

## Структурный анализ долгопериодической кометы Аренда-Роланда на основе гистограммного моделирования

© К.О. Чуркин,<sup>1</sup> А.О. Андреев,<sup>1,2</sup> Н.Ю. Демина,<sup>1</sup> Ю.А. Нефедьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
420008 Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет,  
420066 Казань, Россия  
e-mail: kchurkin87@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 3 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Рассмотрена задача структурного анализа долгопериодической кометы Аренда-Роланда на основе гистограммного моделирования. В результате исследований определены динамические характеристики, связанные с излучением вещества из кометного ядра, получены параметры рассеянного в пространстве хвоста небесного тела.

**Ключевые слова:** долгопериодические кометы, гистограммное моделирование, структурный анализ.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59251.380-24

Исследование долгопериодических комет при их прохождении через околосолнечную область предоставляет уникальную астрофизическую информацию о внешнем диске Солнечной системы, в котором они сформировались [1]. Такие объекты являются остатками планетизималей протопланетного диска [2]. При движении во внутренней части Солнечной системы на них начинает действовать турбулентность солнечного ветра, в результате образуется кома в виде плазмоидов, что меняет их плотностную структуру [3]. Также в пылевых хвостах комет формируются полосчатые элементы, конфигурации которых также важно исследовать [4], так как они включают широкий спектр структур, вызванных воздействием солнечного ветра [5]. При этом в протопланетном диске содержится вода из звездообразующего облака. Соответственно эта вода входит без изменений в крупные ледянистые объекты, подобные кометам [6]. Таким образом, вместе с метеоритами и межпланетной пылью кометы являются резервуарами первородного органического вещества [7]. Также следует отметить, что форма ядер комет отражает разнообразие структурных артефактов, таких, как трещины, валуны и террасы, которые взаимодействуют сложным образом с динамикой вещества в ядре и активностью самой кометы [8]. Большинство вышеперечисленных эффектов можно исследовать с помощью гистограммного моделирования (ГМ) яркостных характеристик. Как пример, можно привести работы по структурному описанию больших галактик [9–12].

В цифровой библиотеке Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта (АОЭ) находится более 2150 оцифрованных изображений астероидов и комет. Исследование данных небесных тел с использованием современных подходов позволяет получить их новые динамические, эволюционные и структурные характери-

стики. Более подробная информация по оцифровке в АОЭ астроснимков приведена в работе [13].

В настоящей работе гистограммы строились на основе сравнения усредненной пиксельной яркости выбранной области с яркостью каждого отдельного пикселя. Как расширение метода гистограммного моделирования яркости и контраста нами использовались математические вычисления дисперсии яркости и контраста и математическое ожидание.

В настоящей работе гистограммы строились на основе программной имитации эффекта Сабатье. С этой целью сопоставлялись негатив и позитив изображения для выделения областей снимка с яркостной плотностью  $D$ . Изменяя с помощью программного алгоритма яркость  $L$ , мы выявляли более светлые или темные области изображения. В результате система гистограмм будет представлять все области снимка с разными значениями плотности  $D$ . Чем больше значение  $L$ , тем более темные области определяются. Чем выше контраст, тем более точное значение плотности почернения будет выделено при данном значении  $L$ . После получения совмещенного изображения применялся фильтр для получения эффекта Solarize. В итоге получалась модель с выделенными гистограммами. Далее с использованием программного пакета MaxIm DL [14] находились значения относительных звездных величин для разных гистограмм, и была оценена ошибка измерений по соотношению полезного сигнала к шуму.

Технически метод гистограммного моделирования включал следующие этапы построения структуры кометы:

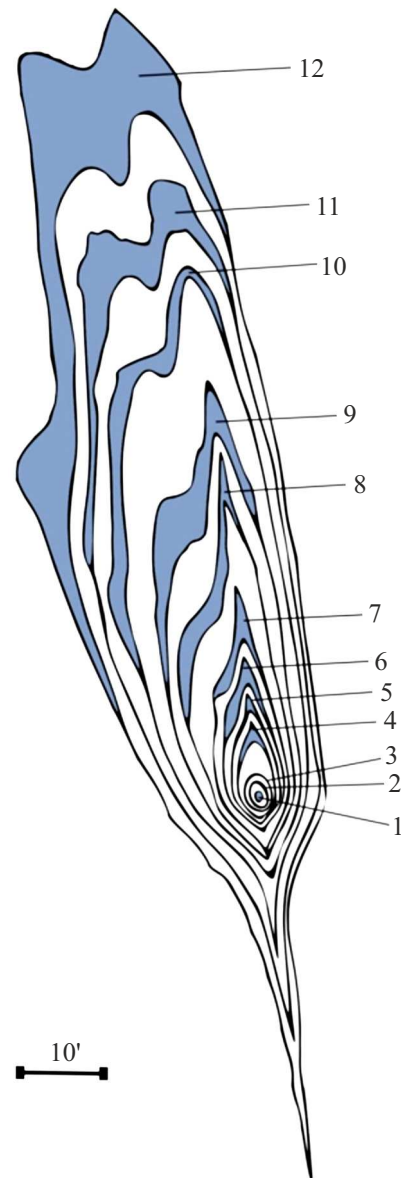
1) с использованием автоматизированного аппаратного комплекса было проанализировано изображение объекта и получены его яркостные градиенты в цифровой форме;

2) для определения гистограмм с одинаковой яркостной плотностью и заданными границами применялся авторский программный имитационный пакет. Для этого с помощью программного наложения негативных и позитивных изображений определяются зоны с равномерными распределения яркостной плотности. Так как в анализе участвуют все световые каналы, сложение и вычитание негативов и позитивов дают возможность точного выделения гистограммных областей;

3) определение звездных величин областей гистограмм по отношению к полезной освещенности (без учета шума) и учет шумового континуума производились с использованием специализированной программы MaxIm DL. В результате удалось достичь точности гистограмм, равной 0.09 звездных величин.

Таким образом была построена структурная модель долгопериодической кометы Аренда-Роланда (ДКАР) и проведен ее качественный анализ. На рисунке приведены яркостные гистограммы кометы. Установлено, что область гистограммы, отмеченная цифрой 1, представляет собой ядро кометы, далее идут ее кома и хвост. В близких к ядру зонах наблюдаются кольцевидные структуры, а затем к периферии проявляются вытянутости, направленные к хвосту, и гистограммные области становятся более широкими. Также видно, что имеется мощный выброс вещества из кометного ядра, а сама ДКАР обладает очень рассеянным в пространстве хвостом. В созданной модели гистограммные области в зависимости от яркостных градиентов достаточно тонкие и близко расположенные, в среднем отличие составляет 0.02 звездной величины. Тем же значением характеризуется точность модели. Разность между гистограммой 12 и яркостью окружающей комету небесной сферы составляет порядка 0.01 звездной величины.

Следует отметить, что созданная гистограммная модель имеет более определенную структуру, чем иные подобные структурные построения [15]. Как можно видеть (см. рисунок), в гипсометрической модели исследуемой кометы присутствует значительный узкий выброс из ее ядра в направлении Солнца в отличие от кометного хвоста. Данный процесс имеет такую силу, что даже давление солнечного излучения не затормаживает его на расстоянии в несколько миллионов километров от кометы. Так как наблюдение кометы было выполнено близко к перигелию ее орбиты, такой аномальный выброс можно объяснить достижением тепловой волной легколетучих компонентов в подповерхностных слоях пылевой коры и их испарения. При этом газ в струе выброса нагревается, что приводит к очень высокой скорости выброса пылевой составляющей кометы. Используемый в настоящей работе метод можно применять для структурного анализа активности кометных и других небесных объектов. Особое значение при этом уделяется долгопериодическим кометам, так как в большинстве случаев их можно изучать только при разовом прохождении перигелия, как, например, в случае ДКАР. Дальнейшее использование полученных результатов также



Структура кометы Аренда-Роланда. Гистограммы отличаются друг от друга на 0.03 звездной величины и имеют разность плотностей 0.02. Цифровые номера от 1 до 12 обозначают полученные гистограммы, обозначение 10' соответствует шкале в десять угловых минут на небесной сфере.

возможно в области лунных исследований [16], изучения внутренней структуры небесных тел [17] и анализа метеорных потоков [18].

#### Финансирование работы

Работа поддержана Российским научным фондом, грант 24-22-00260.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] D.E. Harker, D.H. Wooden, M.S.P. Kelley, Ch.E. Woo. *Planetary Sci. J.*, **4** (12), 242 (2023). DOI: 10.3847/PSJ/ad0382
- [2] B.T. Bolin, F.J. Masci, D.A. Duev, J.W. Milburn, J.N. Purdum, C. Avdellidou, Y.-C. Cheng, M. Delbo, C. Fremling, M. Ghosal, Z.-Y. Lin, C.M. Lisse, A. Mahabal, M. Saki. *MNRAS*, **527** (1), L42 (2023). DOI: 10.1093/mnras/slad139
- [3] E. Behar, P. Henri. *Astronomy Astrophys.*, **671**, A144 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202244455
- [4] O. Price, G.H. Jones, K. Battams, M. Owens. *Icarus*, **389**, 115218 (2023). DOI: 10.1016/j.icarus.2022.115218
- [5] Q. Afghan, G.H. Jones, O. Price, A. Coates. *Icarus*, **390**, 11528 (2023). DOI: 10.1016/j.icarus.2022.115286
- [6] J.J. Tobin, M.L.R. van't Hoff, M. Leemker, E.F. van Dishoeck, T.P.-C. Kenji Furuya, D. Harsono, M.V. Persson, L.I. Cleeves, P.D. Sheehan, L. Cieza. *Nature*, **615** (7951), 227 (2023). DOI: 10.1038/s41586-022-05676-z
- [7] N. Hänni, K. Altwegg, D. Baklouti, M. Combi, S.A. Fuselier, J. De Keyser, D.R. Müller, M. Rubin, S.F. Wampfler. *Astronomy Astrophys.*, **678**, A22 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202347059
- [8] A. Guilbert-Lepoutre, S. Benseguane, L. Martinien, J. Lasue, S. Besse, B. Grieger, A. Beth. *Planetary Sci. J.*, **4**, 220 (2023). DOI: 10.3847/PSJ/ad083a
- [9] L.S. Pilyugin, E.K. Grebel, I.A. Zinchenko, Y.A. Nefedyev, J.M. Vilchez. *A&A*, **623**, A122 (2019). DOI: 10.1051/0004-6361/201834239
- [10] L.S. Pilyugin, E.K. Grebel, I.A. Zinchenko, Y.A. Nefedyev. *A&A*, **634**, A26 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/201936357
- [11] L.S. Pilyugin, E.K. Grebel, I.A. Zinchenko, M.A. Lara-López, Y.A. Nefedyev, V.M. Shulga. *A&A*, **639**, A96 (2020). DOI: 10.1051/0004-6361/202038034
- [12] L.S. Pilyugin, B. Cedrés, I.A. Zinchenko, A.M. Pérez Garcia, M.A. Lara-López, J. Napolny, Y.A. Nefedyev, M. González-Otero, J.M. Vilchez, S. Duarte Puertas, M.R. Navarro. *Astronomy Astrophys.*, **653**, A11 (2011). DOI: 10.1051/0004-6361/202141012
- [13] A. Andreev, Y. Nefedyev, N. Demina. *Astronom. Astrophys. Transactions*, **31** (1), 37 (2019).
- [14] Электронный ресурс. Cyanogen Imaging® MaxIm DL. Режим доступа: <https://cdn.diffractionlimited.com/help/maximdl/MaxIm-DL.htm#t=Introduction.htm>
- [15] A.O. Andreev, Yu.A. Nefedyev, L.A. Nefediev, E.N. Ahmedshina, N.Yu. Demina, A.A. Zagidullin. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, **162** (2), 223 (2020). DOI: 10.26907/2541-7746.2020.2.223-236
- [16] A.O. Andreev, Yu.A. Nefedyev, N.Yu. Demina, L.A. Nefediev, N.K. Petrova, A.A. Zagidullin. *Astronomy Reports*, **97** (9), 795 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920100017
- [17] N. Petrova, Y. Nefedyev, A. Andreev, A. Zagidullin. *Astronomy Reports*, **64** (12), 1042 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920120094
- [18] M. Sergienko, M. Sokolova, Y. Nefedyev, A. Andreev. *Astronomy Reports*, **64** (12), 1087 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920120124