

ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
8

ВЫПУСК 6



ИНАСАН

МОСКВА
2023

В ЖУРНАЛЕ «НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН» ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО РАЗЛИЧНЫМ АСПЕКТАМ АСТРОНОМИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОФИЗИКЕ, ПЛАНЕТНОЙ АСТРОНОМИИ, ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ, ФИЗИКЕ СОЛНЦА, НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ АСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДАМ И ПРИБОРАМ, КОСМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ.



УДК 52
ББК 22.6
НЗ4

НЗ4 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 8(6).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2023, 58 с., илл.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора),
Бисикало Д.В., Барабанов С.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю., Машонкина Л.И.,
Фатеева А.М., Шематович В.И., Шустов Б.М.

Ответственный редактор Исакова П.Б.
Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

«Научные труды Института астрономии РАН» – рецензируемый журнал, публикующий статьи по различным аспектам астрономии, в том числе по теоретической и наблюдательной астрофизике, планетной астрономии, звёздной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

© ИНАСАН, 2023
© Коллектив авторов, 2023

INASAN Science Reports. Vol 8(6). M.: Janus-K, 2023, 58 pp.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

Editorial Board

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S. Wiebe (Deputy Editor-in-Chief),
D.V. Bisikalo, S.I. Barabanov, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina,
A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov.

Managing Editor P.B. Isakova
Staff Editor E.D. Wiebe

INASAN Science Reports is a peer-reviewed journal that publishes papers in various fields of astronomy, including theoretical and observational astrophysics, planetary astronomy, galactic astronomy, solar physics, celestial mechanics, astronomical methods and tools, space research and studies related to space geodesy.

© INASAN, 2023
© Author team, 2023

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 8 (6)**

Сдано в набор 18.12.2023. Подписано в печать 25.12.2023
Формат 60x90/8. Бумага офсетная.
Уч.-изд. п.л. 7,25. Физ. п.л. 7,25. Тираж 100. Заказ №8673

Издательство «Янус-К»
127411, Москва, Учинская ул., д. 1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»
119034, Москва, Еропкинский пер., д. 16



Разработка и создание поляриметра для телескопа Цейсс-1000

Николенко И.В.¹, Аршинкин С.С.¹, Маслов И.А.²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Разработан и изготовлен поляриметр для телескопа Цейсс-1000 Симизской обсерватории ИНАСАН. Прибор позволяет оперативно вводить (и выводить) поляризационный светофильтр в поле зрения штатной камеры телескопа. Проведены первые наблюдения. Планируется использовать этот прибор, как штатное оборудование. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: Симизская обсерватория ИНАСАН, поляриметр, поляризационные наблюдения

Development and creation of a polarimeter for the Zeiss-1000 telescope

Nikolenko I.V.¹, Arshinkin S.S.¹, Maslov I.A.²

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

A polarimeter was developed and manufactured for the Zeiss-1000 telescope of the Simeiz Observatory INASAN. The device allows you to quickly input (and output) a polarizing filter in the field of view of the standard camera of the telescope. The first observations were made. It is planned to use this device, as standard equipment. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: Simeiz Observatory INASAN, polarimeter, polarizing observations

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.001

1. Введение

Ранее для поляриметрических наблюдений протяженных объектов (в том числе комет) на телескопе Цейсс-1000 (Симизская обсерватория ИНАСАН) использовался прибор, где в качестве светоприемника применялась ПЗС-камера ST-6 [1]. Для достижения высокой чувствительности (по яркости) в поляриметре использовался преобразователь фокуса, увеличивающий светосилу до 1:1.5. Рабочий спектральный диапазон прибора находился в пределах 400–700 нм, но обычно измерения проводились в красной области спектра, как в широкой полосе 570–700 нм, так и в трех узких полосах 642, 662 и 684 нм. Полоса 662 нм использовалась для выделения области спектра, соответствующей линии излучения, связанной с аминогруппой NH₂, две другие — для выделения областей спектра, свободных от линий излучения, что позволяло исследовать рассеивание излучения пылью. Измерение линейной поляризации осуществляется путем получения серии снимков при различных углах поворота поляроида-анализатора [2]. Недостатками этого варианта прибора были:

- 1 Потеря некоторого количества света из-за применения преобразователя фокуса.
- 2 Большое время считывания камеры ST-6, по сравнению с малыми длительностями экспозиции при наблюдении комет.
- 3 Невозможность проведения измерений без поляроида.

2. Новый поляриметр

Для улучшения проведения наблюдений был разработан и сконструирован новый поляриметр (рис. 1), с применением штатного оборудования: камеры FLI 16803 и турели FLI CRW 3-10. Он имеет компактные размеры, позволившие установить его внутри трубы телескопа (рис. 2), и содержит:

- 1 Линейный поляризационный светофильтр диаметром 82 мм, который может вращаться и устанавливаться в три фиксированных положения через 120 градусов.
- 2 Устройство ввода/вывода поляризационного светофильтра из светового пучка, позволяющее оперативно переходить от поляриметрических измерений к фотометрическим и обратно.
- 3 Дополнительное колесо для сменных светофильтров (диаметром 60 мм) на четыре положения. В настоящее время используются три узкополосных светофильтра на длины волн 642, 662, 684 нм и свободное отверстие для использования светофильтров турели FLI CRW 3-10.

ПЗС-камера FLI ProLine 16803 имеет следующие характеристики:

- формат 4096 × 4096,
- спектральный диапазон 360–800 нм,



Рис. 1: Слева на право: предыдущий вариант поляриметра; монтаж прибора на посадочный фланец; прибор готовый для установки на телескоп.

- размер пикселя составляет 9 мкм,
- квантовый выход в максимуме 55%.

Турель FLI CFW 3-10 с наборами светофильтров: UBVRi системы Johnson-Cousins и GRIZ системы Sloan.



Рис. 2: Установленный прибор с камерой и турелью.

3. Тестирование

В июле 2023 г. были проведены тестовые наблюдения, показавшие работоспособность прибора и получены первые измерения для двух объектов: сверхновой SN2023ixf в галактике M101 и кометы C2023E1 (рис. 3), которые наглядно продемонстрировали достоинство прибора в быстрой дистанционной смене режима работы с поляризационных на фотометрические и обратно.

Для всех рабочих спектральных полос UBVRi была измерена эффективность поляризационного светофильтра (табл. 1), которую следует учитывать при оценке измеренной поляризации. В будущем мы планируем заменить используемый пленочный поляризационный светофильтр (Vitacon) на более эффективный проволочный (Edmund Optics).

Таблица 1: Эффективность поляризационного светофильтра для рабочих полос прибора.

Полоса	U	B	V	R	I
Контраст, %	90	93	98	98	76



Рис. 3: Слева — Сверхновая SN2023ixf в галактике M101; справа — комета C2023E1.

4. Заключение

Для расширения функциональных возможностей проведения наблюдений на телескопе Цейсс-1000, планируется использовать описанный здесь поляриметр в качестве штатного оборудования, учитывая, что переход от поляриметрических измерений к фотометрическим (обычному режиму камеры FLI) производится очень быстро и не требует перефокусировки телескопа.

Список литературы

1. I. A. Maslov and I. V. Nikolenko, *INASAN Science Reports*, **7**, 129, 2022.
2. S. V. Kryuchkov, I. A. Maslov, I. V. Nikolenko, V. A. Munitsyn, and O. S. Ugolnikov, *News of the Crimean Astrophysical Observatory*, **111**, 34, 2015.

Метеорные наблюдения на радиолокационной станции Казанского федерального университета

Коротышкин Д.В., Шерстюков О.Н., Валиуллин Ф.С.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия

В работе описан метеорный радар Казанского федерального университета как высокоточный и надежный инструмент астрономических исследований притока метеорного вещества в атмосферу Земли. На примере метеорного потока Геминид показаны возможности метеорного радара. Сравнение полученных параметров метеорного потока Геминид со значениями, полученными в других работах, показало высокую точность и стабильность проводимых на метеорном радаре КФУ астрономических наблюдений. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: метеорный радар, метеоры, Геминиды, индексы масс

Meteor observations at the radar station of Kazan Federal University

Korotyshkin D.V., Sherstyukov O.N., Valiullin F.S.

Kazan Federal University, Kazan, Russia

The paper presents the meteor radar of Kazan federal university as a highly accurate and reliable instrument for astronomical studies of the influx of meteoric matter into the Earth's atmosphere. On the example of the Geminid meteor shower, the capabilities of the meteor radar are shown. Comparison of the obtained parameters of the Geminid meteor shower with the values obtained in other works showed a very high accuracy and stability of astronomical observations carried out on the KFU meteor radar. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: meteor radar, meteors, Geminids, mass indices

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.002

1. Введение

Метеорные явления, особенно яркие болиды, всегда привлекали внимание людей, но с развитием оптической техники данные наблюдения стали регулярными и систематизированными. Развитие радиолокационного метода зондирования атмосферы позволило обнаруживать ионизированные следы (подробно метод описан в работе [1]), которые оставляют после себя метеоры, сгорая на высотах мезосферы — нижней термосферы Земли (70–110 км). Данный метод зарекомендовал себя альтернативным способом наблюдения за притоком метеорного вещества, так как измерения проводятся круглые сутки 7 дней в неделю вне зависимости от погодных условий. Недостатком метода является избирательность регистраций метеорных радиоэхо из-за условия зеркальности отражения от следа.

В Казанском университете метеорные наблюдения радиолокационным способом были начаты К.В. Костылевым еще в 1955 г. [2]. Развитие современных цифровых технологий и доступность вычислительной техники и элементной базы электронных компонентов позволило создать в КФУ на базе метеорного радара Skymet [3] современный радиолокационный комплекс. Радар позволяет обнаруживать и регистрировать радиоэхо от ионизированных метеорных следов. В отличие от оптических наблюдений, где можно пронаблюдать до 100 метеорных явлений в час, метеорные наблюдения на модернизированном радаре КФУ [4] дают от 600 до 10000 метеоров в час в зависимости от времени суток и сезона года. В среднем за год число суточных радиоизмерений составляет порядка 45000 штук. Данные регистрации позволяют оценить ряд параметров метеорных отражений:

- угловые координаты (с точностью до долей градуса), пространственные координаты точки сгорания метеора в атмосфере (с точностью несколько сотен метров);
- видимая скорость метеорной частицы (с точностью 0.1–5%);
- амплитуда отклика радиосигнала (аналог оптической яркости метеора);
- ряд других характеристик, связанных с динамикой атмосферы на высотах сгорания метеоров.

Отличительной чертой метеорного радара КФУ является наличие длинных измерительных баз (максимальных расстояний между 12 приемными антеннами): 220×160 метров (рис. 1). Это своего рода «апертура» радара, которая позволяет накапливать больше сигнала на фоне атмосферных шумов и получать большую точность в определении угловых координат отражающих точек.

Технические характеристики метеорного радара представлены в табл. 1.

Таблица 1: Технические характеристики метеорного радара КФУ.

Характеристика	Описание
1. Метод исследования	Импульсный, обратное рассеяние
2. Несущая частота/частота повторения	29.75МГц/1594Гц
3. Длительность импульса	24 мкс
4. Импульсная/средняя мощность передатчика	15 кВт/600 Вт
5. Количество передающих/приемных антенн	1 и 12 шт
6. Тип антенн: передающая/приемная	Скращенные антенны типа волновой канал с 3 и 2 элементами. Антенны всенаправленные.
7. Габаритные размеры антенного поля	220×160 метров

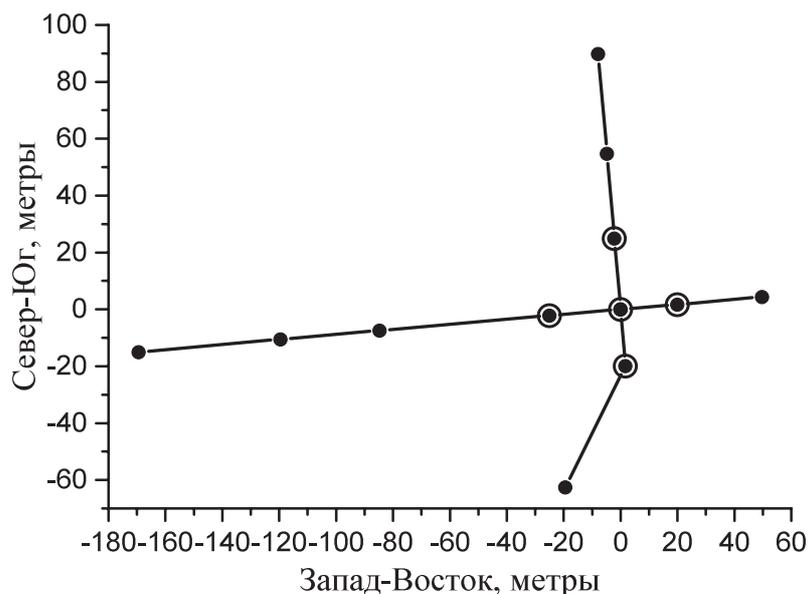


Рис. 1: Расположение приемных антенн метеорного радара КФУ (состояние на 2023 г.). 5 антенн в центре (точки с кружками) — штатное антенное поле в 2015–2020 гг.

На основе анализа амплитуд и фаз отраженных радиозехо от отдельного метеорного следа проводятся оценки видимых скоростей метеорных частиц. Скорости рассчитываются на основе адаптированного метода с использованием преобразования Френеля [5]. Оценки доступны для 60% имеющихся регистраций, что является очень хорошим результатом. Высокий процент оценок скоростей метеоров позволяет проводить улучшенную выборку при выделении метеорных потоков на фоне спорадических метеоров.

Основные области применения метеорного радара: исследование метеорных потоков и спорадического метеорного фона. Метеорный радар позволяет:

- Исследовать внутрисуточную и межсуточную изменчивость количества метеорных частиц метеорного потока.
- Определять радиант метеорного потока статистическим образом на основе метода сферических гармоник [6, 7, 8]. В случае достаточно сильных метеорных потоков, можно определять дрейф радианта метеорного потока внутри суток.
- Проводить оценки индексов масс метеоров [9, 10, 11].
- Определять и отслеживать радианты спорадических источников в зависимости от времени года.
- Получать траекторию движения метеорной частицы.
- Сопоставлять радиометеорные и оптические наблюдения.

В ходе проведения мониторинга на метеорном радаре КФУ с 2015 г. зарегистрировано свыше 80 млн. метеорных радиозехо. Суточное число метеорных регистраций с 2016 по 2023 г., для которых рассчитана видимая скорость метеорной частицы (именно такие представляют интерес для астрономических исследований), представлено рис. 2. На рис. 2 наблюдаются четкие годовые вариации численности метеорных отражений. Данные вариации могут быть связаны с внутригодовыми изменениями интенсивности спорадических источников и геометрии сгорания спорадических метеоров. Выбросы на графике связаны с неполными сутками наблюдений в связи с периодами технического обслуживания радиолокационной станции. В настоящее время

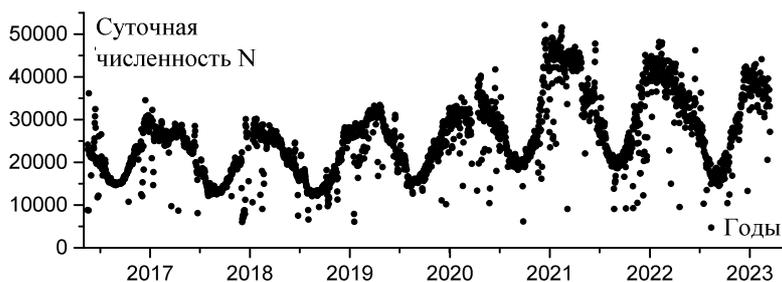


Рис. 2: Годовой ход суточной численности зарегистрированных метеоров в 2016–2023 гг., для которых имеются оценки скоростей метеоров.

мя в минимуме регистрируется около 20000 метеоров с оценками скоростей, в максимуме — свыше 40000 метеоров. Характерно, что после модернизации с осени 2020 г. количество таких регистраций увеличилось на 50%.

2. Дрейф радианта метеорного потока Геминид

Для выделения радиантов метеорных потоков используется статистический метод на основе сферических гармоник, предложенный в работе [6]. Суть метода сводится к построению распределения численности метеорных отражений по всем возможным радиантам. Расчет для конкретного радианта сводится к подсчету количества метеоров, угловые координаты точки сгорания которых относительно пункта наблюдения перпендикулярны угловым координатам радианта. Это основано на том факте, что траектория движения должна быть перпендикулярна направлению наблюдения метеора (условие зеркальности радиоотражений от метеорного следа).

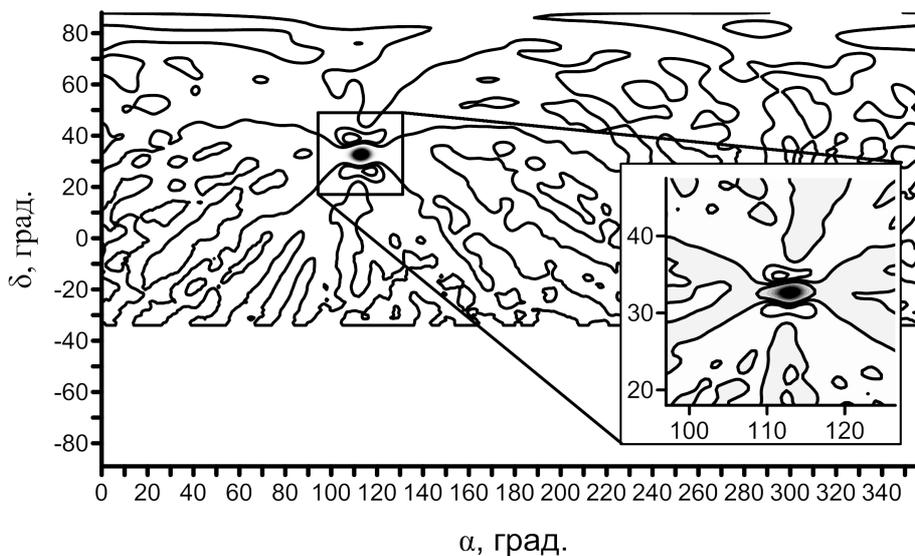


Рис. 3: Распределение радиантов метеорных отражений 13.12.2021 г. Максимум на графике соответствует радианту метеорного потока Геминид. Основное распределение построено для ширины полосы $r = 3^\circ$, увеличенное — для $r = 1^\circ$.

Для выделения метеорных потоков, распределения строятся для различных диапазонов скоростей метеоров. Координаты максимума распределения с тремя параметрами α (прямое восхождение), δ (склонение) и V (скорость метеора) можно считать оценкой радианта метеорного потока в экваториальной системе координат, а значение его максимума — количеством метеоров, характерным для найденного радианта и скорости метеоров метеорного потока.

Однако следует учесть, что в нахождении численности метеоров для конкретного радианта используется некоторое количество «ложных» метеоров, угловые координаты которых также перпендикулярны исследуемому (тестовому) радианту, но истинный радиант этих метеоров другой, что характерно для спо-

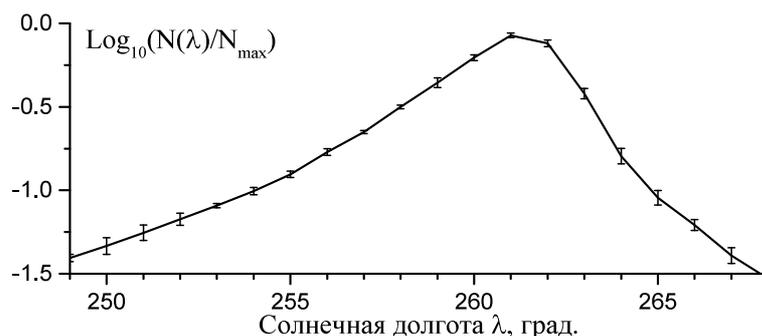


Рис. 4: Изменение нормированной суточной численности метеорного потока Геминид в среднем за 2016–2022 гг. Вертикальные линии показывают вариации данного параметра в пределах указанных лет.

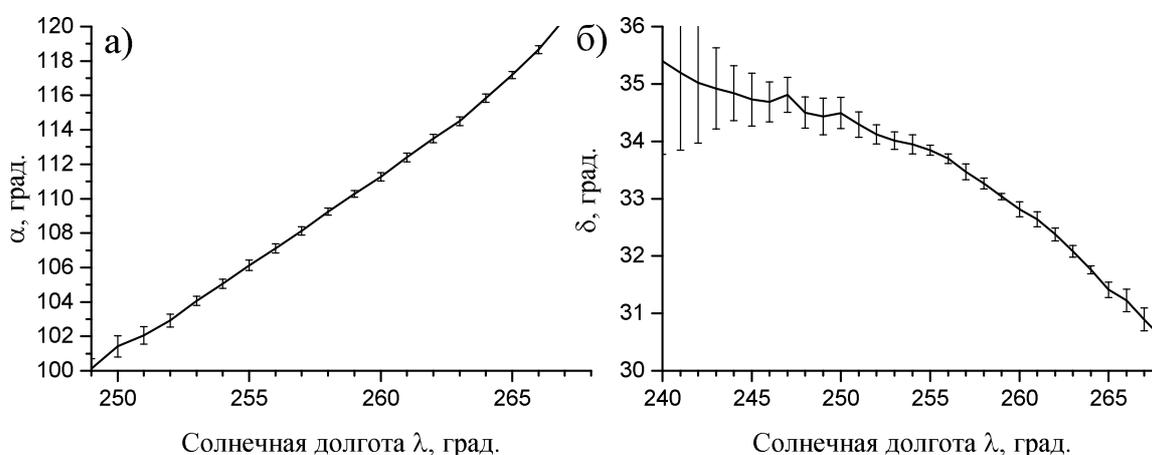


Рис. 5: Дрейф радианта метеорного потока Геминид в зависимости от солнечной долготы λ в среднем за 2016–2022 гг. Вертикальные линии — разброс в пределах указанных лет. Координаты представлены в экваториальной системе координат: (а) прямое восхождение α , (б) склонение δ .

радиальных метеоров, которые распределены практически равномерно. Это приводит к завышению числа метеоров в пике распределения. Для того, чтобы компенсировать данное увеличение численности за счет фоновых метеоров, в работе [6] предложена методика, основанная на расчете количества метеоров, угловые координаты которых «почти» перпендикулярны тестовому радианту. Рассчитанное количество будет приблизительно совпадать со значением числа фоновых метеоров для тестового радианта, с помощью чего можно компенсировать излишек фоновых метеоров в итоговом распределении.

В [6] используется характеристика распределения: угловой радиус r . Данный радиус характеризует полуширину полосы, для которой считается количество метеоров тестового радианта в распределении. Чем меньше радиус, тем лучше разрешающая способность метода. Однако измерения самих угловых координат отражающих точек выполняются на метеорном радаре с погрешностями. Это приводит к тому, что соседние с радиантом метеорного потока точки распределения также демонстрируют некоторое увеличение численности. В свою очередь это уменьшает количество метеоров в распределении, так как часть потоковых метеоров начинают считаться фоновыми. Радиус r в различных работах подбирают исходя из возможностей метеорного радара. Обычно r берут равным 3 (например, в работе [6]). Это связано с рядом факторов, которые влияют на качество распределения:

- точность угловых координат метеорного радара;
- дрейф радианта в пределах времени, за которое строится распределение радиантов;
- «дребезг» (смещение) радианта вследствие таких эффектов, как зенитное притяжение и суточная абберация.

В данной работе для примера на рис. 3 представлено рассчитанное распределение для 13 декабря 2021 г. (солнечная долгота равна 262.2 гр.) с диапазоном скоростей 30–40 км/с. В данный период наблюдается

максимум метеорного потока Геминид с характерными скоростями 35 км/с. В связи с высокой численностью метеорных регистраций, а также с высокой точностью оценок угловых координат, радиус взят равным 1° . Тем не менее, максимум распределения четко выделяется, и размеры как раз сопоставимы с 2° .

Несмотря на то, что распределение радиантов строится в дискретных значениях прямого восхождения α и склонения δ , можно получить точечную оценку радианта с помощью аппроксимации в области максимума. Для представленного на рис. 3 распределения максимум наблюдается в точке $\alpha = 114^\circ$, $\delta = 32.19^\circ$, что весьма близко к полученным ранее значениям в других работах (например, [12]).

По методике, описанной выше, с радиусом $r = 3^\circ$ и диапазоном скоростей 30–40 км/с, рассчитаны распределения радиантов с 2016 по 2022 г. в период с 30 ноября по 20 декабря. По рассчитанным распределениям получены следующие параметры: число зарегистрированных метеоров для потока Геминид (значение максимума распределения); положение максимума в экваториальной системе координат (прямое восхождение α , склонение δ). Расчеты выполнены для целых значений солнечной долготы λ (чтобы избежать смещения оценок параметров вследствие не целого количества суток в году). Количество метеоров для потока Геминид в целом за разные годы, а также в значения суточного максимума представлены в табл. 2.

Таблица 2: Численность метеоров потока Геминид в 2016–2022 гг.

Год	Всего число метеоров потока Геминид	Число метеоров за сутки в максимуме
2016	22935	4348
2017	22804	4296
2018	19113	3627
2019	28057	4296
2020	29516	5855
2021	36788	6599
2022	36489	6476

В 2020 г. проведена модернизация радара: увеличено количество приемных антенн с 5 шт до 12 шт, что увеличило количество регистраций в целом и с оценками скоростей в частности.

На рис. 4 представлено рассчитанное суточное число метеоров в среднем за 2016–2022 гг. Перед осреднением значения суточной численности $N(\lambda)$ нормированы на максимум N_{\max} метеоров потока Геминид в соответствующем году (см. таблицу), изменения численности представлены в логарифмическом масштабе (по основанию 10). Вертикальные линии показывают межгодовой разброс оценок в пределах периода осреднения 2016–2022 гг. Также следует отметить, что интервал $249 - 269^\circ$, для которого представлены параметры, на основе метеорных наблюдений после 2020 г. может быть расширен до $240 - 272^\circ$, учитывая увеличенную численность и точность метеорных наблюдений на метеором радаре КФУ. Анализ рис. 4 показывает практически линейный рост и спад численности (в логарифмическом масштабе) метеорного потока Геминид с коэффициентами линейной регрессии 0.14 и -0.3 .

На рис. 5 представлены рассчитанные угловые координаты (α, δ) радиантов метеорного потока Геминид в зависимости от солнечной долготы λ . Значения представлены в среднем за 2016–2022 гг., т. к. межгодовые изменения незначительны и в виде среднеквадратичных отклонений в пределах указанных годов обозначены на рисунке вертикальными линиями. Полученные значения в целом совпадают с результатами, представленными другими исследователями [7, 12]. В частности, положение радианта для солнечной долготы $\lambda = 261^\circ$ равно $\alpha = 112^\circ$, $\delta = 32.6^\circ$. В работах [7, 12] прямое восхождение α также 112° , а склонение $\delta \approx 34^\circ$ градуса, что связано с отсутствием в работах поправки на зенитное притяжение. В данной работе поправка на зенитное притяжение выполнена по формуле Скиапарелли [13]. В работе [12] разброс оценок прямого восхождения и склонения по данным метеорных радаров представлен в интервале $\pm 1^\circ$. В данной работе он составляет 0.1° для α и 0.2° для δ , что меньше на порядок.

Что касается дрейфа радианта, то он составляет 1.12° за 1° солнечной долготы для α , и -0.16° и -0.13° в [7] и данной работе соответственно для δ . Однако, анализ изменения склонения радианта метеорного потока Геминид (рис. 5б) показывает, что дрейф положения радианта не является линейным.

3. Статистические характеристики метеорных отражений

В отличие от атмосферных измерений возле поверхности Земли, в области высот 80–100 км параметры атмосферы ведут себя более предсказуемо. Что касается метеорных явлений, то их повторяемость из года в год носит еще более систематический характер, не смотря на то, что сами метеорные явления являются случайными. Для наилучшего описания таких случайных явлений используют функции распределения и функции плотности распределения вероятностей. Данные функции хорошо описывают такие случайные параметры метеорных радиозехо, как угловые координаты, дальность до отражающей точки метеорного следа, скорость

метеора, максимальная амплитуда метеорного радиоэхо и высота сгорания. Если распределения угловых координат отражающих точек и дальность до следа характеризуют функционирование метеорного радара, то высота h , максимальная амплитуда Amp и скорость метеорных частиц V представляют интерес для астрономических исследований. В частности, с помощью оценки скорости метеорной частицы можно судить об орбите движения метеора. На основе максимумов амплитуд радиоэхо можно оценить массу метеорных частиц. Высота сгорания характеризует взаимодействие метеорной частицы с атмосферой Земли.

Плотность функций распределения характеризуется формой распределения и средними величинами: средневероятностным значением и дисперсией. Данные параметры удобны для сравнения получаемых данных на различных станциях наблюдения. В частности, распределение высот сгорания метеоров имеет вид распределения Гаусса. Средняя высота и дисперсия высот существенно меняются внутри года, так как зависят от высотных профилей плотности и температуры атмосферы на данной высоте.

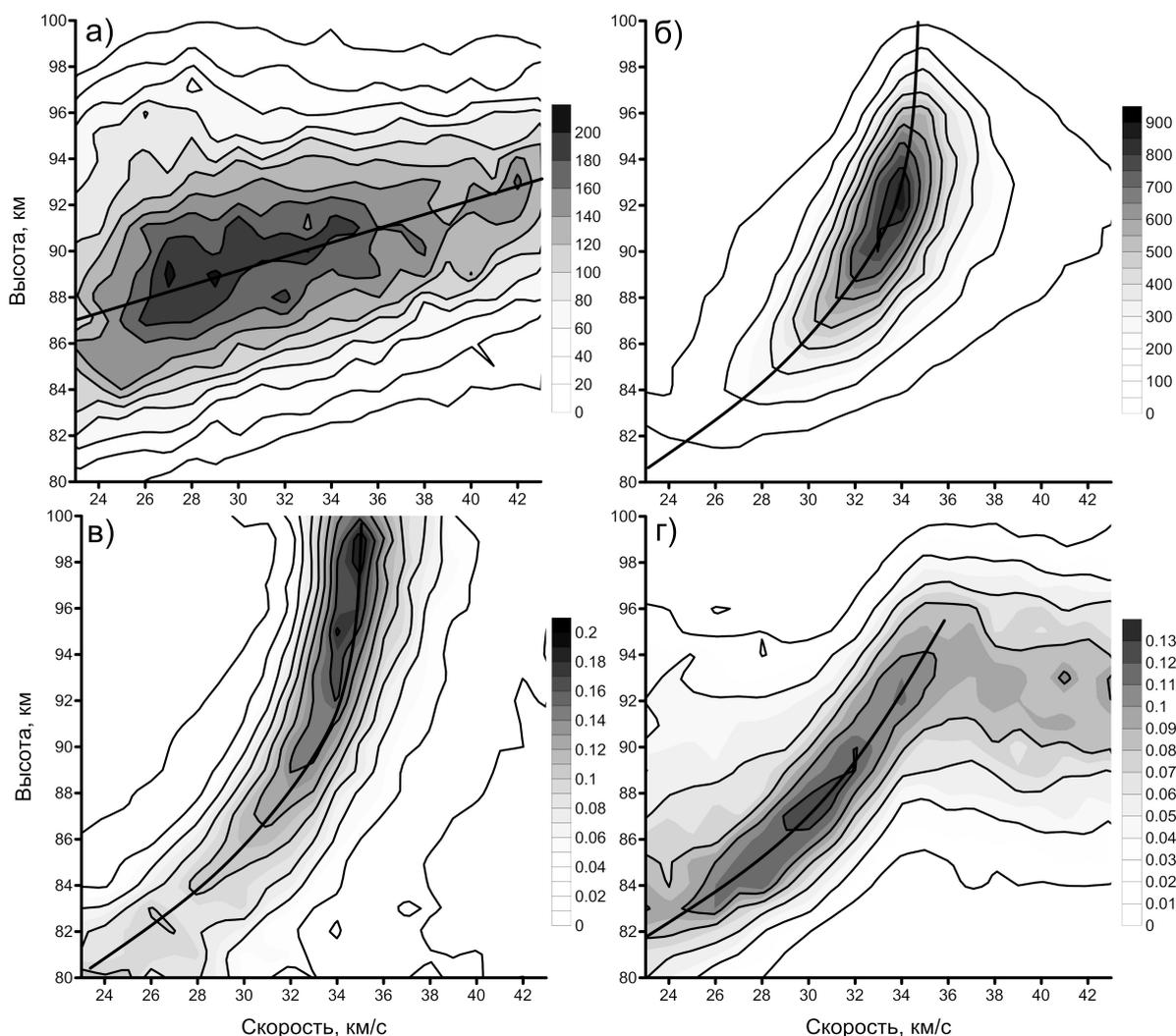


Рис. 6: Распределение численности метеоров в зависимости от их высоты и скорости: а) для спорадического антисолнечного источника (antihelion) 17.11.21–04.12.21, б) для потока Геминид 2021 г., в) для потока Геминид 2021 г. с нормировкой для каждой высоты, г) для потока Геминид 2021 г. с нормировкой для каждой скорости.

Для каждого года наблюдения 2016–2022 гг. построены распределения радиантов за каждый день действия метеорного потока Геминид (30.11–19.12) и определены положения радиантов. Для каждого определенного радианта проведена выборка регистраций метеорных радиоэхо таким образом, чтобы угол между радиантом и направлением на отражающую точку лежал в полосе $90 \pm r$, где r — полуширина полосы согласно работе [6]. Для большей надежности выборок использовались только те регистрации, для которых имеется оценка скорости метеора (а значит присутствует дифракционная картина — однозначная сигнатура регистрации метеора). Для потока Геминид r взят равным 2.4° . Следует отметить, что в данные выборки входят как отражения от метеорных следов потока Геминид, так и некоторое небольшое количество споради-

ческих метеоров, для которых выполняется условие выборки. В период максимума потока этим количеством можно пренебречь, а в период начала потока (26.11.2021) доля потоковых метеоров в выборке составляет только лишь 40%, что существенно влияет на результаты статистических оценок.

Также, для периода с 27 ноября 2021 г. по 7 января 2022 г. выделен набор метеоров для низкоскоростного спорадического антисолнечного источника (antihelion) с диапазонами скоростей 12–40 км/с для $r = 14^\circ$.

Для данных выборок метеорных отражений из общего массива данных построены плотности распределения геоцентрических скоростей и высот сгорания метеоров. Геоцентрическая скорость получена из видимой скорости с учетом зенитного притяжения [13]. Используемые высоты соответствуют положению зеркальной точки и определяются с использованием фазового интерферометра метеорного радара (например, [14, 15]). Хотя метеорный след имеет определенную длину, используются оценки некоторой средней точки на данном следе, которую мы в дальнейшем будем называть высотой сгорания метеора.

Средняя высота сгорания метеора в период действия метеорного потока Геминид 2021 г. и для спорадического антисолнечного источника составила 90.5 км, среднеквадратичное отклонение — 4.7 км. Существенное различие наблюдается в распределении скоростей. Если для потока Геминид характерны скорости около 34 км/с ± 1.5 км/с (по уровню 0.7 от максимума), то для спорадического антисолнечного источника скорости распределены практически равномерно в диапазоне скоростей 24–40 км/с. Различия в оценке скорости (34 км/с) от общепринятого значения в 35 км/с может быть связано с учетом эффекта торможения метеора в атмосфере, что приводит к занижению оценок скоростей метеоров.

Для анализа взаимосвязи скорости метеорной частицы и ее высоты сгорания, построены распределения числа метеоров в зависимости от скорости и высоты. Полученные результаты представлены на рис. 6. Рис. 6а и рис. 6б показывают распределения выборок метеорных отражений из общей базы данных по высотам и скоростям для спорадического антисолнечного источника 24–40 км/с (27.11.2021–06.12.2021) и потока Геминид (30.11.2021–18.12.2021) соответственно. Анализ представленных распределений показывает существенные различия в высотах сгорания спорадических и потоковых метеоров. В частности, для спорадических метеоров характерно практически линейное увеличение высоты с ростом скорости. Для потока Геминид наблюдается более сложная зависимость. Наиболее вероятная высота сгорания, согласно рис. 6б, составляет 92 км, причем большая часть отражений сосредоточена вблизи этой высоты, а судить о высотной зависимости затруднительно. Для того, чтобы подчеркнуть зависимость высоты от скорости или скорости от высоты, в расчетах распределения рис. 6б применены нормировки для каждого значения высоты (рис. 6в) и для каждого значения скорости метеорной частицы (рис. 6г). Несмотря на то, что исходным параметром является скорость метеора, и для каждой скорости характерна своя высота сгорания, радиометеорные наблюдения могут обладать определенной избирательностью при обнаружении метеоров, связанных с потоками, и поэтому можно будет говорить о своей характерной скорости для каждой высоты наблюдения. Анализ рис. 6в и рис. 6г показывает, что наилучшим для описания является вариант с зависимостью скорости от высоты. Мы видим, что низкоскоростные метеоры сгорают существенно ниже максимума распределения, при этом с ростом высоты значение скорости стремится к 35 км/с. Анализ распределения (рис. 6в) также демонстрирует точность оценок скоростей метеоров и угловых координат метеорных отражений. В частности на высотах выше 86 км/с ширина распределения скоростей метеоров по уровню 0.7 составляет ± 0.7 км/с. В случае, если бы точности оценок скоростей или высот были бы ниже, то представленные распределения были бы пологими и диапазоны скоростей по уровню 0.7 существенно превышали бы указанные.

4. Индексы масс для метеорного потока Геминид

Важным параметром при исследовании притока метеорного вещества в атмосферу Земли являются массы сгораемых метеоров. В астрономии обычно о массе метеора судят по яркости вспышки при сгорании метеоров. Кроме того, принято строить распределения метеоров по массам исходя из их яркости. В работе [16] показано, что распределения масс (число метеоров для небольшого диапазона масс) зависят как

$$dN \propto M^{-s} dM,$$

где dN — число метеоров с массами в интервале $[M; M + dM]$, а величина s называется индексом масс.

Обычно для спорадического фона в разных исследованиях указывается величина $s \approx 2$ [11, 17]. При этом для метеорных потоков эта величина опускается до 1.5 [9].

В радиометеорном методе аналогом яркости является максимальная амплитуда метеорного радиоэхо. В работе [10] указывается, что метеорный радар СМОР регистрирует метеоры с массами в диапазоне от $10^{-4.5}$ до $10^{-3.5}$ г. Учитывая, что метеорный радар КФУ обладает несколько большей чувствительностью, можно предположить чуть более широкий рабочий диапазон масс метеороидов.

Амплитуда отраженного сигнала от недоуплотненного метеорного следа A при зеркальном рассеянии пропорциональна плотности электронной концентрации, усредненной по первой зоне Френеля вдоль следа (около 1 км). Однако в зависимости от геометрии рассеяния, зеркальная точка рассеяния может смещаться относительной первой зоны Френеля, что занижит максимальную амплитуду метеорного радиоэхо. Кроме

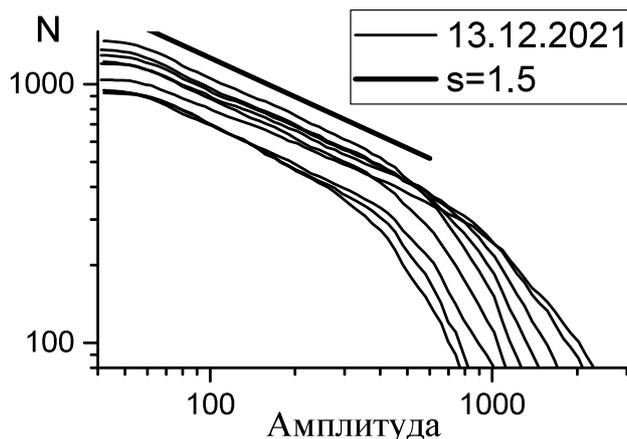


Рис. 7: Кумулятивные распределения амплитуд для потока Геминид по данным 13.12.2021. Разные кривые соответствуют разным диапазонам дальностей. Для сравнения представлена прямая с наклоном 0.5 (индекс масс $s = 1.5$).

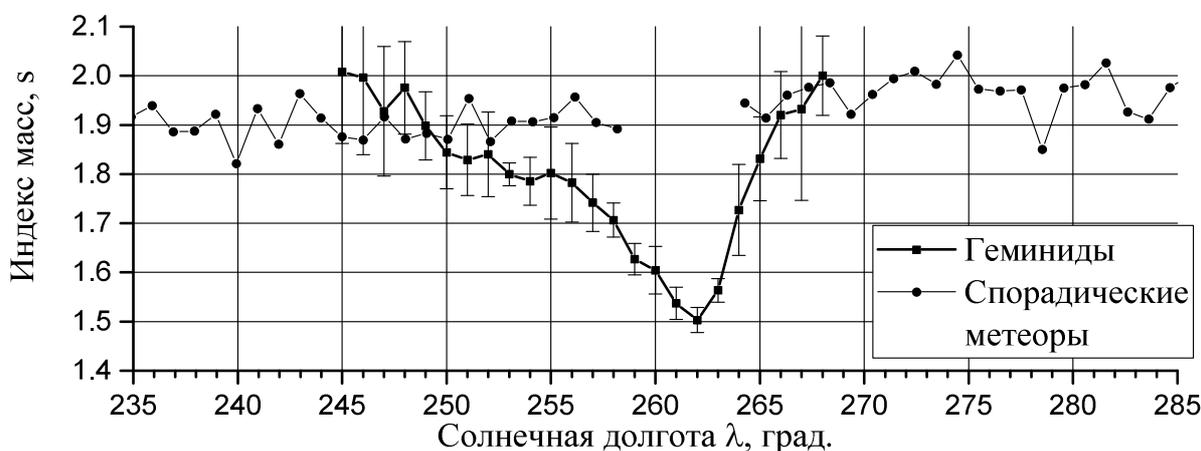


Рис. 8: Индексы масс для потока Геминид в среднем за 2016–2022 гг и спорадического антисолнечного источника за 2021 г. Вертикальные полосы обозначают разброс в пределах 2016–2022 гг.

того, связать максимальную амплитуду с фактической массой весьма затруднительно, так как получаемые оценки амплитуд являются относительными. Амплитуды сигналов, полученные на метеорном радаре, могут зависеть от работы аппаратуры: от мощности передатчика и коэффициента усиления приемного тракта, которые могут меняться со временем. Поэтому, для исследования применяются так называемые кумулятивные распределения $N(A)$, представляющие собой функции распределения числа метеоров, амплитуда которых превышает заданный уровень.

Данные кумулятивные распределения также представляют собой степенные зависимости от максимальной амплитуды сигнала, но с индексом (степенью) $s - 1$. Для расчета степени обычно распределения представляют в логарифмическом масштабе: $\log_{10} N$ от $\log_{10} A$, где A — максимальная амплитуда метеорного радиоэхо. В таком виде распределения имеют линейных наклон $s - 1$.

Одной из особенностей при исследовании таких распределений является зависимость амплитуды принимаемого сигнала от дальности до отражающей точки: метеору с одной и той же массой будет соответствовать разный уровень принимаемого сигнала из-за разного затухания радиосигнала при прохождении через атмосферу. Для того, чтобы избежать этого эффекта, обычно распределения строят для дальностей в диапазоне 110–130 км [8, 9]. Однако это приводит к существенному уменьшению статистической обеспеченности при исследовании, а также уменьшению точности дальнейших оценок.

В данной работе предлагается строить данные распределения для различных диапазонов дальностей, а полученные значения индексов масс усреднять. Для примера, на рис. 7 представлены распределения для потока Геминид (13.12.2021) для 40 км диапазона дальностей со скольжением 10 км, начиная со средней

дальности 120 км. Отдельная прямая линия имеет величину наклона 0.5. Из рис. 7 видим, что для широкого диапазона амплитуд (декада), линии распределения имеют постоянный наклон. Практически горизонтальный участок в начале распределения определяется падением чувствительности радара и, как следствие, падением численности с такими амплитудами. Кроме того, определенную избирательность при использовании метеорных данных вносит расчет скорости метеоров, когда слабые метеоры отбрасываются из-за недостаточной точности оценки. Резкий спад в конце распределения определяется преобладанием переуплотненных метеорных радиоэхо. Переуплотнения в электронной концентрации метеорного следа характерны для крупных метеорных частиц. Это приводит к тому, что амплитуда отклика на этом участке распределения перестает быть привязанной к массе метеора.

Следовательно, начальный и конечный участки распределения нужно отбросить, а наклон определяется по линейному участку. В качестве возможного варианта оценки величины наклона можно использовать метод RANSAC [18]. Другой вариант — определять наклон для различных участков распределения, и оценку наклона брать по максимуму апостериорной вероятности или функции правдоподобия.

В данной работе применяется другой подход. Он заключается в поиске линейного распределения с максимальной шириной $\log_{10} A_{\max} - \log_{10} A_{\min}$ (A_{\min} и A_{\max} — начало и конец предполагаемого линейного участка), для которого погрешность (дисперсия $\hat{\sigma}^2$) линейной регрессии в интервале $[\log_{10} A_{\min}; \log_{10} A_{\max}]$ с заданным наклоном a_k в диапазоне от 0 до 2:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{I} \sum_{A_{\min}}^{A_{\max}} (\log_{10} N_i - a_k * \log_{10} A_i - b_k)^2$$

меньше заданной погрешности σ^2 . Здесь a_k — предполагаемый коэффициент линейной регрессии в диапазоне 0–2, b_k — рассчитанный методом наименьших квадратов постоянный сдвиг, I — число отсчетов в выбранном интервале амплитуд. В качестве предварительной оценки берется такое значение наклона, при которой интервал амплитуд (в отсчетах) имеет максимальную ширину для всех комбинаций A_{\min} и A_{\max} и всех опробованных значений наклона a_k . Очевидно, что ширина участка с линейным наклоном будет сильно зависеть от заданной пороговой погрешности σ . Оценку величины наклона \hat{a} из всего диапазона значений от 0 до 2 нужно будет принять при минимуме ее погрешности σ_a^2 :

$$\sigma_a^2 = \frac{\sigma^2}{\sigma_{\log_{10} A}^2},$$

проводя оценку при различных значениях пороговой погрешности σ^2 . $\sigma_{\log_{10} A}^2$ — это дисперсия амплитуд из найденного диапазона $[\log_{10} A_{\min}; \log_{10} A_{\max}]$.

Такой подход позволяет не захватывать в расчетах участки слева или справа от линейного участка, т. к. включение их в расчеты сильно увеличит погрешность оценки. Для найденного интервала $[\log_{10} A_{\min}; \log_{10} A_{\max}]$, где распределение имеет линейный характер, оценку наклона можно построить более точно методом наименьших квадратов.

По выборкам для потока Геминид 2016–2022 гг., полученным по ранее представленной методике, для различных дней в пределах действия метеорного потока построены подобные кумулятивные распределения. Для каждого набора распределений в пределах дня рассчитаны индексы масс s и усреднены по 4 интервалам дальностей (100–140 км, 110–150 км, 120–160 км, 130–170 км). Полученные значения индекса масс имеют очень хорошее совпадение для различных годов в пределах интервала 2016–2022 гг., поэтому полученные значения усреднены в пределах указанного периода и представлены на рис. 8. Межгодовая изменчивость индекса масс для соответствующих суток представлена в виде вертикальных линий. Кроме того, для сравнения на этом же рисунке представлены значения индекса масс для спорадического низкоскоростного антисолнечного источника со скоростями 12–40 км/с для интервала дат от 17 ноября 2021 г. до 7 января 2022 г. Видим, что для потока Геминид в области максимума численности ($\lambda = 262^\circ$) значения индекса масс опускаются до 1.5, что соответствует преобладанию более крупных частиц.

При этом для спорадического фона характерны значения индекса масс $s \approx 1.9$ –2. Полученные значения для фонового потока совпадают с исследованиями в других работах [11, 17]. Значения же индекса масс для метеорного потока Геминид в период максимума активности обычно выше представленных значений: оценки приводятся с 1.6 и выше [9]. Подобный результат видимо связан с лучшей статистической обеспеченностью результатов метеорных наблюдений, однородностью полученных данных, а также лучшим выделением потоковых метеоров относительно фоновых метеоров. Кроме того, учитывая, что переуплотненные следы могут несколько исказить получаемое кумулятивное распределение, можно предположить, что реальные оценки индекса масс для потока Геминид в период максимума активности могут быть менее 1.5.

5. Заключение

В данной работе представлено описание и некоторые результаты работы модернизированного метеорного радара Skiyet Казанского федерального университета. По результатам наблюдений с 2015 г. накоплены данные о более чем 80 млн. метеорных отражений. Точность и качество радиометеорных наблюдений апробировано на метеорном потоке Геминид. Представлены результаты дрейфа радианта метеорного потока, численности наблюдений в зависимости от солнечной долготы, а также вариации индекса масс. Полученные измерения подтверждают, дополняют и уточняют полученные ранее другими исследователями значения указанных параметров. Кроме того, для потока Геминид получена нелинейная зависимость высоты сгорания метеоров и их скорости. Таким образом, метеорный радар КФУ является уникальным в России высокоточным инструментом исследования притока метеорного вещества в атмосферу Земли.

Работа Коротышкина Д.В. и Валиуллина Ф.С. финансировалась за счет субсидии Минобрнауки РФ FZSM-2023-0015, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. D. W. R. McKinley, *Meteor science and engineering*. (1961).
2. K. V. Kostylev, *Astronomicheskiye osnovy meteornoy radiosvyazi* (1970).
3. W. Hocking, B. Fuller, and B. Vandepeer, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**, 155, 2001.
4. D. Korotyshkin, E. Merzlyakov, O. Sherstyukov, and F. Valiullin, *Advances in Space Research*, **63**, 2132, 2019.
5. W. Elford, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **4**, 2004.
6. J. Jones and W. Jones, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **367**, 1050, 2006.
7. P. Brown, R. Weryk, D. Wong, and J. Jones, *Icarus*, **195**, 317, 2008.
8. P. Brown, D. Wong, R. Weryk, and P. Wiegert, *Icarus*, **207**, 66, 2010.
9. R. Blaauw, M. Campbell-Brown, and R. Weryk, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **414**, 3322, 2011.
10. P. Pokorny and P. Brown, *Astron. and Astrophys.*, **592**, 2016.
11. D. Janches, C. Brunini, and J. Hormaechea, *Astron. J.*, **157**, 240, 2019.
12. G. Stober, C. Schult, C. Baumann, R. Latteck, and M. Rapp, *Annales Geophysicae*, **31**, 473, 2013.
13. G. V. Andreev, *Astronomicheskii Vestnik*, **17**, 56, 1983.
14. T. A. Valentic, J. P. Avery, S. K. Avery, and R. C. Livingston, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35**, 524, 1997.
15. J. Jones, A. R. Webster, and W. K. Hocking, *Radio Science*, **33**, 55, 1998.
16. J. Jones, *Canadian Journal of Physics*, **46**, 1101, 1968.
17. B. M. Shustov and R. V. Zolotarev, *Astronomy Reports*, **66**, 179, 2022.
18. M. Fischler and R. Bolles, *Communications of the ACM*, **24**, 381, 1981.

Моделирование распада двойных транснептуновых объектов

Гусев В.Д., Кузнецов Э.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Выполнено моделирование распада двойных транснептуновых объектов, относящихся к динамически холодному населению классического пояса Койпера. Рассматривались двойные транснептуновые объекты массой 10^{-10} , 10^{-11} , 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} масс Солнца при отношениях масс компонентов 1:1, 1:2, 1:10, 1:25 без учета приливных эффектов. По результатам численных экспериментов сформулирован критерий формирования пары транснептуновых объектов на близких орбитах в результате распада двойного сверхширокого транснептунового объекта. Получены оценки относительных расстояний, скоростей компонентов и метрики Холшевникова, соответствующие моменту формирования пары. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 30.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: двойные транснептуновые объекты, пары транснептуновых объектов

Modeling the decay of binary trans-Neptunian objects

Gusev V.D., Kuznetsov E.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Modeling of the decay of binary trans-Neptunian objects belonging to the dynamically cold population of the classical Kuiper belt has been performed. We considered binary trans-Neptunian objects with masses 10^{-10} , 10^{-11} , 10^{-12} , 10^{-13} , 10^{-14} of solar masses at component mass ratios of 1:1, 1:2, 1:10, 1:25 without taking into account tidal effects. Based on the results of numerical experiments, a criterion for the formation of a pair of trans-Neptunian objects in close orbits as a result of the decay of a binary ultra-wide trans-Neptunian object. Estimates of the relative distances, velocities of the components and the Kholshchevnikov metric corresponding to the moment of the pair formation are obtained. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 30.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: binary trans-Neptunian objects, pairs of trans-Neptunian objects

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.003

1. Введение

В главном поясе астероидов существует большое количество пар астероидов с близкими орбитами, имеющих общее происхождение [1]. Предположение о возможном существовании столкновительных семейств малых тел за орбитой Нептуна было высказано в [2]. Первое семейство, идентифицированное во внешней части Солнечной системы, было связано с карликовой планетой (136108) Haumea [3]. Задача поиска столкновительных семейств транснептуновых объектов (ТНО) рассматривалась в [4] и [5]. В работе [6] выполнен систематический поиск статистически значимых пар и групп динамически коррелированных объектов с большими полуосьми орбит более 25 а. е. Было подтверждено существование пары 2000 FC8 — 2000 GX146, указанной в [2] в качестве кандидата. Были выделены кандидаты в четыре новых столкновительных семейства ТНО, связанных с парами (134860) 2000 OJ67 — 2001 UP18, 2003 UT291 — 2004 VB131, 2002 CU154 — 2005 CE81 и 2003 HF57 — 2013 GG137. Также были найдены несколько пар ТНО, которые могут иметь общее происхождение: (135571) 2002 GG32 — (160148) 2001 KV76 и 2005 GX206 — 2015 BD519.

С момента обнаружения первых ТНО в 1992 г. прошло более 30 лет. По состоянию на 24 октября 2023 г. известно 4487 ТНО¹. Открытие новых ТНО способствовало обнаружению новых пар ТНО на близких орбитах. В работе [7] выделены 26 пар ТНО на близких орбитах, а также 21 пара ТНО, в которых один из объектов является двойным [8].

Поиск пар ТНО на близких орбитах показал, что такие пары принадлежат к динамически холодному населению классического пояса Койпера [9]. В этой области складываются благоприятные условия для сохранения тесных двойных систем ТНО [10]. В то же время широкие двойные системы ТНО могут распадаться в результате сближений с другими объектами [11]. Сверхширокие двойные системы пояса Койпера могут распадаться при длительном взаимодействии с другими объектами того же класса. Время жизни сверхшироких систем сравнимо с возрастом Солнечной системы [12]. Таким образом, распад сверхшироких двойных ТНО может быть одним из механизмов формирования пар ТНО на близких орбитах в современную эпоху. В настоящей работе исследуются условия распада двойных ТНО с целью определения начальных условий, соответствующих формированию пары ТНО.

¹https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html#!#x

2. Численное моделирование распада двойной системы

Мы провели исследование динамической эволюции двойной системы на грани распада. Большая полуось орбиты второго компонента двойной системы варьировалась от 0.5 до 1 радиуса сферы Хилла R_H первичного — более массивного — компонента. В качестве критерия распада двойной системы мы принимаем условие изменения значения полной энергии h системы с отрицательного на положительное. Выражение для полной энергии h двойной системы имеет вид [13]

$$h = v^2 - 2G \frac{M_{\text{sys}}}{r}, \quad (1)$$

где v — относительная скорость компонентов, G — гравитационная постоянная, M_{sys} — масса двойной системы, r — расстояние между компонентами двойной системы.

Когда энергия системы становится положительной, мы фиксируем расстояние между компонентами r , относительную скорость v и орбитальную метрику. В качестве орбитальной метрики мы используем метрику Холшевникова ρ^2 . Обозначение метрики соответствует обозначению, используемому в работе [14]

$$\rho^2 = (1 + e_1^2)p_1 + (1 + e_2^2)p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2}(\cos I + e_1 e_2 \cos P), \quad (2)$$

где $e_1, e_2, p_1, p_2, i_1, i_2$ — эксцентриситеты, фокальные параметры и наклоны орбит первого и второго объектов, соответственно; I — взаимный наклон орбит и P — угол между векторами Лапласа, направленными от притягивающего центра к перицентру. Далее,

$$\cos I = c_1 c_2 + s_1 s_2 \cos \Delta, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \cos P = s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2) \cos \Delta + \\ + (c_2 \cos \omega_1 \sin \omega_2 - c_1 \sin \omega_1 \cos \omega_2) \sin \Delta, \end{aligned} \quad (4)$$

$s = \sin i, c = \cos i, \Delta = \Omega_1 - \Omega_2, \Omega$ и ω долгота восходящего узла орбиты и аргумент перицентра, соответственно.

Выбор метрики ρ^2 был обусловлен тем, что она зависит от разностей долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$ и разностей аргументов перицентров $\Delta\omega$ орбит. Транснептуновые объекты, сформировавшиеся в результате распада двойного ТНО, имеют близкие значения элементов орбит. Разности долгот восходящих узлов $\Delta\Omega$ и аргументов перицентров $\Delta\omega$ орбит ТНО образовавшейся пары должны одновременно стремиться к нулю в окрестности момента рождения пары [6].

Динамическая эволюция двойного ТНО моделировалась в пакете NBI [15] с помощью симплектического интегратора на основе отображения типа Уиздома-Холмана для иерархических систем N -тел. Компоненты двойного ТНО принимались материальными точками без учета приливного взаимодействия. Такое упрощение оправданно, поскольку диссипативная сила, вызванная приливами, возникающими на двойных компонентах, значительна только при очень малых расстояниях между компонентами (см. например, [16]).

При моделировании распада двойного ТНО учитывалось притяжение Солнца и возмущения от больших планет Солнечной системы и Плутона. Массы исследуемых систем принимались равными $10^{-10}, 10^{-11}, 10^{-12}, 10^{-13}, 10^{-14}$ масс Солнца M_\odot , или равными $1.989 \cdot 10^{20}, 1.989 \cdot 10^{19}, 1.989 \cdot 10^{18}, 1.989 \cdot 10^{17}, 1.989 \cdot 10^{16}$ кг. При значениях плотности ТНО от 0.5 до 2 г/см³ [17, 18, 19] этот диапазон масс соответствует диапазону диаметров 26 – 914 км. Отношение масс компонентов исследуемых систем: 1:1, 1:2, 1:10 и 1:25. Взаимная орбита ТНО в двойной системы прямая. Гелиоцентрическая орбита первичного компонента двойного ТНО полагалась круговой с большой полуосью 43 а. е. и лежащей в инвариантной плоскости, движение прямое. Для каждого отношения масс компонентов ТНО было рассмотрено 864 варианта с различными начальными условиями. Начальное значение большой полуоси второго компонента системы принималось равным 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 R_H первичного компонента. Для каждого начального значения большой полуоси задавалось 12 начальных положений первичного компонента на гелиоцентрической орбите с шагом 30°. Затем, для каждого начального положения первичного компонента задавалось 12 начальных положений второго компонента на относительной орбите с шагом 30°. Интервал интегрирования для большинства систем составил 100 000 суток (около 274 лет), что составляет примерно один оборот системы вокруг Солнца. Время жизни систем при максимальных значениях масс оказалось больше 100 тыс. суток. Для таких систем было выполнено повторное интегрирование на интервале 1 млн. суток (около 2738 лет).

3. Критерий формирования пары ТНО

В табл. 1–5 представлены условия распада двойных систем ТНО различных масс и соотношений масс компонентов, а также число распадов, полученное из моделирования. Приведены относительное расстояние между

Таблица 1: Условия распада двойных систем ТНО массой $M_{\text{sys}} = 10^{-10} M_{\odot}$.

$m_1:m_2$	r, R_{H}	v, V_{esc}	$\rho_2, \text{км}^{1/2}$	Число распадов
1:1	2.057 ± 0.167	1.421 ± 0.0	180.11 ± 185.35	280
1:2	1.894 ± 0.211	1.231 ± 0.0	203.92 ± 211.80	476
1:10	1.611 ± 0.289	1.053 ± 0.0	184.41 ± 164.17	720
1:25	1.555 ± 0.296	1.02 ± 0.0	175.72 ± 160.76	758

Таблица 2: Условия распада двойных систем ТНО массой $M_{\text{sys}} = 10^{-11} M_{\odot}$.

$m_1:m_2$	r, R_{H}	v, V_{esc}	$\rho_2, \text{км}^{1/2}$	Число распадов
1:1	2.059 ± 0.169	1.421 ± 0.0	74.94 ± 90.88	282
1:2	1.879 ± 0.219	1.225 ± 0.0	114.24 ± 207.34	398
1:10	1.602 ± 0.292	1.049 ± 0.0	97.77 ± 156.93	692
1:25	1.537 ± 0.301	1.02 ± 0.0	90.87 ± 144.36	701

Таблица 3: Условия распада двойных систем ТНО массой $M_{\text{sys}} = 10^{-12} M_{\odot}$.

$m_1:m_2$	r, R_{H}	v, V_{esc}	$\rho_2, \text{км}^{1/2}$	Число распадов
1:1	2.027 ± 0.172	1.415 ± 0.0	30.15 ± 16.52	224
1:2	1.879 ± 0.22	1.225 ± 0.0	60.27 ± 173.83	397
1:10	1.602 ± 0.292	1.049 ± 0.0	45.34 ± 103.09	692
1:25	1.537 ± 0.301	1.02 ± 0.0	45.42 ± 115.53	701

Таблица 4: Условия распада двойных систем ТНО массой $M_{\text{sys}} = 10^{-13} M_{\odot}$.

$m_1:m_2$	r, R_{H}	v, V_{esc}	$\rho_2, \text{км}^{1/2}$	Число распадов
1:1	2.027 ± 0.172	1.415 ± 0.0	13.97 ± 7.56	224
1:2	1.88 ± 0.219	1.225 ± 0.0	33.47 ± 145.16	397
1:10	1.602 ± 0.292	1.049 ± 0.0	22.9 ± 87.37	692
1:25	1.537 ± 0.3	1.02 ± 0.0	23.99 ± 88.5	702

Таблица 5: Условия распада двойных систем ТНО массой $M_{\text{sys}} = 10^{-14} M_{\odot}$.

$m_1:m_2$	r, R_{H}	v, V_{esc}	$\rho_2, \text{км}^{1/2}$	Число распадов
1:1	2.027 ± 0.172	1.415 ± 0.0	6.48 ± 3.50	224
1:2	1.879 ± 0.220	1.225 ± 0.0	23.72 ± 144.61	398
1:10	1.602 ± 0.292	1.049 ± 0.0	8.95 ± 26.73	692
1:25	1.536 ± 0.300	1.020 ± 0.0	10.26 ± 46.25	699

компонентами r , выраженное в радиусах сферы Хилла R_{H} первичного компонента, модуль скорости второго компонента v относительно первичного компонента, выраженной в единицах второй космической скорости V_{esc} первичного компонента, и метрика Холшевникова ρ_2 в единицах $\text{км}^{1/2}$.

Условия распада для систем разных масс и с одинаковым соотношением масс компонентов примерно одинаковы. Например, для систем массой $M_{\text{sys}} = 10^{-10} M_{\odot}$ при отношении масс $m_1:m_2 = 1:1$ условие распада по расстоянию и скорости выглядит как $r = 2.057 \pm 0.167 R_{\text{H}}$, $v = 1.421 \pm 0.004 V_{\text{esc}}$. Условие распада по расстоянию и скорости для $M_{\text{sys}} = 10^{-14} M_{\odot}$ и $m_1:m_2 = 1:1$ имеет вид: $r = 2.027 \pm 0.172 R_{\text{H}}$, $v = 1.415 \pm 0.0 V_{\text{esc}}$. Аналогично для систем массой 10^{-11} , 10^{-12} , $10^{-13} M_{\odot}$ и разных соотношений масс.

Обобщим критерий формирования пары ТНО для заданного отношения масс $m_1:m_2$. Выразим относительное расстояние r в единицах радиуса сферы Хилла R_{H} двойной системы, а относительную скорость v в единицах второй космической скорости V_{esc} для массы двойной системы на объектоцентрическом рассто-

Таблица 6: Значения метрики ρ_2 в момент распада двойного ТНО.

$M_{\text{sys}}, M_{\odot}$	$\rho_2, \text{км}^{1/2}$
10^{-14}	0 – 169
10^{-13}	0 – 179
10^{-12}	0 – 234
10^{-11}	0 – 322
10^{-10}	0 – 416

янии r . Тогда критерий для разных соотношений масс можно представить в виде:

$$r = 1.6 \pm 0.3 R_{\text{H}}, v = V_{\text{esc}}. \quad (5)$$

Значения метрики ρ_2 , измеряющей расстояние между орбитами ТНО, в момент образования пары существенно отличаются для систем разных масс. В табл. 6 приведены значения метрики ρ_2 в момент распада двойных ТНО в зависимости от массы систем. Максимальное значение метрики ρ_2 зависит от массы двойной системы и в момент формирования пары ТНО может достигать $416 \text{ км}^{1/2}$. Дополним критерий формирования пары следующим условием на метрику $\rho_2 \leq 400 \text{ км}^{1/2}$ ($\rho_2 \leq 0.034 \text{ а. е.}^{1/2}$). Критерий формирования пары ТНО в результате распада двойного ТНО принимает вид:

$$r = 1.6 \pm 0.3 R_{\text{H}}, v = V_{\text{esc}}, \rho_2 \leq 0.034 \text{ а. е.}^{1/2}. \quad (6)$$

Для многих известных на сегодняшний день ТНО нет надежных оценок масс. В таком случае в качестве критерия можно использовать уравнение (6). Если для исследуемых ТНО есть оценки масс, можно использовать условия формирования пары с учетом критерия по метрике ρ_2 из табл. 1–5.

4. Заключение

На основе результатов численного моделирования распада широких двойных систем ТНО сформулирован критерий формирования пары ТНО на близких орбитах. Рассмотрены двойные системы с различными массами при различных отношениях масс компонентов. Критерии, которому должна удовлетворять образовавшаяся пара ТНО, а также орбиты ТНО, включают расстояние между объектами, относительную скорость ТНО и расстояние между орбитами в виде метрики Холшевникова. Найдены значения критериев в зависимости от массы родительской двойной системы ТНО и отношения масс ее компонентов.

Критерий формирования пары ТНО на близких орбитах в результате распада широкой двойной системы ТНО получен для объектов, принадлежащих к классическому динамически холодному населению пояса Койпера. Применимость критерия формирования пары для объектов других классов не проверялась.

Результаты работы позволяют оценить динамические свойства молодой пары ТНО непосредственно после ее формирования. Данный критерий будет использован для исследования методов оценки возраста пар ТНО на близких орбитах.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Список литературы

1. D. Vokrouhlický, P. Pravec, J. Durech, B. Bolin, et al., *Astron. and Astrophys.*, **598**, A91, 2017.
2. E. I. Chiang, *Astrophys. J. Lett.*, **573**, L65, 2002.
3. M. E. Brown, K. M. Barkume, D. Ragozzine, and E. L. Schaller, *Nature*, **446**, 294, 2007.
4. E. I. Chiang, J. R. Lovering, R. L. Millis, M. W. Buie, L. H. Wasserman, and K. J. Meech, *arXiv e-prints*, astro-ph/0309250, 2003.
5. R. A. Marcus, D. Ragozzine, R. A. Murray-Clay, and M. J. Holman, *Astrophys. J.*, **733**, 40, 2011.
6. C. de la Fuente Marcos and R. de la Fuente Marcos, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **474**, 838, 2018.
7. E. D. Kuznetsov, O. M. Al-Shiblawi, and V. D. Gusev, *Solar System Research*, **56**, 122, 2022.
8. E. Kuznetsov, O. Al-Shiblawi, and V. Gusev, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **51**, 226, 2021.
9. E. D. Kuznetsov, O. M. Al-Shiblawi, V. D. Gusev, and D. S. Ustinov, in *52nd Lunar and Planetary Science Conference*, 1859, Lunar and Planetary Science Conference (2021).
10. D. Nesvorný and D. Vokrouhlický, *Icarus*, **331**, 49, 2019.
11. H. Campbell, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, **53**, 205.07 (2021).
12. H. M. Campbell, L. R. Stone, and N. A. Kaib, *Astron. J.*, **165**, 19, 2023.
13. M. Subbotin, *Vvedeniye v teoreticheskuyu astronomiyu* (1968).

14. K. V. Kholshchevnikov, G. I. Kokhirova, P. B. Babadzhanov, and U. H. Khamroev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **462**, 2275, 2016.
15. F. Varadi, M. Ghil, and W. M. Kaula, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **72**, 187, 1998.
16. S. B. Porter and W. M. Grundy, *Icarus*, **220**, 947, 2012.
17. P. Lacerda and D. C. Jewitt, *Astron. J.*, **133**, 1393, 2007.
18. W. M. Grundy, K. S. Noll, J. Virtanen, K. Muinonen, et al., *Icarus*, **197**, 260, 2008.
19. J. Fernández, in D. Prialnik, M. A. Barucci, and L. Young, eds., *The Trans-Neptunian Solar System*, 1–22 (2020).

Синтетические фазовые зависимости поляризации комет в широкополосных и узкополосных кометных фильтрах

Киселев Н.Н.^{1,2}, Жужулина Е.А.², Петров Д.В.², Карпов Н.В.¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

В работе приводятся результаты построения и анализа синтетических фазовых зависимостей поляризации комет, на основе Поляриметрической Базы Данных Комет [1] и наблюдений, выполненных в 2018–2023 гг. на поляриметрах 2.6-м телескопа КраО и 2-м телескопа обсерватории Пик Терскол в широкополосных и узкополосных кометных фильтрах. Показано, что фазовые зависимости степени линейной поляризации систематически отличаются для короткопериодических и долгопериодических комет. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: кометы, поляриметрия

Synthetic phase dependences of comet polarization in broadband and narrowband comet filters

Kiselev N.N.^{1,2}, Zhuzhulina E.A.², Petrov D.V.², Karpov N.V.¹

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²Crimean Astrophysical Observatory of the RAS, Crimea, Russia

The paper presents the results of constructing and analyzing synthetic phase dependences of the polarization of comets, based on the Polarimetric Comet Database [1] and observations made in 2018–2023 on the polarimeters of the 2.6-m telescope of the CrAO and the 2-m telescope of the Peak Observatory Terskol in broadband and narrowband comet filters. It is shown that the phase dependences of the degree of linear polarization are systematically different for short-period and long-period comets. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: comets, polarization

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.004

1. Введение

Различные типы рассеивающих частиц (пылинки атмосфер комет, частицы реголитовых поверхностей безатмосферных тел Солнечной системы и т. п.), имеющие разный состав и морфологию, проявляют характерные поляризационные свойства рассеянного излучения. Как известно, степень линейной поляризации определяется следующим соотношением:

$$P = \frac{I_{\perp} - I_{\parallel}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}. \quad (1)$$

Здесь I_{\perp} и I_{\parallel} — интенсивности рассеянного света, поляризованного в плоскости рассеяния и поляризованного в плоскости, перпендикулярной плоскости рассеяния, соответственно. Для большинства рассеивающих свет частиц и сред степень поляризации меняется с фазовым углом α (угол между направлением «комета — Солнце» и «комета — наблюдатель»), образуя характерные фазовые зависимости поляризации (ФЗП), состоящие из положительных и отрицательных ветвей, если $I_{\perp} > I_{\parallel}$ и $I_{\perp} < I_{\parallel}$, соответственно, как показано на рис. 1.

Физический смысл описываемой в таком случае отрицательной степени поляризации состоит в том, что позиционный угол плоскости поляризации параллелен плоскости рассеяния.

Фазовая зависимость степени линейной поляризации и ее параметры P_{\min} , α_{\min} , α_{inv} , h , P_{\max} и α_{\max} являются наиболее чувствительными к физическим свойствам рассеивающих частиц. Поэтому поляриметрические наблюдения могут дать информацию о природе рассеивающих частиц и физических процессах, которая не может быть получена из других видов наблюдений.

В большинстве случаев, кометы наблюдаются в ограниченном диапазоне фазовых углов. Полную фазовую зависимость поляризации комет в диапазоне фазовых углов, доступных для наблюдений с Земли, — $0^{\circ} \leq \alpha \leq 130^{\circ}$ — можно получить в виде синтетической (средней) кривой поляризации комет, взятых из Поляриметрической базы данных комет (CPDB) [1]. Она содержит 3441 измерение линейной и круговой поляризации 95 комет, в широкополосных и узкополосных фильтрах в спектральной области 0.3–2.3 мкм, полученное в период 1881–2016 гг. Диапазоны фазовых углов, гелио- и геоцентрических расстояний комет —

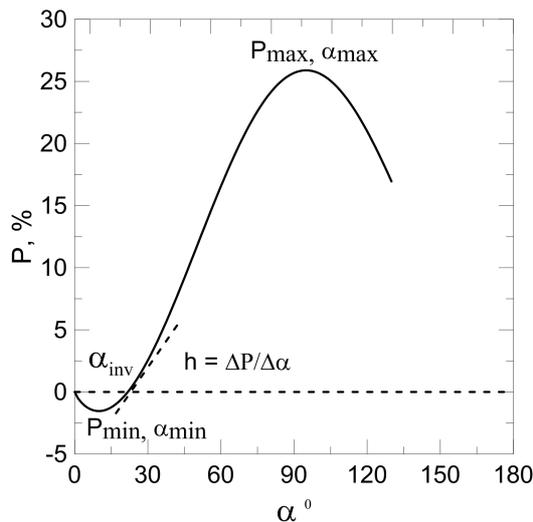


Рис. 1: Типичный вид фазовой зависимости поляризации комет и ее параметры P_{\min} , α_{\min} , α_{inv} , h , P_{\max} и α_{\max} .

0–122 град, 0.34–7.01 а. е., 0.01–6.52 а. е., соответственно. Построение синтетических ФЗП континуума комет и определения их параметров сталкивается с рядом проблем. Они вызваны сложным характером спектров комет, состоящих из непрерывного спектра, благодаря рассеянию излучения на пыли и излучения молекулярных эмиссий, переменностью отношения континуум/молекулярные миссии, вызванное разным составом комет и изменением его с гелиоцентрическим расстоянием, со временем (активность комет), с пространственным распределением пыли и газа по коме. К тому же значительная часть CPDB содержит результаты измерений в широкополосных и не системных фотометрических полосах.

Рис. 2 демонстрирует большое рассеяние степени поляризации комет для спектральной области (5000–5925 Å) около широкополосного фильтра V (5448/840 Å), взятых из CPDB [1].

На рис. 2 видно, что в области фазовых углов > 50 градусов синтетические ФЗП образуют две группы. Впервые наблюдаемое разделение комет на две группы на диаграмме степень поляризации-фазовый угол было установлено в 1980-х (см. работу [2] и ссылки внутри). В этих работах были использованы все имеющиеся к тому времени поляриметрические наблюдения комет, проведенные в основном с широкополосными фильтрами. Было отмечено, что деление комет на две группы отражает, в первую очередь, действие двух механизмов возникновения поляризованного излучения в кометах: рассеяние света на пылевых частицах и резонансная флуоресценция молекулярных эмиссий. В зависимости от ширины используемого фильтра даже одна комета может попасть на обе ветви. Это маскирует реальные различия физических свойств

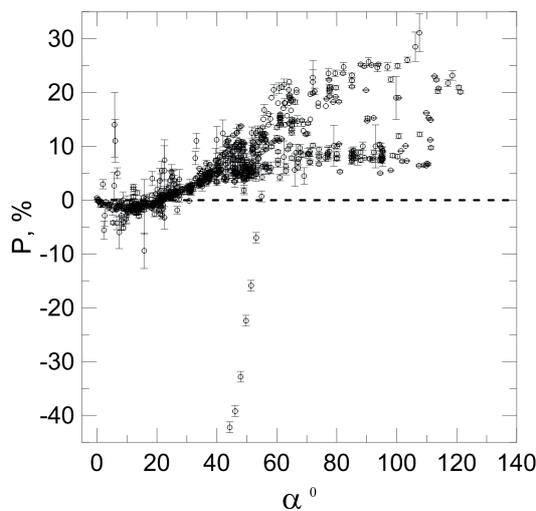


Рис. 2: Синтетическая фазовая зависимость степени поляризации комет по данным вблизи широкополосного фильтра V (5448/840 Å) [1].

пылинок в атмосферах разных комет. Позднее, Перин и Лами [3], анализируя данные 10 комет, пришли к заключению, что каждая комета имеет собственный характер изменения степени поляризации с фазовым углом. Однако только для 4 комет из 10 рассмотренных авторами степень поляризации была измерена в узкополосных континуумных фильтрах. Кроме того, пропускание молекулярных эмиссий континуумными фильтрами не учитывалось. Зубко и др. [4] пришли к заключению, что большой диапазон поляризации, наблюдаемый в кометах, не может быть объяснен деполяризацией молекулярными эмиссиями и предположили, что наблюдаемая дисперсия P около максимума поляризации на фазовых углах $\alpha \approx 90^\circ$ является результатом различных свойств кометной пыли разных комет, а именно разным относительным изобилием слабо и сильно поглощающих частиц.

В обзоре [5] отмечается, что кометы являются объектами, чрезвычайно разнообразными по физическим и динамическим свойствам. Поэтому мотивацией наших исследований фазовых зависимостей поляризации было желание ответить на вопросы:

- являются ли фазовые зависимости поляризации разных комет индивидуальными;
- можно ли выделить таксономические классы комет по поляризационным свойствам;
- и если «Да», то связаны ли поляриметрические таксономические классы комет с динамическими классами (местами происхождения) и/или эволюцией.

2. Аппаратура и наблюдения фазовой зависимости степени линейной поляризации комет

Для составления синтетических ФЗП комет мы использовали два источника данных: поляриметрическая база данных комет [1] и новые результаты наблюдений. В 2018 г. в КрАО и обсерватории Пик Терскол были введены в строй два идентичных двухканальных апертурных поляриметра им. Н.М. Шаховского. Оптическая система каждого поляриметра состоит из модулятора, который является вращающейся со скоростью около 30 оборотов в секунду ахроматической волновой пластиной. Для измерения линейной поляризации используется полуволновая пластина $\lambda/2$. Для разделения света на два ортогонально поляризованных луча, после модулятора установлена призма Волластона. Далее, с помощью зеркал, лучи направляются в два канала, имеющих свой приемник излучения и индивидуальный набор светофильтров. Красный канал оснащен охлаждаемым ФЭУ Hamamatsu R943-02, а синий канал — ФЭУ ЕМІ 6556 В. Подробное описание поляриметров и методик наблюдений приведено в работах [6] и [7].

Благодаря этому в период с 2018 по 2023 г. в КрАО и обсерватории Пик Терскол проведены 411 измерений линейной поляризации 36 комет (15 короткопериодических и 21 долгопериодических) в широкополосных BVRI фильтрах и узкополосных кометных фильтрах. Диапазон фазовых углов, гелио- и геоцентрических расстояний составил: 1.2–102.9 град, 0.24–6.33 а. е., 0.23–6.50 а. е. соответственно. Эти данные были добавлены в CPDB.

3. Аппроксимация данных наблюдений

Для аппроксимации получаемых из наблюдений фазовых зависимостей степени линейной поляризации комет предложены четыре функции:

$$P(\alpha) = b \times \sin^{c_1} \alpha \times \cos^{c_2} \frac{\alpha}{2} \times \sin(\alpha - \alpha_{\text{inv}}), \quad (2)$$

где $b, c_1, c_2, \alpha_{\text{inv}}$ — свободные параметры [8].

$$P(\alpha) = \frac{h(1 - e^{-m\alpha})(1 - e^{-n(\alpha - \alpha_{\text{inv}})})(1 - e^{-l(\alpha - \pi)})}{n(1 - e^{-m\alpha_{\text{inv}}})(1 - e^{-l(\alpha_{\text{inv}} - \pi)})}, \quad (3)$$

где $h, m, n, l, \alpha_{\text{inv}}$ — свободные параметры [9].

$$P(\alpha) = b \times \sin^{c_1} \alpha \times \cos^{c_2} \frac{\alpha}{2} \times \sin(\alpha - \alpha_{\text{inv}}) \times \left(\frac{2}{\pi} \times \arccos^{c_3} \frac{\alpha}{\pi}\right)^{c_4}, \quad (4)$$

где $b, c_1, c_2, c_3, c_4, \alpha_{\text{inv}}$ — свободные параметры (эта работа, [10]).

$$P(\alpha) = A_0 \times \exp\left(-\frac{\alpha}{A_1}\right) - 1 + A_2\alpha, \quad (5)$$

где A_0, A_1, A_2 — свободные параметры [11].

Мы провели аппроксимацию имеющихся данных в синем (рис. 3) и красном (рис. 4) континууме, а также в широкополосных фильтрах R (рис. 5) и I (рис. 6) при помощи уравнений (2)–(5). Подбор свободных параметров каждого уравнения осуществлялся при помощи метода наименьших квадратов. Возникает вопрос о наиболее предпочтительной функции для аппроксимации наблюдений. Из

рисунков видно, что функция (4) является наиболее предпочтительной функцией для аппроксимации наблюдений, т. к. она обеспечивает наименьшее расхождение между наблюдательными данными и аппроксимационной кривой. Это достигается за счет большего количества параметров. При $c_3 = c_4 = 0$ функция (4) превращается в функцию (2).

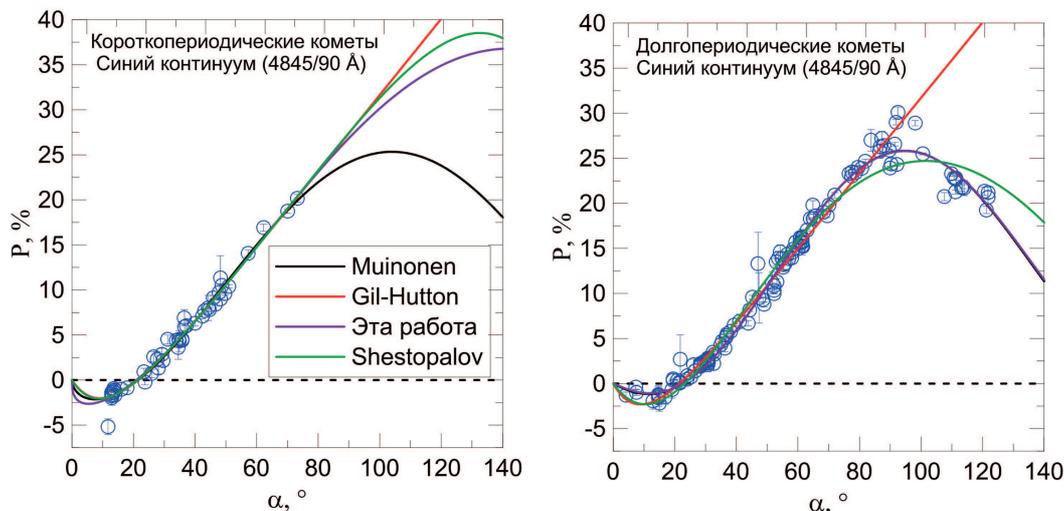


Рис. 3: ФЗП синего континуума (полоса 4845/90 Å) короткопериодических (слева) и долгопериодических (справа) комет и их аппроксимация.

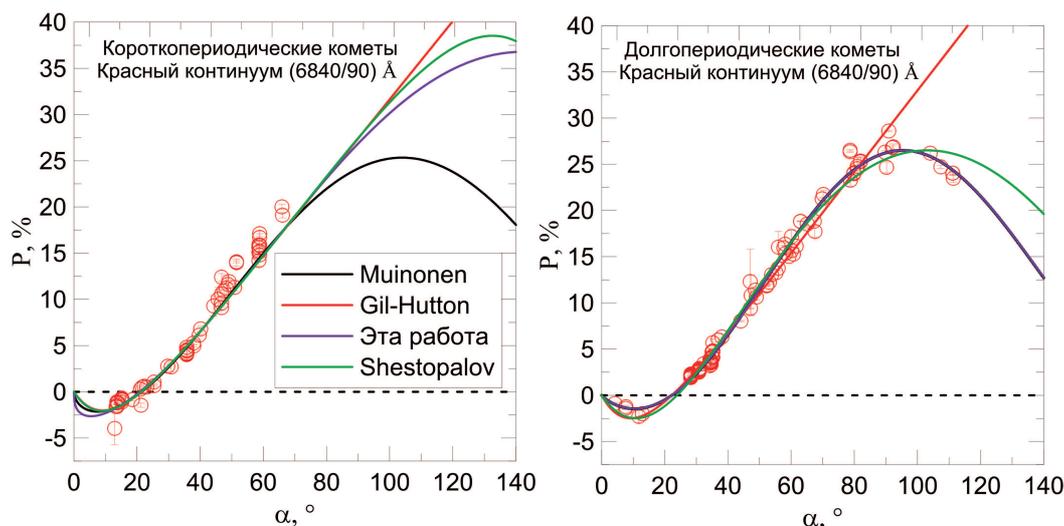


Рис. 4: ФЗП красного континуума (полоса 6840/90 Å) короткопериодических (слева) и долгопериодических (справа) комет и их аппроксимация.

Как видно из представленных рис. 3–6, аппроксимация наблюдений каждой функцией сильно зависит от скважности наблюдений, диапазона углов и поэтому не могут надежно обеспечить экстраполяцию данных на недостающем диапазоне углов, например, на максимуме поляризации. Чтобы получить однозначный вывод о различии морфологических форм ФЗП и их параметров долго- и короткопериодических комет, была проведена аппроксимация наблюдаемых данных, полученных на фазовых углах, общих для этих комет в области углов до 80° . Они показаны на рис. 7.

Из рисунка следует, что на сопоставимых диапазонах фазовых углов ФЗП долгопериодических комет систематически отличаются от ФЗП короткопериодических комет.

4. Выводы

Проведены поляриметрические наблюдения фазовой зависимости степени линейной поляризации короткопериодических и долгопериодических комет, позволившие значительно расширить поляриметрическую базу

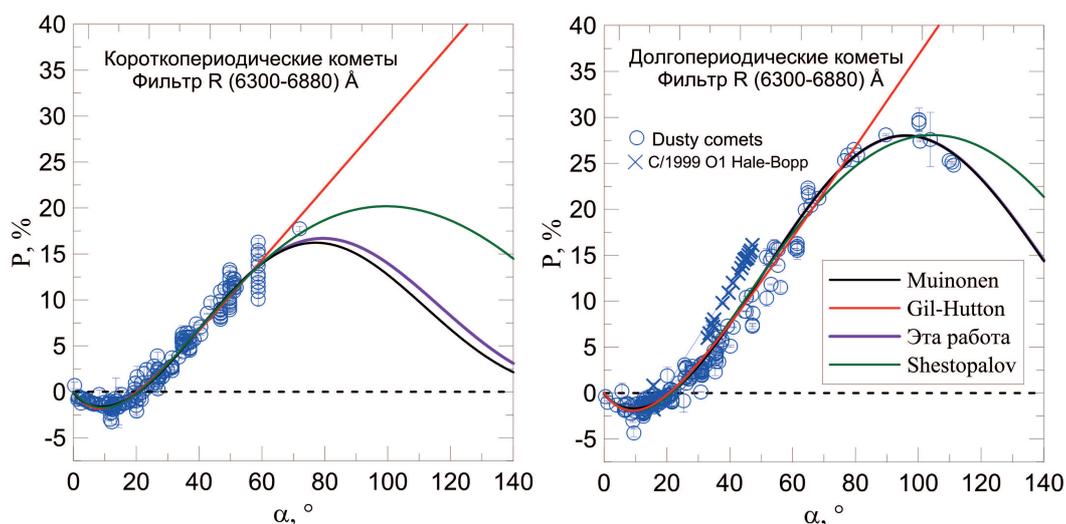


Рис. 5: ФЗП короткопериодических (слева) и долгопериодических (справа) комет в широкополосном фильтре R (полоса 6300–6880) Å и их аппроксимация.

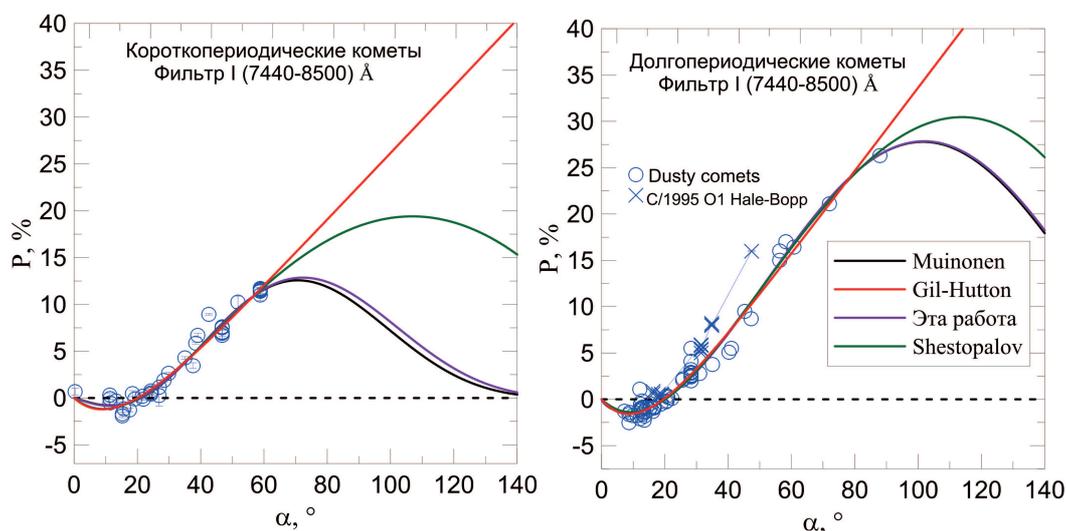


Рис. 6: ФЗП короткопериодических (слева) и долгопериодических (справа) комет в широкополосном фильтре I (полоса 7440–8500) Å и их аппроксимация.

данных наблюдений комет. Построены синтетические фазовые зависимости поляризации в «синем» и «красном» узкополосных континуумных фильтрах и в широкополосных фильтрах R и I для короткопериодических и долгопериодических комет. Показано, что на сопоставимых диапазонах фазовых углов ФЗП долгопериодических комет систематически отличаются от ФЗП короткопериодических комет в широкополосных R и I фильтрах.

Список литературы

1. N. Kiselev, E. Shubina, S. Velichko, K. Jockers, V. Rosenbush, and S. Kikuchi, *NASA Planetary Data System*, 2017.
2. O. V. Dobrovolsky, N. N. Kiselev, and G. P. Chernova, *Earth Moon and Planets*, **34**, 189, 1986.
3. J. Perin and P. Lamy, *Similarity and diversity of the polarization of comets* (1987).
4. E. Zubko, G. Videen, D. C. Hines, and Y. Shkuratov, *Plan. and Space Sci.*, **123**, 63, 2016.
5. J. Crovisier, *arXiv e-prints*, astro-ph/0703785, 2007.
6. N. Kiselev, V. Rosenbush, K. Muinonen, L. Kolokolova, A. Savushkin, and N. Karpov, *The Planetary Science Journal*, **3**, 134, 2022.
7. N. N. Kiselev, A. A. Savushkin, D. V. Petrov, K. A. Antoniuk, E. V. Zhuzhulina, N. V. Karpov, and V. L. Afanasiev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 2023.

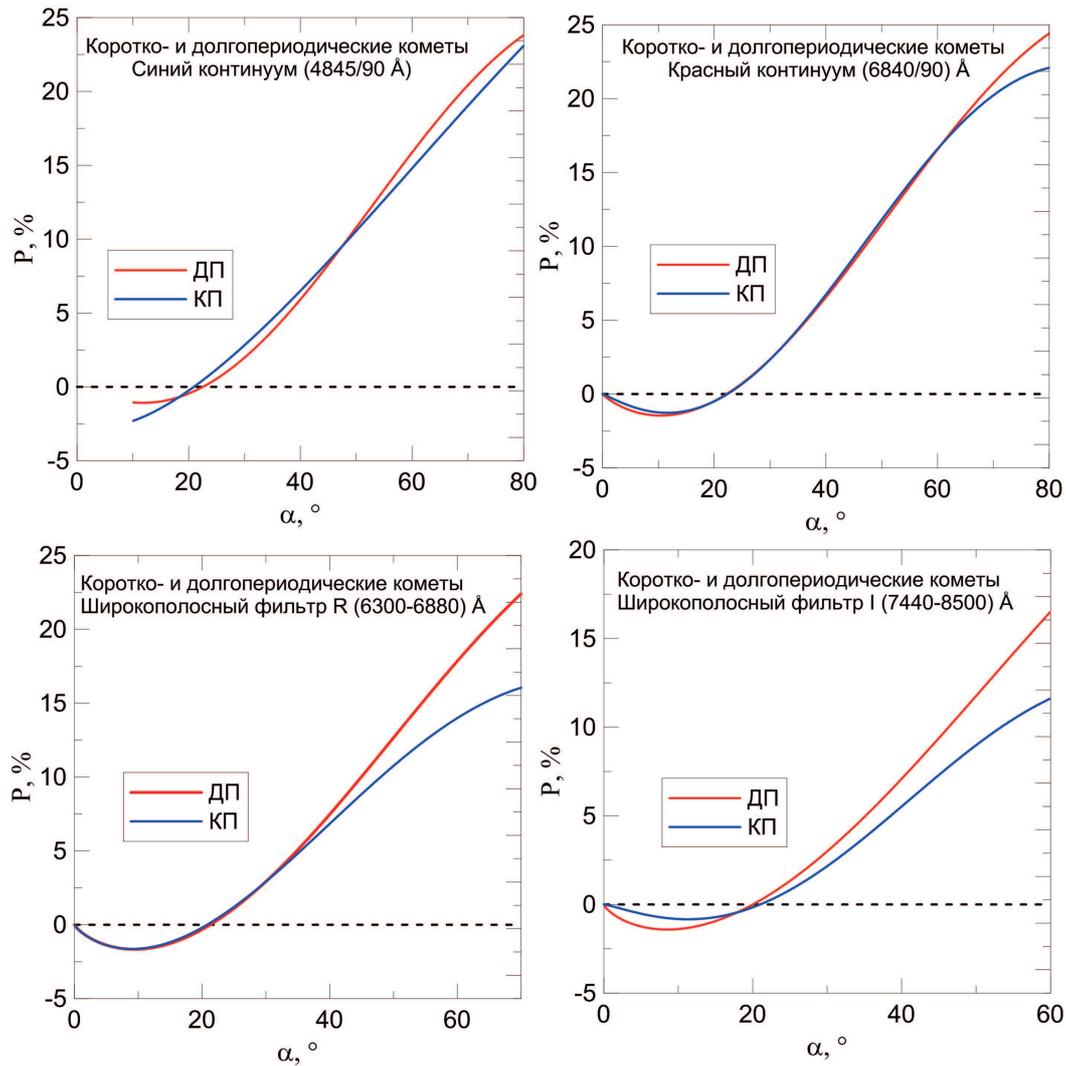


Рис. 7: Аппроксимационные зависимости поляризации долгопериодических (красные кривые) и короткопериодических (синие кривые) комет. Верхняя панель слева — ФЗП для узкополосной области синего континуума; верхняя панель справа — ФЗП для узкополосной области красного континуума; нижняя панель слева — ФЗП для красной области (6300–6880) Å; нижняя панель справа — ФЗП для ближней ИК области (7440–8500) Å.

8. K. Lumme and K. O. Muinonen, in *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, **810**, 194 (1993).
9. D. I. Shestopalov and L. F. Golubeva, *Advances in Space Research*, **59**, 2658, 2017.
10. D. V. Petrov and N. N. Kiselev, *Solar System Research*, **53**, 294, 2019.
11. R. Gil-Hutton, V. Mesa, A. Cellino, P. Bendjoya, L. Peñalosa, and F. Lovos, *Astron. and Astrophys.*, **482**, 309, 2008.

Оценки возраста пяти пар транснептуновых объектов на близких орбитах

Кузнецов Э.Д., Аль-Шиблави О.М., Гусев В.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Исследована вероятностная эволюция пяти пар транснептуновых объектов на близких орбитах. Все пары относятся к холодному населению классического пояса Койпера. Для каждого транснептунового объекта генерировалось 1000 клонов в пределах ошибок определения элементов орбиты. Численное моделирование выполнялось с помощью программы Orbit9, входящей в комплекс OrbFit. При моделировании на интервале времени 10 млн. лет в прошлое учитывались возмущения от восьми больших планет и карликовой планеты Плутон, на интервале 200 млн. лет в прошлое учитывались возмущения только от четырех планет-гигантов. Для оценки возраста пар использовались два метода. В первом методе выполнялся поиск моментов низкоскоростных сближений клонов, относящихся к разным объектам пары. Во втором методе анализировались моменты времени достижения минимального значения метрики Холшевникова между клонами разных транснептуновых объектов. Низкоскоростные сближения для рассматриваемых пар не зафиксированы. На основе анализа моментов достижения минимальных значений метрики получены оценки возраста для всех пяти пар. Минимальный возраст 42_{-31}^{+147} тыс. лет зафиксирован для пары 2013 SD101 — 2015 VY170. Максимальная оценка возраста $2.2_{-0.7}^{+1.0}$ млн. лет получена для пары 2003 QL91 — 2015 VA173. Все пять рассмотренных пар транснептуновых объектов можно отнести к молодым. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 01.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: транснептуновые объекты, холодное население классического пояса Койпера, метрика Холшевникова, вероятностная эволюция

Age estimates of five pairs of trans-Neptunian objects in close orbits

Kuznetsov E.D., Al-Shiblawi O.M., Gusev V.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

We investigated the probabilistic evolution of five pairs of trans-Neptunian objects in close orbits. All pairs belong to the cold population of the classical Kuiper belt. For each trans-Neptunian object, 1000 clones were generated within the limits of errors in determining the orbital elements. Numerical modelling was performed using the Orbit9 software included in the OrbFit. In the modelling, perturbations from eight major planets and the dwarf planet Pluto were taken into account at 10 Myr in the past, while perturbations from only four giant planets were taken into account at 200 Myr in the past. We used two methods to estimate the ages of pairs. The first method searched for moments of low relative-velocity close encounters of clones belonging to different objects in the pair. The second method analysed the moments of time when the minimum value of the Kholshchevnikov metric was reached between clones of different trans-Neptunian objects. Low relative-velocity close encounters were not recorded for the pairs under consideration. On the basis of the analysis of the moments of reaching the minimum values of the metric, we obtained age estimates for all five pairs. The minimum age of 42_{-31}^{+147} kyr was recorded for the pair 2013 SD101 — 2015 VY170. A maximum age estimate of $2.2_{-0.7}^{+1.0}$ Myr is obtained for the pair 2003 QL91 — 2015 VA173. All five pairs of trans-Neptunian objects considered can be classified as young. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 01.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: trans-Neptunian objects, cold population of the classical Kuiper belt, Kholshchevnikov metric, probabilistic evolution

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.005

1. Введение

Предположение о возможном существовании столкновительных семейств малых тел за орбитой Нептуна было высказано в работе [1]. Первое и пока единственное идентифицированное семейство во внешней части Солнечной системы связано с карликовой планетой (136108) Haumea [2]. В работе [3] предложен оригинальный сценарий формирования этого семейства. Среди объектов рассеянного диска также была обнаружена пара ТНО [4]. Задача поиска столкновительных семейств ТНО рассматривалась также в работах [5, 6]. В работе [7] выполнен систематический поиск статистически значимых пар и групп динамически коррелированных объектов с большими полуосями орбит более 25 а. е. Были найдены несколько пар ТНО, которые могут иметь общее происхождение. В работе [8] выполнен поиск пар транснептуновых объектов на близких орбитах с большими полуосями более 30 а. е. Расстояния в пространстве кеплеровых орбит оценивались с помощью метрик Холшевникова [9]. Обнаружено 26 пар транснептуновых объектов, которые могут иметь общее происхождение. В работе [10] найдены 20 пар транснептуновых объектов на близких орбитах, в которых один из ТНО является двойным, и 13 пар, в которых оба ТНО двойные.

Возможно, что в классическом поясе Койпера, в отличие от Главного пояса астероидов, доминирующим механизмом формирования пар и семейств малых тел является распад двойных и кратных ТНО, а не соударения. Наблюдения транснептуновых объектов (ТНО) указывают на относительно большую долю ТНО, которые являются либо контактно-двойными, либо двойными, либо кратными системами. В работе [11] показано, что среди динамически холодного населения классического пояса Койпера реализуются условия для сохранения тесных двойных ТНО с компонентами примерно равных масс. К динамически холодному населению классического пояса Койпера относятся ТНО со следующими позиционными элементами [12, 13]: большие полуоси орбит лежат в пределах $42 \leq a \leq 45$ а. е., эксцентриситеты $e \leq 0.1$, наклоны $i \leq 5^\circ$. Эволюция двойных ТНО может приводить к формированию широких двойных ТНО в результате многократных сближений двойных ТНО с другими объектами [14]. Образующиеся широкие двойные ТНО оказываются неустойчивыми, вследствие частых сближений с другими ТНО. Это приводит к распаду двойных систем [15] и образованию пар ТНО на близких орбитах.

В данной работе оценивается возраст пяти пар ТНО на близких орбитах на основе результатов вероятностной эволюции. В разделе 2 описаны методы исследования. Результаты моделирования и оценки возраста пар даны в разделе 3. В разделе 4 проведено обсуждение результатов и сформулированы выводы.

2. Методы исследования

В работе [8] предложен метод поиска кандидатов в молодые пары транснептуновых объектов на основе вычисления значений метрик Холшевникова ϱ_2 и ϱ_5 [9] (обозначения метрик соответствуют работе [9]). Метрика ϱ_2 определена в пятимерном пространстве кеплеровых элементов орбит: большая полуось a , эксцентриситет e , наклон i , долгота восходящего узла Ω , аргумент перигелия g (положение тела на орбите не учитывается). Метрика ϱ_5 — в трехмерном фактор-пространстве позиционных орбитальных элементов a, e, i . Близость метрик ϱ_2 и ϱ_5 может свидетельствовать о молодости пары ТНО (после образования пары орбиты еще не успели разойтись за счет прецессии узлов и перигелиев). Однако это является лишь необходимым условием молодости пары, т. к. прецессия узлов и перигелиев орбит имеет условно-периодический характер. В работе [8] были выбраны следующие критерии для отбора молодых пар ТНО: $\varrho_2 < 0.07$ (а. е.)^{1/2} ($\varrho_2^2 < 0.0049$ а. е. = 7.5×10^5 км), $\varrho_5 < 0.07$ (а. е.)^{1/2} ($\varrho_5^2 < 0.0049$ а. е. = 7.5×10^5 км) и $\varrho_2 - \varrho_5 < 0.015$ (а. е.)^{1/2} ($(\varrho_2 - \varrho_5)^2 < 0.00225$ а. е. = 3.4×10^4 км). Критерии для метрик ϱ_2 и ϱ_5 соответствуют характерному значению радиуса сферы Хилла для ТНО. Для вычисления метрик использовались оскулирующие элементы орбит из Asteroids Dynamic Site — AstDyS¹ на эпоху MJD 59000 (00^h00^m00^s 31.05.2020). Были отобраны пять пар ТНО с минимальными значениями метрик ϱ_2 и ϱ_5 , удовлетворяющих всем трем условиям (см. табл. 1).

Таблица 1: Пары ТНО на близких орбитах.

Пара ТНО		ϱ_2 , (а. е.) ^{1/2}	ϱ_5 , (а. е.) ^{1/2}	$\varrho_2 - \varrho_5$, (а. е.) ^{1/2}
1999 HV11	2015 VF172	0.0348	0.0316	0.0032
2003 QL91	2015 VA173	0.0366	0.0331	0.0035
2013 SD101	2015 VY170	0.0438	0.0392	0.0046
2002 CY154	2005 EW318	0.0461	0.0377	0.0084
(88268) 2001 KK76	2015 GV58	0.0542	0.0432	0.0110

Оценка возраста пар выполнялась на основе анализа результатов вероятностной эволюции. При исследовании вероятностной эволюции для каждого ТНО генерировалось 1000 клонов орбит на основе разложения Холецкого для многомерных нормальных распределений. Этот метод заключается в записи ковариационной матрицы C в виде $C = LL^T$, где L — нижняя треугольная матрица. Выборка из 1000 клонов генерируется на основе номинальных элементов ε_{0k} , где $1 \leq k \leq 6$, как $\varepsilon_k = \varepsilon_{0k} + r_j L_{kj}$. Здесь выполняется суммирование по повторяющемуся индексу j для $j \leq k$, а r_j — 6-мерный вектор с независимо генерируемыми компонентами на основе нормального распределения с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1.

Улучшенные элементы орбит ТНО, а также ковариационные матрицы C были взяты с сайта AstDyS на эпоху MJD 59000. Интегрирование выполнялось в пакете Orbit9², входящем в программный комплекс OrbFit [16]. При интегрировании на интервале времени 200 млн. лет в прошлое учитывались возмущения от четырех планет-гигантов, сжатие Солнца и релятивистские эффекты. При интегрировании на интервалах времени до 10 млн. лет в прошлое включительно учитывались возмущения от восьми больших планет, карликовой планеты Плутон, сжатие Солнца, релятивистские эффекты. По результатам численного моделирования для каждой пары ТНО анализируется 1 млн. возможных вариантов эволюции.

¹<https://newton.spacedys.com/astdys/>

²<http://adams.dm.unipi.it/orbfit/>

Для определения возраста пар ТНО на близких орбитах используются два метода:

1. анализ низкоскоростных сближений объектов (см., например, [17]),
2. анализ минимальных расстояний между орбитами объектов на основе метрики Холшевникова ϱ_2 (см., например, [8]).

При анализе низкоскоростных сближений мы определяли моменты времени, когда относительное расстояние между ТНО $\Delta r < 4R_H$, а относительная скорость ТНО $\Delta v < 10V_{\text{esc}}$. Для оценки радиуса сферы Хилла более массивного ТНО R_H и второй космической скорости V_{esc} относительно более массивного тела на объектоцентрическом расстоянии Δr необходимы сведения о физических параметрах ТНО:

$$R_H = \frac{1}{2} r D \left(\frac{4\pi G \rho}{9 \mu} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

$$V_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{\pi G D^3 \rho}{3 \Delta r}}, \quad (2)$$

где r — гелиоцентрическое расстояние, ρ — плотность ТНО, G — гравитационная постоянная, μ — гравитационный параметр Солнца. Диаметр D ТНО можно определить по данным о его абсолютной звездной величине H и геометрическом альбедо p_v [18]:

$$D = 1329 \text{ км } 10^{-H/5} \frac{1}{\sqrt{p_v}}. \quad (3)$$

Поскольку объекты, входящие в исследуемые пары ТНО, относятся к динамически холодному населению классического пояса Койпера и имеют размеры, не превышающие нескольких сотен км, мы, следуя [8], использовали для всех ТНО одинаковые значения плотности $\rho = 0.5 \text{ г/см}^3$ и геометрического альбедо $p_v = 0.13$. Элементы орбит и оценки диаметров ТНО приведены в табл. 2.

Таблица 2: Элементы орбит на эпоху MJD 59000, абсолютные звездные величины и оценки диаметров ТНО.

ТНО	a , а. е.	e	i , град.	Ω , град.	g , град.	M_0 , град.	H , зв. вел.	D , км
1999 HV11	43.114024	0.021002	3.157790	160.95169	275.11525	153.76245	7.61	111
2015 VF172	43.319339	0.018662	2.923907	162.93905	276.48160	338.17060	8.87	62
2003 QL91	43.324611	0.013972	1.540441	164.59451	186.17139	2.19792	6.87	156
2015 VA173	42.923379	0.010911	1.688857	169.36340	184.49760	60.64594	8.41	77
2013 SD101	43.430420	0.024498	1.584830	44.63178	302.69282	30.26928	7.43	120
2015 VY170	43.063804	0.020970	1.765226	43.82956	311.49705	60.06008	7.73	105
2002 CY154	44.228686	0.079400	0.977662	120.90171	235.87093	188.74023	6.68	170
2005 EW318	44.407295	0.074228	1.059882	128.50332	225.71190	175.26789	6.35	198
(88268) 2001 KK76	42.828521	0.024019	1.885238	86.97674	221.26467	326.33699	6.30	203
2015 GV58	43.059465	0.020456	2.116070	82.03115	238.75610	252.83746	8.58	71

При анализе минимальных расстояний между орбитами объектов на основе метрики Холшевникова ϱ_2 , для каждого из 1 млн. вариантов определяется момент t_q достижения минимального значения метрики $\varrho_{2\text{min}}$. При оценке возраста t_q используется медианное значение с 5% и 95% перцентилями.

3. Оценка возраста пар ТНО

Для каждой пары ТНО было выполнено два вида моделирования вероятностной эволюции: 1) на длительном интервале — 200 млн. лет в прошлое и 2) на коротком интервале — в пределах 10 млн. лет в прошлое. Для каждого вида моделирования возраст пары оценивался двумя способами: 1) на основе поиска моментов низкоскоростных сближений и 2) путем поиска моментов достижения минимальных значений метрики Холшевникова ϱ_2 . При анализе результатов вероятностной эволюции низкоскоростных сближений зафиксировано не было. Поэтому оценки возраста пар ТНО основаны на анализе моментов сближений орбит.

3.1. Пара ТНО 1999 HV11 и 2015 VF172

По результатам моделирования на интервале 200 млн. лет сближения орбит ТНО пары 1999 HV11 и 2015 VF172 концентрируются в начале исследуемого интервала, а также на интервалах от 40 до 70 млн. лет в прошлое и от 170 до 200 млн. лет в прошлое (см. рис. 1). Значения $\varrho_{2\text{min}}$ не превышают $0.07 \text{ (а. е.)}^{1/2}$. Все сближения орбит являются тесными. Важную информацию для оценки возраста несет распределение

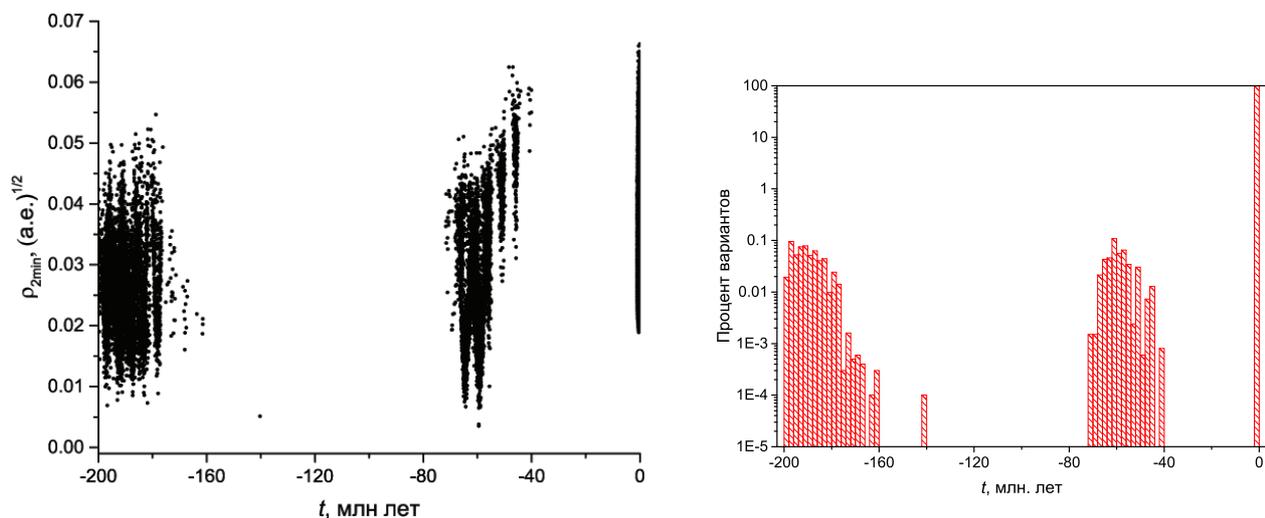


Рис. 1: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $q_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 1999 HV11 и 2015 VF172.

количества сближений от времени. Из гистограммы видно, что более 90% наиболее тесных сближений орбит ТНО пары 1999 HV11 и 2015 VF172 происходит в два первых миллиона лет. Приведенные в данной работе гистограммы разделены на 100 интервалов. При равномерном распределении данных от времени значимым будет уровень в 1%. На гистограмме рис. 1 видно, что на интервалах от 40 млн. лет в прошлое доля сближений орбит клонов ТНО не превышает 0.1%, поэтому при анализе возраста пары анализировалось распределение моментов сближений, произошедших в течение первых миллионов лет.

Результаты моделирования на интервале 10 млн. лет показали, что тесные сближения орбит происходят только в течение первого миллиона лет. На интервале 1 млн. лет в прошлое минимальные значения метрики $q_{2\min}$ составляют $0.02 \text{ (a. e.)}^{1/2}$ и концентрируются в окрестности 0.4 млн. лет (см. рис. 2). Оценка возраста пары ТНО 1999 HV11 и 2015 VF172 составляет $t_e = 400_{-240}^{+190}$ тыс. лет.

3.2. Пара ТНО 2003 QL91 и 2015 VA173

Моделирование на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 2003 QL91 и 2015 VA173 показывает, что сближения орбит располагаются от начала исследуемого интервала до 40 млн. лет в прошлое, а также на интервале от 120 до 200 млн. лет в прошлое (см. рис. 3). Все сближения орбит являются тесными, значения $q_{2\min}$

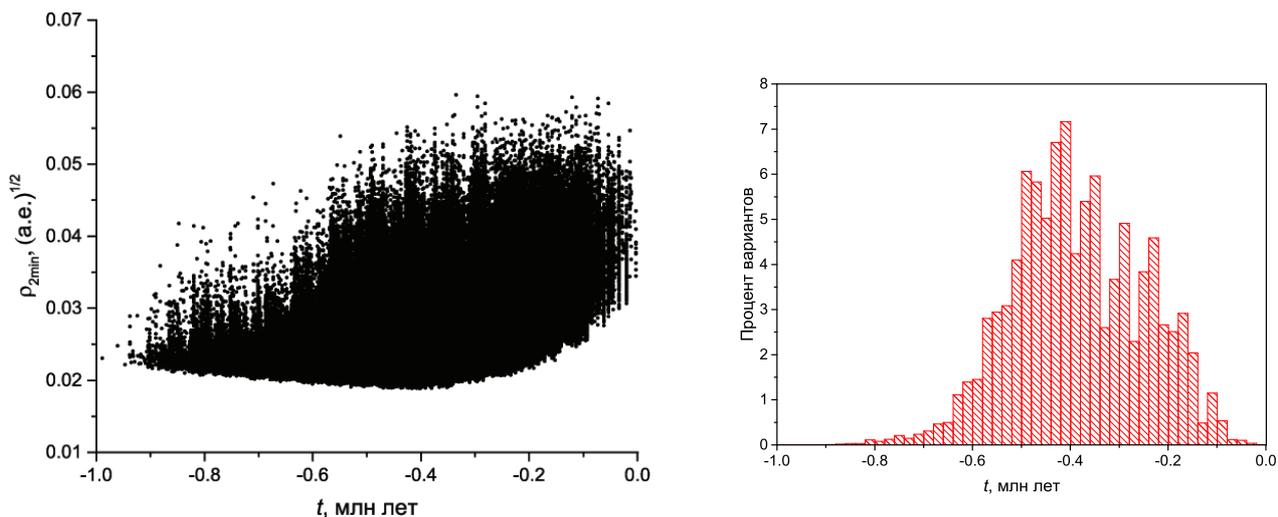


Рис. 2: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $q_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 1 млн. лет для пары ТНО 1999 HV11 и 2015 VF172.

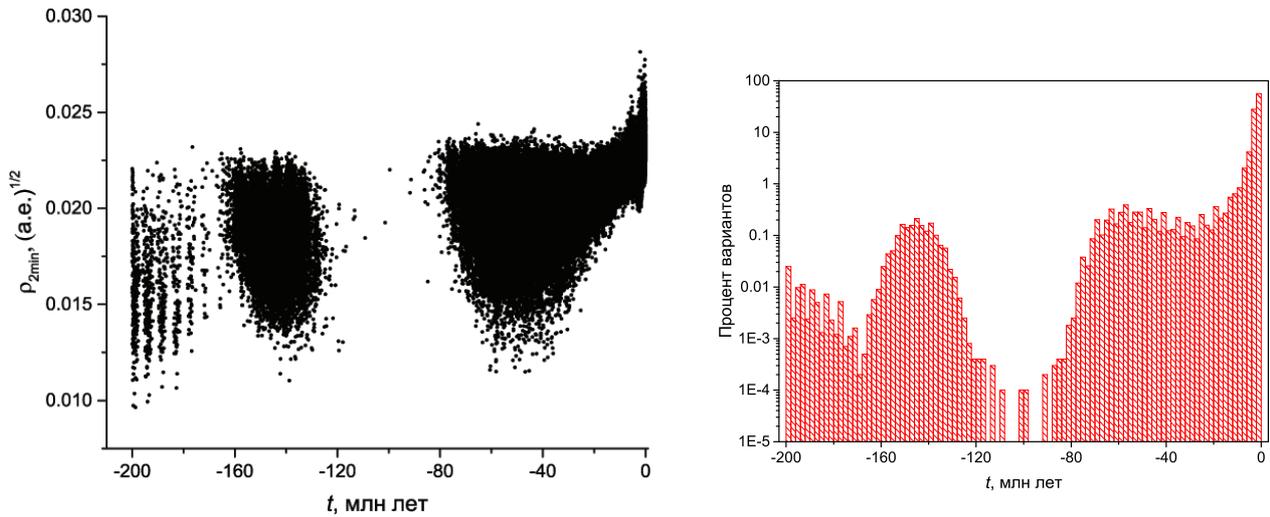


Рис. 3: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 2003 QL91 и 2015 VA173.

не превышают $0.03 \text{ (a. e.)}^{1/2}$. Гистограмма (рис. 3) показывает, что более 90% тесных сближений орбит ТНО пары 2003 QL91 и 2015 VA173 происходят в первые десять миллионов лет.

Моделирование на интервале 10 млн. лет показывает, что сближения орбит ТНО пары 2003 QL91 и 2015 VA173 концентрируются в окрестности 0.5 и 2 млн. лет в прошлое (см. рис. 4). Минимальные значения метрики $\varrho_{2\min}$ не превышают $0.024 \text{ (a. e.)}^{1/2}$. Возраст данной пары может составлять $t_\varrho = 380_{-290}^{+530}$ тыс. лет или $2.2_{-0.7}^{+1.0}$ млн. лет.

3.3. Пара ТНО 2013 SD101 и 2015 VY170

Интегрирование на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 2013 SD101 и 2015 VY170 показывает, что практически все сближения орбит ТНО происходят в несколько первых миллионов лет (см. рис. 5). Все сближения орбит являются тесными, значения $\varrho_{2\min}$ не превышают $0.06 \text{ (a. e.)}^{1/2}$. Гистограмма (рис. 5) приведена для первых четырех миллионов лет. Более 80% тесных сближений орбит ТНО пары 2013 SD101 и 2015 VY170 происходят в первый миллион лет.

Результаты моделирования на интервале 2.5 млн. лет показывают, что более 80% тесных сближений орбит происходят в течение первых 250 тыс. лет (см. рис. 6). Оценка возраста пары ТНО 2013 SD101 и 2015 VY170 составляет $t_\varrho = 42_{-31}^{+147}$ тыс. лет.

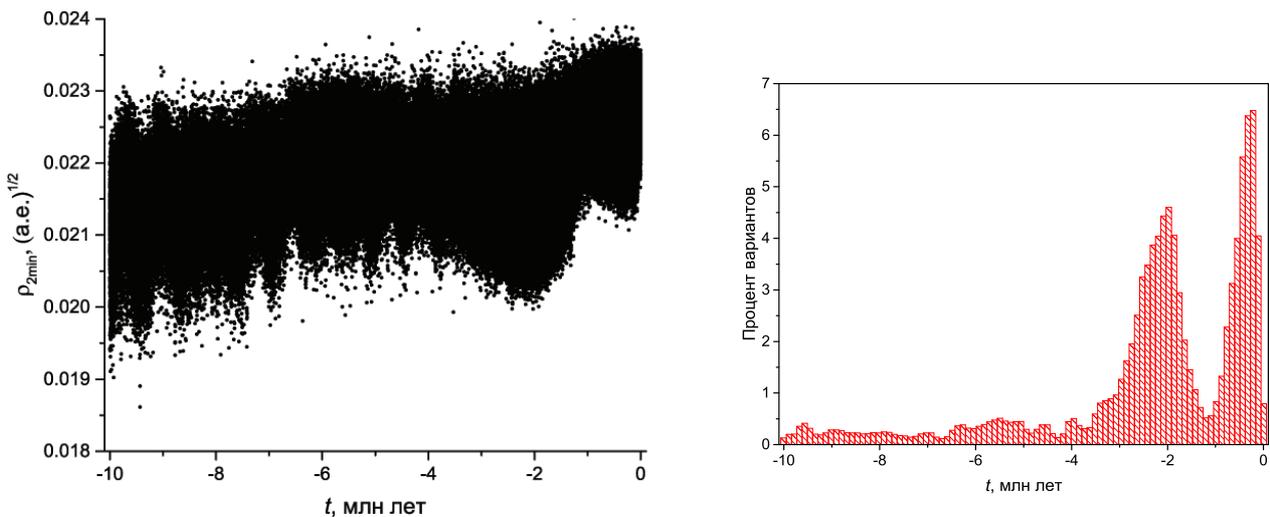


Рис. 4: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 10 млн. лет для пары ТНО 2003 QL91 и 2015 VA173.

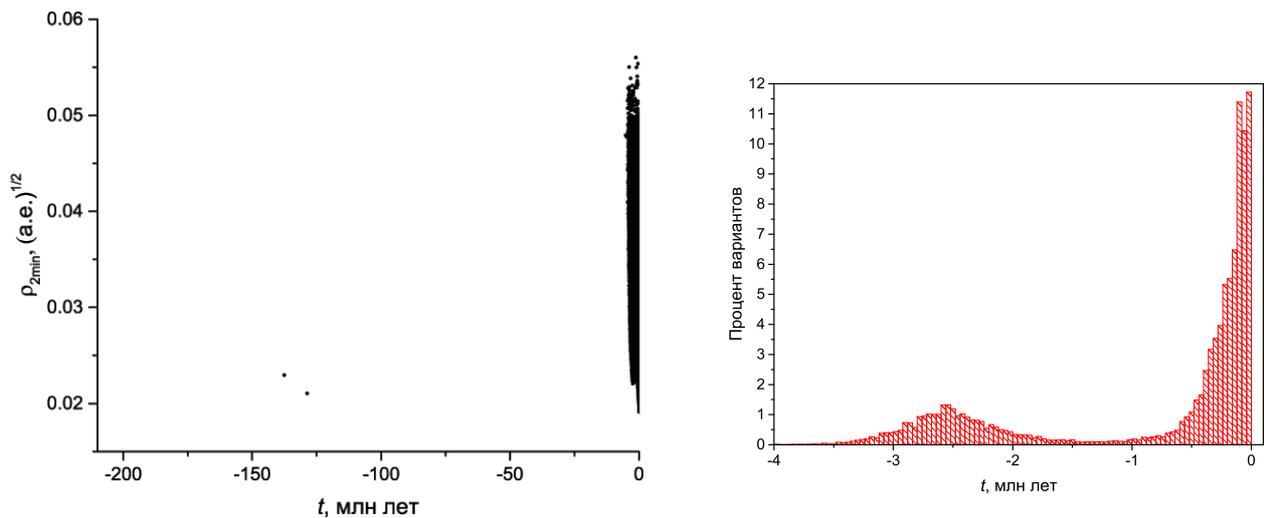


Рис. 5: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 2013 SD101 и 2015 VY170.

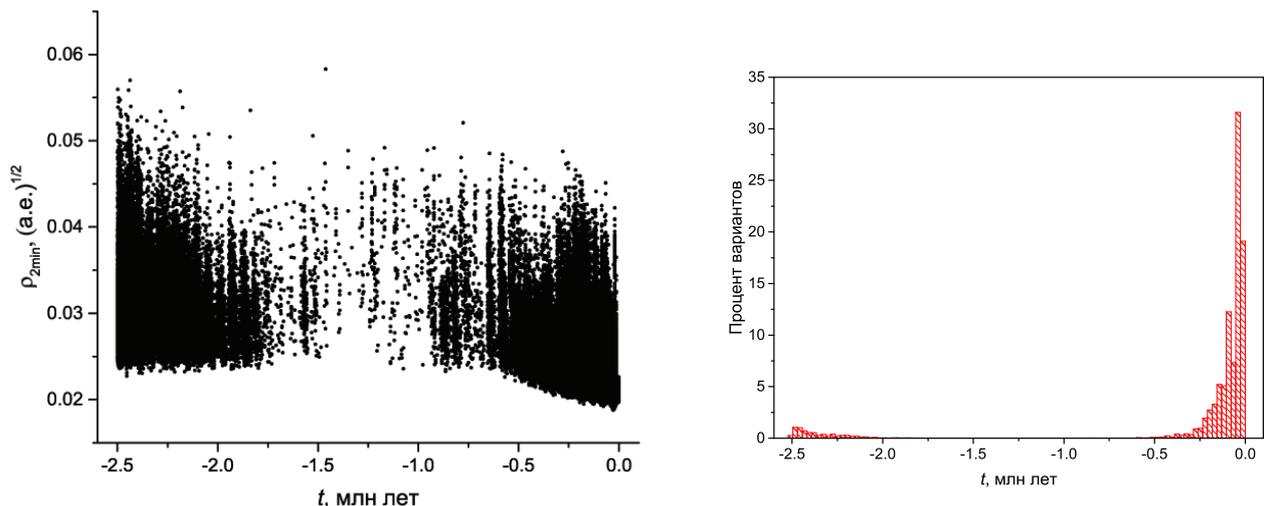


Рис. 6: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 2.5 млн. лет для пары ТНО 2013 SD101 и 2015 VY170.

3.4. Пара ТНО 2002 CY154 и 2005 EW318

Моделирование на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 2002 CY154 и 2005 EW318 показывает, что сближения орбит происходят на всем рассматриваемом интервале 200 млн. лет в прошлое (см. рис. 7). На интервале от 40 до 200 млн. лет сближения орбит клонов ТНО оказываются более тесными, чем в начале рассматриваемого интервала. Анализ гистограммы (рис. 7) показывает, что более 90% тесных сближений орбит ТНО пары 2002 CY154 и 2005 EW318 происходят в первые миллионы лет.

Моделирование на интервале 3.5 млн. лет показывает, что тесные сближения орбит концентрируются в течение двух первых миллионов лет (см. рис. 8). Практически все сближения орбит являются тесными, для которых значения $\varrho_{2\min}$ не превышают $0.07 \text{ (a. e.)}^{1/2}$. Оценка возраста пары ТНО 2002 CY154 и 2005 EW318 составляет $t_g = 0.26_{-0.24}^{+1.1}$ млн. лет.

3.5. Пара ТНО (88268) 2001 KK76 и 2015 GV58

Интегрирование на интервале 200 млн. лет для пары ТНО (88268) 2001 KK76 и 2015 GV58 показывает, что сближения орбит ТНО происходят практически на всем рассматриваемом интервале (см. рис. 9). Все сближения орбит являются тесными, значения $\varrho_{2\min}$ не превышают $0.02 \text{ (a. e.)}^{1/2}$. Начиная с 20 млн. лет

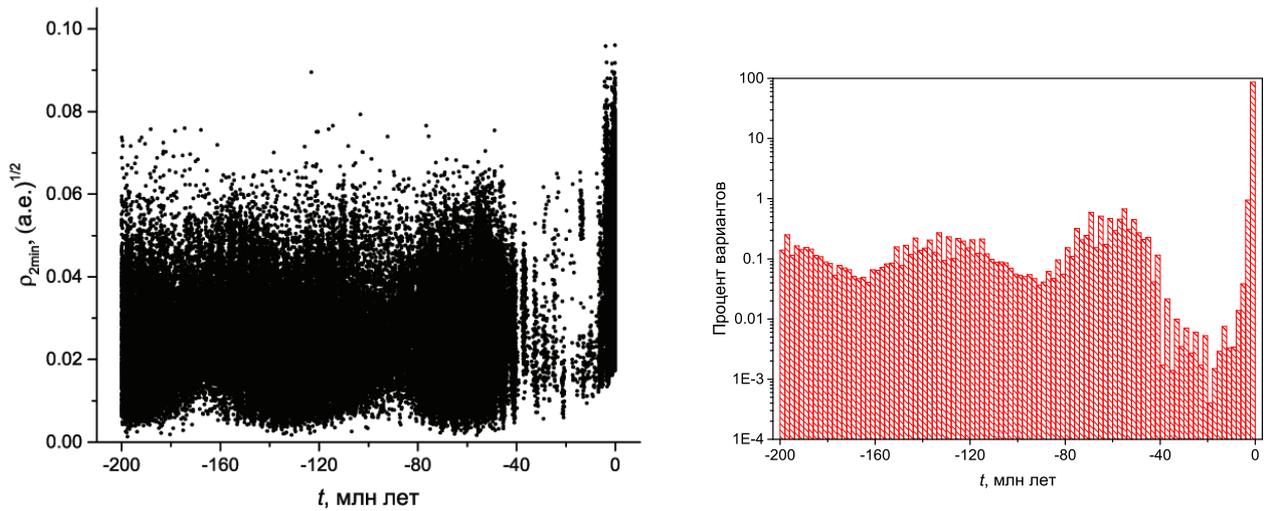


Рис. 7: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 200 млн. лет для пары ТНО 2002 CY154 и 2005 EW318.

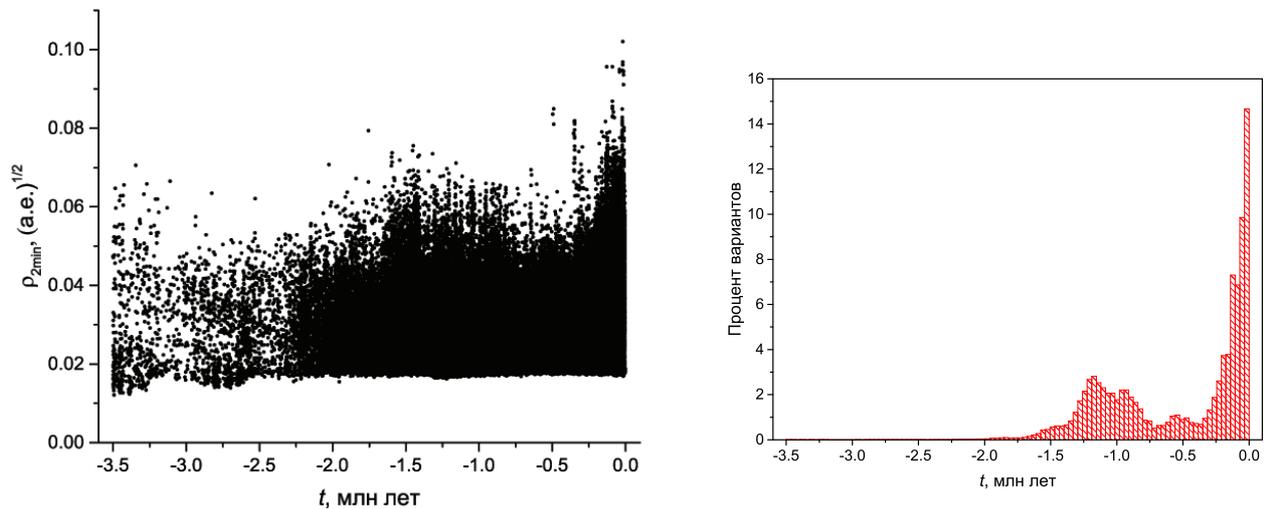


Рис. 8: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 3.5 млн. лет для пары ТНО 2002 CY154 и 2005 EW318.

в прошлое и до конца интервала 200 млн. лет в прошлое, тесные сближения орбит ТНО до расстояний, соответствующих значениям метрики ϱ_2 менее $0.001 \text{ (a. e.)}^{1/2}$, происходят регулярно. Гистограмма (рис. 9) показывает, что количество сближений в течение двух первых миллионов лет превышает 23% от общего числа сближений. Начиная с 25 млн. лет в прошлое и до конца интервала 200 млн. лет в прошлое, количество сближений орбит ТНО пары (88268) 2001 KK76 и 2015 GV58 колеблется около 1% и не превышает 2%. Значительное превышение количества сближений в начале интервала указывает на то, что возраст пары не превышает 2 млн. лет.

Моделирование на интервале 1 млн. лет показывает, что тесные сближения орбит распределены от начала интервала до 0.6 – 0.8 млн. лет (см. рис. 10). Все сближения орбит являются тесными, значения $\varrho_{2\min}$ не превышают $0.02 \text{ (a. e.)}^{1/2}$. Оценка возраста пары ТНО (88268) 2001 KK76 и 2015 GV58 составляет $t_e = 160_{-140}^{+200}$ тыс. лет.

4. Обсуждение результатов и заключение

В табл. 3 даны оценки возраста пар, полученные на основе анализа моментов сближений орбит ТНО, соответствующих достижению минимальных значений метрики Холшевникова $\varrho_{2\min}$ между клонами орбит ТНО. Все рассмотренные пары ТНО можно отнести к молодым. Возраст пар, как правило, не превышает

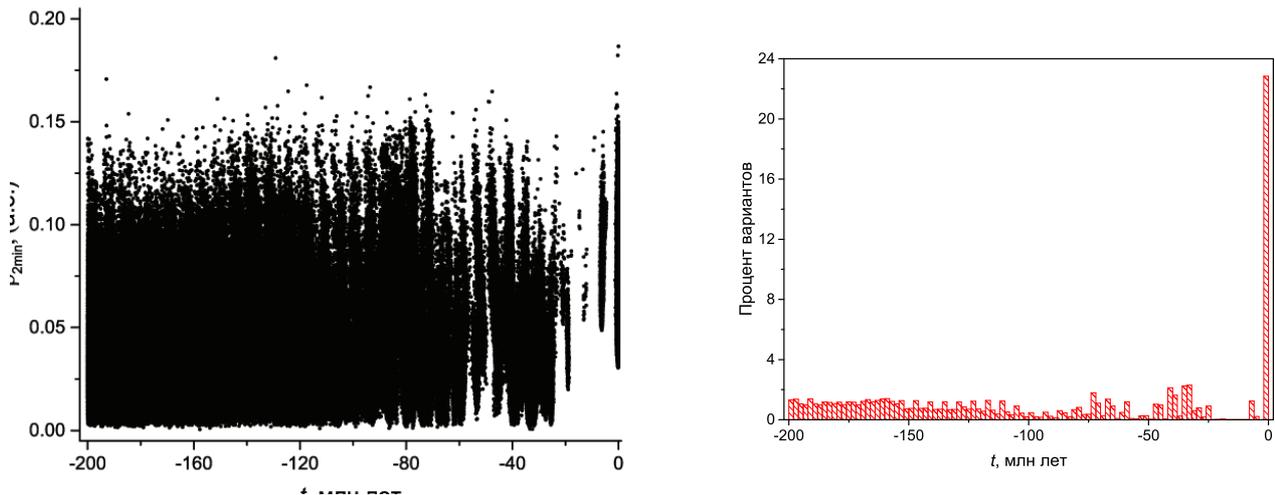


Рис. 9: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 200 млн. лет для пары (88268) 2001 KK76 и 2015 GV58.

Таблица 3: Оценки возраста пар ТНО на близких орбитах

Пара ТНО		Возраст, млн. лет
1999 HV11	2015 VF172	$0.40^{+0.19}_{-0.24}$
2003 QL91	2015 VA173	$0.38^{+0.53}_{-0.29}$
		$2.2^{+1.0}_{-0.7}$
2013 SD101	2015 VY170	$0.042^{+0.147}_{-0.031}$
2002 CY154	2005 EW318	$0.26^{+1.11}_{-0.24}$
(88268) 2001 KK76	2015 GV58	$0.16^{+0.20}_{-0.14}$

1 млн. лет. Исключением является пара ТНО 2003 QL91 и 2015 VA173, для которой вторая оценка возраста превышает 2 млн. лет. Минимальная оценка возраста 42^{+147}_{-31} тыс. лет получена для пары ТНО 2013 SD101 и 2015 VY170.

Несмотря на то, что по результатам численного моделирования тесные сближения орбит ТНО зафиксированы для всех рассмотренных пар, не удалось обнаружить низкоскоростные сближения самих ТНО. Это

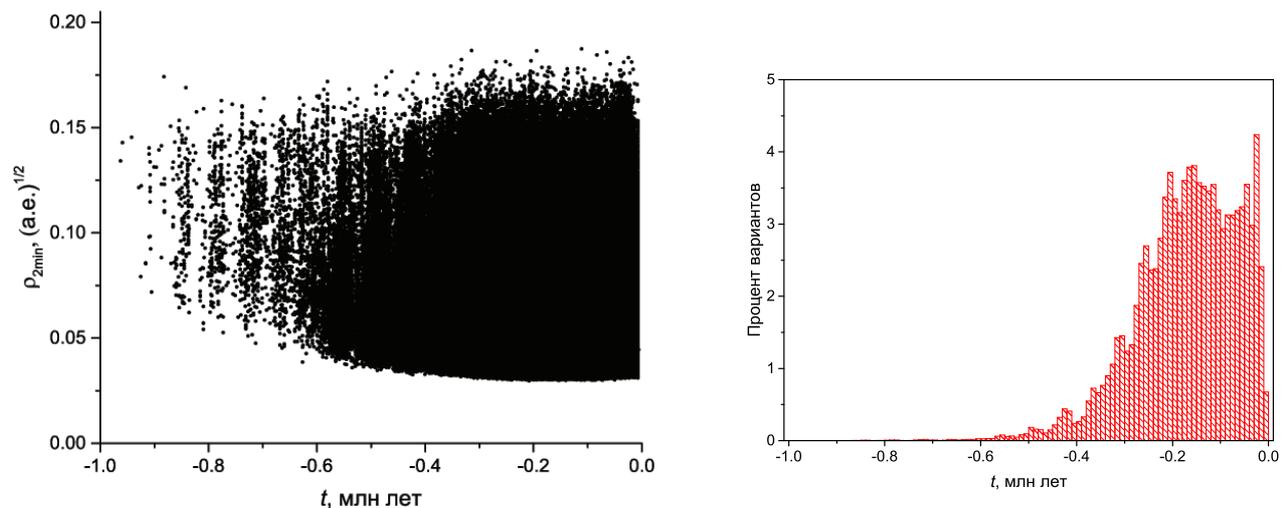


Рис. 10: Распределение минимальных значений метрики Холшевникова $\rho_{2\min}$ (слева) и гистограмма распределения моментов времени (справа) на интервале 1 млн. лет для пары (88268) 2001 KK76 и 2015 GV58.

может быть связано с большими ошибками определения орбит ТНО. Из 10 рассмотренных ТНО, только ТНО (88268) 2001 КК76 имеет номер и, соответственно, его орбита определена с более высокой точностью. Для повышения надежности полученных оценок возраста пар ТНО необходимо оценить возраст пар другим методом. С течением времени точность определения улучшенных элементов орбит ТНО должна возрасти. Это дает надежду, что появится возможность проверки и уточнения полученных в данной работе оценок возраста пар ТНО на основе анализа низкоскоростных сближений.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

Список литературы

1. E. I. Chiang, *Astrophys. J. Lett.*, **573**, L65, 2002.
2. M. E. Brown, K. M. Barkume, D. Ragozzine, and E. L. Schaller, *Nature*, **446**, 294, 2007.
3. B. Proudfoot and D. Ragozzine, *Nature Communications*, **13**, 2262, 2022.
4. D. Rabinowitz, M. E. Schwamb, E. Hadjiyska, P. Rojo, and S. Tourtellotte, in *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, **2011**, 1642 (2011).
5. E. I. Chiang, J. R. Lovering, R. L. Millis, M. W. Buie, L. H. Wasserman, and K. J. Meech, *Earth Moon and Planets*, **92**, 49, 2003.
6. R. A. Marcus, D. Ragozzine, R. A. Murray-Clay, and M. J. Holman, *Astrophys. J.*, **733**, 40, 2011.
7. C. de la Fuente Marcos and R. de la Fuente Marcos, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **474**, 838, 2018.
8. E. D. Kuznetsov, O. M. Al-Shiblawi, and V. D. Gusev, *Solar System Research*, **56**, 122, 2022.
9. K. V. Kholoshevnikov, G. I. Kokhirova, P. B. Babadzhanov, and U. H. Khamroev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **462**, 2275, 2016.
10. E. Kuznetsov, O. Al-Shiblawi, and V. Gusev, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, **54**, 350.01 (2022).
11. D. Nesvorný and D. Vokrouhlický, *Icarus*, **331**, 49, 2019.
12. B. Gladman, B. G. Marsden, and C. Vanlaerhoven, in M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and R. Dotson, eds., *The Solar System Beyond Neptune*, 43–57 (2008).
13. J. Kavelaars, L. Jones, B. Gladman, J. W. Parker, and J. M. Petit, in M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, and R. Dotson, eds., *The Solar System Beyond Neptune*, 59–69 (2008).
14. H. M. Campbell, L. R. Stone, and N. A. Kaib, *Astron. J.*, **165**, 19, 2023.
15. H. Campbell, in *AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting*, **53**, 501.04 (2021).
16. OrbfIt Consortium, OrbfIt: Software to Determine Orbits of Asteroids, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1106.015, 2011.
17. P. Pravec, P. Fatka, D. Vokrouhlický, P. Scheirich, et al., *Icarus*, **333**, 429, 2019.
18. E. Bowell, B. Hapke, D. Domingue, K. Lumme, J. Peltoniemi, and A. W. Harris, in R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, eds., *Asteroids II*, 524–556 (1989).

История наблюдений астероидов и комет в Симеизской обсерватории

Николенко И.В., Аршинкин С.С., Крючков С.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

История Симеизской обсерватории, которая является частью ИНАСАН, перешагнувшая свой 100-летний юбилей, неразрывно связана с наблюдениями малых тел Солнечной системы. В статье приводится история наблюдений малых тел в разные периоды существования обсерватории. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: Симеизская обсерватория ИНАСАН, астероиды, кометы, история наблюдений

History of observations of asteroids and comets in the Simeiz Observatory

Nikolenko I.V., Arshinkin S.S., Kryuchkov S.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The history of the Simeiz observatory, which is a part of INASAN and has crossed its 100th anniversary, is inextricably linked with observations of small bodies in the solar system. The article presents the history of observations of small bodies in different periods of the existence of the observatory. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: Simeiz Observatory INASAN, asteroids, comets, observation history

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.006

1. Введение

Первая из малых планет (астероидов), Церера, была открыта в 1801 г. итальянским астрономом Джузеппе Пьяцци в Палермской астрономической обсерватории. Названа в честь древнеримской богини плодородия. Это событие дало толчок к началу работ по поиску астероидов. Немало астероидов найдено российскими и советскими астрономами. Целью открытий и изучения астероидов является всестороннее изучение строения Солнечной системы, с одной стороны, и разрешение проблемы происхождения астероидов и их роли в Солнечной системе — с другой. Большой вклад в эти работы внесли ученые Симеизской обсерватории. Симеизский астроном Г.Н. Неуймин открыл с 1912 по 1941 г. свыше 400 новых астероидов, из которых 63 вошли в каталог. Большое число новых астероидов было открыто астрономами С.И. Белявским, В.А. Альбицким. Изучением движений астероидов и вычислением их орбит в течении многих лет занимались советские астрономы И.И. Путилина, Н.С. Самойлова-Яхонтова, П.Ф. Шайн. В первой половине 20-го века Симеизская обсерватория занимала второе место в мире [1] по числу открытых астероидов.

2. Как это начиналось

Симеизская обсерватория была построена по заказу весьма обеспеченного человека, увлеченного астрономией, Николая Сергеевича Мальцова, на выкупленном им земельном участке выше курортного поселка Симеиз, где располагалась фамильная усадьба Мальцовых [2]. Им был заказан у фирмы «Карл Цейсс» сдвоенный астрограф, с 120 мм объективами. Под него в 1906 г. построили башню, но в связи с задержкой отправки астрографа из Германии, она пустовала. После знакомства с А.П. Ганским, который выезжал в составе экспедиции в Крым от Пулковской обсерватории Николай Сергеевич принимает решение о безвозмездной передаче своей обсерватории (рис. 1) с оборудованием и прилегающими землями Пулковской обсерватории. Статус государственной обсерватории был присвоен в 1908 г., а уже в июле установленный двойной астрограф получил первое изображение звезд. Первый астероид был открыт Сергеем Ивановичем Белявским в 1909 г., но из-за недостаточности количества наблюдений невозможно было рассчитать траекторию его движения, и он был потерян. 28 сентября 1913 г. первая малая планета была открыта Григорием Николаевичем Неуйминым. Она получила название (748) «Симеиза». А 21 августа 1913 г. Неуйминым была открыта первая комета, названная «Неуймин».

Астероид (951) «Гаспра», открытый им же 30 июля 1916 г., примечателен тем, что в октябре 1991 г. АМС «Галилео» (NASA), пролетев на минимальном расстоянии 1600 км от Гаспры, сделал серию снимков, ближайший из которых получен с расстояния 5300 км. Знаменательно, что именно в Симеизской обсерватории работала Пелагея Федоровна Шайн, первая в мире женщина, открывшая 15 августа 1928 г. астероид

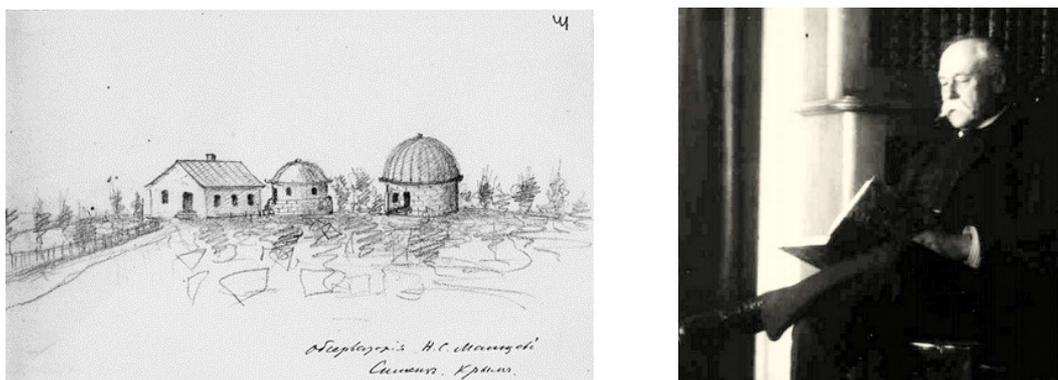


Рис. 1: Слева направо: рисунок обсерватории, Николай Сергеевич Мальцов.

(1112) «Полония». Всего она открыла 19 малых планет. Ее муж, директор Симеизской обсерватории, Григорий Абрамович Шайн, попутно с наблюдениями галактик и звезд наблюдал метеорные потоки и кометы (ему принадлежит исследование спектра кометы Понс-Виннике). После Великой Отечественной войны в п. Научный под Бахчисараем была организована Крымская астрофизическая обсерватория. Туда и переместились исследования астероидов, где активно этой темой занимался Николай Степанович Черных, открывший более 500 малых планет.

3. В составе ИНАСАН (Астросовет АН СССР)

В 1974 г. Симеизская обсерватория была передана в Астросовет АН СССР, который произвел реконструкцию обсерватории, установил новые оптические инструменты. В 1985–1986 гг. на спутниковой фотографической камере Шмидта (SBG) (рис. 2) с главным зеркалом диаметром 420 мм и фокусным расстоянием 770 мм были проведены, в качестве дипломной работы И.В. Николенко, астрометрические наблюдения для уточнения эфемериды кометы Галлея.



Рис. 2: Камера Шмидта (SBG).

В 1989 г. начало наблюдений на новом телескопе Цейсс-1000 с диаметром главного зеркала 1016 мм и фокусным расстоянием 13300 мм проводилось с использованием гибридной телевизионной камеры ПГ-3 производства МЭЛЗ (разработчиком контроллера были сотрудники ИНАСАН Л.Ю. Кокурин, С.В. Крючков). Это было первое применение на обсерватории светоприемника на базе ПЗС элемента. Потом были S1C, S3C, ST-6, Aropgee, FLI. Разработанные методики фотометрических наблюдениях ИСЗ на геостационарной орбите, которые были основными в те годы, в дальнейшем начали применяться для фотометрии избранных астероидов.

В начале XX в. не уделялось большого внимания поиску и исследованию астероидов, т. к. считалось, что их орбиты находятся в пределах Главного пояса, между орбитами Юпитера и Марса, но обнаружение новых, таких как (1862) «Аполлон», (2101) «Адонис», (69230) «Гермес», сближавшихся с Землей астероидов послужило началом специализированных наблюдений, связанных с проблемой астероидной опасности. Совсем недавно, в июле 2023 г., астероид NT1 [3], имевший размер порядка 60 метров в поперечнике, пролетел

от нашей планеты на расстоянии около 100 тысяч километров, то есть в 4 раза ближе, чем Луна. Возможные последствия столкновения с таким телом можно сравнить с кратером в штате Аризона, диаметр которого превышает 1 км.

В 1970-е годы поисковые наблюдения проводились с использованием 46-см камеры Шмидта на Паломарской обсерватории, в США. Подобная камера имелась на Симеизской обсерватории, но использование фотопластинок с появлением более прогрессивных средств регистрации изображения, ПЗС-камер, и необходимость модернизации системы управления телескопом не дали возможность проводить наблюдения по поисковым задачам. Этим начали заниматься на телескопе Цейсс-1000 (рис. 3).

16 июля 1994 г. в результате захвата Юпитером кометы Шумейкеров-Леви 9, произошло столкновение фрагментов ядра кометы с планетой, что являлось первым наблюдавшимся столкновением двух небесных тел Солнечной системы. Наблюдения проводились в течение нескольких ночей с использованием телевизионной камеры SONY стандарта SVHS для регистрации результатов падения. Для оценки выделившийся энергии при столкновении, синхронно на рядом расположенным телескопе Цейсс-600 с использованием одноканального фотометра с прыгающей диафрагмой проводились фотометрические наблюдения тех спутников Юпитера, которые находились в тот момент на участке орбиты, проходящей, относительно Земли, за Юпитером. Необходимость этого связана с попаданием фрагментов на невидимую с Земли сторону Юпитера. Что давало возможность определить размеры этих фрагментов.

При проведении поисковых работ, длиннофокусная оптическая система давала небольшое поле зрения, что снижало эффективность работы. С целью ее увеличения своими силами были разработаны и сделаны ряд редукторов фокуса: до 5.3 м, 5.1 м. и 1.7 м. С использованием одного из них был обнаружен 20 августа 2001 г. новый астероид 109573, получивший название «Мишасмирнов». Позже, в 2020 г., с целью расширения возможностей обнаружения и подхвата вновь обнаруженных астероидов и не только астероидов, был изготовлен и введен в эксплуатацию новый фокальный редуктор, который в зависимости от приемника изображений позволяет увеличивать поле зрения до 0.8 градуса в диаметре. В текущей конфигурации, с использованием ПЗС-камеры FLI 16803 и турели FLI CRW 3-10, поле зрения составляет около 0.5 градусов (рис. 3).

Начиная с 1994 г. проводились наблюдений радиантов метеорных потоков с целью выявления крупных фрагментов метрового и декаметрового диапазона. Первые обнаруженные такие тела в потоке Персеид, в августе 1995 г., получили название «инасань». Первооткрывателем таких объектов можно по праву считать Михаила Александровича Смирнова (рис. 4), выдвинувший идею их существования, а потом им же найденные. Потом были наблюдения в потоках Альфа-Каприкорниды, Комиды, Леониды, Гемениды, Тауриды. В период до 2003 г. всего было обнаружено порядка 30 объектов такого размера [4, 5].

Для более широкого изучения комет на телескопе Цейсс-1000 более 10 лет проводятся поляриметрические наблюдения И.А. Масловым (ИКИ РАН), с использованием поляриметра собственной конструкции (рис. 5), который позволяет исследовать кометные выбросы [6].

Изучение малых тел Солнечной системы, уточнение их орбит, изучение происхождения, распределения, физических характеристик напрямую связано с безопасностью человека на планете Земля, не только при столкновении с астероидами и кометами, но и с постепенным истощением полезных ресурсов. С увеличением потребления человечеством земных природных ресурсов, которые являются не возобновляемыми, появился дефицит некоторых из них. Для решения этой проблемы планируется использовать астероиды, как объекты промышленного освоения, для добычи различных металлов, воды. Причем количество этих веществ, вхо-

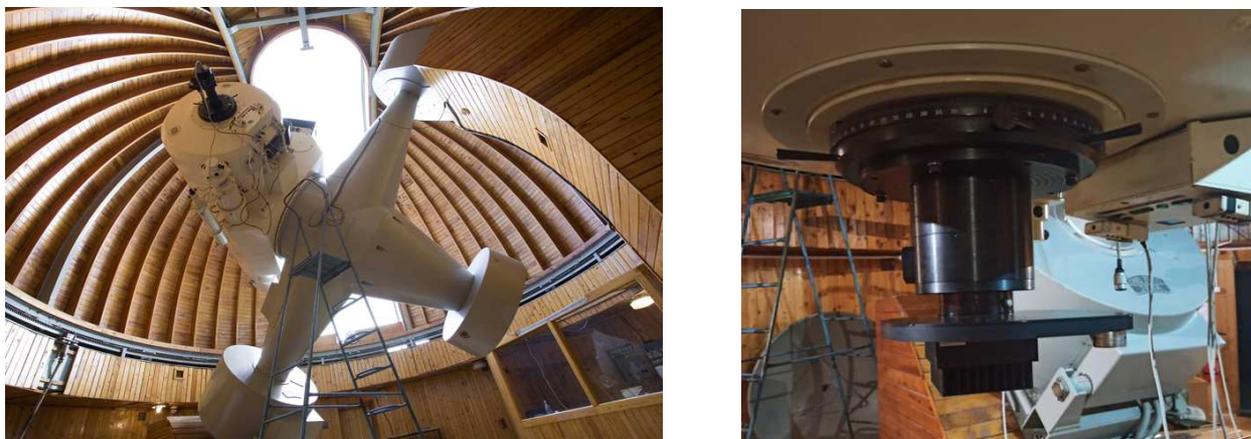


Рис. 3: Слева направо: Цейсс-1000, фокальный редуктор с камерой FLI.



Рис. 4: М.А. Смирнов.

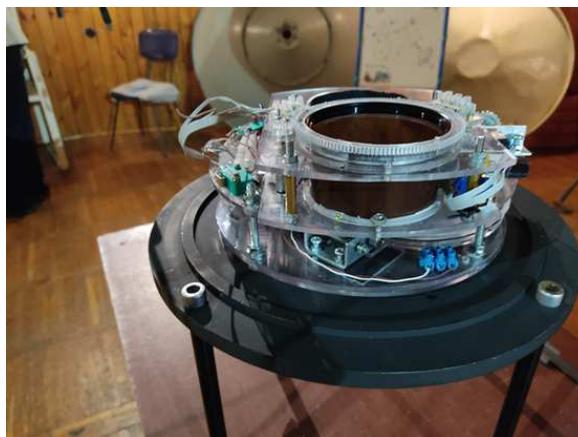


Рис. 5: Поляриметр образца 2023 г.

дящий в состав астероидов и комет, порой превосходит количество, которое находится на планете Земля. В список подобных объектов Солнечной системы входят астероиды (617) «Патрокл», (16) «Психея», (65803) «Дидим», (433) «Эрос» и многие другие. Наличие тех или иных химических элементов помогает определить материал, полученный на основании результатов наблюдательной астрономии, в частности на Симеизской обсерватории [7, 8, 9].

Список литературы

1. Y. Krinov, *Planety-karliki (Asteroidy)* (1951).
2. G. Neuymin, *Simeizskoye otdeleniye Pulkovskoy observatorii za 25 let. 1908–1923 g* (1923).
3. Caltech, Small-body database lookup, URL https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=2023%20NT1&view=OPC/.
4. S. Barabanov, I. Nikolenko, and D. Neyachenko, *Nablyudeniya meteoroidov i elementov kosmicheskogo musora s opticheskimi sistemami na osnove PZS-kamer* (1998).
5. M. Smirnov, S. Barabanov, S. Kryuchkov, A. Zen'kovich, D. Neyachenko, I. Nikolenko, and G. N.M., *Kompleks 1-m teleskopa v Simeizskoy observatorii dlya nablyudeniya nebesnykh tel v okolozemnom kosmicheskom prostranstve* (2001).
6. I. Maslov, S. Kruchkov, I. Nikolenko, V. Munitsyn, and O. Ugolnikov, *Izvestiya Krymskoy astrofizicheskoy observatorii*, **111**, 34, 2015.
7. I. V. Nikolenko, Y. Bakanas, S. I. Barabanov, and S. Kryuchkov, *Astrometriya i fotometriya mal'nykh planet Solnechnoy sistemy, sblizhayushchikhsya s orbital'noy Zemli, v Simeize, 1648* (2009).
8. I. Volkov, Y. Bakanas, I. Nikolenko, A. Ivanov, and V. Lysenko, *Fotometricheskiye nablyudeniya izbrannykh mal'nykh tel, sdelaynyye v 2009- 2011gg. s ispol'zovaniyem vysokotochnogo BVRI-fotometra na teleskope Tseyss-1000 na gore Koshka* (2011).
9. J. Ďurech, D. Vokrouhlický, P. Pravec, Y. N. Krugly, et al., *Astron. and Astrophys.*, **657**, A5, 2022.

Динамика кометы 157P/Tritton и ее фрагментов

Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследована динамика кометы 157P/Tritton и ее фрагмента 157P-B, наблюдавшегося в 2022 г. Световые кривые кометы в четырех последних появлениях, особенно в 2017 г., показывают нерегулярные изменения ее яркости. Тогда же произошло изменение знака негравитационного параметра A_2 , что также может указывать на неустойчивое состояние ядра кометы. Анализ «O–C» в 2021–2023 гг. позволяет предположить, что фрагментов было два, и каждый из двух фрагментов наблюдался в течение примерно двух недель с интервалом между ними, равным 10 суткам. Время отделения фрагментов от основного тела оценивалось в результате вариации момента отделения и определения на этот момент компонентов скорости фрагмента при фиксированных координатах основного тела. Считалось, что минимальное значение среднеквадратической ошибки соответствует времени разделения. Время отделения первого фрагмента от основного тела оценивается достаточно уверенно, с ошибкой в десятки суток. В качестве наиболее вероятной принята дата 6 июня 2020 г., это примерно через три месяца после сближения с Юпитером и за два года до прохождения через перигелий. Время отделения второго фрагмента от основного тела оценивается менее уверенно, оно могло произойти на интервале порядка 800 суток, поэтому было рассмотрено два варианта: отделение в начале этого интервала 6 июня 2020 г. и конце — 1 июля 2022 г. Рассмотрена также возможность отделения второго фрагмента от первого. Оцененное время этого события ближе к началу приведенного интервала, что указывает на то, что оба фрагмента могли образоваться практически одновременно. На момент 6 июня 2020 г. скорость отделения первого фрагмента составляла $|\Delta v_1| = (5.02 \pm 0.07)$ м/с. Угол между векторами скорости основного тела и изменения скорости, θ_1 , равен 133.2° . На этот же момент скорость отделения второго фрагмента составляла $|\Delta v_2| = (0.87 \pm 0.21)$ м/с и $\theta_2 = 96.2^\circ$. Если же отделение второго фрагмента от основного тела произошло незадолго до начала его наблюдений 1 июля 2022 г., то $|\Delta v_2| = (5.68 \pm 0.88)$ м/с и $\theta_2 = 164.0^\circ$. Скорость отделения второго фрагмента от первого оценивается с большой ошибкой. Обстоятельства разделения 157P таковы, что наиболее вероятной причиной фрагментации могло быть столкновение кометы с некоторым малым телом. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 06.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: разделяющиеся кометы, фрагмент кометы, комета 157P/Tritton

Dynamics of the comet 157P/Tritton and its fragments

Kuznetsov V.B., Chernetenko Yu.A.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, St. Petersburg, Russia

This work examines the dynamics of the comet 157P/Tritton and its fragment 157P-B, observed in 2022. Light curves of the comet in four recent apparitions, especially in 2017, show irregular changes in the comet's brightness. At the same time, the sign of the non-gravitational parameter A_2 changed, which may also indicate an unstable state of the comet's nucleus. Analysis of "O–C" in 2021–2023 suggests that there were two fragments, and each of the two fragments was observed for approximately two weeks with interval between them of 10 days. The time of fragment separation from the main body was estimated as a result of varying the moment of separation and determining at this moment the velocity components of the fragment. It was assumed that the minimum value of the root mean square error corresponds to the separation time. The time of separation of the first fragment from the main body is estimated quite confidently, with an error of tens of days. The most probable date is June 6, 2020, this is approximately three months after the approach to Jupiter and two years before passing through perihelion. The time of separation of the second fragment from the main body is estimated less confidently; it could have occurred over an interval of about 800 days, so two options were considered: separation at the beginning of this interval June 6, 2020, and the end of July 1, 2022. The possibility of separating the second fragment from the first one is also considered. The estimated time of this event is closer to the beginning of the given interval, which indicates that both fragments could have formed almost simultaneously. As of June 6, 2020 the separation velocity of the first fragment was $|\Delta v_1| = (5.02 \pm 0.07)$ m/s. The angle between the velocity vectors of the main body and the velocity change, θ_1 , is equal to 133.2° . As of June 6, 2020 the separation velocity of the second fragment was $|\Delta v_2| = (0.87 \pm 0.21)$ m/s and $\theta_2 = 96.2^\circ$. If the separation of the second fragment from the main body occurred shortly before the start of its observations July 1, 2022, then $|\Delta v_2| = (5.68 \pm 0.88)$ m/s and $\theta_2 = 164.0^\circ$. The velocity of separation of the second fragment from the first one is not estimated due to a large error. The circumstances of the fragmentation of the comet 157P/Tritton suggest that the most likely cause of fragmentation could be a collision with some small body. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 06.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: split comets, fragment of comet, comet 157P/Tritton

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.007

1. Введение

Короткопериодическая комета 157P/Tritton впервые наблюдалась в 1978 г. и было получено 11 наблюдений. Затем, до 2003 г., комета не наблюдалась, а с 2003 г. наблюдалась в каждом появлении. Орбита кометы имеет значение MOID относительно Земли 0.276 а. е. и относительно Юпитера — 0.121 а. е., что приводит

к сближениям кометы с этими планетами. Так, сближение с Юпитером до 0.265 а. е. произошло 10 февраля 2020 г., перед последним наблюдаемым появлением. Всего получено 1673 наблюдения (на 1.06.2023 г.) [1]. В появлении 2021–2023 гг. наблюдался фрагмент, обозначаемый далее **b**, для которого получено 30 наблюдений. Т. о., комета 157P принадлежит к группе комет, называемых разделяющимися. Предполагается [2], что основными внутренними причинами, приводящими к разделению, являются низкая плотность комет, слабая связанность ее отдельных частей (модель «груда щебня»), взрывные проявления сублимации, вращательная неустойчивость. Среди внешних причин называются столкновения, приливные воздействия массивных тел (Солнце или Юпитер) при тесных сближениях.

З. Секанина в серии работ [3, 4, 5] предложил модель исследования движения фрагмента, содержащую пять параметров: время разделения, дифференциальное негравитационное ускорение вдоль радиального направления (зависимость от гелиоцентрического расстояния как $1/r^2$) в единицах солнечного притяжения, три компонента относительной скорости разделения. Измеряемыми являются положения фрагмента относительно основного тела (ОТ). Для определения искомым параметров применялся нелинейный метод наименьших квадратов. По оценкам З. Секанины [6], если причина разделения приливная, то значения скоростей отделения относительно велики, а дифференциальное ускорение мало. Если причины разделения другие, то скорости малы, а ускорение значительно. При приливном воздействии разрушение тела направлено от центра и фрагменты могут двигаться перед и после основного тела. В других случаях основное тело движется по орбите перед фрагментом.

Анализ динамики фрагментов позволяет предположить [2], что разделение ядер может происходить на больших гелиоцентрических расстояниях для долгопериодических и новых комет и вдоль всей орбиты для короткопериодических комет; относительная скорость фрагмента вскоре после фрагментации составляет от 0.1 до 15 м/с, для большинства — от 0.3 до 4 м/с; среднее значение скорости отделения фрагмента короткопериодических комет оценивается в 2.7 ± 2.3 м/с.

Целью настоящей работы является определение момента времени разделения кометы 157P, оценки скорости отделения фрагмента и его негравитационного ускорения.

2. Анализ орбит и «О–С»

Нами был получен ряд орбит кометы, объединяющих различные интервалы наблюдений. Учет негравитационного ускорения (НУ) проводился по модели Марседена [7]. Оказалось, что весь интервал наблюдений, 1978–2023 гг., удовлетворительно представить одной орбитой невозможно. Орбита, объединяющая интервал 2003–2023 гг. (4 появления) также неудовлетворительна из-за наличия систематических отклонений в некоторых рядах наблюдений. Орбиты, полученные на интервалах 2003–2017, 2009–2017, 2009–2023, 2015–2023 гг. показывают согласующиеся значения негравитационных параметров A_1 и A_3 (табл. 1). Что касается параметра A_2 , то на интервале 2015–2023 гг. произошло изменение знака A_2 . Это может свидетельствовать об изменении состояния кометы на интервале между перигелиями в появлениях 2017 и 2022 гг.

Анализ поведения «О–С» в разных появлениях показывает, что «О–С» в появлении 2017 г. имеют систематические отклонения (рис. 1), которые могли быть вызваны неоднородным распределением яркости в коме кометы, наличием смещения фотоцентра. А это, в свою очередь, может означать неустойчивое состояние кометного ядра уже в 2017 г., т. е. до наблюдения фрагмента.

Световые кривые кометы в последних появлениях (2003–2023) [8] имеют нерегулярный характер, особенно в 2017 г. Этот факт коррелирует с поведением «О–С» на этом интервале (рис. 1) и с изменением знака A_2 на интервале 2017–2023 (табл. 1). Т. е., аномальное поведение кометы можно отметить уже в 2017 г., задолго до наблюдения появления фрагмента в 2022 г.

В наблюдениях фрагмента есть перерыв в 13 суток. Мы предполагаем, что фрагментов было два, **b**₁ и **b**₂, и наблюдались они не одновременно. На рис. 2 показаны «О–С» кометы и фрагмента **b** относительно орбиты кометы, полученной на интервале 2015–2023 гг. (табл. 2). Видно, что наблюдения фрагмента на рис. 2б и 2в представляются двумя группами, поэтому предположение о существовании двух фрагментов представляется логичным.

Таблица 1: Негравитационные параметры (в 10^{-8} а. е. сут.⁻²) для разных интервалов наблюдений.

Параметр (10^{-8} а. е. сут. ⁻²)	Интервал наблюдений			
	2003–2017	2009–2017	2009–2023	2015–2023
A_1	0.699 ± 0.012	0.298 ± 0.044	0.426 ± 0.002	0.352 ± 0.042
A_2	0.0184 ± 0.0004	0.0181 ± 0.0157	0.0306 ± 0.0004	-0.1059 ± 0.0108
A_3	-0.028 ± 0.004	-0.014 ± 0.003	-0.043 ± 0.003	-0.085 ± 0.010

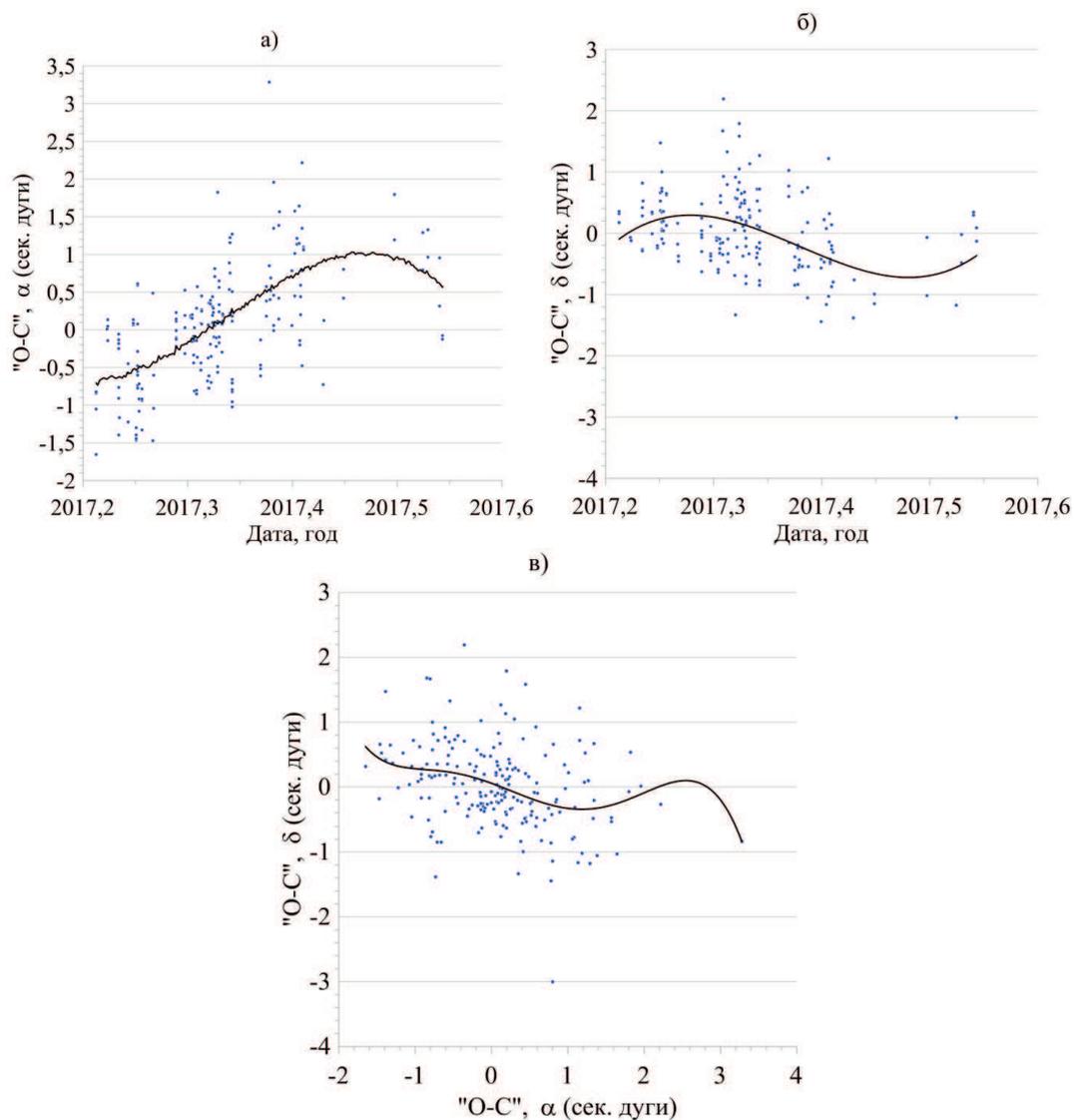


Рис. 1: Уклонения наблюдений 2017 г. от орбиты, полученной на интервале 2015–2023 гг. (табл. 1).

В табл. 2 приводятся элементы кометы, фрагмента **b** и предполагаемых фрагментов **b₁** и **b₂**. Обращает внимание большое значение среднеквадратической ошибки (СКО) для фрагмента **b**, что можно рассматри-

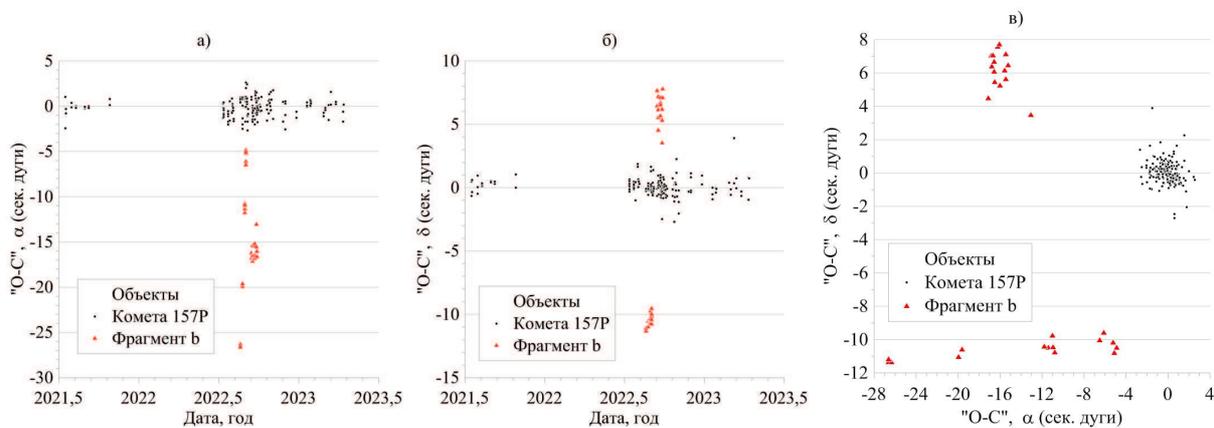


Рис. 2: Уклонения наблюдений 2021–2023 гг. от орбиты кометы, полученной на интервале 2015–2023 (табл. 2).

Таблица 2: Элементы кометы и фрагментов на эпоху 2022.07.01.0.

	Комета	Фрагменты		
		b	b₁	b₂
Интервал	2015.08.09–2023.04.13	2022.08.21–2022.09.28	2022.08.21–2022.09.02	2022.09.15–2022.09.28
$N_{\text{obs.}}$	440	30	15	15
СКО, ''	0.6850	2.2857	0.3877	0.9705
M , °	349.544475 ± 0.000029	346.856 ± 0.263	348.169 ± 2.598	357.072 ± 4.756
ω , °	155.054299 ± 0.000086	153.633 ± 0.130	155.032 ± 0.157	158.771 ± 1.979
Ω , °	287.548261 ± 0.000070	286.932 ± 0.062	287.269 ± 0.542	289.409 ± 1.328
i , °	12.420589 ± 0.000017	12.437 ± 0.003	12.428 ± 0.046	12.348 ± 0.064
e	0.5565925 ± 0.0000002	0.481 ± 0.007	0.521 ± 0.065	0.810 ± 0.203
n , °/сут.	0.1476779 ± 0.0000002	0.191 ± 0.004	0.167 ± 0.037	0.038 ± 0.063
q , а. е.	1.571	1.545	1.562	1.657
Q , а. е.	5.518	4.409	4.962	15.781
a , а. е.	3.544803 ± 0.000003	2.977 ± 0.045	3.262 ± 0.412	8.749 ± 4.200
P , год	6.67	5.14	5.89	25.88
A_1, A_2, A_3	$0.352, -0.1059, -0.085$ (10^{-8} а. е. сут. $^{-2}$)	–	–	–

вать как некоторое подтверждение того, что фрагментов было два. В дальнейшем мы рассматриваем все эти варианты.

3. Определение обстоятельств фрагментации кометы

Для оценки обстоятельств разделения кометы в работе используется подход, реализованный в работе [9] и отличающийся от подхода [3, 4, 5] оценкой момента разделения. Для этой оценки на полученной номинальной орбите основного тела выбираются моменты разделения, при этом координаты точки на орбите считаются общими также и для фрагмента. Затем компоненты скорости фрагмента и, если это возможно, параметры негравитационного ускорения по модели Марсдена определяются методом наименьших квадратов из позиционных наблюдений фрагмента. Наименьшее значение СКО наблюдений фрагмента, полученное в результате вариации времени разделения и близкое к значению СКО, оцененному по наблюдениям фрагмента, определяет дату фрагментации.

На основании анализа «О–С» в 2017 г. и поведения световой кривой в этом появлении, можно предположить, что разделение кометы произошло после 2017 г. В качестве опорной рассматривалась орбита кометы, полученная по наблюдениям 2003–2017 гг. (табл. 2). Для успешной оценки даты разделения график СКО должен иметь минимум, а соответствующее этому минимуму значение СКО должно быть близким к значению СКО, полученному при определении орбит фрагментов по их наблюдениям (табл. 2). Для фрагмента **b** это значение СКО равно $2.17''$, для фрагментов **b₁** и **b₂** $0.39''$ и $0.97''$, соответственно. Мы рассмотрели также вариант отделения фрагмента **b₂** от фрагмента **b₁**, при этом в качестве опорной орбиты для фрагмента **b₁** использовалась его орбита, приведенная в табл. 2.

Результаты варьирования показаны на рис. 3. Рис. 3а показывает, что график имеет минимум вблизи даты 2020.1, однако СКО удается минимизировать только до $4.7''$, что неудовлетворительно. Это можно считать подтверждением нашего предположения о том, что наблюдения, отнесенные к фрагменту **b**, являются, вероятнее всего, наблюдениями двух разных фрагментов. На рис. 3б показаны результаты варьирования моментов времени, в которые могло произойти отделение фрагментов **b₁** (сплошная кривая) и **b₂** (пунктирная кривая) от кометы и фрагмента **b₂** от фрагмента **b₁** (штрих-пунктирная кривая). Видно, что самый четкий минимум (соответствует дате 2020.06.06) имеет график для **b₁**, при этом полученное для минимума графика значение СКО совпадает с соответствующим значением СКО из табл. 2. Отделение фрагмента **b₂** от основного тела, согласно рис. 3б, могло произойти на интервале около 800 суток, от 2020.06.06 ($r = 5.107$ а. е.) до 2022.07.01 ($r = 1.892$ а. е.), где r — гелиоцентрическое расстояние кометы. А вариант отделения фрагмента **b₂** от фрагмента **b₁**, хотя и демонстрирует минимум, близкий к двум другим минимумам, но не обеспечивает необходимое значение СКО, равное $0.97''$.

Результаты оценки параметров разделения для фрагмента **b₁** приводятся в табл. 3. Решение 1 показывает изменения компонентов скорости фрагмента относительно основного тела, причем угол между вектором изменения скорости и вектором скорости кометы $\theta_1 = 133^\circ$. Необходимо отметить, что совместное определение компонентов скорости и параметров НУ оказалось невозможным из-за их значительной корреляции. Определение только параметров НУ (решение 2) приводит к существенному увеличению значения СКО.

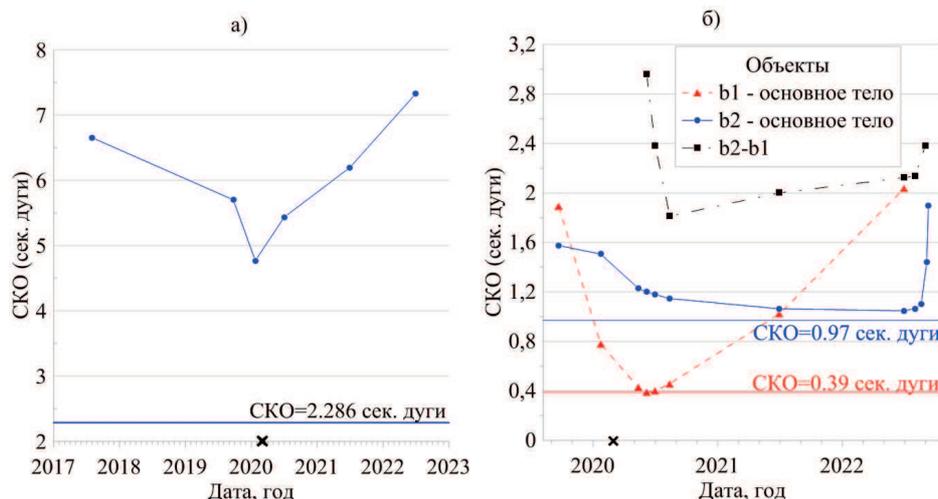


Рис. 3: Результаты варьирования момента отделения фрагмента **b** от основного тела (а), фрагментов **b₁** и **b₂** от основного тела и фрагмента **b₂** от фрагмента **b₁** (б). Значком «x» отмечен момент сближения с Юпитером 2020.02.10 до 0.265 а. е.

Сами параметры НУ таковы, что угол теплового запаздывания, оцененный по значениям A_1 и A_2 , оказывается близок к 90° , что представляется нереальным. В решениях 3 и 4 ошибки оцениваемых параметров A_1 и A_3 значительно превышают сами значения, а включение их в решение приводит к увеличению ошибок изменения скоростей.

Отделение фрагмента **b₂** от основного тела, согласно рис. 3б, могло произойти в любой момент на интервале около 800 суток, от 2020.06.06 до 2022.07.01. Результаты оценки параметров разделения для двух этих крайних дат приводятся в табл. 4. Так же, как и для фрагмента **b₁**, совместное определение компонентов скорости и параметров НУ невозможно из-за их значительной корреляции. Решение 3 показывает параметры НУ, которые так же нереальны, как и в случае с фрагментом **b₁**.

Что касается возможности отделения фрагмента **b₂** от фрагмента **b₁** (рис. 3б, штрих-пунктирная кривая), СКО удастся минимизировать только до $1.8''$, хотя момент времени, соответствующий этому минимуму (2020.08.13) близок к минимумам для фрагментов **b₁** и **b₂** относительно основного тела. Изменение скорости фрагмента **b₂** относительно фрагмента **b₁** на этот момент времени не приводится, так как его ошибка существенно больше самого значения. Но все три минимума графиков на рис. 3б говорят о том, что образование обоих фрагментов могло произойти одновременно вблизи даты 2020.06.06.

4. Результаты

Световые кривые кометы 157P в четырех последних появлениях [8] показывают нерегулярные изменения яркости кометы, особенно в 2017 г., что коррелирует с наличием систематических уклонений в остаточных

Таблица 3: Обстоятельства отделения фрагмента **b₁** от основного тела. Эпоха 2020.06.06.0.

Параметр	Номер решения			
	1	2	3	4
$\Delta v_x, 10^{-6}$ а. е./сут.	-0.383 ± 0.011	—	-0.406 ± 0.328	-0.487 ± 0.158
$\Delta v_y, - // -$	-1.194 ± 0.022	—	-1.124 ± 0.412	-1.197 ± 0.338
$\Delta v_z, - // -$	-2.612 ± 0.028	—	-2.634 ± 0.376	-2.628 ± 0.469
$ \Delta v_1 , - // -$	2.894 ± 0.035	—	2.893 ± 0.647	2.928 ± 0.469
$ \Delta v_1 , \text{ м/с}$	5.02 ± 0.07	—	5.04 ± 1.12	5.08 ± 1.04
$\theta_1, ^\circ$	133.2	—	133.1	133.3
$A_1, 10^{-8}$ а. е. сут. $^{-2}$	—	19.1 ± 0.22	1.0 ± 15.0	—
$A_2, - // -$	—	-133.4 ± 5.25	—	—
$A_3, - // -$	—	-18.4 ± 0.49	—	0.07 ± 0.40
СКО, ''	0.3912	1.5891	0.3914	0.3910

Таблица 4: Обстоятельства отделения фрагмента \mathbf{b}_2 от основного тела.

Параметр	Эпоха 2020.06.06 ($r = 5.107$ а. е.)	Эпоха 2022.07.01 ($r = 1.892$ а. е.)	
	Номер решения		
	1	2	3
$\Delta v_x, 10^{-6}$ а. е./сут.	0.180 ± 0.016	3.078 ± 0.317	—
$\Delta v_y, - // -$	0.000 ± 0.050	-1.694 ± 0.358	—
$\Delta v_z, - // -$	-0.459 ± 0.108	-0.037 ± 0.182	—
$ \Delta v_2 , - // -$	0.501 ± 0.120	3.280 ± 0.511	—
$ \Delta v_2 , \text{ м/с}$	0.87 ± 0.21	5.68 ± 0.88	—
$\theta_2, ^\circ$	96.2	164.0	—
$A_1, 10^{-8}$ а. е. сут. $^{-2}$	—	—	-5.7 ± 2.6
$A_2, - // -$	—	—	-58.7 ± 6.4
$A_3, - // -$	—	—	-7.5 ± 0.8
СКО, "	1.1999	1.0472	1.0682

разностях наблюдений 2017 г. Кроме того, после появления 2017 г. произошло изменение знака параметра A_2 , что также может указывать на неустойчивое состояние ядра кометы.

Анализ «О–С» в 2021–2023 гг. позволяет предположить, что фрагментов было два и каждый из двух фрагментов наблюдался в течение примерно двух недель с интервалом между ними, равным 13 суткам. Время отделения фрагментов от основного тела оценивалось в результате вариации момента отделения и определения на этот момент компонентов скорости фрагмента при фиксированных координатах основного тела. Считалось, что минимальное значение СКО соответствует времени разделения. Время отделения первого фрагмента от основного тела оценивается достаточно уверенно, с ошибкой в десятки суток, нами принято значение 2020.06.06, что примерно через три месяца после сближения с Юпитером и за два года до прохождения через перигелий. Комета в это время не наблюдалась.

Время отделения второго фрагмента от основного тела оценивается менее уверенно, оно могло произойти на интервале примерно в 800 суток и поэтому было рассмотрено два варианта: отделение в начале этого интервала, 2020.06.06, и в конце, 2022.07.01. Рассмотрена также возможность отделения второго фрагмента от первого. Оцененное время этого события ближе к началу приведенного интервала, что указывает на то, что оба фрагмента могли образоваться практически одновременно.

На момент 2020.06.06 скорость отделения первого фрагмента составила $|\Delta v_1| = (5.02 \pm 0.07)$ м/с. Угол между векторами скорости основного тела и изменения скорости $\theta_1 = 133.2^\circ$. На момент 2020.06.06 скорость отделения второго фрагмента составила $|\Delta v_2| = (0.87 \pm 0.21)$ м/с и $\theta_2 = 96.2^\circ$. Если отделение второго фрагмента от основного тела произошло незадолго до начала его наблюдений, 2022.07.01, то $|\Delta v_2| = (5.68 \pm 0.88)$ м/с, $\theta_2 = 164.0^\circ$. Скорость отделения второго фрагмента от первого оценивается с большой ошибкой и здесь не приводится.

5. Обсуждение

Рассмотрим возможные причины, вызвавшие фрагментацию кометы 157P. Особенности этого события таковы:

1. комета в течение последних появлений демонстрировала нерегулярное поведение световых кривых;
2. согласно изображениям кометы [8], основное ядро располагалось на орбите впереди каждого из фрагментов;
3. в оцененное время разделения комета находилась на расстоянии 5.1 а. е. от Солнца;
4. движение фрагментов определялось скоростями разделения, а не негравитационным ускорением.

Учитывая все эти факторы, можно предположить, что разделение на этом расстоянии от Солнца и с такой скоростью вряд ли могло быть вызвано термическим стрессом или внутренним давлением газа. Вращательную неустойчивость, как первопричину разделения, по-видимому, следует исключить, так как ядро кометы невелико (согласно данным JPL [10], $m_1 = 15.2^m$) и должно иметь нереально быстрое вращение для достижения скорости в 5 м/с. Две кометы, для которых причиной разделения считают тесное сближение с Юпитером [2], 16P/Brooks2 и D/Shoemaker-Levy 9, прошли на расстоянии от Юпитера 0.001 а. е. и 0.0002 а. е., соответственно. Расстояние кометы 157P от Юпитера 10 февраля 2020 г. составило 0.265 а. е., и вряд ли это событие могло привести к фрагментации. Остается только вариант столкновения вблизи даты 2020.06.06 некоторого малого тела с кометой, предположительно состоявшей из слабо связанных фрагмен-

тов. Так как кометное ядро уцелело, то это тело было совсем небольшого размера и маловероятно, что элементы его орбиты могли находиться в наших каталогах.

Считается, что столкновение малых тел сопровождается вспышкой яркости. Однако в случае кометы 157P во время предполагаемого столкновения 2020.06.06 комета находилась на расстоянии 5.1 а. е. от Солнца и не наблюдалась.

Список литературы

1. M. P. Center, MPC Database Search 157P/Tritton, 2023, URL https://minorplanetcenter.net/dbsearch/showobject?utf8=%E2%9C%93&object_id=157P.
2. H. Boehnhardt, in M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver, eds., *Comets II*, 301 (2004).
3. Z. Sekanina, *Icarus*, **30**, 574, 1977.
4. Z. Sekanina, *Icarus*, **33**, 173, 1978.
5. Z. Sekanina, *Icarus*, **38**, 300, 1979.
6. Z. Sekanina, in L. L. Wilkening, ed., *IAU Colloq. 61: Comet Discoveries, Statistics, and Observational Selection*, 251–287 (1982).
7. B. G. Marsden, Z. Sekanina, and D. K. Yeomans, *Astron. J.*, **78**, 211, 1973.
8. S. Yoshida, Seiichi Yoshida's Home Page 157P/Tritton (2022), 2023, URL <http://www.aerith.net/comet/catalog/0157P/2022.html>.
9. Y. A. Chernetenko, *Transactions of IAA RAS*, 93–107, 2019, URL <http://iaaras.ru/en/library/paper/2015/>.
10. Jet Propulsion Laboratory, Small-body Database Lookup, 2023, URL https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=157P-B.

Влияние внутренней структуры частиц на поляризационные свойства кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1

Петров Д.В., Жужулина Е.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

Поляриметрические наблюдения кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 проводились на 2.0-м телескопе обсерватории Пик Терскол и на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории в период с 2018–2022 г. Диапазон фазовых углов, охваченный наблюдениями, составил от 2° до 9.6° . Наблюдения выявили значительную разницу в степени линейной поляризации кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 при одном и том же фазовом угле в разное время наблюдения. Для объяснения этого факта было проведено компьютерное моделирование рассеяния света радиально-пористыми фрактальными частицами. Показано, что изменение внутренней структуры рассеивающих частиц заметно влияет не только на интенсивность, но и на степень поляризации рассеянного света. Когда рассеивающая частица становится более «пушистой», это одновременно приводит к увеличению интенсивности и степени линейной поляризации рассеянного света. Следовательно, изменения степени поляризации могут быть объяснены морфологическими изменениями внутренней структуры кометного вещества. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 23.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: кометы, степень линейной поляризации, компьютерное моделирование

The influence of the internal structure of particles on the polarization properties of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1

Petrov D.V., Zhuzhulina E.A.

Crimean Astrophysical Observatory of the RAS, Crimea, Russia

Polarimetric observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 were carried out on the 2.0-m telescope of the Terskol Peak Observatory and on the 2.6-m telescope of the Crimean Astrophysical Observatory in the period from 2018–2022. The range of phase angles covered by the observations was from 2° up to 9.6° . Observations revealed a significant difference in the degree of linear polarization of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 at the same phase angle at different observation times. To explain this fact, computer simulation of light scattering by radially porous fractal particles was carried out. It is shown that changes in the internal structure of scattering particles noticeably affect not only the intensity, but also the degree of polarization of the scattered light. As the scattering particle becomes fluffier, this simultaneously leads to an increase in the intensity and degree of linear polarization of the scattered light. Consequently, changes in the degree of polarization can be explained by morphological changes in the internal structure of the cometary material. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 23.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: comets, linear polarization degree, computer simulation

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.008

1. Введение

Комета 29P/Schwassmann-Wachmann 1 была открыта 5 ноября 1927 г. немецкими астрономами Арнольдом Швассманом и Арно Артуром Вахманом в Гамбургской обсерватории. Орбита кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 полностью находится позади орбиты Юпитера, на расстоянии примерно 6 астрономических единиц. В результате эта комета доступна для наблюдений с Земли только в довольно узком диапазоне фазовых углов от 0 до 10 градусов. Особенностью кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1 является то, что время от времени она показывает увеличение блеска на 1–5 звездных величин [1]. При типичной яркости этой кометы от 16^m до 19^m всплеск яркости может увеличить ее яркость до 13^m , а в некоторых случаях и до 10^m , что соответствует более чем тысячекратному увеличению яркости.

В работе [2] было показано, что всплески можно объяснить наличием у кометы одного или нескольких крупных спутников (более километра), с перигелийским расстоянием орбиты, примерно равным радиусу ядра кометы и имеющим период вращения от 6 до 14 дней. Благодаря тому, что спутник при прохождении перигелия «трется» о поверхность кометы, он оставляет борозду на мягкой пыльной поверхности кометы и поднимает шлейф пыли по обе стороны от проведенной борозды.

Комета 29P/Schwassmann-Wachmann 1 являлась объектом многочисленных астрономических наблюдений, например, [3, 4, 5, 6]. Однако, как правило, в ходе этих наблюдений изучались лишь фотометрические свойства кометы. База данных поляриметрических наблюдений комет¹ не содержит результатов поляриметрических наблюдений данной кометы. В работе [7] было получено одно значение степени линейной поляризации на фазовом угле 9.5° .

¹<https://data.nasa.gov/Earth-Science/DATABASE-OF-COMET-POLARIMETRY-V1-0/xdyf-936n/data>

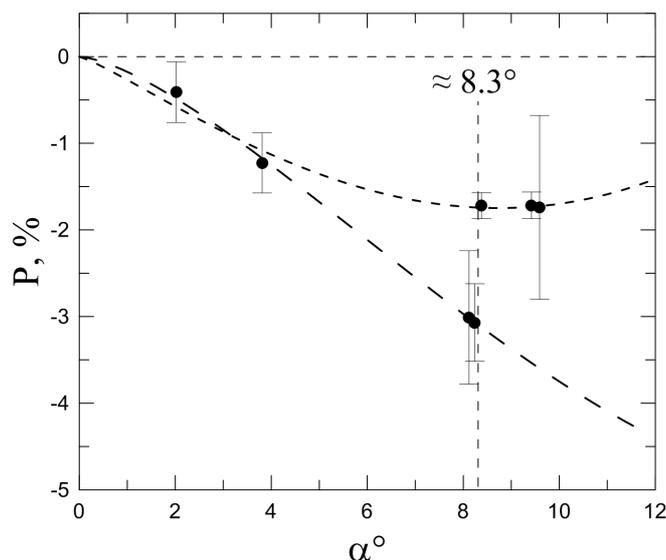


Рис. 1: Фазовая зависимость степени линейной поляризации кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Штриховые линии представляют собой аппроксимацию тригонометрическим полиномом.

Поляриметрические наблюдения кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1, произведенные на 2.6-м телескопе КраО [8], показали, что у данной кометы может меняться не только яркость, но и степень линейной поляризации (см. рис. 1). На данном рисунке показаны результаты наблюдений в широкополосном фильтре R. В других фильтрах видна аналогичная картина. На рисунке видно, что на фазовом угле $\approx 8.3^\circ$ степень поляризации может отличаться примерно в два раза. У иных комет не обнаружено подобных особенностей [8]. Этот наблюдательный факт требует объяснений.

2. Компьютерное моделирование

Одним из возможных объяснений могут послужить морфологические изменения, происходящие с кометным веществом, которые, как было показано в работе [9], влияют на изменение яркости кометы. Исходя из общих соображений, очевидно, что они должны становиться более «пушистыми», т. е. размер рассеивающей частицы должен увеличиваться за счет взаимного разделения составляющих ее фрагментов. Для этого была разработана специальная модель, названная радиально-пористой фрактальной частицей. В ее основе лежит квазифрактальная частица, объединяющая иерархию шероховатостей на всех уровнях [10]. Примеры таких частиц показаны на рис. 2. Морфологические изменения таких частиц характеризуются параметром R/R_0 , где R — радиус сферы, описанной вокруг морфологически измененной частицы, а R_0 — радиус сферы, описанной вокруг начальной частицы.

Исходя из того, что частицы состоят из водяного льда, мы произвели компьютерное моделирование фазовой зависимости степени линейной поляризации для разных R_0 и R/R_0 . Рис. 3 показывает карту распределения степени линейной поляризации для фазового угла 8.3° . Из рисунка видно, что морфологические изменения структуры частиц влияют на степень линейной поляризации, начиная с размера частиц более 400 нм. Когда частица становится более «пушистой», величина R/R_0 возрастает. При этом степень линейной поляризации увеличивается по абсолютной величине и даже при больших величинах R/R_0 становится положительной.

3. Выводы

В ходе наблюдений на одном и том же фазовом угле в разное время наблюдений было обнаружено значительное отличие степени линейной поляризации кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Компьютерное моделирование показало, что эти изменения степени поляризации могут быть объяснены морфологическими изменениями внутренней структуры кометного вещества.

Список литературы

1. J. M. Trigo-Rodriguez, *The Astronomer's Telegram*, **1879**, 1, 2008.
2. Y. D. Medvedev and S. R. Pavlov, in *Proceedings of the All-Russia scientific conference "The Multifaceted Universe: Theory and Observations — 2022"*, 148, The Multifaceted Universe: Theory and Observations — 2022 (2022).
3. O. V. Ivanova, Y. V. Skorov, P. P. Korsun, V. L. Afanasiev, and J. Blum, *Icarus*, **211**, 559, 2011.

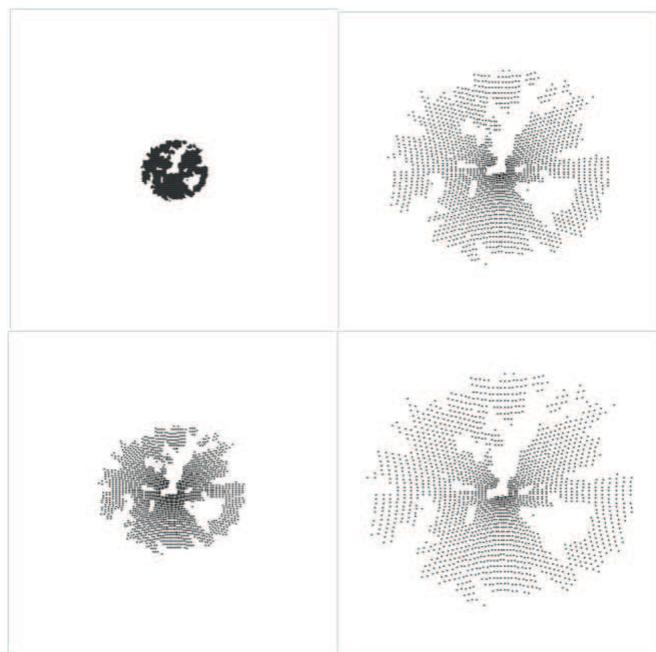
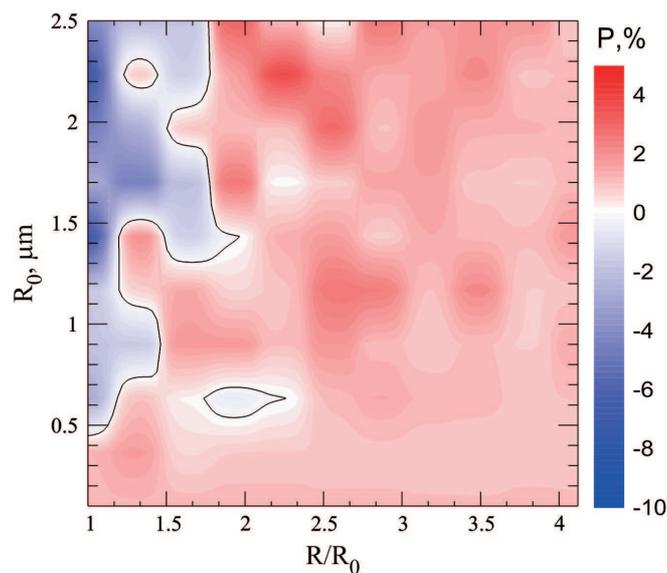


Рис. 2: Примеры радиально-пористых фрактальных частиц.

Рис. 3: Карта степени поляризации света, рассеянного радиально-пористыми фрактальными частицами на фазовом угле 8.3° .

4. G. I. Kokhirova, O. V. Ivanova, F. D. Rakhmatullaeva, A. M. Buriev, and U. K. Khamroev, *Plan. and Space Sci.*, **181**, 104794, 2020.
5. O. Shubina, V. Kleshchonok, O. Ivanova, I. Luk'yanyk, and A. Baransky, *Icarus*, **391**, 115340, 2023.
6. A. S. Betzler, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **523**, 3678, 2023.
7. A. Kochergin, E. Zubko, E. Chornaya, M. Zheltobryukhov, G. Videen, G. Kornienko, and S. S. Kim, *Icarus*, **366**, 114536, 2021.
8. E. A. Zhuzhulina, N. N. Kiselev, D. V. Petrov, A. A. Savushkin, and N. V. Karpov, in *53rd Lunar and Planetary Science Conference*, **2678**, 2300 (2022).
9. D. V. Petrov and E. A. Zhuzhulina, in *Proceedings of the "Thirteenth Moscow Solar System Symposium 2022"*, 285–286, Thirteenth Moscow Solar System Symposium 2022 (2022).
10. D. V. Petrov and E. A. Zhuzhulina, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **289**, 108298, 2022.

Поиск кандидатов в активные астероиды среди АСЗ

Барабанов С.И., Баканас Е.С.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В Институте астрономии РАН с 2010 г. проводятся наблюдения околоземных объектов, получен большой архив фотометрических данных. С целью определения критериев выявления объектов для архивного поиска кометной активности у астероидов рассмотрены распределения по элементам орбит и физическим характеристикам известных активных астероидов (АА). На основании проведенного анализа распределений АА и элементов орбит астероидов, сближающихся с Землей, (АСЗ) несколько астероидов из архива наблюдений ИНАСАН были включены в список для дальнейших исследований — поиска по доступным архивным данным и по новым наблюдениям с целью выявления кометной активности астероидов. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: Солнечная система, астероиды, кометы, кометная активность, активные астероиды, кандидаты в активные астероиды

Search of candidates for active asteroids among the NEA

Barabanov S.I., Bakanas E.S.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences has been conducting observations of near-Earth objects since 2010, and a large archive of photometric data has been obtained. In order to determine the criteria for identifying objects for archival search of cometary activity near asteroids, distributions by orbital elements and physical characteristics of known active asteroids (AAs) are considered. Based on the analysis of the AAs distributions and the orbital elements of the near-Earth asteroids (NEA) from the INASAN archive, several asteroids were included in the list of objects for further research — archival search and new observations in order to identify comet activity of asteroids. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: Solar system, asteroids, comets, cometary activity, active asteroids, candidates for active asteroids

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.009

1. Введение

Считается, что кометы — это грязные ледяные шары, а астероиды — ледяные комочки грязи [1] и отличаются они по визуальным признакам — наличию или отсутствию процесса «активности», проявляющейся в виде газопылевой комы и хвостов. Предложенное ранее разграничение комет и астероидов по постоянной Тиссерана относительно Юпитера ($T_J \leq 3.08$ — кометы, более 3.08 — астероиды [2]) не всегда работает — кометная активность обнаружена у астероидов в том числе с $T_J > 3$, для объектов на явно «астероидных орбитах» (распределение по постоянной Тиссерана для известных активных астероидов показано в разделе 2). То есть, активные астероиды с постоянной Тиссерана более 3 — это отдельный класс объектов Солнечной системы, как и было отмечено в ряде публикаций (например, в [2]).

После первого выявления кометной активности в 1996 г. у астероида (7968) Elst-Pizarro [3], список астероидов с выявленной «активностью» постоянно пополняется. Кандидаты в активные астероиды — это и астероиды, находящиеся на кометных орбитах, в том числе астероиды, входящие в единый с метеороидными потоками комплекс малых тел [4], и астероиды, для которых выявлено аномальное поведение кривых блеска (по данным, представленным в Центре малых планет [5]) по сравнению с расчетными значениями по эфемеридам и другим.

Включая объекты в кандидаты АА, необходимо учитывать, что часть объектов, находящихся на кометных орбитах, не проявляют кометной активности, возможно, по причине, что представляют из себя давно угасшие кометы и, вероятно, только столкновение с другими объектами может повлиять на проявление какой-либо «активности».

Ряд активных астероидов был найден в рамках проекта «Active Asteroids» по архивным снимкам [6]. Поиск активности у астероидов по архивным источникам был рассмотрен ранее, например, в работе [7]. В ИНАСАН с 2010 г. ведутся наблюдения околоземных астероидов, и было принято решение по имеющимся архивным данным провести аналогичный поиск. Цель данной работы — выбор объектов для поиска АА по архивным данным и для дальнейших наблюдений данных объектов с целью выявления кометной активности.

2. Активные астероиды среди околоземных объектов

Для сравнения околоземных активных астероидов с другими АА, были построены распределения по элементам орбиты и физическим характеристикам для всех известных на данный момент активных астероидов (64 объекта). Ранее, в работах [2, 8] приводятся распределения по элементам орбит комет Главного пояса астероидов, известных на тот момент, среди них нет околоземных объектов. И в работе [9] обсуждается целенаправленный поиск объектов с кометной активностью именно в Главном поясе астероидов. С другой стороны, в [10] показано, что среди АСЗ с диаметром более 1 км 0.3–3.3% составляют спящие короткопериодические околоземные кометы, и при учете наблюдательной селекции и рассматривая все возможные размеры, спящих комет среди астероидов, сближающихся с Землей, должно быть еще больше.

Распределения по элементам орбит и постоянной Тиссерана относительно Юпитера для АА, приведенные на рис. 1, построены по данным каталога [11]. Проведен статистический анализ распределений орбитальных характеристик АА. В результате показано, что практически по всем рассматриваемым характеристикам положение активных околоземных астероидов на гистограммах отличается от имеющихся максимумов распределений, поэтому для выявления активных астероидов среди околоземных требуется выявление дополнительных условий.

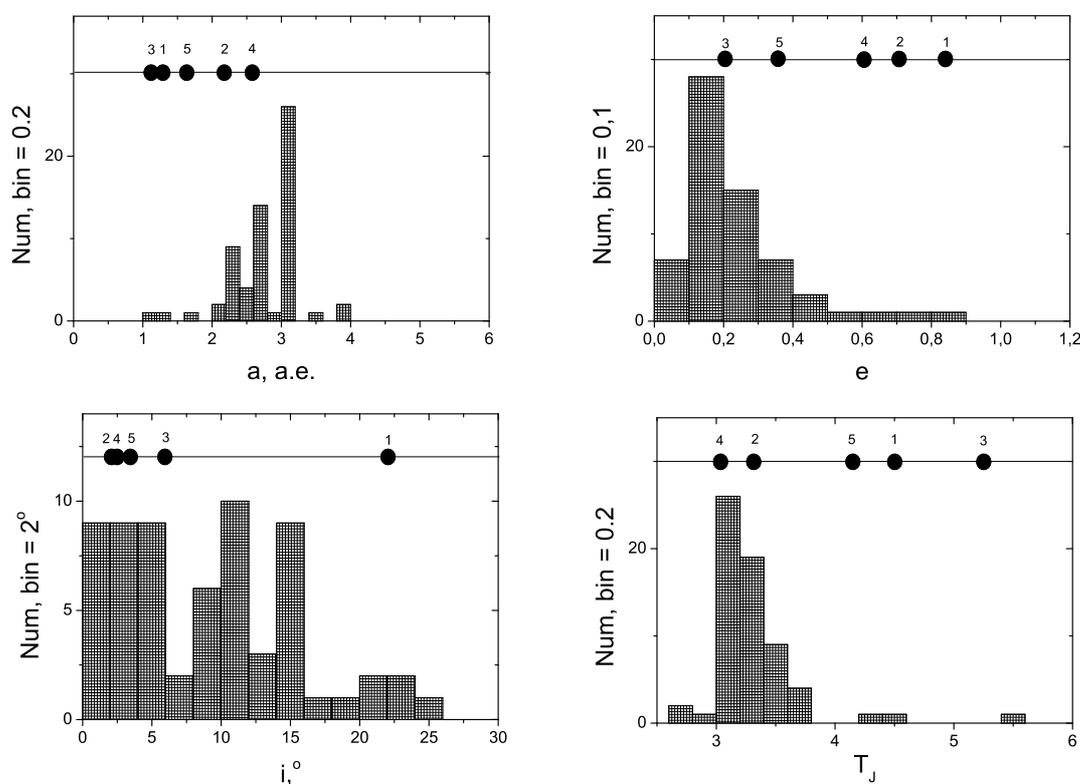


Рис. 1: Распределение АА по элементам орбит и постоянной Тиссерана. Черными точками на графиках обозначены значения соответствующих элементов орбиты и постоянной Тиссерана для околоземных астероидов. Цифры 1–5 соответствуют номерам из первого столбца табл. 1.

В табл. 1 приведены данные околоземных АА. В этой таблице постоянная Тиссерана T_J и абсолютная звездная величина указаны по данным сайта JPL [11]), значения диаметров и спектральный класс — по данным указанных источников.

Дополнительным критерием для отбора в кандидаты активных астероидов может служить факт наличия других малых тел на близких орбитах к орбите кандидата. Данный критерий выбран на основании того, что в ряде публикаций показывается значимость наличия «семейственности» — вхождения в состав какого-либо комплекса различных малых тел Солнечной системы для объектов с предполагаемой кометной природой. Например, вхождение ядер угасших комет в состав комплексов малых тел, включающие метеорные потоки, показано в работах [19, 20]. В тоже время, ранее в ИНАСАН проводились исследования взаимосвязи различных малых тел Солнечной системы. В работе [21] рассматривается связь крупных тел с метеороидными потоками, которые имеют близкие орбиты.

Таблица 1: Околоземные объекты среди активных астероидов.

No	Объект	T_J	H , зв. вел.	D , км	Tholen	SMASII	Источники
1	3200 Phaethon (1983 TB)	4.510	14.45	2.95	F	B	[12, 13, 14]
2	2201 Oljato (1947 XC)	3.298	15.35	1.80		Sq	[15, 16]
3	101955 Bennu (1999 RQ36)	5.525	20.21	0.484		B	[15, 17]
4	4015 Wilson-Harrington (1979 VA)	3.082	16.18	3.821		B	[15, 14]
5	65803 Didymos (1996 GT)	4.204	18.11	0.780		S	[15, 18]

3. Выявление кандидатов в активные астероиды среди АСЗ, наблюдавшихся в ИНАСАН

В рамках программы исследования околоземных объектов в ИНАСАН проводятся наблюдения астероидов. Среди данных астероидов был осуществлен поиск кандидатов в АА — найдены астероиды из числа всех АСЗ, находящиеся на близких орбитах астероидов, наблюдавшихся в ИНАСАН. Элементы орбит астероидов взяты из каталога, представленного на сайте JPL [11]. Критерием близости орбит был выбран критерий Саутворда-Хоккинса [22] с общепринятым значением $D_{SH} < 0.2$.

В табл. 2 для каждого астероида показано количество объектов, подходящих по критерию $D_{SH} < 0.2$, указаны значения перигелийного расстояния (q), значение постоянной Тиссерана относительно Юпитера T_J , спектральный класс (по [15]) и даты прохождения перигелия.

Таблица 2: Количество найденных объектов на близких орбитах с избранными астероидами, для которых ранее были проведены наблюдения в ИНАСАН.

No	Объект	Кол-во объектов $D_{SH} < 0.2$	q , а. е.	T_J	SMAAII	Дата прохождения перигелия
1	518635 (2008 HO3)	2	1.0191	2.887		2023-09-07.26177785
2	(2014 UF206)	4	1.1022	2.913	C	2022-08-20.67015982
3	361071 (2006 AO4)	7	1.0873	3.031	S	2022-03-23.61500651
4	285944 (2001 RZ11)	14	1.0819	3.046	C	2024-04-24.67188450
5	330825 (2008 XE3)	2	1.1727	3.167	S	2025-05-02.39947840
6	5836 (1993 MF)	4	1.1316	3.222	S	2024-02-29.39170218
7	5587 (1990 SB)	4	1.0932	3.253	S	2023-09-20.92345032
8	348400 (2005 JF21)	9	1.0337	3.423	Q	2022-04-20.74683497
9	40329 (1999 ML)	7	1.2363	3.471		2023-06-20.29318063
10	190166 (2005 UP156)	6	1.1227	3.582		2023-09-03.25812411
11	141354 (2002 AJ29)	4	1.0939	3.699	Q	2024-09-08.98980558
12	141018 (2001 WC47)	18	1.0611	4.726	Sw	2023-11-06.69171188

Стоит обратить внимание на спектральные классы объектов, указанные в табл. 2. В работе [23] показано, что для околоземных астероидов на кометных орбитах ($T_J < 3$) существует зависимость спектрального класса от значения постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Чем больше постоянная Тиссерана, тем больше объектов С и S классов, в тоже время присутствует и В класс. Из табл. 1 видно, что околоземные астероиды, для которых зафиксирована активность — В и S классов. Среди кандидатов в АА (табл. 2) тоже присутствуют именно эти спектральные классы.

По представленным данным в табл. 2 видно, что наиболее подходящими кандидатами являются астероиды, находящиеся в верхней части таблицы — с $T_J < 3$, и астероиды, имеющие наибольшее число объектов на близких орбитах ($D_{SH} < 0.2$) — 518635 (2008 HO3), (2014 UF206), 361071 (2006 AO4), 285944 (2001 RZ11), 348400 (2005 JF21) и 141018 (2001 WC47). Для этих астероидов будет проведен архивный поиск проявлений кометной активности и, по возможности, новые фотометрические наблюдения.

Фотометрические наблюдения околоземных объектов с целью выявления кометной активности проводились и ранее другими авторами, в том числе и с отрицательными результатами, как например, в [24] — астероиды на явно кометных орбитах на полученных изображениях не показывают признаков кометной активности. Но подобный отрицательный результат не является опровержением факта возможности проявления активности в том числе и для тех же самых объектов, например, при последующих прохождениях перигелия.

4. Заключение

Среди астероидов, наблюдаемых ранее в ИНАСАН, выявлены кандидаты в АА — 518635 (2008 НОЗ), (2014 UF206), 361071 (42006 АО4), 285944 (2001 RZ11), 348400 (2005 JF21) и 141018 (2001 WC47). Для данных объектов предполагается провести дополнительные исследования — поиск по всем доступным архивным данным и, по возможности, повторные наблюдения с целью выявления кометной активности данных объектов.

Список литературы

1. S. Sonnett, J. Kleyna, R. Jedicke, and J. Masiero, *Icarus*, **215**, 534, 2011.
2. D. Jewitt, H. Hsieh, and J. Agarwal, in *Asteroids IV*, 221–241 (2015).
3. E. W. Elst, O. Pizarro, C. Pollas, J. Ticha, M. Tichy, Z. Moravec, W. Offutt, and B. G. Marsden, *IAU Circ.*, **6456**, 1, 1996.
4. P. B. Babadzhanov and G. I. Kokhirova, in LPI Editorial Board, ed., *Asteroids, Comets, Meteors 2012*, **1667**, 6034 (2012).
5. S. Cikota, J. Ortiz, A. Cikota, N. Morales, and G. Tancredi, in K. Muinonen, A. Penttilä, M. Granvik, A. Virkki, G. Fedorets, O. Wilkman, and T. Kohout, eds., *Asteroids, Comets, Meteors 2014*, 105 (2014).
6. C. Chandler, C. Trujillo, and H. Hsieh, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, **54**, 208.02 (2022).
7. Y. Quan-Zhi, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #49*, **49**, 305.11 (2017).
8. Y. Kim, Y. JeongAhn, and H. H. Hsieh, *Astron. J.*, **155**, 142, 2018.
9. L. Ferellec, C. Snodgrass, and C. Opitom, in *European Planetary Science Congress*, EPSC2022-925 (2022).
10. M. Mommert, A. W. Harris, D. E. Trilling, M. Mueller, et al., in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #44*, **44**, 302.03 (2012).
11. Jet propulsion laboratory, JPL (solar system dynamics, official website = <https://ssd.jpl.nasa.gov/>).
12. D. J. Tholen, *Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry.*, Ph.D. thesis, University of Arizona, 1984.
13. S. J. Bus and R. P. Binzel, *Icarus*, **158**, 146, 2002.
14. A. K. Mainzer, J. M. Bauer, R. M. Cutri, T. Grav, E. A. Kramer, J. R. Masiero, S. Sonnett, and E. L. Wright, *NASA Planetary Data System*, 2019.
15. R. P. Binzel, F. E. DeMeo, E. V. Turtelboom, S. J. Bus, et al., *Icarus*, **324**, 41, 2019.
16. E. F. Tedesco, P. V. Noah, M. Noah, and S. D. Price, *NASA Planetary Data System*, IRAS-A-FPA-3-RDR-IMPS-V6.0, 2004.
17. J. P. Emery, Y. R. Fernández, M. S. P. Kelley, K. T. Warden, et al., *Icarus*, **234**, 17, 2014.
18. S. P. Naidu, L. A. M. Benner, M. Brozovic, M. C. Nolan, et al., *Icarus*, **348**, 113777, 2020.
19. G. I. Kokhirova and P. B. Babadzhanov, *Solar System Research*, **57**, 467, 2023.
20. P. B. Babadzhanov, G. I. Kokhirova, and Y. V. Obruchov, *Solar System Research*, **49**, 165, 2015.
21. S. I. Barabanov, in B. M. Shustov and D. S. Wiebe, eds., *Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary*, 80–86 (2018).
22. R. B. Southworth and G. S. Hawkins, *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **7**, 261, 1963.
23. G. Simion, M. Popescu, J. Licandro, O. Vaduvescu, and J. de León, in *European Planetary Science Congress*, EPSC2020-351 (2020).
24. J. M. Trigo-Rodríguez, J. Lacruz, A. Sánchez, and D. Rodríguez, in *European Planetary Science Congress 2009*, 739 (2009).

Сравнение эволюции орбит околоземных астероидов 52768 (1998 OR2) и 159402 (1999 AP10)

Емельяненко В.В., Карташова А.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Проведено сравнение эволюции орбит астероидов 52768 и 159402. Эти объекты имеют очень похожее динамическое поведение в прошлом. С большой вероятностью оба астероида подходили к Солнцу на расстояние менее 0.1 а. е. Анализ сближений с Солнцем, выполненный для виртуальных частиц из доверительных областей орбит, подтверждает возможность общего происхождения астероидов 52768 и 159402 в результате распада первоначального объекта вблизи Солнца.

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: астероид, эволюция орбит

Comparison of the orbital evolution of near-Earth asteroids 52768 (1998 OR2) and 159402 (1999 AP10)

Emel'yanenko V.V., Kartashova A.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The orbital evolution of asteroids 52768 and 159402 is compared. These objects have very similar dynamical behavior in the past. With a high probability, both asteroids approached the Sun at a distance of less than 0.1 au. Analysis of approaches to the Sun, performed for virtual particles from the confidence regions of the orbits, confirms the possibility of a common origin of asteroids 52768 and 159402 as a result of the original object breakup near the Sun.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: asteroid, evolution of orbits

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.010

1. Введение

Астероиды 52768 (1998 OR2) и 159402 (1999 AP10) привлекли большое внимание наблюдателей в 2009 г., поскольку проходили на малых расстояниях (0.18 и 0.08 а. е., соответственно) от Земли. Эти объекты имеют близкие значения больших полуосей a , перигелийных расстояний q и наклонов орбиты i (табл. 1), а также сходные поляризационные свойства [1, 2]. Но аргументы перигелиев ω и долготы восходящих узлов Ω для этих объектов в настоящее время значительно различаются.

Таблица 1: Элементы орбиты астероидов 52768 и 159402 на эпоху 2023.09.13 из базы данных JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov>).

Астероиды	52768	159402
a , а. е.	2.380	2.380
q , а. е.	1.010	1.018
i , град	5.9	7.6
ω , град	174.6	47.6
Ω , град	26.9	356.8

В статье [3] была исследована эволюция астероида 159402 и показано, что с большой вероятностью этот объект проходил в прошлом на расстоянии менее 0.1 а. е. от Солнца. Естественно предполагать, что малые тела испытывают большие изменения (и даже разрушение) вблизи Солнца вследствие очень больших приливных и тепловых воздействий, а также возможного взаимодействия с солнечной атмосферой. Интерес к сближениям с Солнцем как возможному процессу, играющему важную роль в физической эволюции околоземных объектов, значительно усилился после Челябинского события, поскольку была установлена большая вероятность прохождения Челябинского объекта вблизи Солнца в прошлом (приблизительно 1 млн. лет назад) [4]. Однако изучение влияния околосолнечных процессов на физические свойства малых тел является явно недостаточным даже для комет, прохождения которых вблизи Солнца были доступны для наблюдений. Кометы, касающиеся Солнца (sungrazing comets), обычно дезинтегрируют. Однако многие кометы семейства Крахта и Марседена (sunskirting comets), имеющие перигелийные расстояния около 0.05 а. е., наблюдались

уже в нескольких появлениях, и вопрос их дальнейшей эволюции требует дополнительных исследований. Еще более сложным является вопрос об эволюции астероидов после околосолнечных прохождений, поскольку прямых наблюдений этих явлений почти нет. В этом направлении представляется важным изучение обнаруженных астероидов с похожими физическими характеристиками и сближавшихся в прошлом с Солнцем.

В настоящей работе мы исследуем эволюцию астероида 52768 и обсуждаем вопрос о возможности общего происхождения астероидов 52768 и 159402 в результате разрушения первоначального объекта вблизи Солнца.

2. Эволюция орбиты астероида 52768 в прошлом

Основной целью исследования эволюции орбиты было выяснение, насколько вероятно прохождение астероида в прошлом вблизи Солнца. Чтобы учесть неопределенности в исходной орбите, проводилось интегрирование уравнений движения для 100 орбит из доверительной области. Применялись те же методы, что и в работе [3].

Рис. 1 показывает изменение числа виртуальных частиц N , достигших $q < 0.1$ а. е., как функции времени. 68% частиц переходит на такие околосолнечные орбиты за 10 млн. лет наших интегрирований. Частицы наиболее часто становятся околосолнечными объектами в прошлом на промежутке между 0.1 млн. лет и 2.3 млн. лет.

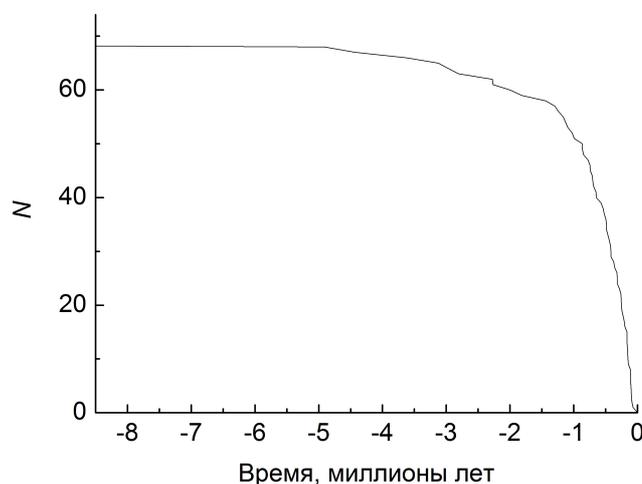


Рис. 1: Число виртуальных объектов, достигших $q < 0.1$ а. е. в прошлом.

И эволюция орбит астероидов 52768 и 159402, и переход этих объектов на околосолнечные орбиты имеют похожие характеристики. Поэтому мы провели анализ возможности общего происхождения этих астероидов при их разделении вблизи Солнца.

3. Возможное разделение астероидов вблизи Солнца

В работе [3] была исследована эволюция 100 виртуальных частиц для астероида 159402 и установлено, что частицы подходят к Солнцу наиболее часто на промежутке времени между 0.25 млн. лет и 2.6 млн. лет в прошлом. Поэтому на промежутке между 0.25 млн. лет и 2.3 млн. лет мы провели поиск моментов времени, когда виртуальные частицы и для 52768, и для 159402 находились на околосолнечных орбитах и имели сходные орбитальные характеристики. На рис. 2 показан пример эволюции элементов орбит для такой пары частиц. Вблизи момента времени -0.65 млн. лет эти частицы находились на орбитах с перигелийными расстояниями 0.05 а. е.

4. Заключение

Исследована эволюция орбиты астероида 52768 и проведено сравнение с ранее полученными результатами [3] изучения движения астероида 159402. Эти объекты имеют очень похожее динамическое поведение в прошлом. С большой вероятностью оба астероида подходили к Солнцу на расстояние менее 0.1 а. е. Поскольку астероиды 52768 и 159402 имеют также сходные поляризационные свойства [1, 2], то проведено рассмотрение возможности разделения этих астероидов в результате распада единого объекта вблизи Солнца. Анализ

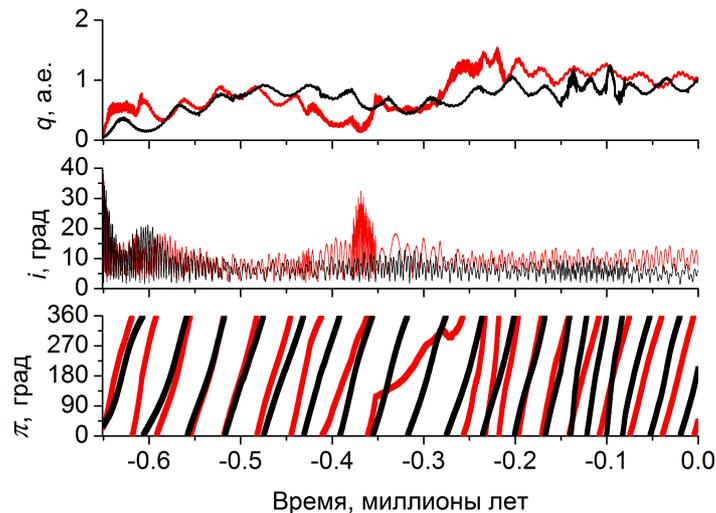


Рис. 2: Пример изменения перигелийного расстояния, наклона орбиты и долготы перигелия для виртуальной частицы из доверительной области астероида 52768 (черные линии) и виртуальной частицы из доверительной области астероида 159402 (красные линии).

сближений с Солнцем, проведенный для виртуальных частиц из доверительных областей орбит, подтверждает возможность общего происхождения астероидов 52768 и 159402. Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера МВС-10П Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

Список литературы

1. N. Kiselev, N. Karpov, A. Savushkin, D. Petrov, A. Gorshkov, E. Zhuzhulina, A. Shein, and K. Antoniuk, in *Abstract book of the fourteenth Moscow Solar System Symposium 14M-S3*, 281–283 (2023).
2. N. N. Kiselev, A. A. Savushkin, D. V. Petrov, K. A. Antoniuk, E. V. Zhuzhulina, N. V. Karpov, and V. L. Afanasiev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 2023.
3. V. V. Emel'yanenko and A. P. Kartashova, *INASAN Science Reports*, **7**, 229, 2022.
4. V. V. Emel'yanenko, S. A. Naroenkov, P. Jenniskens, and O. P. Popova, *Meteoritics and Planetary Science*, **49**, 2169, 2014.

Постоянные Тиссерана для малых тел относительно планет Солнечной системы

Емельяненко Н.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследована постоянная Тиссерана малого тела относительно планет Солнечной системы. Выделены орбиты малых тел, для которых она равняется трем. Орбиты малых тел могут быть высокоэксцентричными. Статья основана на материалах, представленных на Научной конференции «VIII Бредихинские чтения».

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: постоянная Тиссерана, малое тело, элементы орбит

The Tisserand parameter for small bodies with respect to the planets of the Solar System

Emel'yanenko N.Yu.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Tisserand parameter for small bodies with respect to the planets is calculated and analysed. The orbits of small bodies for which it is equal 3 identified. The orbits of small bodies can have high eccentricities. This paper is based on a talk presented at VIII Bredikhin conference.

Received 31.10.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: Tisserand parameter, small body, orbital elements

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.6.011

1. Введение

Хорошо известно, если постоянная Тиссерана малого тела относительно планеты близка к трем, оно может испытывать низкоскоростные сближения с этой планетой [1]. Постоянная Тиссерана относительно планеты слабо изменяется в эволюционных преобразованиях элементов орбит малых тел. Последний фактор (критерий Тиссерана) ранее часто использовался при отождествлении утерянных периодических комет. Неоднократно было показано, что близкое к трем значение постоянной Тиссерана имеют малые тела, находящиеся на орбитах с малым эксцентриситетом и наклоном. Сближения с планетой у таких объектов происходят с малой планетоцентрической скоростью. Эти сближения были названы низкоскоростными. В области сближения фиксируются особенности: временный спутниковый захват (ВСЗ), временный гравитационный захват (ВГЗ), геометрические и физические кратные минимумы функции планетоцентрического расстояния (ГКМ и ФКМ) [2]. Одной из главных особенностей является долгое время пребывания в окрестностях планеты с физическим захватом малого тела на спутниковые орбиты. Первыми наблюдаемыми объектами были кометы семейства Юпитера. Это кометы Oterma, Gerels3, Kyshida-Myramatsu и многие другие. В настоящее время известны более сотни комет с высоким, близким к трем относительно Юпитера, значением постоянной Тиссерана. В 21 в. открыты кометы, сближающиеся с Сатурном (например, 308P Lagerkvist-Carsenty, P/2005S2 Skiff и другие). Сближения с Сатурном этих комет сопровождались ВСЗ и ГКМ. Наиболее уникальными являются астероиды, сближающиеся с Землей: 2006 RH120 и 2020CD3. Длительные сближения этих астероидов сопровождались ВГЗ с многочисленными физическими кратными минимумами внутри сферы Хилла Земли.

Целью данной работы является изучение возможности существования орбит малых тел с высоким значением постоянной Тиссерана относительно планет Солнечной системы при любых значениях эксцентриситета орбиты малого тела.

2. Исследование уравнения $T_p = 3$

Запишем постоянную Тиссерана малого тела m относительно произвольной планеты p в виде:

$$T_p = \frac{a_p}{a_m} + 2\sqrt{\frac{a_m}{a_p}(1-e^2)} = 3 \quad (1)$$

Пусть $\frac{a_m}{a_p} = X$, тогда $\frac{1}{X} + 2\sqrt{X(1-e_m^2)} = 3$, $T_p - 3 = y$.

Область определения: $X > 0$.

$$y = 4(1-e_m^2)X^3 - 9X^2 + 6X - 1 = 0 \quad (2)$$

Начертим графики функций $y_i (i = 1 - 8)$ уравнения (2) при выбранных значениях эксцентриситета орбиты малого тела (рис. 1). Графики необходимы только для того, чтобы установить, что уравнение (1) имеет действительные корни.

Уравнение (2) — кубическая парабола, имеет три действительных корня при $0 \leq e_m < 1$. Корни X_2, X_3 с шагом $\Delta e = 0.1$ помещены во 2–3 столбцы табл. 1. Корень X_1 не удовлетворяет исходному уравнению (1), появился для уравнения (2) из-за возведения уравнения (1) в квадрат (помещен в последний столбец таблицы). Вычисленные корни одинаковы для всех больших планет.

Дополним табл. 1. Вычислим элементы орбит малых тел: большие полуоси: $(a_m)_1 = X_1 a_p$, $(a_m)_2 = X_2 a_p$, а также соответствующие им перигелийные и афелийные расстояния для всех планет Солнечной системы. Данные вычислений поместим в таблицы. Дополним вычисления снизу строкой со значениями границ областей сближений по большой полуоси для высокоскоростных и низкоскоростных сближений [3]. Вычисления, выполненные для Нептуна, поместим в табл. 1. Проанализируем размеры орбит малых тел на примере табл. 1. С использованием дополнительной строки выделим курсивом в табл. 1 значения, удовлетворяющие дополнительной строке. Отметим, что при $e = 0$ орбиты малого тела совпадают с орбитой планеты m . Такие орбиты существуют (например, троянцы Юпитера). Подобные образования фиксируются у Нептуна.

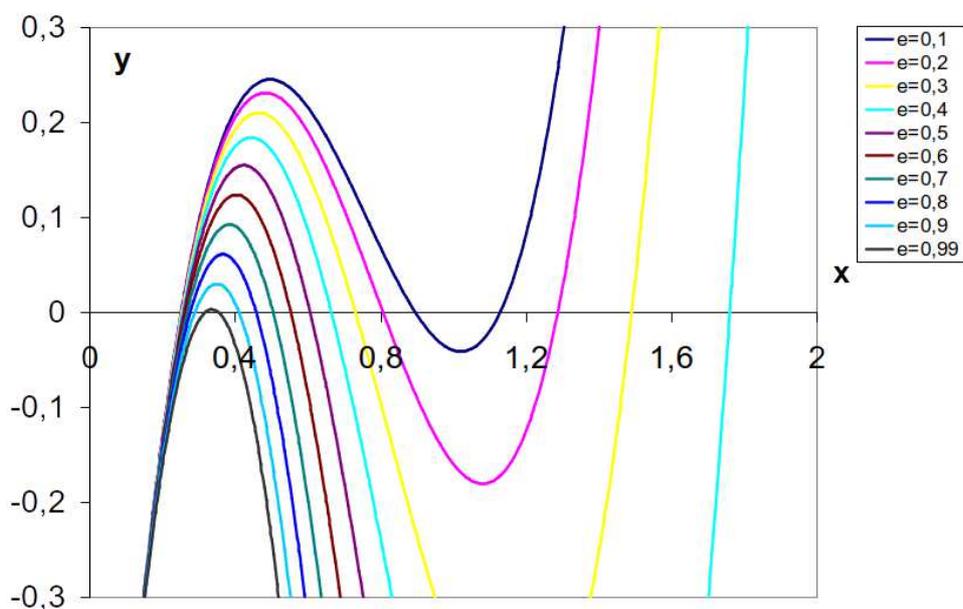


Рис. 1: Графики функции Y для выбранных значений эксцентриситетов.

Таблица 1: Нептун.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
e	x_2	x_3	a_{m1}	a_{m2}	a_p	q_{m1}	q_{m2}	Q_{m1}	Q_{m2}	x_1
0	1.00	1.00	30.02	30.02	30.02	30.02	30.02	30.02	30.02	0.25
0.1	0.89	1.13	26.85	33.86	30.02	24.17	30.47	29.54	37.25	0.25
0.2	0.81	1.29	24.19	38.63	30.02	19.36	30.90	29.03	46.35	0.25
0.3	0.73	1.49	21.91	44.73	30.02	15.34	31.31	28.49	58.15	0.25
0.4	0.66	1.76	19.92	52.84	30.02	11.95	31.70	27.89	73.98	0.25
0.5	0.61	2.14	18.17	64.16	30.02	9.083	32.08	27.25	96.24	0.26
0.6	0.55	2.70	16.58	81.10	30.02	6.631	32.44	26.52	129.8	0.26
0.7	0.50	3.64	15.11	109.3	30.02	4.534	32.79	25.69	185.8	0.27
0.8	0.46	5.52	13.71	165.6	30.02	2.743	33.13	24.68	298.2	0.28
0.9	0.41	11.1	12.29	334.6	30.02	1.229	33.46	23.36	635.7	0.29
<i>Pl.</i>	<i>a_{l2}</i>	<i>a_{l1}</i>	<i>a_p</i>	<i>a_{r1}</i>	<i>a_{r2}</i>					
<i>N</i>	22.01	25.73	30.02	35.03	40.95					

У планет земной группы удовлетворяют своей таблице только орбиты малых тел с эксцентриситетом, равным 0.1. Но у наблюдаемых астероидов, сближающихся с Землей, есть низкоскоростные сближения. Они находятся на орбитах с эксцентриситетом $e \leq 0.1$. У планет-гигантов диапазон орбит шире. Столбцы 7–10 дают представление о значениях перигелийного q и афелийного Q расстояний орбит малых тел для Нептуна. Известны наблюдаемые малые тела, находящиеся на подобных орбитах. Малые тела, находящиеся на выделенных в табл. 1 орбитах, могут испытывать низкоскоростные сближения с Нептуном. Более 100 комет семейства Юпитера испытывают с ним низкоскоростные сближения с особенностями. У наблюдаемых комет найдены низкоскоростные сближения с Сатурном, сопровождающиеся ВСЗ и ГКМ. Исследованы низкоскоростные сближения астероидов с Землей.

Постоянные Тиссерана малых тел относительно всех планет мало изменяются после сближений с планетой. Последний фактор много лет используется для отождествления утерянных комет. Отметим еще один факт. Ранее было показано, что для планет-гигантов области низкоскоростных сближений пересекаются [3]. Из-за большей вытянутости орбит малое тело с орбитой из табл. 1 может оказаться ближе к Урану, чем это возможно для объектов из области пересечения двух планет.

Исследование, проведенное для планет-гигантов, показало, что $T_p = 3$ для широкого диапазона эксцентриситетов малых тел каждой планеты. Но при больших эксцентриситетах значения постоянной Тиссерана существенно отличаются от трех как в перигелии, так и, особенно, в афелии. Положение осложняет и то, что при больших значениях эксцентриситета на различных участках орбиты малого тела не выполняется равенство векторов планетоцентрических скоростей малого тела и планеты (необходимое условие низкоскоростного сближения). Тем не менее, наличие низкоскоростных участков на высокоэксцентрической орбите малого тела (в транснептуновой зоне Нептуна в первую очередь) приводит к изменению планетоцентрической скорости малого тела в окрестности части орбиты, удовлетворяющей условию $T_p = 3$, увеличивая влияние гравитации планеты на его орбиту. Процесс уменьшения планетоцентрической скорости на участках орбиты малого тела с высоким значением постоянной Тиссерана будет приводить к медленной диффузии объектов внутрь Солнечной системы или наружу. Последнее зависит от того, идет ли малое тело впереди или сзади планеты.

3. Заключение

Показана возможность существования орбит малых тел, постоянная Тиссерана которых удовлетворяет уравнению (1) для всех планет Солнечной системы. Для планет-гигантов это могут быть малые тела с высокоэксцентрическими орбитами.

Исследование, проведенное для планет-гигантов, показало, что $T = 3$ для широкого диапазона эксцентриситетов малых тел каждой планеты приводит к медленной диффузии малых тел внутрь Солнечной системы или наружу.

Подтверждено существование орбит, позволяющих малому телу испытывать низкоскоростные сближения с двумя соседними планетами-гигантами.

Список литературы

1. E. J. Opik, *Interplanetary encounters : close-range gravitational interactions* (1976).
2. N. Y. Emel'yanenko, *Solar System Research*, **46**, 181, 2012.
3. N. Y. Emel'yanenko, *Solar System Research*, **49**, 398, 2015.

Содержание

<i>Николенко И.В., Аршинкин С.С., Маслов И.А.</i> Разработка и создание поляриметра для телескопа Цейсс-1000	255
<i>Коротышкин Д.В., Шерстюков О.Н., Валиуллин Ф.С.</i> Метеорные наблюдения на радиолокационной станции Казанского федерального университета	258
<i>Гусев В.Д., Кузнецов Э.Д.</i> Моделирование распада двойных транснептуновых объектов	268
<i>Киселев Н.Н., Жужулина Е.А., Петров Д.В., Карпов Н.В.</i> Синтетические фазовые зависимости поляризации комет в широкополосных и узкополосных кометных фильтрах	273
<i>Кузнецов Э.Д., Аль-Шиблави О.М., Гусев В.Д.</i> Оценки возраста пяти пар транснептуновых объектов на близких орбитах	279
<i>Николенко И.В., Аршинкин С.С., Крючков С.В.</i> История наблюдений астероидов и комет в Симеизской обсерватории	288
<i>Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А.</i> Динамика кометы 157P/Tritton и ее фрагментов	292
<i>Петров Д.В., Жужулина Е.А.</i> Влияние внутренней структуры частиц на поляризационные свойства кометы 29P/Schwassmann-Wachmann 1	299
<i>Барabanов С.И., Баканас Е.С.</i> Поиск кандидатов в активные астероиды среди АСЗ	302
<i>Емельяненко В.В., Карташова А.П.</i> Сравнение эволюции орбит околоземных астероидов 52768 (1998 OR2) и 159402 (1999 AP10)	306
<i>Емельяненко Н.Ю.</i> Постоянные Тиссерана для малых тел относительно планет Солнечной системы	309

Contents

<i>Nikolenko I.V., Arshinkin S.S., Maslov I.A.</i> Development and creation of a polarimeter for the Zeiss-1000 telescope	255
<i>Korotyshkin D.V., Sherstyukov O.N., Valiullin F.S.</i> Meteor observations at the radar station of Kazan Federal University	258
<i>Gusev V.D., Kuznetsov E.D.</i> Modeling the decay of binary trans-Neptunian objects	268
<i>Kiselev N.N., Zhuzhulina E.A., Petrov D.V., Karpov N.V.</i> Synthetic phase dependences of comet polarization in broadband and narrowband comet filters	273
<i>Kuznetsov E.D., Al-Shiblawi O.M., Gusev V.D.</i> Age estimates of five pairs of trans-Neptunian objects in close orbits	279
<i>Nikolenko I.V., Arshinkin S.S., Kryuchkov S.V.</i> History of observations of asteroids and comets in the Simeiz Observatory	288
<i>Kuznetsov V.B., Chernetenko Yu.A.</i> Dynamics of Comet 157P/Tritton and its fragments	292
<i>Petrov D.V., Zhuzhulina E.A.</i> Influence of the internal structure of particles on the polarization properties of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1	299
<i>Barabanov S.I., Bakanas E.S.</i> Search for candidates for active asteroids among near-Earth asteroids	302
<i>Emel'yanenko V.V., Kartashova A.P.</i> Comparison of the orbital evolution of near-Earth asteroids 52768 (1998 OR2) and 159402 (1999 AP10)	306
<i>Emel'yanenko N.Yu.</i> The Tisserand parameter for small bodies with respect to the planets of the Solar System	309