых руд [4, 6]. Разработаны и испытаны в опытно-промышленных условиях несколько способов получения коагулянтов из нефелиновых сиенитов, каолиновых глин и сиаллитов. При разложении алюмосиликатных руд кислотами в найденных оптимальных условиях образуется раствор, представляющий собой смесь сульфатных или хлоридных солей алюминия, железа, кремния и др., которая используется в качестве коагулянтов для очистки воды [7, 8].

Нами, после изучения литературных источников, касающихся переработки алюминиевых руд, не обнаружены сведения по разложению нефелиновых сиенитов с использованием смеси соляной и серной кислот. Использование смеси минеральных кислот с целью извлечения из их состава смешанных коагулянтов для очистки вод является целью настоящей работы, так как при разложении смесью двух кислот получается коагулянт, содержащий одновременно анионы хлора и сульфата наряду с ионами алюминия и железа.



Технологические процессы для указанной переработки разрабатывались, учитывая физико-химические характеристики нефелинового сиенита, а также его химический состав и минералогические составляющие (табл. 1).

Определено, что в составе нефелинового сиенита имеются значительные количества глинозёма, кроме этого в его состав входят минералы с различными содержаниями Na, K и Fe.

Таблица 1

Содержание компонентов химического и минералогического составов нефелинового сиенита Турпи [6]

Название породы	Содержание компонентов, мас%						
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	п.п.п
Нефелиновые сиениты	22	5.5	53.5	6	7.15	3	2.85
Минералы	Формула					Содержание (мас%)	
Нефелин	(Na,K) <sub>2</sub> O·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>					25.5	
Альбит	Na[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]					25.8	
Ортоклаз, Микроклин	K[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]					35.1	
Биотит	K <sub>2</sub> O·3MgO·(Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O					6.9	
Анортит	CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>					4.6	
Кальцит	CaCO <sub>3</sub>					2.0	
	<i>Итого:</i>					99.9	

Нефелиновый сиенит был исследован с использованием рентгенофазового анализа (РФА) и было показано, что полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в [6].

Нефелиновый сиенит разлагали смесью HCl+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с варьированием их концентраций. В экспериментах использовались кислоты марки “хч”.

Предварительно нефелиновый сиенит подвергали термообработке в муфельной печи в течение 1 ч. при 500-600°C, далее обрабатывали смесью кислот HCl+H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и определяли процентное извлечение из данной руды Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. соединений.

Как показал анализ данного разложения, смесь кислот оказывает большое влияние на извлечение из нефелинового сиенита оксидов. Были проведены опыты по разложению исходного сырья с предварительной его термообработкой и показано, что термообработка оказывает положительное воздействие на извлечение оксидов, то есть извлечение значительно увеличивается.

Результаты разложения нефелиновых сиенитов смесью кислот приведены в табл. 2. В ней также дан сравнительный анализ извлечения полезных компонентов серной и соляной кислотой.

Таблица 2

Сравнительный анализ разложения нефелинового сиенита различными концентрациями смеси кислот  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$

Наименование кислот	Содержание оксидов, %				
	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
HCl - 20% [6]	-	71.8	39.5	98.8	50.8
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 50% [6]	-	-	-	65.45	44.6
HCl+H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - смесь 20+50%	-	-	-	75.5	50.7

Соответственно было исследовано влияние концентрации  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$  на процесс разложения указанных нефелиновых сиенитов. При исследовании меняли концентрацию HCl в пределах от 10 до 30%, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – в пределах от 20 до 70%. Постоянными в данном процессе являлись такие технологические параметры, как температура=98°C, время обработки кислотой 1 ч. Показано, что максимальные извлечения оксидов достигаются при обработке нефелинового сиенита смесью 20% HCl + 50% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Проведён сравнительный анализ переработки нефелинового сиенита без предварительной термообработки и с предварительной термообработкой при 500-600°C, обработка смесью  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$  была проведена в обоих вариантах, полученные результаты оформлены в виде гистограммы на рис.1, и дан сравнительный анализ с другими минеральными кислотами.

Показано увеличение процентного извлечения из нефелинового сиенита оксидов при предварительной термообработке, а также использование смеси кислот  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$ .

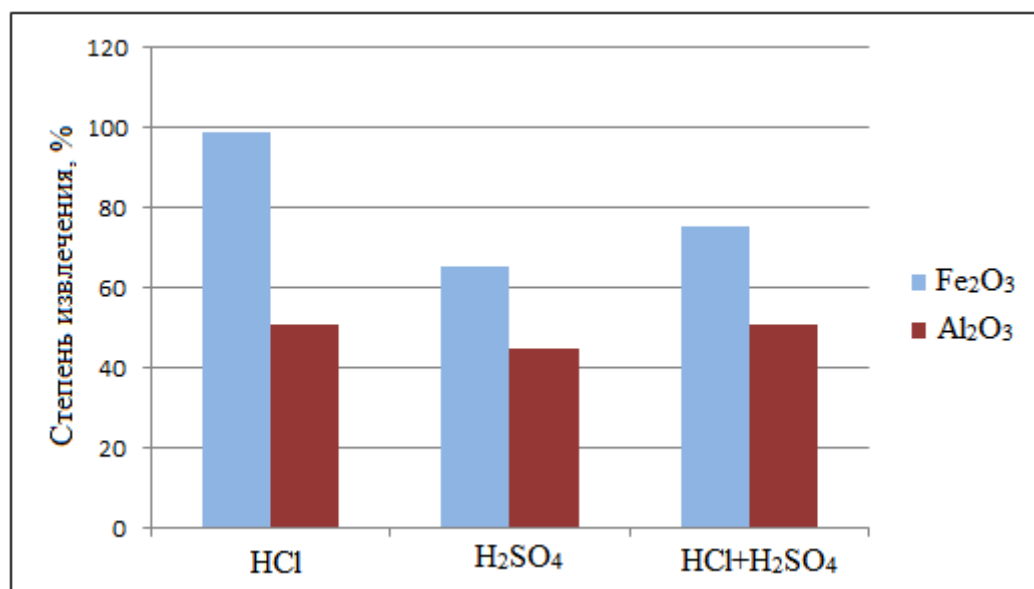
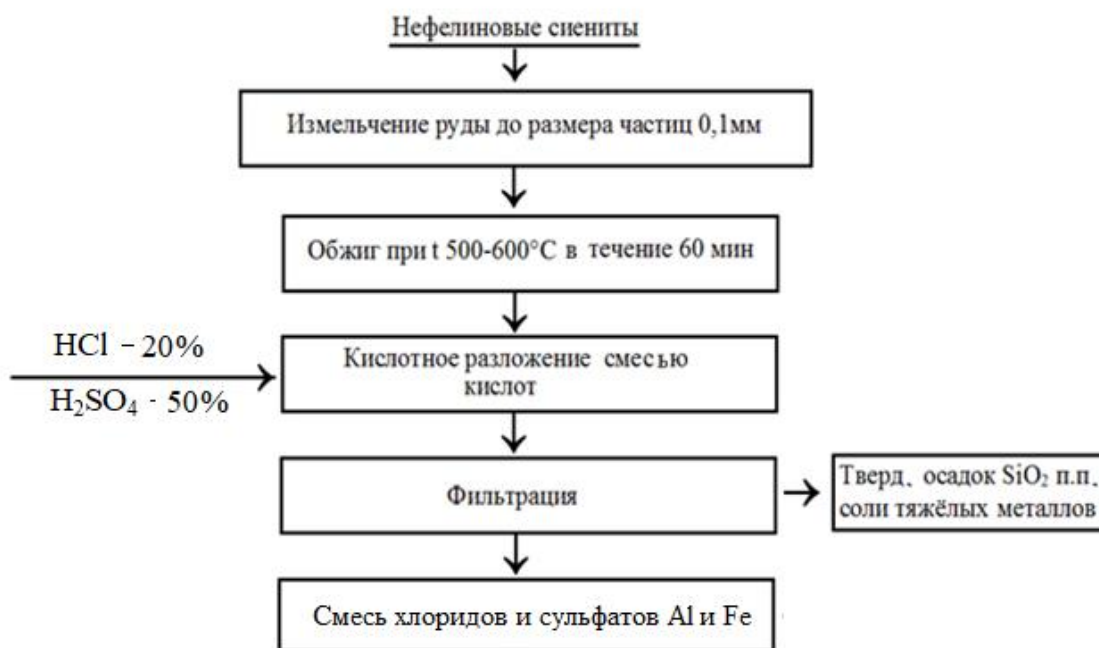


Рис. 1. Влияние минеральных кислот и смеси  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{SO}_4$  на извлечение из нефелинового сиенита оксидов Al и Fe.

На основании проведённых исследований по переработке нефелинового сиенита Турпи с использованием смеси  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$  и предварительной термообработкой проведена разработка технологической схемы для данного процесса (рис. 2). В данной схеме для разложения предложены следующие стадии:

- дробление до фракций 0.1 мм;
- предварительная термообработка в течение 1 ч. при 500-600°C;
- разложение смесью 20%  $\text{HCl} + 50\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ;
- разделение отстаиванием;
- разделение фильтрацией.



**Рис. 2.** Принципиальная технологическая схема разложения нефелинового сиенита Турпи с использованием смеси  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$ .

Таким образом, получен коагулянт для очистки вод разложением нефелиновых сиенитов смесью кислот  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$ , который содержит одновременно ионы хлора и сульфата и катионы железа и алюминия. Найдены оптимальные параметры разложения руды, и разработана принципиальная технологическая схема получения смешанных алюможелезных коагулянтов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Запольский А.К., Мирзоев Б., Сафиев Х. – ДАН Тадж. ССР, 1984, т.27, №11, с.655-658.
2. А.с. 1668300 СССР. Способ переработки низкокачественного глиноземсодержащего сырья. / Б.Мирзоев, Х.Сафиев, А.К.Запольский, У.М.Мирсаидов. 1989.
3. А.с. 1633748 СССР. Способ переработки алюминий-содержащего сырья. Б.Мирзоев, Х.Сафиев, А.К.Запольский, У.М.Мирсаидов. – 1989.

4. Мирсаидов У.М., Сафиев Х.С. Комплексная переработка низкокачественного алюминийсодержащего сырья. – Душанбе: Дониш, 1998, 238 с.
5. А.с. 1733381 СССР. Способ переработки алюмосиликатов / Б.Мирзоев, Х.Сафиев, А.К.Запольский, У.М.Мирсаидов, 1990.
6. Сафиев Х. Физико-химические основы комплексной переработки низкокачественного алюминийсодержащего сырья: автореф. дис... д.х.н. Х.Сафиев. – Душанбе, 1997, 50 с.
7. Бобоев Х.Э., Рузиев Дж.Р., Сафиев Х., Кутенец В.А. – ДАН РТ, 1995, т.35, №3-4, с.46-50.
8. Назаров Ш.Б., Бобоев Х.С., Ахмадов А.Ш. – Изв. АН РТ, 2017, №4(161), с.71-79.

Т.Б.ХОЛМАТОВ, И.М.РАҶИМОВ, Х.Р.РАҲМОНОВ, С.К.ҚОДИРЗОДА, Р.А.РАҲИМОВ

**ҲОСИЛ НАМУДАНИ КОАГУЛЯНТ БАРОИ ТОЗА НАМУДАНИ ОБҲО  
ТАРИҚИ ТАҶЗИЯИ СИЕНИТҲОИ НЕФЕЛИНӢ БО ОМЕХТАИ  
КИСЛОТАҲОИ ХЛОРИД ВА СУЛФАТ**

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,  
Институту химияи ба номи В.И.Никитини АМИ Тоҷикистон*

Натиҷаҳои ҳосил намудани коагулянт барои тоза намудани обҳои тариқи таҷзияи сиенитҳои нефелинӣ бо омехтаи кислотаҳои хлорид ва сулфат пешниҳод карда шудаанд. Шароити оптималии равандҳои ҳосилкунии коагулянтҳои омехта, ки дар ҳуд ионҳои хлор ва сулфат доранд, дар қатори катионҳои алюминий ва оҳан муайян карда шуданд.

**Калимаҳои калидӣ:** сиенитҳои нефелинӣ, коагулянт, кислотаи хлорид, кислотаи сулфат, нақшаи технологӣ.

T.B.KHOLMATOV, I.M.RAKHIMOV, Kh.R.RAHMONOV,  
S.K.KODIRZODA, R.A.RAHIMOV

**OBTAINING A COAGULANT FOR WATER PURIFICATION  
BY DECOMPOSITION OF NEPHELINE SYENITES WITH A MIXTURE  
OF HYDROCHLORIC AND SULFURIC ACID**

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
V.I.Nikitin Institute of Chemistry, NAS of Tajikistan*

The results of obtaining a coagulant for water purification by decomposition of nepheline syenites with a mixture of mineral acids are presented. The optimal conditions for the process of obtaining mixed coagulants containing both chlorine and sulfate ions along with aluminum and iron cations have been determined.

**Key words:** nepheline syenites, coagulant, hydrochloric acid, sulfuric acid, technological scheme.

**Сведения об авторах:**

**Холматов Туйчи Бурихонович** – докторант PhD, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: 988090937@mail.ru

**Рахимов Илхомиддин Мирзоевич** – канд. тех наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, заведующий лабораторией комплексной переработки минерального сырья и промышленных отходов. E-mail: rahimzod\_74@mail.ru

**Рахмонов Холназар Рахмоналиевич** - Докторант PhD, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: kholnazarrahmonov9@gmail.com

**Қодирзода Субҳони Қурбон** – Докторант PhD, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: 208858558@mail.ru

**Рахимов Рамазон Абдурахмонович** – Магистрант, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ. E-mail: ramason.r@gmail.com

УДК 547.7

Специальность: 1.4.3. Органическая химия

Р.О.РАХМОНОВ, Ю.ХОДЖИБАЕВ, Ш.С.ШАРИПОВ, Б.Ф.САФАРОВ, М.Ф.ХОЛИКОВ

**СИНТЕЗ ИМИДАЗО[2,1-В][1,3,4]-ТИАДИАЗОЛОВ И ИЗУЧЕНИЕ  
ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*Национальная академия наук Таджикистана,  
Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана*

*Поступила в редакцию 17.04.2024 г.*

*Путем реакций электрофильного и нуклеофильного замещения функционализованы 2-бром-6-(п-бромфенил)- и 2-[2-(алкилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазолов молекулярным бромом, алкиламино-, морфолинометилирования по Манниху. Установлено, что введенные заместители взаимодействуют с углеродом 5-го положения имидазо-тиадиазольного кольца. Проведен анализ спектров ИК и ПМР в синтезированных гетероциклах.*

**Ключевые слова:** 2-бром-6-(п-бромфенил)имидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазол, 2-[2-(алкилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазол, реакция Манниха, бромирование, аминометилирование, валентные колебания, химический сдвиг.

Использование реакции электрофильного замещения, а также реакции Манниха для получения производных имидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазолов дает хорошие выходы в синтезе производных имидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазолов. Известно, что производные имидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазолов обладают широким спектром фармакологической активности, благодаря чему находят важное применение в качестве коммерчески доступных лекарственных препаратов и в качестве строительных блоков для создания более сложных гетероциклических структур, а также при конструировании соединений, проявляющих биологическую активность [1-9].

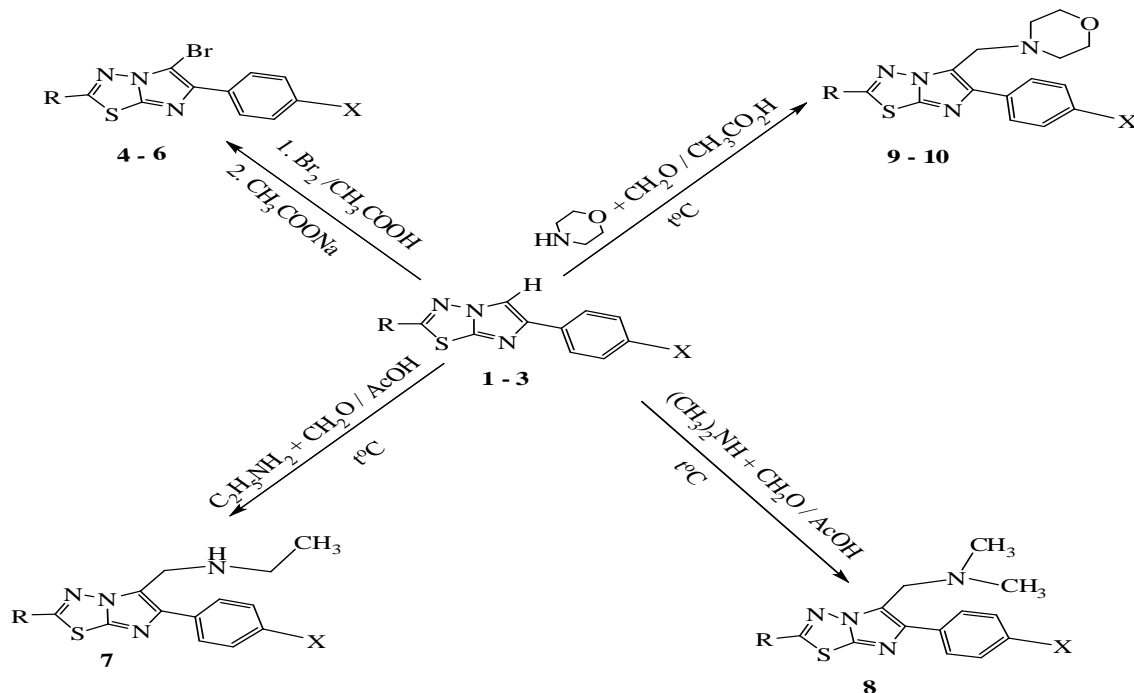
Расширение границ применимости реакции электрофильного замещения и реакции Манниха в ряду имидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазолов с использованием новых доступных и эффективных реагентов открывает возможности получения полизамещенных тиадиазолов.

---

*Адрес для корреспонденции:* 734063, Республика Таджикистан, Душанбе, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, ул. Айни 299/2. E-mail: r-rahmonov@mail.ru.

В настоящей работе была исследована реакция бромирования и аминотетирования 2-R-6-X-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазола (**1-3**) с целью выявления факторов, влияющих на хемоселективность и региохимию процесса, а также выяснения синтетических возможностей реагента и перспективы его использования для синтеза тиадиазолов.

Бромирование 2-R-6-X-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазола (**1-3**) молекулярным бромом проводили в среде ледяной уксусной кислоты при комнатной температуре, варьируя соотношение реагентов. Все продукты реакций были выделены в индивидуальном виде методом колоночной хроматографии и охарактеризованы ИК и ПМР  $^1\text{H}$  спектрами.



R =  $\text{CH}_3\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ - (1, 4, 11);  $\text{C}_2\text{H}_5\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$  (2 - 5, 12); R = Br (3, 6, 9 - 10);  
 $\text{R}_1 = \text{H}$  и  $\text{R}_2 = \text{C}_2\text{H}_5$  (7);  $\text{R}_1 = \text{R}_2 = \text{CH}_3$  (8); X = H (1 - 2, 4 - 5, 9 - 10), Br (3, 6, 7 - 8).

Проведено аминотетирование X-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазолов **1-3** в условиях реакции Манниха. Реакции **1-3** с этиламино, диметиламино и морфолином в присутствии формальдегида и с добавлением уксусной кислоты протекали при кипячении в изопропиловом спирте в течение 5 часов. В результате синтезированы с хорошим выходом (53-70%) соединения (**7-10**). Аминотетирование имидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазолов (**1-3**) проходит через иминиевые соли, образующиеся из формальдегида и аминов [10].

Исследование реакций бромирования и аминотетирования фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазолов **1-3** показало, что благодаря повышенной плотности электронов в 5-ом положении данных гетероциклов открывается взаимодействие с другими электрофильными реагентами.

**ИК-спектры поглощения.** Структуры полученных соединений **4-10** установлены физико-химическими методами анализа. В ИК-спектре [11], кроме общей полосы

поглощения, характерной для соединений **1-3**, в соединениях **4** и **6** имеются полосы поглощения в области 500 и 532  $\text{см}^{-1}$ , подтверждающие образование связи C(5)-Br.

По сравнению с **3** в ИК-спектрах соединений **7-10** полоса поглощения валентных колебаний сдвинута в сторону низкочастотного поля, так как для соединений **7** и **8** частота поглощения C-S-C – триадиазольного фрагмента, C=N - имидазотиадиазольного фрагмента и C=C - имидазольного фрагмента полоса поглощения проявлена в области 687 - 689, 1648 - 1656, 1542 - 1546 и 1479 - 1483  $\text{см}^{-1}$ . А для соединений **7** и **8** частота поглощения для C-Br и C=N-имидазотиадиазольного фрагмента и C=C-имидазольного фрагмента проявлена в области 686-684, 1646-1597, 1540-1531 и 1477-1471  $\text{см}^{-1}$ . Характерная полоса поглощения C-S-C-триадиазольного фрагмента проявлена в области 693-705  $\text{см}^{-1}$ . Для 5- $\text{CH}_2\text{-NH-C}_2\text{H}_5$ -группы полосы деформационных колебаний  $-\text{CH}_2$ -группы обнаружены в средней интенсивности (1475-1340  $\text{см}^{-1}$ ), а в области 3384  $\text{см}^{-1}$  для NH и в интенсивном поле проявляют симметричный тип колебания для  $\text{CH}_3$  при 1345  $\text{см}^{-1}$ .

Также в ИК-спектре соединений **9** и **10** обнаружены полосы поглощения в области 1424 и 1443  $\text{см}^{-1}$ , характерные для  $\text{CH}_2$ -морфолинового фрагмента. Полосы поглощения в области 1072 и 1065  $\text{см}^{-1}$ , свидетельствуют о наличии C-O-C морфолина. Наличие деформационных колебаний фенильной группы обнаружено в области 776 и 741  $\text{см}^{-1}$ .

**$^1\text{H}$  ЯМР спектр.** В ЯМР  $^1\text{H}$  спектре соединений **1-3** имеются синглеты протонов метиновый группы от C(5)-H при 7.50, 7.47 и 7.80 м. д. (миллион доль).

В  $^1\text{H}$  ЯМР спектрах соединений **4-6** не обнаружены протоны C(5)-H-го положения, которые имеются в соединениях **1-3**. Однако, в соединениях **4-6** обнаружены только протоны  $\text{CH}_3\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ -,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SO}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ - и незамещенного и замещенного бензола в области 2.07 – 3.69, 1.93 – 3.60 и 7.56-7.88 и 7.56-7.88 м.д.

В спектре  $^1\text{H}$  ЯМР соединения **7**, содержащего идентичные экзофункциональные группы у атомов углерода C-5 и C-6, обнаружены сигналы трех типов протонов: синглет метиленовых протонов при 4.19 м. д. (2H, s,  $\text{CH}_2$ ), уширенный синглет NH протона в области 8.03 м. д. (1H, s NH), триплет  $\text{CH}_3$  протона при 1.39 м. д. (3H,  $\text{CH}_3\text{CH}_2$ ), дублет метиленового протона при 1.83 м. д. (2H,  $\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) и протоны замещенных ароматических ядер в виде дублетов в области 7.51-7.67 м. д.

Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  соединения **8** характеризуется наличием сигналов системы  $-\text{CH}_2\text{-N}(\text{CH}_3)_2$ – в области 4.31 м. д. (d, 2H,  $\text{CH}_2$ ), синглетов метильных протонов в области  $\delta$  2.83 м. д. (6H,  $\text{CH}_3$ ). В  $^1\text{H}$  ЯМР спектре соединения **8** присутствие двух узких синглетов метиленовых протонов характерно для протонов *para*-бромфенильной группы в области  $\delta$  7.81-7.41 для *o*-CH и *m*-CH.

В ЯМР  $^1\text{H}$  спектрах имидазо[2,1-*b*][1,3,4]-триадиазолов **9** и **10** имеются сигналы протонов метиленовой группы при 3.49 м. д. (2H,  $\text{CH}_2$ , с.), 3.48 м. д. ( $\alpha, \alpha'$  4H,  $\text{NCH}_2$ ), 3.53 м. д. ( $\beta, \beta'$ , 4H,  $\text{OCH}_2$ ) и 3.48 м. д. (2H,  $\text{CH}_2$ , с.), 3.51 м. д. ( $\alpha, \alpha'$  4H,  $\text{NCH}_2$ ), 3.54 м. д. ( $\beta, \beta'$ , 4H,  $\text{OCH}_2$ ).



Таким образом, из возможных двух центров электрофильного замещения в соединениях **1**, **2** и **3**: имидазотиадиазольного и X-бензольного кольца в замещение вступает у атома имидазотиадиазольного C(5)-H соединений **2a**, **2b**, **3a** и **3b**. Следовательно, электронная плотность у C(5) больше, чем у бензольного кольца, то есть гетероциклический C(5)-H более реакционно способный, чем бензольный фрагмент.

Проведенное исследование показало, что реакции бромирования молекулярным бромом в среде ледяной уксусной кислоты и аминотилирование **1-3** протекают хемо- и региоселективно, и с высокими выходами приводят к образованию соответствующих 2,5-дибром- и 5-бром-2-[2-(алкилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-b][1,3,4]-тиадиазола (4 - 5), 2,5-дибром-6-(4-фенил)имидазо[2,1-b][1,3,4]-тиадиазола (6), N-((2-бром-6-(4-бромфенил)имидазо[2,1-b][1,3,4]тиадиазо-5-ил)метил)этанамин (7), N,N-((2-бром-6-(4-бромфенил)-имидазо[2,1-b][1,3,4]тиадиазо-5-ил)метил)диметиламина (8) и 2-(2-(алкилсульфонил)этил)-5-(морфолин-4-илметил)-6-фенилимидазо-[2,1-b][1,3,4]тиадиазолов (**9-10**). Установлено, что из двух возможных центров электрофильного замещения в соединениях **1-3** (имидазольного фрагмента и бензольного кольца) замещение происходит у углерода 5-го положения имидазольного фрагмента, а атомы водорода бензольного кольца не участвуют в реакции. Следовательно, реакционная способность гетероциклического фрагмента больше, чем у бензольного кольца.

### Экспериментальная часть

ИК-спектры записаны в виде кристаллического образца на спектрометре Perkin Elmer Spectrum 65 FT-IR, (вазелиновое масло). ЯМР  $^1\text{H}$  спектры полученных соединений записаны прибором Bruker при 600 MHz, ( $\delta$ , м.д., (J, Гц) в хлороформе дейтерированный –  $\text{CDCl}_3$ , диметилсульфоксида дейтерированный  $(\text{CD})_3\text{SO}$ , - DMSO,  $\text{D}_6$ ), внутренний стандарт - гексаметилендисилоксан. Элементный анализ полученных соединений проведён в микроаналитической лаборатории Университета L'Aquila в Италии. Температура плавления определялась на микронагревательном столике «Voetius». Контроль над ходом реакции и чистотой полученных соединений осуществляли методом ТСХ на пластинке Silufol UV-254 с проявлением парами йода.

**2-[2-(Метилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо-[2,1-b][1,3,4]тиадиазола (2) синтезирован по [13] 1.** Выход 80 %, т.пл. 118-120°C (из изопропилового спирта), лит. т.пл. 118-120°C. ИК-спектр (тонкий слой),  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 695 (C-S-C), 1122, 1300 ( $\text{SO}_2$ ), 955-1245 (Ar). Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  (600 МГц, DMSO,  $\text{D}_6$ ),  $\delta$ , м. д., (J, Гц): 2.64 (t, 3H, J=7.0,  $\text{CH}_3$ ); 3.33 (2H, д, J=0.61,  $\text{CH}_2$ ); 3.55 (2H, кв, J=0.61,  $\text{CH}_2$ ); 7.43 (H, м J=7.0, o-C-H); 7.49 (H, м J=7.0, m-C-H); 7.29 (H, м J=7.0, p-C-H), 8.64 (с, H, N-H).

**2-[2-(Этилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-b][1,3,4]-тиадиазола (2) синтезирован по [13].** Выход 83 %, т.пл. 196-198°C (из изопропилового спирта), лит. 196-198°C. ИК-спектр (тонкий слой),  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 697 (C-S-C), 1122, 1300 ( $\text{SO}_2$ ), 772, 955-1245 (Ar). Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  (600 МГц, DMSO,  $\text{D}_6$ ),  $\delta$ , м. д., (J, Гц): 2.29 (t, 3H, J=7.0,  $\text{CH}_3$ ); 3.17 (2H, д, J=0.61,  $\text{CH}_2$ ); 3.34 (2H, д, J=0.61,  $\text{CH}_2$ ); 7.44 (H, м J=7.0, o-C-H); 7.42 (H, м J=7.0, m-C-H); 7.31 (H, м J=7.0, p-C-H), 8.74 (с, H, N-H).

**Синтез 2-бром-6-(4-бромфенил)имидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазола (3).** 1.8 г (0.01 моль) 2-бром-5-амино-1,3,4-тиадиазола помещают в 40 мл *n*-бутанола. Затем при перемешивании добавляют 2.78 г (0.01 моль) *n*-бромфенацилбромистый. Реакционную смесь при перемешивании кипятят в течение 7-8 часов, охлаждают и нейтрализуют 0.82 г (0.01 моль) ацетатом натрия. Выпавший осадок отфильтровывают, промывают водой и кристаллизуют из смеси ДМФА-этанола (2:3). Выход 2.62 г (73%). Т.пл.=199-200°C.

ИК-спектр,  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 1655 (C=N), 1518 (C=N), 1493 (C=C), 698 (C-S-C), 749 (C-Br)  $\text{cm}^{-1}$ ;  $^1\text{H}$ -ЯМР спектры:  $\text{CDCl}_3$ , 7.53 (H, CH- Ph-m), 7.67 (H, CH Ph-o), 7.95 (s, 1H, CH-5).

**5-Бром-2-[2-(метилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазола (4).** К смеси 2.92 г (0.01 моль) 2-(2-метилсульфонил)этил-6-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазола 1a в 15 мл уксусной кислоты приливают раствор 1.6 г (0.01 моль) брома в 3 мл уксусной кислоты. Реакционную смесь перемешивают 60 минут при комнатной температуре. Затем при перемешивании добавляют 82 мг (1 ммоль) ацетата натрия и выпавшие осадки отфильтровывают. Осадок 4 тщательно промывают водой, высушивают на воздухе и перекристаллизуют из этанола. Выход 4, 3.05 г (79 %), бесцв. крист, т. пл. 138-140°C.  $R_f=58$  (Silufol, UV-254, (дибутиловый эфир-бутанол-1 (2:1); 138-140°C. Найдено, %: C 38.28; H 2.96.  $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{BrN}_4\text{O}_2\text{S}_2$ . Вычислено, %: C 40.41; H 3.11.

ИК-спектр (тонкий слой),  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 500 (C-Br), 631, 770 (Ar), 630 (C-S-C), 1115, 1328 ( $\text{SO}_2$ ). Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  (600 МГц,  $\text{DMSO}$ ,  $\text{D}_6$ ),  $\delta$ , м. д., (J, Гц): 3.02 (t, 3H,  $J=7.0$ ,  $\text{CH}_3$ ); 3.61 (2H, кв,  $J=0.61$ ,  $\text{CH}_2$ ); 3.15 (2H, д,  $J=0.61$ ,  $\text{CH}_2$ ); 7.94 (H, м  $J=7.0$ , о-С-Н); 7.44 (H, м  $J=7.0$ , м-С-Н); 7.36 (H, м  $J=7.0$ , п-С-Н).

**5-Бром-2-[2-(этилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазола (5).** К раствору 3.09 г (0.01 моль) 2-(2-этилсульфонил)этил-6-фенилимидазо-[2,1-*b*][1,3,4]-тиадиазола 2 в 20 мл уксусной кислоты добавляют раствор 1.6 г (0.01 моль) брома в 3 мл. уксусной кислоты. Через 60 мин к раствору выливают 82 мг (1 ммоль) ацетата натрия в 20 мл воды. Выпавший осадок 5 отфильтровывают, тщательно промывают водой, высушивают на воздухе и перекристаллизуют из пропанола-2. Выход 5, 3.12 г (78 %), бесцв. крист, т. пл. 128-130°C.  $R_f=52$  (Silufol, UV-254, (дибутиловый эфир-бутанол-1 (2:1); Найдено, %: C 41.88; H 2.36.  $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{O}_2\text{S}$ . Вычислено, %: C 42.00; H 3.50.

ИК-спектр (тонкий слой),  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 532 (C-Br), 631, 696 (Ar), 630 (C-S-C), 1115, 1328 ( $\text{SO}_2$ ). Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  (600 МГц,  $\text{DMSO}$ ,  $\text{D}_6$ ),  $\delta$ , м. д., (J, Гц): 1.93 (t, 3H,  $J=7.0$ ,  $\text{CH}_3$ );  $\text{CH}_3$ ); 3.52 (2H, д,  $J=0.61$ ,  $\text{CH}_2$ ); 3.13 (2H, кв,  $J=0.61$ ,  $\text{CH}_2$ ); 3.58 (2H, кв,  $J=0.61$ ,  $\text{CH}_2$ ); 7.99 (H, м  $J=7.0$ , о-С-Н); 7.47 (H, м  $J=7.0$ , м-С-Н); 7.20 (H, м  $J=7.0$ , п-С-Н).

**Синтез 2,5-дибром-6-(4-бромфенил)имидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазола (6).** Выход 3.5 г (80%). Т.пл.=142-143°C. Перекристаллизовывают из смеси ДМФА-этанола (2:3). ИК-спектр,  $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ : 1585 (C=N), 1518 (C=N), 1490 (C=C), 734 (C-S-C), 674 и 712 (2-С-Br и 5-С-Br)  $\text{cm}^{-1}$ .  $^1\text{H}$ -ЯМР спектры:  $\text{CDCl}_3$ ,  $\delta$  7.87 (d,  $J = 8.6$  Hz, 1H), 7.53 (d,  $J = 8.5$  Hz, 1H).

**Синтез N-((2-бromo-6-(4-бромфенил)имидазо[2,1-*b*][1,3,4]тиадиазо-5-ил)метил)этанамина (7).** К раствору 3.59 г (0.01 моль) соединения 2 в 15 мл этанола добавляют смесь 0.01 моль формальдегида (1 г 37%-й раствор формалина), 0.45 г (0.01 моль) этиламина и 2-3 капли уксусной кислоты. Смесь перемешивают 35 мин, затем кипятят с

обратным холодильником в течение 6-7 ч. Выпавший при охлаждении осадок отфильтровывают. Выход 2.66 г (64%). Бесцветные кристаллы (из этанола).  $T_{пл.} = 164-165^{\circ}C$ .

ИК-спектр,  $\nu$ ,  $cm^{-1}$ : 686 (C-Br), 1646 (C=N-гиадиазольный фрагмент), 1540 (имидазольный фрагмент), 1477 (C=C-имид. фрагм.), 693 (C-S-C) 1200, 1181, 1107, 937, 934, 1080 (пара-бромфенильной групп), 3384  $cm^{-1}$  (NH), 1345 (CH<sub>3</sub>), 1475-1340 (CH<sub>2</sub>-группы), 1027 (C-N).

<sup>1</sup>H-ЯМР спектры: Спектры ЯМР <sup>1</sup>H (600 МГц, CDCl<sub>3</sub>),  $\delta$ , м. д.: 4.19 м. д. (2H, CH<sub>2</sub>), 8.03 м. д. NH, 1.39 м. д. (3H, CH<sub>3</sub>), 2.85 м. д. (2H, CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>). 7.51-7.67 (*n*-Br-C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>).

**2-[2-(Метилсульфонил)этил]-5-(морфолин-4-илметил)-6-фенилимидазо-[2,1-*b*][1,3,4]гиадиазола (8).** К смеси 2.95 г (0.01 моль) соединения 1, 11 ммоль (1 г 40% -ный раствор формалина) формальдегида, и 2-3 каплю уксусной кислоты в 18 мл изопропанола приливают 0.89 г (0.01 моль) морфолина в 2 мл изопропанола. Реакционную массу перемешивают при комнатной температуре в течение 20 мин, затем при нагревании в течение 6 ч, далее реакционную массу упаривают до 15 мл, охлаждают, выделившийся осадок отфильтровывают, промывают водой, высушивают на воздухе и перекристаллизуют из этанола. Выход 8, 2.75 г (78 %), бесцв. крист, т. пл. 164-166°C.  $R_f=66$  (Silufol, UV-254, дибутиловый эфир-изопропанол (5:1). Найдено, %: C 51.74; H 4.89. C<sub>17</sub>H<sub>20</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>S<sub>2</sub>. Вычислено, %: C 52.04; H 5.10. ИК-спектр (тонкий слой),  $\nu$ ,  $cm^{-1}$ : 758-777 (Ar), 692 (C-S-C), 1165, 1346 (SO<sub>2</sub>), 1420, 1452 (C-N-морф), 1072 (C-O морф.). Спектры ЯМР <sup>1</sup>H (600 МГц, DMSO, D<sub>6</sub>),  $\delta$ , м. д., (J, Гц): 2.07 (с, 3H, CH<sub>3</sub>); 3.11 (2H, д, J=0.61, CH<sub>2</sub>); 3.48 (2H, с, CH<sub>2</sub>); 3.51 ( $\alpha,\alpha$ , 4H, с, CH<sub>2</sub>); 3.54 ( $\beta,\beta$ , 4H, с, CH<sub>2</sub>); 7.81 (H, м J=7.0, о-C-H); 7.42 (H, м J=7.0, м-C-H); 7.29 (H, м J=7.0, п-C-H).

**2-[2-(Этилсульфонил)этил]-5-(морфолин-4-илметил)-6-фенил-имидазо-[2,1-*b*]-[1,3,4]гиадиазола (9)** получают из 3.09 г (0.01 моль) соединения 1b, 11 ммоль (1 г 40%-ный раствор формалина) формальдегида и 0.89 г (0.01 моль) морфолина аналогично соединению 8. Получают 2.84 г (70 %) соединения 9, Т.пл. 146-148°C (из спирта).  $R_f=58$  (Silufol, UV-254, дибутиловый эфир-этанол (3:1). Найдено, %: C 52.98; H 5.29. C<sub>18</sub>H<sub>22</sub>N<sub>4</sub>O<sub>3</sub>S<sub>2</sub>. Вычислено, %: C 53.20; H 5.42.

ИК-спектр (тонкий слой),  $\nu$ ,  $cm^{-1}$ : 776-864 (Ar), 694 (C-S-C), 1120, 1311 (SO<sub>2</sub>), 1423, 1443 (C-N-морф), 1063 (C-O морф.). Спектры ЯМР <sup>1</sup>H (600 МГц, DMSO, D<sub>6</sub>),  $\delta$ , м. д., (J, Гц): 1.98 (с, 3H, CH<sub>3</sub>); 3.48 (2H, д, J=0.61, CH<sub>2</sub>); 3.49 (2H, с, CH<sub>2</sub>); 3.50 (2H, с, CH<sub>2</sub>); 3.52 (2H, с, CH<sub>2</sub>); 3.48 ( $\alpha,\alpha$ , 4H, с, CH<sub>2</sub>); 3.53 ( $\beta,\beta$ , 4H, с, CH<sub>2</sub>); 7.81 (H, м J=7.0, о-C-H); 7.42 (H, м J=7.0, м-C-H); 7.29 (H, м J=7.0, п-C-H).

Таким образом, разработан удобный метод синтеза новых функционалированных производных имидазотиадиазолов, являющихся ключевыми соединениями для исследования биологических свойств этих гетероциклов.

Авторы благодарят докторанта PhD Ихсонова И.М., магистрантов Мехрангез Ш.М. и Муродова Ш.А. за участие в экспериментальной части материалов данной статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Mosby W.L. Heterocyclic Systems with Bridgehead Nitrogen Atoms. – Interscience Publ., New York, 1961, p. 157.
2. Mazur A. and Kochergin P.M. Chem. Heterocycl. Compound, 1970, 6, 470. (ХГС, 1970, 512)) № 4
3. Gauthier J.Y, Lau C.K., Leblanc Y., Li C.-S, Roy P., Therien M., Wang Z. US Пат. 5552422 (1996).
4. Куканиев М.А., Салимов Т.М., Хайдаров К.Х. Химия и биологическая активность производных 1,3,4-тиадиазола [3,2-а] пиримидина. – М.: Наука, 2004, с. 94.
5. Ходжибаев Ю., Куканиев М.А. Синтез, превращения и свойства имдазо-[2,1-б]-1,3,4-тиадиазола. – Душанбе: Ирфон, 2010, 148 с.
6. Andreani A., Rambaldi M., Leoni A. et. al. – Eur. J. Med. Chem. 2001, № 36, p.743.
7. Mohan, Jag. Kumar, Ashok. – Indian J. Heterocycl. 2003. V.13, № 2, p.101.
8. Gadad A.K., Noolvi M. N., Karpoornath. V. – Bioorg. Med. Chem., 2004, p.5651.
9. Gadaginamath G.S, Kavali R.R, Shyadligeri A.S, Doddamani H.P. – Indian J. Heterocycl. Chem., 1999, v. 9, № 1, p. 33.
10. Kamal Atta F.M., O.M. Omaima Farahat O. M., Ahmed, Mohamed Z. A., Marei G. – J. Molekules. 2011. № 16, p.5496.
11. Беккер Г. Введение в электронную теорию органических реакций. – М.: Мир, 1977, 395 с.
12. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений. – М.: Мир. 1965, с. 31-69
13. Ионин Б.И., Кольцов А.И. ЯМР-спектроскопия в органической химии. – Л.: Химия, 1983, 270 с.
14. Zoidova M.T., Khojibaev Yu, Rakhmonov R.O., Hojy Akbar Aysa. The 4th International Symposium on edible Plant Resources and the bioactive Ingredients. – Dushanbe. Tajikistan. July 24th to 28th. 2014, p.126.

Р.О.РАҲМОНОВ, Ю.ҲОҶИБОЕВ, Ш.С.ШАРИФОВ, Б.Ф.САФАРОВ, М.Ф.ХОЛИҚОВ

### СИНТЕЗИ ИМИДАЗО[2,1-В][1,3,4]-ТИАДИАЗОЛҲО ВА ОМУҶИШИ

### ТАСНИФОТИ СПЕКТРАЛИИ ОНҲО

*Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон,*

*Институти химияи ба номи В.И.Никитин АМИ Тоҷикистон*

Бо усули реаксияи муовизаи электрофилӣ 2-бromo-6-(п-бromoфенил- ва 2-[2-(алкилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-б][1,3,4]-тиадиазолҳо бо бромиди молекулавӣ, алкиламин-, морфолино-метиленионидан бо усули Манних функционилонида шуданд. Нишон дода шуд, ки чойнишинҳои воридшаванда ба мавқеи 5-уми ҷузъи имидазолӣ ҳамла менамоянд. Таҳлили спектрҳои ИС- ва РМХ-и барои гетероциклҳои синтезшуда гузаронида шуд.

**Калимаҳои калидӣ:** 2-бromo-6-(п-бromoфенил)имидазо[2,1-б][1,3,4]-тиадиазол, 2-[2-(алкилсульфонил)этил]-6-фенилимидазо[2,1-б][1,3,4]-тиадиазол, реаксияи Манних, бромонидан, аминометилонидан, лапиши валентӣ, лағзиши химиявӣ.

R.O.RAHMONOV, Y.KHODZHIBAЕV, SH.S.SHARIPOV, B.F.SAFAROV,  
M.F.KHOLIQOV

## SYNTHESIS OF IMIDAZO[2,1-B][1,3,4]-THIADIAZOLES AND STUDY OF THEIR SPECTRAL CHARACTERISTICS

*National Academy of Sciences of Tajikistan,  
V.I.Nikitin Institute of Chemistry, NAS of Tajikistan*

By means of the reaction of electrophilic substitution 2-bromo-6-(p-bromophenyl)- and 2-[2-(alkylsulfonyl)ethyl]-6-phenylimidazo[2,1-b][1,3,4]-thiadiazoles were functionalized with molecular bromine, alkylamino- and morpholinomethylation according to Mannich. It was found that the introduced substituents enter the carbon of the 5-th position of the imidazothiadiazole ring. The analysis of IR and NM-spectra in the synthesized heterocycles was carried out.

**Key words:** 2-bromo-6-(p-bromophenyl)imidazo[2,1-b][1,3,4]-thiadiazole, 2-[2-(alkylsulfonyl)ethyl]-6-phenylimidazo[2,1-b][1,3,4]-thiadiazole, Mannich reaction, bromination, aminomethylation, stretching vibration, chemical shift.

### **Сведения об авторах:**

**Рахмонов Рахмон Охонвич** – доктор химических наук, Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, зав. лабораторией химии гетероциклических соединений. E-mail: r-rahmonov@mail.ru;

**Ходжибаев Юлдош** – Института химии им. В.И.Никитина НАНТ, главный научный сотрудник лаборатории химии гетероциклических соединений;

**Шарипов Шомахмад Сафарович** – Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, научный сотрудник лаборатории химии гетероциклических соединений. E-mail: shamsiddinsharipov@mail.ru;

**Сафаров Бахрулло Файзуллоевич** – Института химии им. В.И.Никитина НАНТ, научный сотрудник лаборатории химии гетероциклических соединений. E-mail: safarovbahrullo@mail.ru;

**Холиков Махмадулло Файзалиевич** – Институт химии им. В.И.Никитина НАНТ, докторант PhD 2-го курса лаборатории химии гетероциклических соединений. E-mail: imron95@mail.ru.

Г.И.КОХИРОВА

**О МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,  
СОСТОЯВШЕЙСЯ В ИНСТИТУТЕ АСТРОФИЗИКИ НАНТ  
В АПРЕЛЕ 2024 Г.**

21 марта 2024 г. Ибадинову Хурсандкулу Ибадиновичу, члену-корреспонденту Национальной академии наук Таджикистана, д.ф.-м.н. исполнилось бы 80 лет. В ознаменование этой даты в Институте астрофизики НАНТ запланирована организация и проведение научно-практического мероприятия.

Международная научно-практическая конференция «Загадки происхождения комет и их связь с планетами», посвящённая 80-летию члена-корреспондента Национальной академии наук Таджикистана, д.ф.-м.н. Ибадинова Хурсандкула Ибадиновича и «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования (2020-2040 годы)» состоялась 26-27 апреля 2024 г. в Институте астрофизики Национальной академии наук Таджикистана. Научный оргкомитет конференции состоял из таких видных ученых, как Г.И.Кохирова - председатель, член-корр. НАНТ, д.ф.-м.н., зав. Отделом межпланетных тел Института астрофизики НАНТ, А.В.Девяткин, д.ф.-м.н., зав. лабораторией, главный научный сотрудник Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Н.Н.Киселёв, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института астрономии РАН (ИНАСАН), зав. лабораторией малых тел Солнечной системы Крымской астрофизической обсерватории РАН, А.С.Гулиев, чл.-корр. НАН Азербайджана, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Шемахинской астрономической обсерватории НАНА, А.А.Иванова, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Отдела межпланетной материи Астрономического института АН Словакии, а также А.М.Буризода, к.ф.-м.н., директор Института астрофизики НАНТ, Ф.Дж.Рахматуллаева, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Отдела межпланетных тел Института астрофизики НАНТ.

Конференция прошла в смешанном формате очном и онлайн, что дало возможность нашим зарубежным коллегам принять в ней участие. В общем, в конференции приняли участие 80 человек, в том числе 10 ученых из зарубежных астрономических учреждений. В очном формате в конференции активно участвовали научные сотрудники Института астрофизики НАНТ, Института математики им. А.Джураева НАНТ, Физико-технического института им. С.Умарова НАНТ, сотрудники Президиума НАНТ, преподаватели и студенты

Таджикского национального университета, Таджикского государственного педагогического университета им. С.Айни и др.

Кроме того, в пленарном заседании конференции приняли участие и выступили со своими воспоминаниями об ученом и педагоге Х.И.Ибадинове Г.И.Кохирова, чл.-корр. НАНТ, д.ф.-м.н., У.М.Мирсаидов, академик НАНТ, д.х.н., Д.Н.Низомов, чл.-корр. НАНТ, д.т.н., Т.Х.Салихов, чл.-корр. НАНТ, д.ф.-м.н., А.С.Гулиев, чл.-корр. НАНА, д.ф.-м.н., М.Нарзиев, к.ф.-м.н., снс ОМТ ИА НАНТ, коллеги, ученики и родные Х.И.Ибадинова.

В Программе конференции **заявлены 21 научный доклад**, 18 из них были доложены и обсуждены в ходе мероприятия, 8 научных докладов были представлены нашими зарубежными коллегами из ведущих астрономических учреждений ближнего и дальнего зарубежья, в том числе членами научного Оргкомитета конференции Н.Н.Киселевым, А.В.Девяткиным, А.В.Ивановой, А.С.Гулиевым. Также заслушаны интересные доклады, сделанные Г.О.Рябовой, д.ф.-м.н, доцентом, главным научным сотрудником НИИ Прикладной математики и механики Томского госуниверситета РФ, Жужулиной Е.А., мнс КрАО РАН, Павловым С.Р., инженером лаборатории МТСС, аспирантом Института прикладной астрономии РАН. Остальные доклады представлены научными сотрудниками ИА НАНТ, ТНУ, ТГПУ им.С.Айни. В работе конференции активно участвовали магистранты, докторанты PhD, аспиранты и соискатели.

В научных докладах основное внимание уделено результатам оптических и радиолокационных наблюдений и исследований малых тел Солнечной системы, физике и динамике комет и астероидов, а также особенностям их активности, взаимосвязи и происхождения. Заслушаны доклады по результатам моделирования динамических характеристик комет и метеороидного роя Геминид, обзорный доклад о результатах поляриметрических наблюдений, выполненных в ИА НАНТ в 1970-1990 гг. Озвучены некоторые проблемы, требующие дальнейших исследований. В заключении подведены итоги работы конференции и принята резолюция.

Работа конференции активно освещалась средствами массовой информации, в том числе республиканскими телевизионными каналами, репортажи о ее работе размещены на сайтах НАНТ и ИА НАНТ, на страницах в Фейсбуке НАНТ и ИА НАНТ.



Ибадинов Х.И., чл.-корр. НАНТ, д.ф.-м.н.





