

УДК 521.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ОЦИФРОВАННЫХ ДАННЫХ ПОЗИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

© 2021 г. Ю. А. Нефедьев^{1,*}, А. В. Багров², В. С. Усанин¹,
А. О. Андреев^{1,3,4}, Н. Ю. Демина¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

² Институт астрономии РАН, Москва, Россия

³ Московский государственный университет, Москва, Россия

⁴ Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

*E-mail: star1955@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2019 г.

После доработки 29.01.2021 г.

Принята к публикации 29.01.2021 г.

Задачи по изучению малых небесных тел являются важной составляющей современных космических исследований. Это касается как исследования физико-химических и эволюционных параметров, так и нахождения генетических связей метеорных потоков и их родительских тел. Важным направлением исследований является структурный анализ комет и астероидов. Актуальность изучения кометных тел заключается в том, что кометы содержат данные о протосолнечном молекулярном облаке. Ядра комет представляют собой твердые тела, состоящие из пыли (силикаты, полимеры, полициклические ароматические углеводороды и др.) и льда различного состава (вода, углекислый газ, угарный газ, метан, аммиак и др.). Ядра комет являются хрупкими и из-за их низкой плотности, малой массы и силы тяжести имеют неправильную форму. Изучение структурных и физико-химических характеристик комет является актуальной и важной задачей для разработки эволюционной теории. Используя разработанный метод и специальное программное обеспечение для яркостного анализа цифровых изображений, мы создали структурные модели комет и получили яркостные изофоты их ядер, головы и хвостов. Так как ядра комет являются элементами динамической эволюции и процессов в протодиске Солнечной системы, исследование цифровой структуры комет позволит уточнить теорию образования и эволюции Солнечной системы.

DOI: 10.31857/S0004629921060050

1. ВВЕДЕНИЕ

Единственным методом для исследования динамики небесных тел в течение очень продолжительных (в масштабе 100 лет) временных интервалов является анализ астрономических пластинок (astronomical plates, AP), хранящихся в стеклянных библиотеках. Как известно, вид неба в данный момент – это уникальное изображение, и его фотография может служить некоей машиной времени для исследования в будущем. Например, многие рентгеновские и γ -источники являются также источниками оптического излучения. Поэтому фотопластинки с изображением звездных площадок могут быть использованы для дополнительного изучения таких объектов, включая и объекты астрофизики высоких энергий [1], хотя эти фотопластинки были получены совсем для других целей. Например, в работе [2] фотопластинки, полученные на телескопах Шмидта, ис-

пользуются как дополнительная информация в ультрафиолетовом эксперименте, основанном на низкодисперсной спектроскопии (low dispersion spectroscopy, LDS) звезд. Такие фотопластинки являются источниками астрофизических данных для автоматизированного отождествления объектов со специфическими спектрами и анализа спектральной динамики [2].

В настоящее время особенно активные процессы происходят в области развития цифровой науки. С этой целью в астрономических организациях создаются виртуальные астрономические обсерватории (virtual astronomical observatories, VAO). Такие цифровые обсерватории включают в себя данные астрономических и астрофизических наблюдений, выполненных в разные годы, и создание программных средств для работы с ними [3, 4]. Сегодня астрономические работы по анализу фотопластинок в Астрономической об-

серватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ, Engelhardt astronomical observatory, ЕАО) переходят на новый уровень благодаря развитию новых технологий [5]. Были проведены исследования, связанные с решением теоретических и прикладных задач астрофотограмметрии и обработки фотографических данных [6]. Это относится и к редукции фотопластинок комет. Считается, что ядра комет образовались из вещества протопланетного диска. Таким образом, изучение структуры и физических свойств комет позволяет понять эволюцию формирования всей планетарной составляющей Солнечной системы. Наиболее интенсивные исследования кометных атмосфер и структур проводились на основе использования фотографических наблюдений ярких околоземных комет. Однако следует упомянуть две проблемы, связанные с изучением эволюции комет.

Первая состоит в том, что современные работы по взаимному сравнению комет с большой величиной перигелийного расстояния и наблюдавшихся на малых гелиоцентрических расстояниях показали, что такие кометы имеют различные уровни активности [7]. Это приводит к наблюдательной селекции полученного материала по долгопериодическим кометам.

Вторая проблема заключается в том, что согласно современным представлениям, большая часть кометного вещества находится в поясе Койпера и облаке Оорта [8]. Соответственно, кометы как первичные планетезимали могли сохраняться до наших дней при разных условиях. С другой стороны, формирование Солнечной системы имело более сложный динамический характер [8]. Таким образом, моделирование и анализ структуры различных комет могут помочь разработать более точную теорию их происхождения и эволюции. Задачи по нахождению генетических связей между метеорными потоками и их родительскими телами, которыми могут быть кометы, также являются современными и актуальными [9, 10]. Цифровая библиотека АОЭ содержит более 2150 оцифрованных изображений астероидов и комет. Исследование этих объектов современными методами позволит получить новые структурные, динамические и эволюционные параметры малых небесных тел. Настоящая работа направлена на построение изоденсных структурированных моделей комет и проведение их анализа.

2. МЕТОД СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОДЕНСНЫХ МОДЕЛЕЙ

В настоящее время цифровой изоденсный анализ (Digital Isodensity Analysis, DIA) используется для изучения различных сложных астрофизических систем [11]. Основой изоденсного анализа является псевдосоляризация эффект Сабатье (pseudo-solarization effect, PSE) [12], ко-

торый заключается в обращении в позитив фотоизображения, происходящем при добавочной равномерной засветке слоя фотопластины в начале процесса ее проявления. При этом чувствительность фотоэмульсии к добавочной фотозасветке уменьшается в зависимости от первоначального значения экспозиции изображения, т.е. более яркие участки реального изображения (на негативе это более черные области) становятся более светлыми, чем окружающие менее яркие (т.е. менее черные на негативе) области. Такие участки называются линиями Макки. Варьируя время экспозиции и условия проявления, можно получить не полное обращение негатива в позитив, а выделить некоторый интервал яркостной плотности изображения, т.е. получить изоденсу, соответствующую определенному интервалу яркостной плотности. В нашей работе был разработан модифицированный метод (Method of the Digital Isodensity Modelling, MDIM) для анализа фотопластинок с использованием программных пакетов современных графических редакторов. Используя внутренние фильтры графических редакторов, можно создать имитационные модели псевдосоляризации эффекта, изменяя параметры яркостных кривых полутонов для монохромного изображения. Метод и стадии создания имитационных моделей псевдосоляризации эффекта следующие:

1. Оцифровка фотопластинок с изображениями малых небесных тел на сканере A3 Microtek ScanMaker 1000XL plus. Данный сканер имеет пиксельное разрешение 2400×4800 dpi и оптическую плотность 3.8D. Основу системы сканирования и оцифровки фотопластинок составляет автоматический аппаратно-программный комплекс анализа изображений (Hardware and Software Image Processing Complex, HSIPC).

2. Для построения структурных областей одинаковой плотности — изофот (isophotes) — с заданными граничными условиями используется программный алгоритм имитации псевдосоляризации эффекта. Это наглядно изображено на рис. 1. Изначально имеется негативное изображение фотопластины. Затем программным методом с помощью графического редактора из дубликата фотопластины строится позитивное изображение.

3. Следующий шаг — цифровое наложение негативного и позитивного изображений и приведение яркостных параметров к заданным краевым значениям позволяют построить области одинаковой яркостной плотности в заданных границах $D \pm \Delta D$, где D — заданная яркостная плотность выделенной области изображения, соответствующая определенной изоденсе, а ΔD — допуск изменения значения при построении изоденсы. Следует уточнить, что изофота — это кри-

вая, соединяющая точки изображения с одинаковой плотностью, а изоденса соответствует области с точками заданного интервала плотности на изображении. Таким образом, получаются цифровые карты изоденс (Digital Isodensity Maps, DIM) — областей со средней плотностью в заданных краевых значениях. Программное изменение яркостных характеристик позитива и негатива позволяет выделять разные области средней освещенности. Чем больше значение яркости, тем более темные области фотопластинки будут выделяться, а чем больше значение коэффициента контрастности, тем меньшая область средней плотности будет выделена, и, соответственно, будет меньшее значение ΔD . В результате создается DIM целой системы изофот. Следует отметить, что при анализе фотопластинки используются все яркостные каналы графического редактора, и в зависимости от того, какое изображение (позитив или негатив) имеет большее значение яркости, производится либо совмещение изображения основного негатива и позитива, либо вычитание основного светового канала из совмещенного изображения. Для имитации псевдосоляризации эффекта используется программный фильтр графического редактора. В результате мы получаем DIM с четко выделенными изофотами.

4. С целью определения значений относительных звездных величин для разных изофот можно применить известный программный продукт MaxIm DL. С использованием возможностей MaxIm DL для исследуемого изображения, производится оценка величины ошибки измерений по взаимному соотношению полезной яркости к шумовому фону (signal to noise ratio, SNR). Значение коэффициента SNR определяется с помощью программного модуля “Toggle information” в режиме “Aperture”. Модельные вычисления показали, что применение HSIPC и описанных выше процедур позволяет достичь точности оценки относительной яркости DIM для структурных изофот в диапазоне $0.08^m - 0.10^m$.

3. АНАЛИЗ DIM МОДЕЛЕЙ

К самым ярким околоземным небесным телам относится комета C/Bennett (1969 Y1). Параметры C/Bennett (1969 Y1) приведены в табл. 1. Данная комета в перигелии приближалась к Солнцу на 0.537606 а. е., достигала светимости выше 0^m и имела сложный структурно изменяющийся хвост. Голова кометы Беннета окружена большим вытянутым водородным облаком, имеющим протяженность более 13 млн. км [13]. Хвост кометы был расположен параллельно вытянутой структуре этого облака. Яркость ближайшей к центру ядра изофоты можно принять равной 0^m .

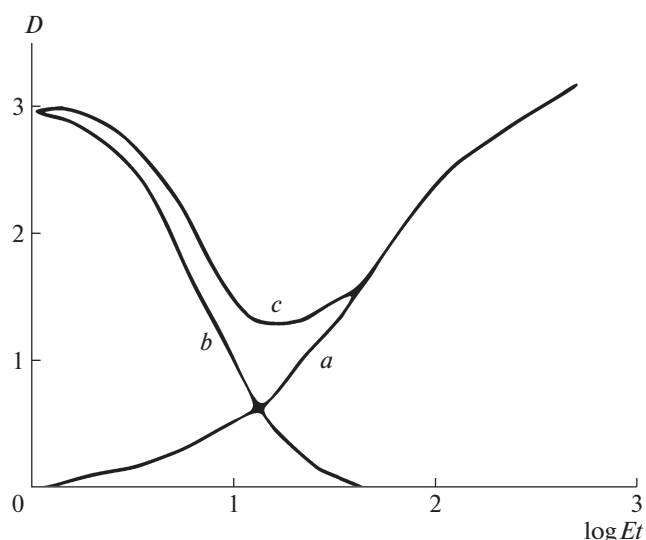


Рис. 1. Зависимость яркостной плотности фотопластинки (D) от логарифма количества освещенности Et (Et — произведение освещенности E и выдержки t). Приведены характеристическая кривая для негативного изображения фотопластинки (a), яркостная кривая для позитивного изображения фотопластинки (b) и суммарное почернение с выделением областей одинаковой плотности (c).

На рис. 2 представлена DIM, построенная по фотопластинке с экспозицией в 30 с. Изофота № 1 — это самая яркая центральная область головы кометы. Изофота № 2 имеет структуру, близкую к кольцевидной. Следующие по порядку изофоты имеют вытянутости в направлении выброса вещества кометным ядром. Фотометрический центр изображения кометы имеет асимметричную форму. Расположение изофот относительно друг друга довольно плотное, и величина отличия между средними плотностями изофот составляет 0.06^m . Суммарное уменьшение яркости от изофоты № 1 до изофоты № 9 равно 3.40^m .

DIM кометы Беннета на рис. 2 показывает, что структура внешних изофот повторяется с высоким уровнем детализации. Вблизи перигелия газовыделение из кометного ядра было очень интенсивным, но облако испаряющихся газов не деформировалось. Считается вероятным, что крупномасштабные структуры в комах комет являются признаками изменений полной газопроизводительности ядер, вызванных вращением [14]. Следовательно, отсутствие таких структур в случае кометы Беннета может указывать на отсутствие на ядре данной кометы преобладающих отдельных источников газовыделения (однородность газовыделения с поверхности ядра), либо на такое расположение этих источников по отношению к оси вращения, что вблизи времени на-

Таблица 1. Параметры комет Беннета (C/1969 Y1), Хонды–Мркоса–Пайдушаковой (45P) и Аренда–Роланда (C/1956 R1)

Название и обозначение	Беннета (C/1969 Y1)	Хонды–Мркоса– Пайдушаковой (45P)	Аренда–Роланда (C/1956 R1)
Эпоха, юлианский день	244 0680.5	245 0560.5	243 6028.5
q , а.е.	0.537606	0.5316337	0.316044
e	0.996193	0.8242502	1.000246
i , °	90.0394	4.24823	119.94430
ω , °	354.1460	326.0436	308.77457
Ω , °	224.6574	89.1391	215.85542
T	1970 03 20.0446	1995 12 25.97821	1957 04 08.0324
P , годы	≈ 1678	5.261	нет
Ссылка	SAO_2008	JPL J954/21	JPL 3

Примечание. q – перигелийное расстояние в а. е.; i – наклон орбиты в градусах; e – эксцентриситет; ω – аргумент перигелия в градусах; Ω – долгота восходящего узла в градусах; T – момент прохождения перигелия в формате год-месяц-день; P – орбитальный период в годах.

блюдения они не пересекали линию терминатора. Как известно, сублимация газов идет преимущественно с освещенной Солнцем поверхности, поэтому второй вывод, который можно сделать из структуры комы, заключается в том, что эрозия ядра вблизи времени прохождения комой перигелия привела к обнажению свежей поверхности, содержащей большое количество высоколетучих веществ. Несмотря на сильнейшее газовыделение, комета Беннета не имеет чисто пылевого хвоста, хотя газовые струи, исходящие из ядра, должны были увлекать с собой пылевые частицы.

Другим интересным объектом является комета Хонды–Мркоса–Пайдушаковой (45P/Honda–Mrkos–Pajdusakova). Параметры кометы приведены в табл. 1. Данная комета принадлежит к малым небесным телам семейства Юпитера. Такие объекты имеют стационарное состояние “эклиптических” комет и небольшой наклон орбиты к плоскости эклиптики.

На рис. 3 изображена DIM кометы Хонды–Мркоса–Пайдушаковой. Средняя разница между соседними изофотами составляет 0.045^m . При использовании алгоритма MEDIM для построения DIM получены следующие результаты. Гранулярность, т.е. количество изофот, остается практически постоянной, в то время как ширина изофот значительно уменьшается, что увеличивает точность представления структуры кометы в случае ее природной неоднородности.

При создании DIM яркость ядра кометы была принята равной 0^m . Точность представления изофот составила 0.045^m . Такое значение точности объясняется тем, что разные изофоты отличаются друг от друга на 0.02^m , 0.025^m и 0.03^m .

На рис. 4 представлена динамическая DIM модель кометы Хонды–Мркоса–Пайдушаковой. Хорошо видно последовательное изменение структуры DIM от центральной области к периферийной в зависимости от времени. Около кометного ядра изофоты имеют кольцевидную форму. Если в центре DIM изофоты имеют форму, близкую к узким кольцам, то к периферийным областям проявляются вытянутости по направлению кометного хвоста и утолщение их структуры. В DIM № 841, № 851 и № 855 можно выделить большой и малый хвостовые лучи.

Характер эволюции карты изофот подтверждает неоднородность областей газовыделения с поверхности кометного ядра. По-видимому, в результате вращения ядра происходила смена зон основного газовыделения. Голова кометы формируется не просто массой сублимированных из ядра газов, но и перераспределением выброшенного газа давлением солнечного излучения. Каждая изофота отражает как направление и объем выброшенных газов, так и их дрейф. На рис. 4 видно, что некоторые элементы изофот вытянуты не вдоль направления от Солнца, а под разными углами к нему; это можно интерпретировать как указание на направление выброса отдельных сильных струй, впоследствии сохранившееся до полной дилуции выброса. Направление выброса можно определить как направление оси симметрии самого выброса по отношению к положению изофоты № 1. Среднюю скорость выброса из некоторой зоны можно оценить по величине наблюдаемой асимметрии относящейся к нему изофоты по отношению к фотометрическому центру головы кометы. Это исследование предполагается выполнить позднее.

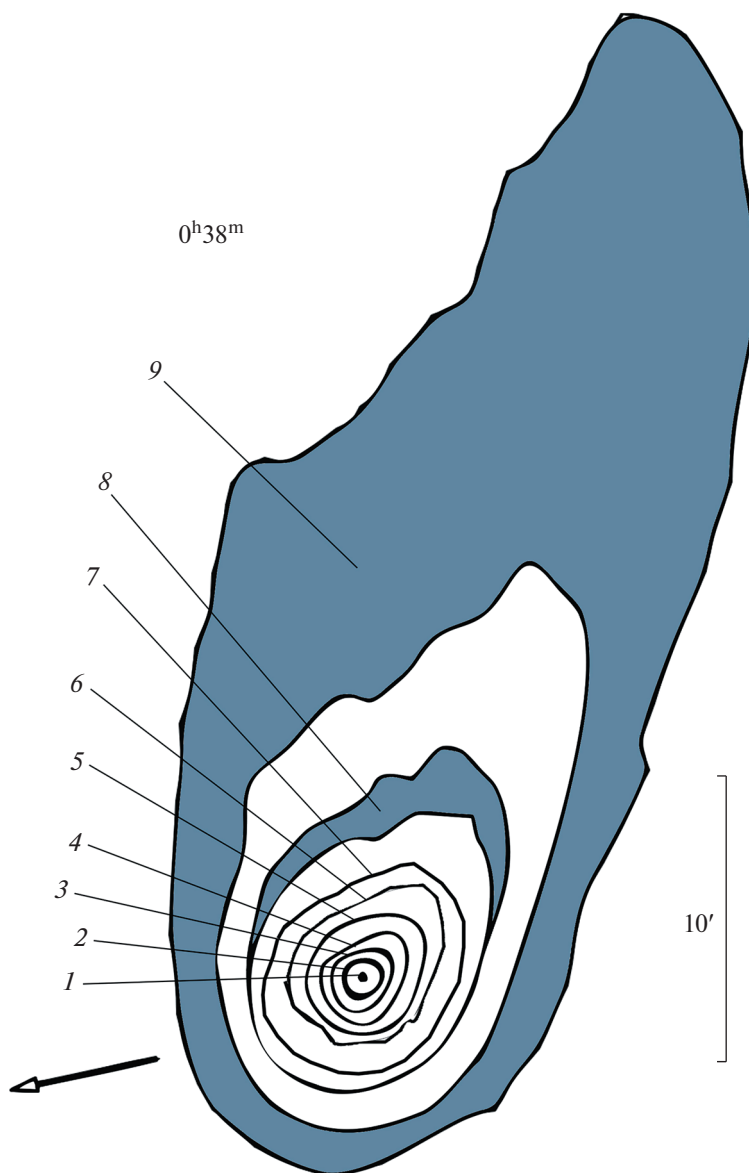


Рис. 2. DIM модель кометы Беннета 10 апреля 1970 г. в $0^{\text{h}}38^{\text{m}}$ UT.

Другим интересным объектом при анализе структурного распределения изофот в DIM модели (рис. 5) является долгопериодическая комета Аренда–Роланда C/1956 R1 (Arend–Roland). Параметры Аренда–Роланда приведены в табл. 1.

Карта изофот кометы Аренда–Роланда показывает существование сильного узкого выброса из ядра кометы, причем настолько сильного, что давление солнечного излучения не могло затормозить его на расстоянии нескольких миллионов километров. Поскольку данное изображение было получено через 18 сут после прохождения перигелия, когда гелиоцентрическое расстояние кометы достигло только 0.62 а. е., причиной такого аномального выброса могло быть масштабное

разрушение части пылевой коры из-за распространения тепловой волны до легко летучих компонентов в подповерхностных слоях и их испарения. Процесс сублимации является фазовым переходом первого рода, следовательно, если он происходит при постоянном давлении, температура льда и газов в течение этого процесса остается постоянной, несмотря на поглощение тепла. Поэтому начальная температура испаренных газов могла быть относительно невысокой (в некоторых космогонических расчетах используется температура сублимации чистого водяного льда около 152 К, льда из чистого угарного газа – 25 К [15]). Однако увлекаемые струей газов тугоплавкие частицы (пылинки) при этом находились в

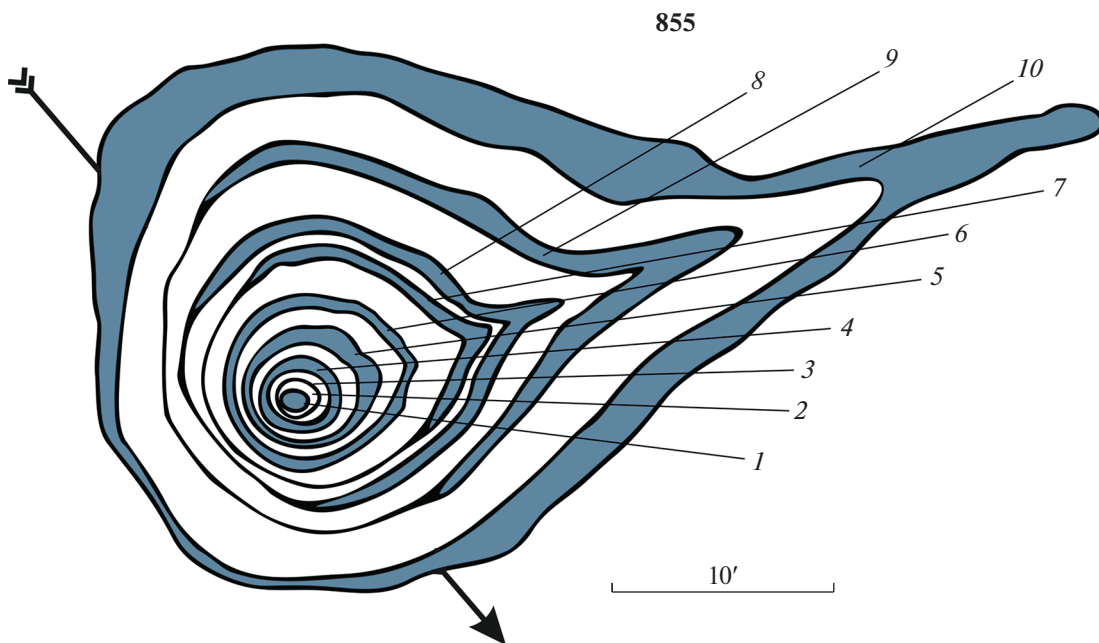


Рис. 3. DIM модель кометы Хонды–Мркоса–Пайдушаковой 29 августа 1968 г. в $21^{\text{h}}21^{\text{m}}37^{\text{s}}$ UT.

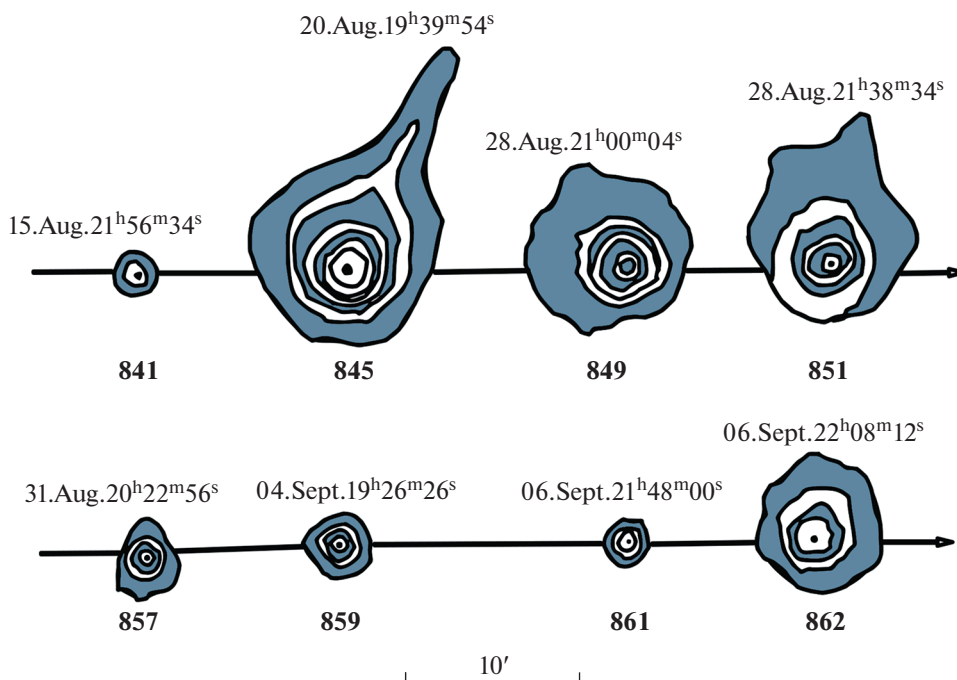


Рис. 4. Динамическая DIM кометы Хонды–Мркоса–Пайдушаковой.

струе и сильно нагревались солнечными лучами. Газ в струе, сам слабо поглощающий излучение в видимом свете и ближнем инфракрасном диапазоне, на которые приходится большая часть энергии солнечного излучения, нагревался от пылинок,

что обеспечило очень высокую скорость их выброса. Малозаметные вариации массы выброшенного из ядра кометы материала, почти неразличимые в аномальном хвосте кометы, становятся заметными в структуре изофот нормального хвоста.

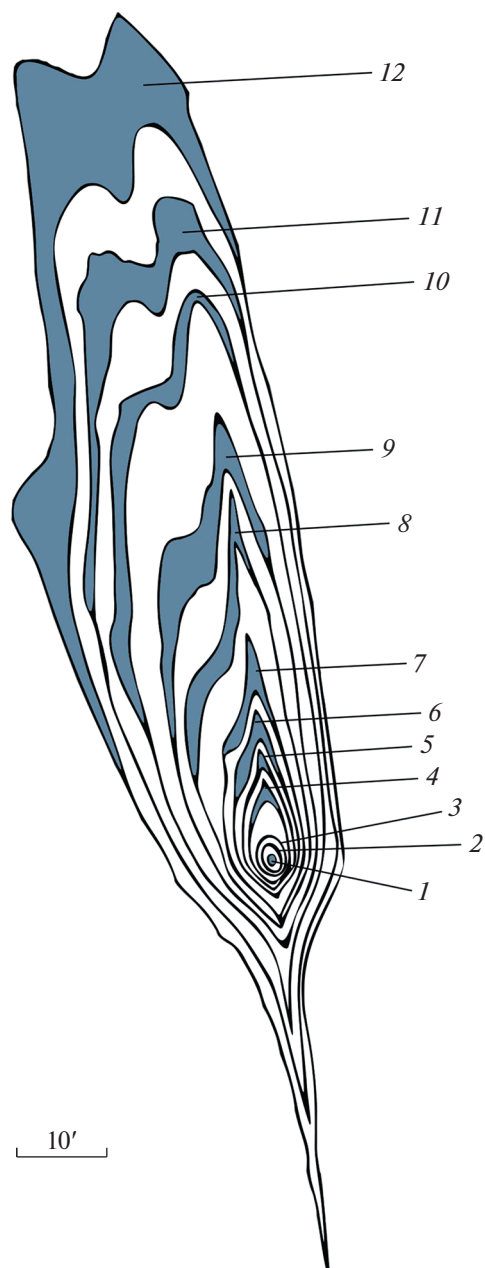


Рис. 5. DIM модель кометы Аренда–Роланда 26 апреля 1957 г. в $20^{\text{h}}48^{\text{m}}49^{\text{s}}$ UT.

Ярко выраженного пылевого хвоста у кометы Аренда–Роланда не наблюдается. Можно утверждать, что на орбите кометы Аренда–Роланда отсутствуют метеорные частицы. Что касается мелких пылевых частиц, всегда присутствующих в кометных льдах, то они выбрасывались на очень большое расстояние, и их пространственная плотность не могла быть высокой. Скорее всего, комета Аренда–Роланда тоже имела классический пылевой хвост, но его поверхностная яркость даже в самых плотных частях оказалась не-

достаточной, чтобы быть зарегистрированной фотографическим методом.

Как видно из рис. 5, в процессе построения модели DIM были получены довольно близкие друг к другу и узкие изофоты. Средние значения отличий соседних изофот одинаковой плотности достигают 0.02^{m} , а точность их определения – 0.02^{m} . Периферийное значение яркости изофоты № 12 отличается от фона на 0.01^{m} . Такая высокая точность построенных изофот может использоваться как прямое доказательство газообразования преимущественно на обращенной к Солнцу поверхности ядра данной кометы, так как на всех изофотах градиент яркости вдоль линии “ядро кометы – направление на Солнце” существенно круче на обращенной к Солнцу стороне, чем с противоположной стороны ядра.

4. ВЫВОДЫ

Развитие работ по применению современных технологий для анализа астрономических фотопластинок направлено на сохранение уникальных астрономических наблюдений, выполненных в течение многих лет, и использование их для современных научных исследований. Построенные в настоящей работе DIM имеют более четкую структуру, чем аналогичные модели, полученные другими исследователями [16–18]. Разработанный метод можно применять для анализа и оценки активности таких сложных систем, как кометы, которые во многих случаях наблюдались только в одном прохождении и которые можно исследовать только по архивным фотографическим наблюдениям. Необходимо отметить, что изучение динамики комет напрямую связано с теоретическим описанием динамической эволюции Солнечной системы.

Дальнейшее применение разработанных в настоящей работе методов планируется направить на исследование цифровых моделей других небесных объектов, в частности для анализа малых небесных тел [19–22], Луны [23–27], звездных объектов [28] и Земли [29], определения динамических параметров небесных тел [30] с применением многопараметрического анализа [31], селектофизического анализа [32] и для изучения активности Солнца [33]. Объединение цифровых электронных баз данных АОЭ с данными других мировых виртуальных обсерваторий позволит получить глобальную цифровую сеть астрономических наблюдений, которая будет использоваться как интерактивное хранилище для современных и исторических данных и результатов их обработки. Также следует отметить, что развитие рынка космических услуг открывает возможность постоянного использования электронных

баз астрономических данных для текущей деятельности современной астрономии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящая работа частично поддержана Российским научным фондом, грант 20-12-00105 (согласно гранту разработан метод анализа данных и проведены численные расчеты). Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета. Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 19-32-90024 Аспиранты и Фондом развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. Hudec*, *Astron. Nachricht.* **339**, 408 (2018).
2. *R. Hudec*, *Astron. Nachricht.* **339**, 416 (2018).
3. *O. Malkov and I. Zolotukhin*, *Astron. Nachricht.* **334**, 818 (2013).
4. *O. B. Dluzhnevskaya and O. Y. Malkov*, *Astron. Rep.* **49**, 1028 (2005).
5. *A. Andreev, Y. Nefedyev, and N. Demina*, *Astron. Astrophys. Trans.* **31**, 37 (2019).
6. *Y. Nefedyev, S. Valeev, R. Mikeev, A. Andreev, and N. Varaksina*, *Adv. Space Research* **50**, 1564 (2012).
7. *J. M. Dlugach, O. V. Ivanova, M. I. Mishchenko, and V. L. Afanasiev*, *J. Quant. Spectroscop. Radiative Transfer* **205**, 80 (2018).
8. *D. Lis, N. Biver, D. Bockelo-Morvan, P. Hartogh, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **774**, id. L3 (2013).
9. *M. Sokolova, Y. Nefedyev, M. Sergienko, N. Demina, and A. Andreev*, *Adv. Space Research* **58**, 541 (2016).
10. *M. Sokolova, M. Sergienko, Y. Nefedyev, A. Andreev, and L. Nefediev*, *Adv. Space Research* **62**, 2355 (2018).
11. *M. Pennetta*, *Geosciences* **8**, 235 (2018).
12. *I. I. Breido and T. P. Chebotareva*, *Izvestiya GAO* **180**, 159 (1966).
13. *M. J. Hendrie*, *J. Brit. Astron. Assoc.* **109**, 14 (1999).
14. *J. F. Crifo, M. Fulle, N. I. Kömle, and K. Szego*, *Comets II. Part V: The Gas Coma*, p. 471 (2004).
15. *T. Yamamoto*, *Astron. and Astrophys.* **142**, 31 (1985).
16. *L. Cai-Pin and K. Hiroshi*, *Chin. Astron. and Astrophys.* **7**, 11 (1983).
17. *Y. Moulane, E. Jehin, C. Opitom, F. Pozuelos, J. Manfroid, Z. Benkhaldoun, A. Daassou, and M. Gillon*, *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A156 (2018).
18. *M. Fulle and G. Sedmak*, *Icarus* **74**, 383 (1988).
19. *M. Sergienko, M. Sokolova, Y. Nefedyev, and A. Andreev*, *Astron. Rep.* **64**, 1087 (2020).
20. *V. Usanin, Y. Nefedyev, and A. Andreev*, *Adv. Space Research* **58**, 2400 (2016).
21. *M. Sokolova, Y. Nefedyev, and N. Varaksina*, *Adv. Space Research* **54**, 2415 (2014).
22. *M. Sokolova, E. Kondratyeva, and Y. Nefedyev*, *Adv. Space Research* **52**, 1217 (2013).
23. *A. O. Andreev, Y. A. Nefed'ev, L. A. Nefed'ev, E. N. Akhmedshina, N. Y. Demina, and A. A. Zagidullin*, *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki* **162**, 223 (2020).
24. *N. Petrova, A. Zagidullin, Y. Nefedyev, V. Kosulin, and A. Andreev*, *Adv. Space Research* **60**, 2303 (2017).
25. *K. Churkin, A. Andreev, Y. A. Nefedyev, N. Petrova, and N. Y. Demina*, *Astron. Rep.* **62**, 1042 (2018).
26. *A. Andreev, Y. A. Nefedyev, N. Y. Demina, L. Nefediev, N. Petrova, and A. Zagidullin*, *Astron. Rep.* **64**, 795 (2020).
27. *N. Petrova, Y. Nefedyev, A. Andreev, and A. Zagidullin*, *Astron. Rep.* **64**, 1078 (2020).
28. *N. Varaksina, Y. Nefedyev, K. Churkin, R. Zabbarova, and S. Demin*, in *J. Phys. Conf. Ser. (IOP Publishing, 2015)*, **661**, p. 012014.
29. *V. Lapaeva, V. Meregina, and Y. Nefedjev*, *Geophys. Res. Lett.* **32**(24), id. L24304 (2005).
30. *Y. A. Nefedyev, A. Andreev, N. Petrova, N. Y. Demina, and A. Zagidullin*, *Astron. Rep.* **62**, 1016 (2018).
31. *S. Demin, O. Y. Panischev, and Y. A. Nefedyev*, in *J. Phys. Conf. Ser. (IOP Publishing, 2015)*, **661**, p. 012003.
32. *N. Varaksina, Y. Nefedyev, K. Churkin, R. Zabbarova, and S. Demin*, in *J. Phys. Conf. Ser. (IOP Publishing, 2015)*, **661**, p. 012015.
33. *S. Demin, Y. Nefedyev, A. Andreev, N. Demina, and S. Timashev*, *Adv. Space Research* **61**, 639 (2018).