

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ РАБОТЫ С НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМИ АСТРОНОМИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ И КАТАЛОГАМИ

Н.А. Архипова, А.С. Лужнов

Аннотация. С середины прошлого века, а особенно с начала этого века, во многих областях науки наблюдается значительный рост объемов наблюдательных и экспериментальных данных. Особенно эта проблема проявляется в области астрономии и астрофизики в связи с большим количеством накопленных наблюдательных данных. В связи с этим существует глобальная насущная проблема методики преподавания современных методов работы с астрономическими данными на уроках астрономии в школах, а также на первых курсах в вузах. В данной статье будет разобрана часть разрабатываемого курса по работе с наблюдательными астрономическими данными, посвященная принципам работы с астрономическими каталогами. Особенностью данного курса является наличие практических задач по программированию, которые наиболее приближены к современным научным методикам и открытиям в астрономии.

Ключевые слова: астрономия, астрофизика, педагогика, обработка данных, астрономические каталоги.

Для цитирования: Архипова Н.А., Лужнов А.С. Методика преподавания работы с наблюдательными астрономическими данными и каталогами // Преподаватель XXI век. 2024. № 3. Часть 1. С. 119–131. DOI: 10.31862/2073-9613-2024-3-119-131

METHODS OF TEACHING WORK WITH OBSERVATIONAL ASTRONOMICAL DATA AND CATALOGS

N.A. Arkhipova, A.S. Luzhnov

Abstract. A significant increase in the amount of observational and experimental data has been observed in many fields of science since the middle of the last century, and especially since the beginning of this century. The problem is especially evident in the field of astronomy and astrophysics due to the large amount of accumulated observational data. In this regard, there is a global urgent problem of methodology of teaching modern methods of working with astronomical data in astronomy classes in schools, as well as in the first years of university studies. The article deals with the part of the course on working with observational astronomical data, devoted to the

© Архипова Н.А., Лужнов А.С., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

principles of working with astronomical catalogs. The peculiarity of this course is the presence of practical programming tasks, which are the closest to modern scientific methods and discoveries in astronomy.

Keywords: *Astronomy, astrophysics, pedagogy, data processing, astronomical catalogs.*

Cite as: Arkhipova N.A., Luzhnov A.S. Methods of Teaching Work with Observational Astronomical Data and Catalogs. *Prepodavatel XXI vek. Russian Journal of Education*, 2024, No. 3, part 1, pp. 119–131. DOI: 10.31862/2073-9613-2024-3-119-131

Введение

Несколько последних десятилетий в современной астрономии и астрофизике наблюдается значительный рост получения и накопления наблюдательных данных. Это связано как с большим количеством работающих как наземных, так и космических обсерваторий, так и с улучшением качества приемников информации и большим временем работы телескопов в режиме обзоров небесной сферы. Современные телескопы позволяют получать петабайты информации о космосе в секунду [1], что определяет задачу обработки и «извлечения» из них информации к более общей проблеме обработки больших данных [2].

В связи с этим на сегодняшний день существует довольно серьезная проблема методики преподавания современной астрономии в области работы с астрономическими данными как в школе, в рамках обязательного предмета или дополнительного образования, так на первых курсах вузов. Потому что изучение единственного классического курса астрономии [3; 4] не дает представления о современной работе астрономов и тенденциях развития науки [5–7], поскольку главный упор в обучении ставится на фундаментализацию знаний и сведению к общеизвестным уравнениям физики и астрофизики, в то время как прошлые, так и современные исследования строятся на эмпирическом и статистическом анализе наблюдательных астрономических данных [8].

Наиболее важным, на наш взгляд, является внесение в программу обучения астрономии методов работы с астрономическими данными и многочисленными астрономическими каталогами данных, появившимися в последние десятилетия благодаря бурному развитию астрономических инструментов и приемников, а также многочисленным обзорам небесной сферы, выполненных как наземными, так и космическими обсерваториями. Актуальной задачей обучения современных школьников и студентов является обучение методам математической обработки наблюдательных данных, а также умению выявлять и находить зависимости и корреляции в этих данных. Данные методики помогут учащимся более эффективно и продуктивно подключаться к исследовательским работам в астрономии на современном уровне. Переход к новым методикам может производиться поэтапно в виде дополнительных курсов по обработке наблюдательных астрономических данных и сопровождать классический курс астрономии и астрофизики. Данный курс должен содержать основные методы анализа совокупности данных, в том числе корреляционного анализа и базовые примеры применения этого анализа к астрономическим наблюдениям.

В рамках данной статьи мы хотели бы рассмотреть одну из частей курса, посвященную принципам работы с астрономическими каталогами. Эта часть курса имеет особое значение по нескольким причинам:

- в настоящее время десятки различных обсерваторий наблюдают за различными объектами в нашей Вселенной, но при этом обработано менее 10% полученных данных;
- большинство каталогов размещены в свободном доступе, что поможет развеять миф о “закрытости большой науки” [9];
- для работы с каталогами имеется множество удобных рабочих библиотек, что несомненно облегчает процесс обучения;
- многие крупнейшие современные космические обсерватории (Хаббла (HST)¹, Джеймса Уэбба (JWST)², Гайя (Gaia)³ и т. д.) имеют достаточную популярность в массовом сознании и медийном пространстве, что может дополнительно мотивировать обучающихся заниматься в дальнейшем научными исследованиями;
- методы работы с каталогами научных данных достаточно универсальны и данный курс может быть с успехом использован на уроках информатики для обучения работы с базами данных на основе астрономических баз данных и каталогов.

Стоит отметить, что желательно продемонстрировать принципы работы на различных астрономических каталогах, а не концентрироваться на каком-то одном. Важно показать универсальность методик и в перспективе научить проводить кросс-корреляционные исследования по различным каталогам.

Обучение работе с астрономическими базами данных и их анализу играет огромную роль в исследованиях, посвященных изучению этапов эволюции Вселенной, исследованию темной материи [10; 11] и темной энергии [12; 13], а также изучению топологической структуры Вселенной [14].

Все эти аспекты являются одними из основных проблем астрофизики XXI века, по мнению академика Н.С. Кардашева [15].

В современной ситуации по этой тематике активно работают зарубежные космические миссии: космическая обсерватория Джеймса Уэбба, разработанная Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и запущенная в 2021 г., которая является развитием космической обсерватории Гершель Herschel⁴ (2009–2013 гг.), также запущенная летом 2023 г. Европейским космическим агентством (ЕКА) космическая обсерватория Евклид (Euclid)⁵.

Работа с каталогом Мессье

Начальным примером в этом модуле было логично выбрать один из первых каталогов, появившихся в астрономии, а также часто используемый как педагогами, так и любителями астрономии, а именно каталог Мессье, который был издан еще в XVIII веке французским ученым Шарлем Мессье. Этот каталог содержит данные о 110 астрономических объектах (галактиках, туманностях, шаровых и рассеянных звездных скоплениях), которые являются наиболее известными среди астрономов-любителей. Он изучается в рамках базовой астрономии и в нем достаточно объектов для наглядной демонстрации. Сам каталог доступен в различных вариациях и с различным набором

¹ Космическая обсерватория Hubble Space Telescope. URL: <https://hubblesite.org/home> (дата обращения: 22.03.2024).

² Космическая обсерватория James Webb Space Telescope. URL: <https://webb.nasa.gov/> (дата обращения: 19.02.2024).

³ Космическая обсерватория Gaia. URL: <https://gea.esac.esa.int/archive/> (дата обращения: 22.03.2024).

⁴ Космическая обсерватория Hersche. URL: <https://herschel-vos.phys.sussex.ac.uk/> (дата обращения: 16.03.2024).

⁵ Космическая обсерватория Euclid. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid (дата обращения: 16.03.2024).

данных об объектах. Для удобства работы с данным каталогом создан отдельный файл формата “csv”, в который добавили порядковые номера объектов, их тип, экваториальные координаты и расстояние до них.

Далее в качестве первого задания работы с данным каталогом нужно отобразить все объекты каталога в экваториальных координатах в стереографической проекции или в проекции Мольвейде (см. рис. 1).

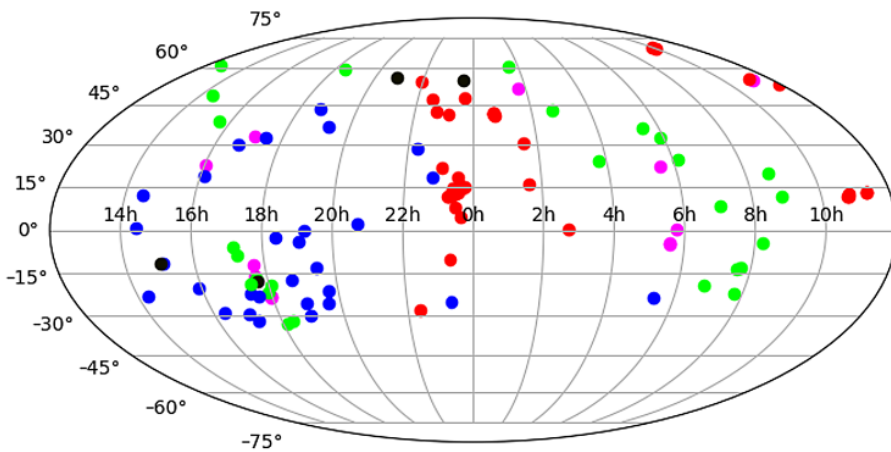


Рис. 1. Отображение объектов Мессье в проекции Мольвейде

*Галактики — красный цвет, рассеянные звездные скопления — зеленый цвет, шаровые звездные скопления — синий цвет, туманности — розовый цвет, иное — черный цвет

Помимо визуализации объектов на карте звездного неба можно в качестве второго задания предложить оценить положение центра и характерные размеры гало и диска Млечного пути, основываясь на свойствах объектов каталога, что описано далее.

122

1. Для поиска центра Галактики Млечный Путь можно воспользоваться данными по положениям шаровых звездных скоплений, т. к. известно, что данные объекты являются объектами сферической составляющей Галактики.

Для этого необходимо было сначала перевести сферические координаты в декартовы (что само по себе уже является хорошей учебной задачей):

$$x_i = r_i \cos \delta_i \cos \alpha_i \quad (1)$$

$$y_i = r_i \cos \delta_i \sin \alpha_i \quad (2)$$

$$z_i = r_i \sin \delta_i \quad (3)$$

А далее для оценки положения центра системы шаровых скоплений Галактики необходимо просто рассчитать среднеарифметическое значение по координатам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (4)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (5)$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N} \quad (6)$$

И далее совершить обратный переход в экваториальные координаты:

$$r_{\text{центра}} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2} = 6,4 \text{ кпк} \quad (7)$$

$$\delta_{\text{центра}} = \arcsin\left(\frac{\bar{z}}{r_{\text{центра}}}\right) = -9,6^\circ \quad (8)$$

$$\alpha_{\text{центра}} = \arctg \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = 18h03m \quad (9)$$

В реальности центр ядра Галактики находится в 8,5 кпк от Солнца в созвездии Стрельца ($\alpha = 17h40m, \delta = -29^\circ$). Из чего ученикам предлагается сделать вывод, что расхождение рассчитанных значений центра подсистемы шаровых скоплений в Галактике с реальным положением центра Галактики очевидным образом связаны с неполнотой каталога Мессье, но дают неплохой оценочный результат.

2. Для оценки размеров Галактики достаточно вычислить расстояние от каждого шарового скопления до предполагаемого центра и выбрать максимальное. В результате получится порядка 22 кпк, что сравнимо с реальным значением порядка 30 кпк.

Данный анализ легко масштабируется на современные каталоги, в частности на анализ наиболее полного на сегодняшний момент астрономический каталог шаровых скоплений в нашей Галактике [16; 17], создаваемого космической обсерватории Gaia, основная цель которой — астрометрические измерения и создание полной карты положения видимых объектов нашей Галактики Млечный Путь.

Работа с современными астрономическими каталогами

Большинство файлов астрономических данных хранятся в астрономических каталогах в специальном формате Flexible Image Transport System (FITS)⁶. Данный формат отличается от классических форматов изображений тем, что помимо основного изображения в нем хранятся дополнительные метаданные об этом изображении и об объекте, т. е. помимо фотографии космического объекта в данном файле также будут присутствовать данные о его координатах, спектральном классе, красном смещении и многом другом.

В качестве первого упражнения ученикам предлагается с помощью библиотеки `astropy` построить изображение файла “`photometry/M6707NH.fits`”⁷ и указать, на какой частоте излучения было получено данное изображение. Получим данное изображение и частоту наблюдения 150 МГц (см. рис. 2). Это изображение рассеянного звездного скопления М67 в созвездии Рака.

Для анализа современных астрономических каталогов удобно воспользоваться встроенным в Python пакетом `astroquery`⁸ библиотеки `astropy`⁹.

При анализе данных каталогов стоит обратить внимание на то, какие данные доступны о каждом объекте, а также особенности работы в Python со списками и массивами. После ряда итераций можно получить удобный массив данных по интересующим параметрам.

⁶ Официальный справочник, определяющий требования к файлам данных формата FITS. URL: https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_standard.html (дата обращения: 09.02.2024).

⁷ Сервер астрономических данных. URL: <https://www.astropy.org/astropy-data/> (дата обращения: 09.02.2024).

⁸ `Astroquery` — это набор инструментов для запросов к астрономическим веб-формам и базам данных. URL: <https://astroquery.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 01.03.2024).

⁹ Общедоступная библиотека Python для астрономии. URL: <https://docs.astropy.org/en/stable/index.html> (дата обращения: 17.02.2024).

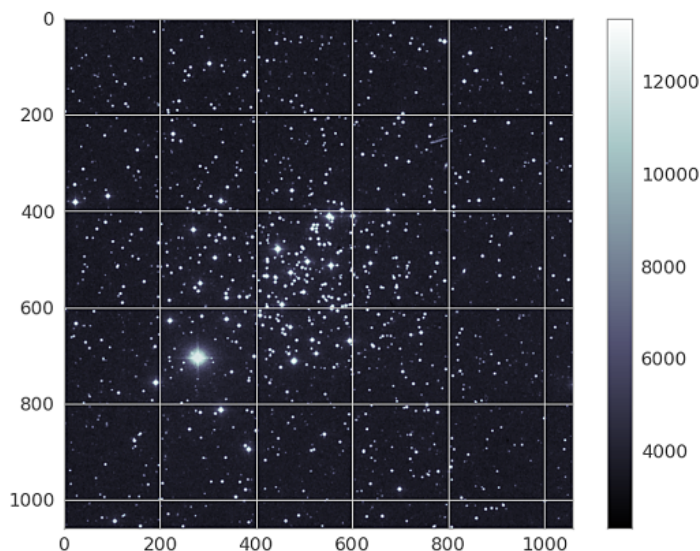


Рис. 2. Изображение М 67

В качестве примера рассмотрим каталог галактик, полученный космической обсерваторией Гершеля. Эта космическая астрономическая обсерватория проработала с 2009 по 2013 г. и на момент запуска являлась крупнейшей в инфракрасном диапазоне спектра электромагнитного излучения объектов. Выбор каталога этого телескопа обусловлен тем, что в конце 2021 г. был запущен космический телескоп Джеймс Уэбб, в 2023 г. — космический телескоп “Euclid”, которые работают в оптическом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, а в ближайшем времени появятся также каталоги отечественной космической обсерватории «Миллиметрон», работающей в мм диапазоне электромагнитного спектра. Эти диапазоны интересны тем, что в них наблюдаются самые далекие объекты на экстремально больших красных смещениях, что позволяет наблюдать астрономические объекты на самых больших красных смещениях, т. е. очень древние.

124

Обсуждаемые в нашем учебном пособии [18] и в данной статье методики легко экстраполируются на все существующие современные и будущие каталоги, а умение проводить комплексный анализ астрономических данных со всех телескопов даст более четкое представление о первых галактиках и крупномасштабной структуре галактик во Вселенной.

Первым, как и при работе с каталогом Мессье, было задание визуализировать каталог, т. е. отобразить галактики в заданном участке неба в экваториальных координатах из каталога Гершеля. Результат отображен на рис. 3.

В целом, обучение работе с fits-файлами и получение по определенным параметрам массива данных из каталога можно считать конечной целью данной части курса, поскольку дальнейший анализ и поиск корреляций по параметрам являются уже исследовательской работой и зависят от уровня дальнейшей подготовки учащихся. Основная наша задача — открыть путь обучающимся к получению исходных данных из астрономических каталогов — выполнена.

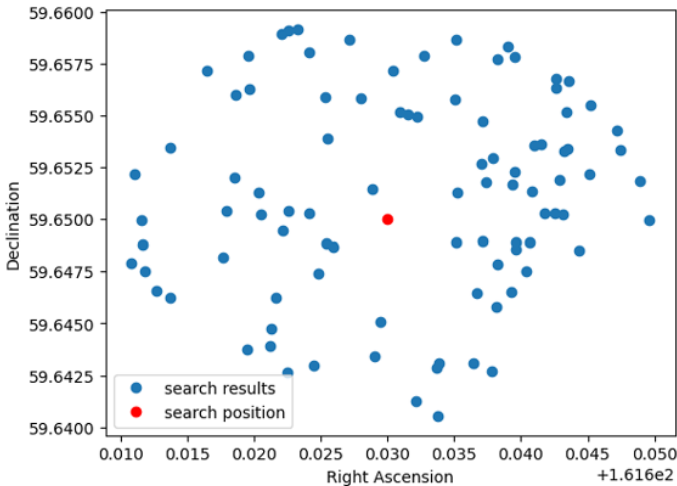


Рис. 3. Отображение объектов из каталога Гершеля в заданном участке неба

Следуя современной проектной парадигме образования и отвечая на запросы научно-технического прогресса, главной целью обучения является развитие исследовательского подхода в работе. Поэтому далее можно поставить следующую задачу: обучить школьников базовым методам обработки данных для построения закономерностей и проверке гипотез относительно теорий, описывающих эти закономерности. В качестве простого примера опять обратимся к каталогу галактик космической обсерватории Гершель и изучим корреляцию между красным смещением галактик и их количеством в области небесной сферы, ограниченной радиусом $0,05^\circ$, отображенным на рис. 3. Построим зависимость числа галактик внутри радиуса с заданным красным смещением z от величины z . Эта зависимость отображена на рис. 4.

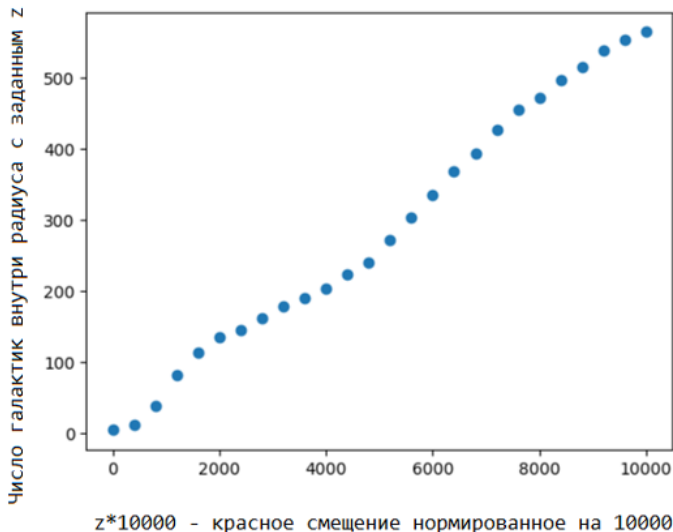


Рис. 4. Зависимость числа галактик от красного смещения

Далее для данной зависимости был применен критерий Пирсона (можно применить любой другой критерий, предназначенный для оценки значимости между двумя или несколькими относительными признаками), который в данном случае получился порядка 8,5. А для степени свободы 2 с уровня значимости не менее 0,05 допустимый диапазон критерия лежит от 6 до 10 [19], т. е. мы также обнаружили, что существует определенная зависимость между числом галактик N и их красным смещением z , как было обнаружено и в ряде работ других авторов [20; 21].

Полученную на рис. 4 зависимость можно аппроксимировать линейной функцией:

$$N(R) \sim z \quad (10)$$

Число галактик равно их концентрации n умноженной на объем V :

$$N(R) = n(R)V = n(R) \cdot \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right) \quad (11)$$

Если далее в первом приближении можно пренебречь сложной зависимостью красного смещения от космологической модели

$$z \sim R \quad (12)$$

то получим, что концентрация галактик убывает с увеличением расстояния до них:

$$n(R) \sim R^{-2} \quad (13)$$

Отметим, что следует обсудить с учениками, что в данной задаче мы рассматривали упрощенную модель и не учитывали типы и эволюцию галактик, и нелинейную зависимость между расстоянием и красным смещением, а также ограниченность чувствительности спектрографов Гершеля, поэтому в более полном научном исследовании (уже выходящем за рамки учебного курса) будут существовать дополнительные поправки, учитывающие все эти эффекты. Тем не менее, несмотря на упрощенную модель, мы получили верное представление о том, что галактики во Вселенной распределены неоднородно и существует корреляция между числом галактик и их красным смещением.

В целом на базе данной задачи можно построить множество проектных и научных задач по исследованию структуры Вселенной, что является перспективой дальнейших наших исследований.

А в качестве дополнительной задачи ученикам было предложено исследовать, как влияет увеличение радиуса площадки небесной сферы, в рамках которой мы изучали распределение галактик, на полученный результат, и получили, что увеличение радиуса площадки небесной сферы не дает значительного улучшения или качественно другого результата, но значительно увеличивает время обработки данных. Этот аспект тоже можно рассматривать как самостоятельную исследовательскую задачу для обучающихся.

Результаты и выводы

Астрономия и астрофизика являются одними из самых перспективных отраслей для развития научной мысли. Крупные технические достижения и открытые источники наблюдательных данных способствуют все большей популяризации науки и вовлечению большего числа людей. А новые методики обучения через проектную деятельность позволяют гораздо лучше понять предмет и лучше развивают когнитивные

способности. Именно поэтому необходимо заниматься развитием программ обучения и создавать новые подходы в образовании, связанные с анализами данных и программированием.

На данный момент мы проводим апробацию разрабатываемого курса на уроках дополнительного образования в Лицее НИУ ВШЭ и Центре педагогического мастерства на занятиях со школьниками 9–11 класса, а также на интенсивах подготовки к астрономическим олимпиадам в школе «Ассоциация победителей олимпиад». Мы получаем положительные и заинтересованные отзывы о данном курсе как от учеников и учителей, так и от научных сотрудников астрономических институтов, которые ознакомлены с нашим курсом. Мы надеемся, что данные форматы обучения и навыки работы с существующими астрономическими данными и каталогами, полученные учащимися данного курса, позволят им гораздо проще, эффективнее и легче влиться в современные исследовательские проекты по астрономии и астрофизике, чем изучение данных методик с нуля уже непосредственно при научной карьере.

И самое главное: обучение учеников работе с астрономическими данными и каталогами данных особенно важно в свете того, что Астрокосмическим центром ФИАН и Роскосмосом планируется запуск (дата планируемого запуска в 2029, включен в федеральную космическую программу¹⁰ 2016–2025 гг.) отечественной космической обсерватории «Миллиметрон»¹¹ (из серии космических миссий «Спектр»), которая также будет наблюдать самые далекие объекты на экстремально больших красных смещениях, что позволяет «заглянуть» в далекое прошлое Вселенной в поисках самых первых галактик, звезд, «первого света» от них, знания о которых являются важнейшей задачей космологии, а значит, и физики ранней Вселенной [22; 23]. Эти знания могут помочь решить вопросы парадокса темной энергии и темной материи, а также вопросы в области физики элементарных частиц и высоких энергий, т. к. ранняя Вселенная является природной лабораторией, параметры которой принципиально не могут быть достигнуты в земных лабораториях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, С.В. Обработка больших объемов сырых астрономических данных с помощью модели вычислений MapReduce / С.В. Герасимов, А.В. Мещеряков, И.Ю. Колосов, Е.С. Глозов, И.С. Попов // Труды Института системного программирования РАН (ИСП РАН). 2015. Т. 27. № 6. С. 315–334.
2. Денисова, О.Ю., Мухутдинов, Э.А. Большие данные — это не только размер данных // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 4. С. 226–230.
3. Левитан, Е.П. Астрономия. 11 класс. Учебник. Базовый уровень. М.: Просвещение, 2022. 240 с.
4. Чаругин, В.М. Астрономия. 10–11 классы. Учебник. Базовый уровень. М.: Просвещение, 2022.
5. Королев, М.Ю., Петрова, Е.Б., Чулкова, Г.М. Преподавание астрономии в современной образовательной среде // Преподаватель XXI век. 2023. № 1. Ч. 1. С. 71–83.

¹⁰ Государственная корпорация Роскосмос. URL: <https://www.roscosmos.ru> (дата обращения: 09.02.2024).

¹¹ Космическая обсерватория «Миллиметрон» («Спектр-М»). URL: <https://millimetron.ru/> (дата обращения: 09.02.2024).

6. Дробчик, Т., Невзоров, Б. Проблемы и перспективы преподавания астрономии школьникам // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2018. № 1 (29). С. 113–132.
7. Тихомирова, Е.Н., Иродова, И.А. Формирование астрономической картины мира школьников // Ярославский педагогический вестник. 2017. № 2. С. 72–76.
8. Малков, О.Ю., Ковалева, Д.А., Позаненко, А.С. Большие данные в астрономии: обзоры, архивы, базы данных // Физика космоса: сборник трудов 45 Международной студенческой конференции. Екатеринбург, 2016. С. 103–114.
9. Архипова, Н.А., Промыслов, В.Г. Проблема обеспечения целостности и достоверности радиоастрономических данных в открытых проектах // Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы 31-й Международной конференции. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2023. С. 74–83.
10. Архипова, Н.А., Кахниашвили, Т., Лукаш, В.Н. Численность и эволюция скоплений галактик в космологических моделях с массивными нейтрино // Астрономия и астрофизика. 2002. № 386 (3). С. 775–783.
11. Кахниашвили, Т. Предел массы нейтрино из эволюции плотности числа скоплений галактик / Т. Кахниашвили, Э. фон Тоерн, Н.А. Архипова, Б. Ратра // Физический обзор D-частиц, полей, гравитации и космологии. 2005. № 71 (12).
12. Авсаджанишвили, О. Скорость роста в динамических моделях темной энергии / О. Авсаджанишвили, Н.А. Архипова, Л. Самушия, Т. Кахниашвили // Европейский физический журнал С. 2014. № 74 (11). С. 1–8.
13. Архипова, Н.А., Пилипенко, С.В. Перспективы изучения темной энергии при $z > 2$ с помощью обзоров галактик // Международный журнал современной физики D. 2016. № 25 (14).
14. Аурих, Р. Дисперсия температурного градиента реликтового излучения: новая сигнатура многосвязной Вселенной / Р. Аурих, Т. Бухерт, М.Д. Франс, Ф. Штайнер // Классическая и квантовая гравитация. 2021. № 38.
15. Кардашев, Н.С. Радиовселенная // Успехи физических наук (УФН). 2007. Т. 177. № 5. С. 553–558.
16. Байкова, А.Т., Бобылев, В.В. Сравнение орбитальных свойств шаровых скоплений млечного пути, полученных по данным каталогов GAIA DR2 и EDR3 // Астрономический журнал. 2021. Т. 98. № 9. С. 722–739.
17. Байкова, А.Т., Смирнов, А.А., Бобылев, В.В. Исследование влияния эволюционирующего потенциала галактики на орбитальные свойства 152 шаровых скоплений с данными из каталога GAIA EDR3 // Письма в Астрономический журнал. 2021. Т. 47. № 7. С. 472–492.
18. Худсон, Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.
19. Гроховская, А.А., Додонов, С.Н., Мовсесян, Т.А. Крупномасштабное распределение галактик поля HS 47.5-22. II. Анализ наблюдательных данных // Астрофизический бюллетень. 2020. Т. 75. № 3. С. 250–266.
20. Решетников, В.П. Обзоры неба и глубокие поля наземных и космических телескопов // УФН. 2005. № 175. С. 1163–1183.
21. Кардашёв, Н.С., Новиков, И.Д. и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // УФН. 2014. № 184. С. 1319–1352.

22. Новиков, И.Д., Лихачёв, С.Ф. и др. Задачи научной программы космической обсерватории Миллиметронт и технические возможности её реализации // УФН. 2021. № 191. С. 404–443.
23. Рубаков, В.А. Физика частиц и космология: состояние и надежды // УФН. 1999. № 169. С. 1299–1309.

REFERENCES

1. Gerasimov, S.V., Meshcheryakov, A.V., Kolosov, I.Yu., Glotov, E.S., Popov, I.S. Obrabotka bolshih obemov syryh astronomicheskikh dannyh s pomoshchyu modeli vychislenij MapReduce [Processing of Large Volumes of Raw Astronomical Data Using the MapReduce Computing Model], *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya Rossijskoj akademii nauk* = Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2015, No. 6. (in Russ.)
2. Denisova, O.Yu., Muhutdinov, E.A. Bolshie dannye — eto ne tolko razmer dannyh [Big Data Is Not Just about the Size of the Data], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* = Bulletin of the Technological University, 2015, vol. 18, No. 4, pp. 226–230. (in Russ.)
3. Levitan, E.P. *Astronomiya. 11 klass. Uchebnik. Bazovyj uroven* [Astronomy. 11th Grade. Textbook. Basic Level]. Moscow, Prosveshchenie, 2022, 240 p. (in Russ.)
4. Charugin, V.M. *Astronomiya. 10–11 klassy. Uchebnik. Bazovyj uroven* [Astronomy. Grades 10–11. Textbook. Basic Level]. Moscow, Prosveshchenie, 2022. (in Russ.)
5. Korolev, M.Yu., Petrova, E.B., Chulkova, G.M. Prepodavanie astronomii v sovremennoj obrazovatelnoj srede [Teaching Astronomy in a Modern Educational Environment], *Prepodavatel XXI vek* = Russian Journal of Education, 2023, No. 1, part 1, pp. 71–83. (in Russ.)
6. Drobchik, T., Nevzorov, B. Problemy i perspektivy prepodavaniya astronomii shkolnikam [Problems and Prospects of Teaching Astronomy to Schoolchildren], *Professionalnoe obrazovanie v Rossii i za rubezhom* = Vocational Education in Russia and Abroad, 2018, No. 1 (29), pp. 113–132. (in Russ.)
7. Tikhomirova, E.N., Irodova, I.A. Formirovanie astronomicheskoy kartiny mira shkolnikov [Formation of the Astronomical Picture of the World of Schoolchildren], *Yaroslavskij pedagogicheskij vestnik* = Yaroslavl Pedagogical Bulletin, 2017, No. 2, pp. 72–76. (in Russ.)
8. Malkov, O.Yu., Kovaleva, D.A., Pozanenko, A.S. Bolshie dannye v astronomii: obzory, arhivy, bazy dannyh [Big Data in Astronomy: Reviews, Archives, Databases]. In: *Fizika kosmosa* [Space Physics: Proceedings of the 45th International Student Conference]. Ekaterinburg, 2016, pp. 103–114. (in Russ.)
9. Arkhipova, N.A., Promyslov, V.G. Problema obespecheniya celostnosti i dostovernosti radioastronomicheskikh dannyh v otkrytyh proektah [The Problem of Ensuring the Integrity and Reliability of Radio Astronomy Data in Open Projects]. In: *Problemy upravleniya bezopasnostyu slozhnyh system* [Problems of Security Management of Complex Systems: Materials of the 31st International Conference]. Moscow, Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova, 2023, pp. 74–83. (in Russ.)
10. Arkhipova, N.A., Kahniashvili, T., Lukash, V.N. Chislennost i evolyuciya skoplenij galaktik v kosmologicheskikh modelyah s massivnymi nejtrino [The Number and Evolution of Galaxy Clusters in Cosmological Models with Massive Neutrinos], *Astronomiya i astrofizika* = Astronomy and Astrophysics, 2002, No. 386 (3), pp. 775–783. (in Russ.)

11. Kahnashvili, T., Toern, fon E., Arkhipova, N.A., Ratra, B. Predel massy nejtrino iz evolyucii plotnosti chisla skoplenij galaktik [Neutrino Mass Limit from the Evolution of the Density of the Number of Galaxy Clusters], *Fizicheskij obzor D — chastic, polej, gravitacii i kosmologii* = Physical Review of D — Particles, Fields, Gravity and Cosmology, 2005, No. 71 (12). (in Russ.)
12. Avsadzhanishvili, O., Arkhipova, N.A., Samushiya, L., Kahnashvili, T. Skorost rosta v dinamicheskikh modelyah temnoj energii [Growth Rate in Dynamic Models of Dark Energy], *Evropejskij fizicheskij zhurnal C* = European Journal of Physics C, 2014, No. 74 (11), pp. 1–8. (in Russ.)
13. Arkhipova, N.A., Pilipenko, S.V. Perspektivy izucheniya temnoj energii pri $z > 2$ s pomoshchyu obzorov galaktik [Prospects for Studying Dark Energy Energy at $z > 2$ Using Galaxy Surveys], *Mezhdunarodnyj zhurnal sovremennoj fiziki D* = International Journal of Modern Physics D, 2016, No. 25 (14). (in Russ.)
14. Aurikh R., Buhert T., Frans M.D., Shtajner F. Dispersiya temperaturnogo gradienta reliktoivogo izlucheniya: novaya signatura mnogovyaznoj Vselejnoj [Dispersion of the Temperature Gradient of the Relic Radiation: A New Signature of a Multi-Connected Universe], *Klassicheskaya i kvantovaya gravitaciya* = Classical and Quantum Gravity, 2021, No. 38. (in Russ.)
15. Kardashev, N.S. Radiovselennaya [Radio Universe], *Uspekhi fizicheskikh nauk* = Successes of Physical Sciences, 2007, vol. 177, No. 5, pp. 553–558. (in Russ.)
16. Bajkova, A.T., Bobilev, V.V. Sravnenie orbitalnyh svojstv sharovyh skoplenij mlechnogo puti, poluchennyh po dannym katalogov GAIA DR2 i EDR3 [Comparison of the Orbital Properties of Globular Clusters of the Milky Way Obtained from the GAIA DR2 and EDR3 Catalogs], *Astronomicheskij zhurnal* = Astronomical Journal, 2021, vol. 98, No. 9, pp. 722–739. (in Russ.)
17. Bajkova, A.T., Smirnov, A.A., Bobilev, V.V. Issledovanie vliyaniya evolyucioniruyushchego potentsiala galaktiki na orbitalnye svojstva 152 sharovyh skoplenij s dannymi iz kataloga GAIA EDR3 [Investigation of the Influence of the Evolving Potential of the Galaxy on the Orbital Properties of 152 Globular Clusters with Data from the GAIA EDR3 Catalog], *Pisma v Astronomicheskij zhurnal* = Letters to the Astronomical Journal, 2021, vol. 47, No. 7, pp. 472–492. (in Russ.)
18. Hudson, D. *Statistika dlya fizikov* [Statistics for Physicists]. Moscow, Mir, 1970, 296 p. (in Russ.)
19. Grohovskaya, A.A., Dodonov, S.N., Movsesyan, T.A. Krupnomasshtabnoe raspredelenie galaktik polya HS 47.5-22. II. Analiz nablyudatelnyh dannyh [Large-Scale Distribution of Galaxies of the HS 47.5-22 Field. II. Analysis of Observational Data], *Astrofizicheskij byulleten* = Astrophysical Bulletin, 2020, vol. 75, No. 3, pp. 250–266. (in Russ.)
20. Reshetnikov, V.P. Obzory neba i glubokie polya nazemnyh i kosmicheskikh teleskopov [Reviews of the Sky and Deep Fields of Ground-Based and Space Telescopes], *Uspekhi fizicheskikh nauk* = Successes of Physical Sciences, 2005, No. 175, pp. 1163–1183. (in Russ.)

21. Kardashyov, N.S., Novikov, I.D. i dr. Obzor nauchnyh zadach dlya observatorii Millimetron [Review of Scientific Tasks for the Millimetron Observatory], *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of Physical Sciences*, 2014, No. 184, pp. 1319–1352. (in Russ.)
22. Novikov, I.D., Lihachyov, S.F. i dr. Zadachi nauchnoj programmy kosmicheskoy observatorii Millimetron i tekhnicheskie vozmozhnosti eyo realizacii [The Tasks of the Scientific Program of the Millimetron Space Observatory and the Technical Possibilities of Its Implementation], *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of Physical Sciences*, 2021, No. 191, pp. 404–443. (in Russ.)
23. Rubakov, V.A. Fizika chastic i kosmologiya: sostoyanie i nadezhdy [Particle Physics and Cosmology: State and Hopes], *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of Physical Sciences*, 1999, No. 169, pp. 1299–1309. (in Russ.)

Архипова Наталья Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент, базовая кафедра физики космоса, Институт космических исследований, Российская академия наук; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», naarkhipova@hse.ru

Natalia A. Arkhipova, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Basic Department of Space Physics, Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences; National Research University “Higher School of Economics”, naarkhipova@hse.ru

Лужнов Алексей Сергеевич, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; Лицей Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», отдел развития талантов школьников, Центр педагогического мастерства, asluzhnov@edu.hse.ru

Alexey S. Luzhnov, National Research University “Higher School of Economics”; Lyceum of the National Research University “Higher School of Economics”; Department of Talent Development of Schoolchildren, Center for Pedagogical Excellence, asluzhnov@edu.hse.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2024. Принята к публикации 15.03.2024

The paper was submitted 29.01.2024. Accepted for publication 15.03.2024