

ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
9
ВЫПУСК 4



МОСКВА
2024

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
Н34

Н34 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 9(4).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2024, 60 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., Кохирова Г.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, звездной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

© ИНАСАН, 2024
© Коллектив авторов, 2024

INASAN Science Reports. Vol 9(4). М.: Janus-K, 2024, 60 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, G.I. Kokhirova, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov,
L.I. Mashonkina, A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov.

Coordinating Editor Isakova P.B.
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, 2024
© Author team, 2024

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Института астрономии Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83927 от 16.09.2022

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 9 (4)**

Сдано в набор 16.12.2024. Подписано в печать 26.12.2024
Формат 60х90/8. Бумага офсетная.
Уч.-изд. п.л. 7,5. Физ. п.л. 7,5. Тираж 100. Заказ №6329

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

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



Наблюдательная программа по обнаружению транзитных экзопланет в рассеянных скоплениях

Тарасенков А.Н., Нароенков С.А., Наливкин М.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье обсуждается стратегия и методика поиска экзопланет в рассеянных скоплениях на роботизированных телескопах ИНАСАН транзитным методом. Из-за высокой звездной плотности и расположению вблизи плоскости Галактики рассеянные скопления не всегда могут успешно наблюдаться космической миссией TESS, однако могут быть легко исследованы на небольших наземных телескопах. В рамках нашей программы мы проводим фотометрический мониторинг избранных площадок в близких рассеянных скоплениях на роботизированном телескопе Astrosib RC500. В результате обработки планируется выявить звезды-кандидаты, демонстрирующие периодические вариации блеска, по форме и амплитуде соответствующие транзитам экзопланет. В случае обнаружения таких кандидатов будет развернута программа подтверждения путем фотометрических, спектроскопических и спекл-интерферометрических наблюдений на российских телескопах. Также в результате реализации программы будут исследованы уже известные переменные звезды наблюдаемых скоплений и обнаружены новые.

Поступила в редакцию 10.11.2024 г. Принята в печать 04.12.2024 г.

Ключевые слова: экзопланеты, фотометрия, рассеянные скопления

Observational program to detect transiting exoplanets in open clusters

Tarasenkov A.N., Naroenkov S.A., Nalivkin M.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In this paper we discuss the strategy and methodology of searching for exoplanets in open clusters on INASAN robotic telescopes using the transit method. Due to the high stellar density and location near the galactic plane, open clusters cannot always be successfully observed by the TESS space mission, but can be easily studied with small ground-based telescopes. As part of our program, we conduct photometric monitoring of selected fields in nearby open clusters on the Astrosib RC500 robotic telescope. As a result of processing, it is planned to identify candidate stars demonstrating periodic brightness variations, corresponding in shape and amplitude to exoplanet transits. If such candidates are found, a confirmation program will be launched by photometric, spectroscopic and speckle interferometric observations on Russian telescopes. Also, as a result of the program implementation, already known variable stars of the observed clusters will be studied and new ones will be discovered.

Received 10.11.2024. Accepted 04.12.2024.

Keywords: exoplanets, photometry, open clusters

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.001

1. Введение

Транзитный метод обнаружения экзопланет был предложен еще в 1952 году [1], и на данный момент является наиболее эффективным — с его помощью обнаружено большинство известных на данный момент экзопланет [2]. Данный метод основан на получении кривых блеска звезд с высокой точностью и обнаружении в них периодических вариаций блеска, по форме и амплитуде соответствующих транзитам экзопланет. Впервые транзиты экзопланеты выявлены в 1999 году у звезды HD 209458 [3, 4]. На основе данного метода работали такие выдающиеся проекты по поиску экзопланет, как WASP [5], KELT [6], космическая миссия Kepler [7]. В настоящее время на орбите работает космический аппарат TESS [8], осуществляющий обзор практически всего неба с целью поиска экзопланет транзитным методом. В России существовал Коуровский обзор фотометрического поиска экзопланет [9], а сейчас запущен обзор на роботизированных телескопах САО РАН для поиска экзопланет методом фотометрии транзитов [10, 11].

Эффективность транзитного метода тем выше, чем плотнее наблюдаемое поле. Однако обзор миссии TESS не охватывает плотные поля вблизи центра Галактики, поскольку его приемники имеют пиксели большого углового размера, и в плотных полях он неэффективен. Поэтому для обзора плотных звездных полей применяются наземные инструменты небольшого размера.

В данной работе мы проводим обзор близких рассеянных скоплений с целью поиска экзопланет. Данная стратегия имеет ряд преимуществ:

- 1) Рассеянные скопления имеют высокую концентрацию звезд, что повышает шансы обнаружения экзопланет.
- 2) Звезды скопления находятся на приблизительно одинаковых расстояниях от Солнца, поэтому звезды-цели обзора, потенциально обладающие экзопланетами (карлики спектральных классов K-F), имеют малый разброс по видимым величинам, что позволяет подобрать экспозицию так, чтобы наиболее яркие звезды

не оказались перекоплены, а самые слабые имели достаточно высокий SNR для детектирования планетных транзитов.

3) Рассеянные скопления достаточно молодые объекты, и их звезды имеют высокую металличность, что повышает вероятность наличия вокруг них экзопланет.

4) Параметры звезд в рассеянном скоплении определены точнее, чем одиночных, поскольку существует большое количество методов комплексной оценки астрофизических свойств членов скопления.

5) Наблюдение рассеянного скопления в течение длительного времени позволяет не только исследовать уже известные переменные звезды скопления и обнаружить новые, но и уточнить ряд параметров скопления.

6) Рассеянные скопления могут иметь небольшие угловые размеры и попадать в поле телескопа целиком, что дает возможность не делить их на несколько площадок и уменьшить затраченное наблюдательное время, при том же числе измерений для каждой звезды.

Наблюдения рассеянных скоплений с целью поиска экзопланет ведутся уже около 20 лет. Одной из первых подобных программ был обзор EXPLORE [12], в рамках которого были исследованы скопления NGC 2660 и NGC 6208 [13], однако первая экзопланета в рассеянном скоплении была обнаружена методом лучевых скоростей у звезды Epsilon Tau [14]. Среди наиболее успешных проектов по поиску и исследованию экзопланет в рассеянных скоплениях стоит отметить международный проект YETI [15, 16, 17, 18], в котором были задействованы телескопы по всему миру. В рамках этого проекта исследовались скопления Trumpler 37 [19], NGC 7243 [20] и IC 348 [21]. Среди космических обзоров рассеянных скоплений стоит отметить ZEIT, основанный на данных миссии K2 [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34]. В настоящее время экзопланеты в рассеянных скоплениях обнаруживаются и исследуются на основе данных космических миссий Kepler [35, 36] и TESS [37, 38, 39, 40]. Но стоит отметить, что космические обзоры не являются всенебесными — на небе есть области, не охваченные их наблюдениями. В рамках нашего наблюдательного проекта мы исследуем как раз скопления, расположенные в подобных областях.

2. Оборудование

С 2014 года в ИНАСАН создается сеть многозадачных роботизированных телескопов [41, 42]. Данные инструменты способны работать в дистанционном и роботизированном режимах, проводя фотометрические наблюдения объектов, включенных в программу, а так-же наблюдения транзитов. Специальное программное обеспечение позволяет автоматически управлять всеми системами (приемником излучения, колесом фильтров, монтировкой, фокусировочным узлом и куполом) и отслеживать погодные условия, прекращая выполнение плана наблюдений при ухудшении погоды.

В качестве основного инструмента для настоящего исследования используется 50-см телескоп Астро-сиб RC500, установленный на новой обсерватории ИНАСАН на плато Шатджатмаз под Кисловодском [43]. Телескоп оборудован sCMOS-кемерой ZWO ASI6200MM Pro с колесом фильтров UBVRi системы Джонсона-Бесселя. Использование камеры с мертвым временем менее 1 секунды позволяет увеличить точность фотометрии за счет повышения скважности наблюдательного ряда. Для 120-секундных экспозиций предельная звездная величина в фильтре V равна 20.2^m при SNR=5, для звезд 16^m стандартное отклонение измерений составляет около 1 процента потока, что позволяет детектировать наиболее глубокие транзиты. Зависимость стандартного отклонения от звездной величины для одного из наблюдаемых нами полей представлена на рис. 1.

Для подтверждения обнаруженных кандидатов в транзитные экзопланеты мы планируем использовать другие роботизированные телескопы ИНАСАН: на Звенигородской обсерватории [41], на обсерватории Пик Терскол [42], Российско-кубинский телескоп [44], а так-же новые фотометрические телескопы, находящиеся в разработке, в том числе четырехканальный фотометрический кластер [45], способный обеспечить измерение глубины транзита параллельно в четырех разных фотометрических полосах и отбросить затмения в некоторых двойных звездных системах, которые, в отличие от экзопланетных транзитов не являются ахроматичными.

3. Выбор площадок и методика проведения обзора

Для отбора рассеянных скоплений для наблюдательной программы мы исследовали базу данных WEBDA [46, 47], в которой агрегированы параметры большинства известных звездных скоплений. Мы отбирали скопления по следующим критериям:

1) Близость к Солнцу: расстояние до рассеянного скопления должно быть таким, чтобы звезды главной последовательности спектрального класса G-F были достаточно ярки, чтобы достигнуть необходимой для детектирования транзитов точности. Для подсчета экспозиций использовался специальный калькулятор, который обеспечивал, чтобы эти звезды не были перекоплены для наиболее близких скоплений, и при этом слабые красные карлики имели бы максимально высокое отношение сигнала к шуму, чтобы иметь возможность обнаружить транзиты и у них.

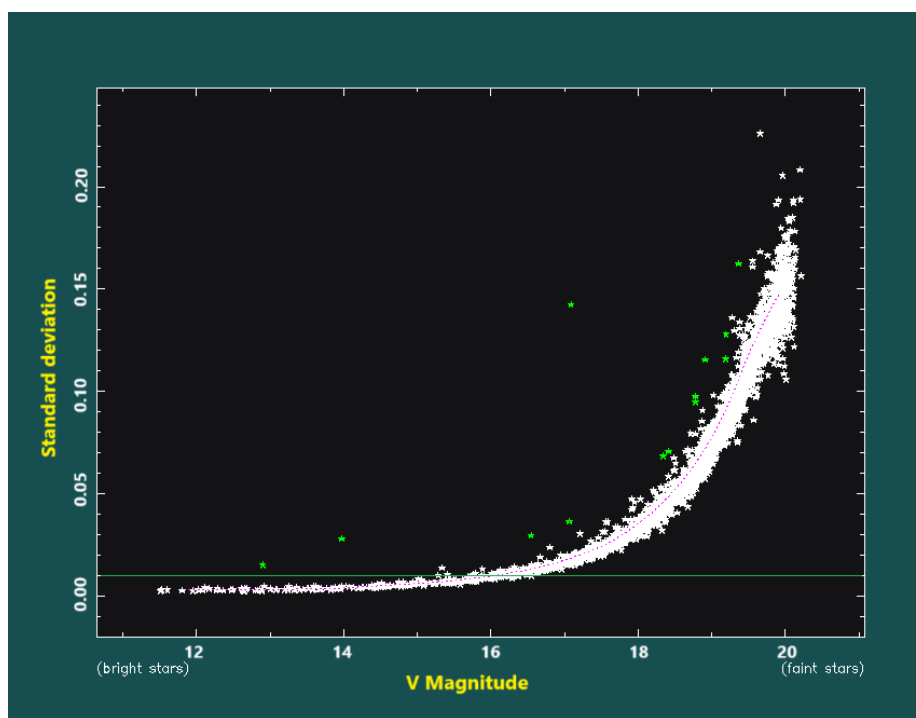


Рис. 1: Зависимость стандартного отклонения от звездной величины в полосе V для площадки в рассеянном скоплении Stock 2, снятой с экспозиций 120 секунд.

2) Плотность звезд: наиболее заселенные площадки получают больший приоритет, поскольку вероятность обнаружения экзопланет в них выше.

3) Координаты: исследуемые скопления должны иметь достаточно большое склонение, чтобы наблюдаться на высоте более 30 градусов несколько часов. Это позволяет избежать искажений и ошибок, возникающих при наблюдении объектов на больших воздушных массах (размытие, поглощение и покраснение) и ухудшающих точность фотометрии.

4) Исследуемые площадки должны находиться в зонах вблизи центральной области Галактики, не охваченных наблюдениями миссии TESS, или количество наблюдений TESS должно быть невелико.

Обзор площадки производится по следующему алгоритму: наблюдения начинаются, как только закончатся навигационные сумерки или наблюдаемая площадка достигнет высоты 30 градусов, и продолжаются до наступления утренних навигационных сумерек или уменьшения высоты площадки до 30 градусов. Наблюдения могут прерываться в случае необходимости наблюдать высокоприоритетные или алертные объекты.

4. Обработка наблюдательных данных

После стандартной калибровки (bias, dark, плоское поле) все полученные кадры обрабатываются программой VaST [48], которая использует ряд алгоритмов для выявления фотометрической переменности. Обнаруженные в результате обработки переменные звезды проверяются по базам ОКПЗ [49] и VSX [50] с целью определить, являются ли они уже известными или новооткрытыми. Для подтверждения ранее неизвестных переменных звезд помимо фотометрии, полученной в рамках наблюдательной кампании, может использоваться фотометрия ZTF [51], извлеченная с помощью WEB-инструмента SNAD [52].

Дальнейшая обработка проводится с помощью программы *Astrokit* [53], созданной специально для выделения транзитов экзопланет. Поиск и валидация обнаруженных транзитов производится с помощью пакета TLS [54]. Звезды, демонстрирующие периодические изменения блеска, по амплитуде, форме и длительности соответствующие транзитам экзопланет отмечаются как кандидаты. Для их подтверждения разворачивается наблюдательная программа: проводится мониторинг на малых телескопах ИНАСАН параллельно в нескольких фотометрических полосах, чтобы проверить повторяемость события по рассчитанным эфемеридам и исключить затменные переменные звезды, затмения которых не ахроматичны. После проверки методами прецизионной фотометрии проводится спектроскопия высокого разрешения с целью измерения масс планет и спекл-поляризметрические наблюдения с целью отделить возможную контаминацию близкими звездами фона, не разрешаемыми при фотометрических наблюдениях.

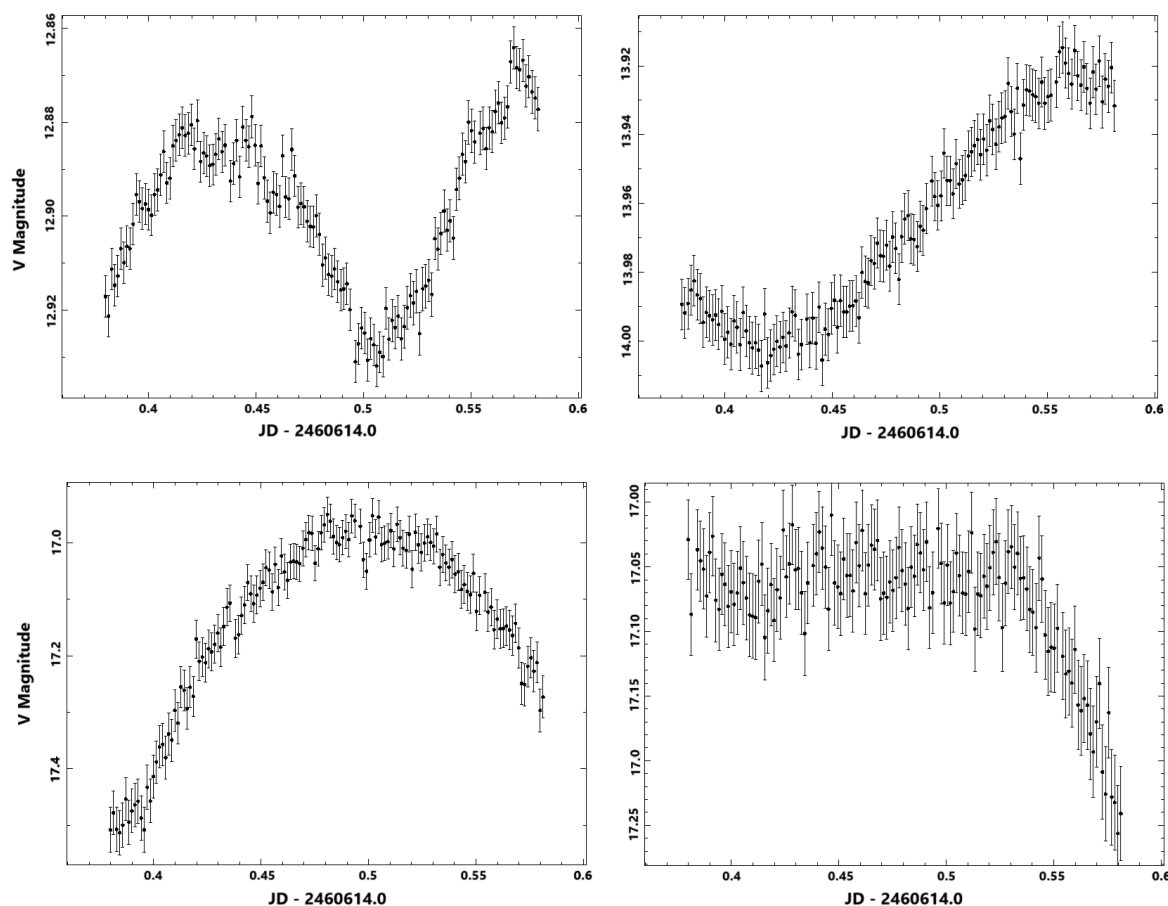


Рис. 2: Кривые блеска в полосе V (за одну ночь) переменных звезд, обнаруженных в рассеянном скоплении Stock 2.

5. Первые результаты и оценки эффективности

В тестовом режиме мы провели наблюдения двух рассеянных скоплений — Collinder 359 и Stock 2. Наблюдения проводились в полосе V с экспозицией 120 секунд. Площадка в скоплении Collinder 359 наблюдалась в течение 12 ночей, Stock 2 — в течение 22 ночей. Проведена первичная обработка кадров с помощью программы VaST. Результаты анализа показали, что переменные звезды слабее 17^m и амплитудой менее 0.05^m уверенно детектируются. Кривые блеска некоторых из них показаны на рис. 2.

Учитывая, что используемые нами телескопы могут обеспечить детектирование транзита крупной экзопланеты у звезд слабее 16^m , подходящие для наблюдений в рамках нашей программы скопления будут лежать на расстоянии менее 2 кпк от Солнца. В базе данных WEBDA содержится около 900 скоплений, удовлетворяющих данному критерию. Учитывая вероятность наличия крупных планет в транзитной конфигурации, можно предположить, что для детектирования могут быть доступны несколько тысяч экзопланет.

6. Заключение

В работе представлена концепция обзора рассеянных звездных скоплений с целью обнаружения транзитных экзопланет с помощью роботизированных телескопов ИНАСАН. Предполагается наблюдать площадки в скоплениях, не попавших в поле обзора TESS, или наблюдавшиеся этой космической миссией в течение недостаточного для полноценного анализа время. Анализ возможностей телескопа Астробит RC500, используемого в качестве главного инструмента для проведения обзора, показал, что у звезд ярче 16^m возможно обнаружить транзит крупных экзопланет (типа «горячий юпитер»). Были проведены тестовые наблюдения и протестированы алгоритмы обработки кадров и поиска кандидатов в транзитные экзопланеты. Предполагается, что кроме обнаружения экзопланет данный обзор позволит открыть большое количество новых переменных звезд, детально исследовать уже известные, и уточнить параметры наблюдаемых скоплений.

Список литературы

1. O. Struve, *The Observatory*, **72**, 199, 1952.
2. M. Kaushik, A. Mattoo, and R. Rastogi, *arXiv e-prints*, arXiv:2404.09143, 2024.
3. D. Charbonneau, T. M. Brown, D. W. Latham, and M. Mayor, *ApJL*, **529**, L45, 2000.
4. G. W. Henry, G. W. Marcy, R. P. Butler, and S. S. Vogt, *ApJL*, **529**, L41, 2000.
5. D. L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, D. J. Christian, et al., *PASP*, **118**, 1407, 2006.
6. J. Pepper, R. W. Pogge, D. L. DePoy, J. L. Marshall, et al., *PASP*, **119**, 923, 2007.
7. W. J. Borucki, D. Koch, G. Basri, N. Batalha, et al., *Science*, **327**, 977, 2010.
8. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, et al., *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **1**, 014003, 2015.
9. A. Y. Burdanov, P. Benni, V. V. Krushinsky, A. A. Popov, et al., *MNRAS*, **461**, 3854, 2016.
10. O. Y. Yakovlev, A. F. Valeev, G. G. Valyavin, A. V. Tavrov, et al., *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, **9**, 903429, 2022.
11. O. Y. Yakovlev, A. F. Valeev, G. G. Valyavin, A. V. Tavrov, et al., *Astrophysical Bulletin*, **78**, 79, 2023.
12. G. Mallén-Ornelas, S. Seager, H. K. C. Yee, D. Minniti, M. D. Gladders, G. M. Mallén-Fullerton, and T. M. Brown, *ApJ*, **582**, 1123, 2003.
13. K. von Braun, B. L. Lee, S. Seager, H. K. C. Yee, G. Mallén-Ornelas, and M. D. Gladders, *PASP*, **117**, 141, 2005.
14. B. Sato, H. Izumiura, E. Toyota, E. Kambe, et al., *ApJ*, **661**, 527, 2007.
15. R. Neuhauser, R. Errmann, A. Berndt, G. Maciejewski, et al., *Astronomische Nachrichten*, **332**, 547, 2011.
16. D. Dimitrov, R. Neuhauser, D. Kjurkchieva, and YETI Team, *Bulgarian Astronomical Journal*, **17**, 22, 2011.
17. R. Errmann, S. Raetz, M. Kitze, R. Neuhauser, and YETI Team, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **43**, 513, 2014.
18. M. Mugrauer, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **49**, 330, 2019.
19. R. Errmann, R. Neuhauser, L. Marschall, G. Torres, et al., *Astronomische Nachrichten*, **334**, 673, 2013.
20. Z. Garai, T. Pribulla, Ľ. Hambálek, R. Errmann, et al., *Astronomische Nachrichten*, **337**, 261, 2016.
21. D. J. Fritzewski, M. Kitze, M. Mugrauer, R. Neuhauser, et al., *MNRAS*, **462**, 2396, 2016.
22. A. W. Mann, E. Gaidos, G. N. Mace, M. C. Johnson, et al., *ApJ*, **818**, 46, 2016.
23. E. Gaidos, A. W. Mann, A. Rizzuto, L. Nofi, et al., *MNRAS*, **464**, 850, 2017.
24. A. W. Mann, E. R. Newton, A. C. Rizzuto, J. Irwin, et al., *AJ*, **152**, 61, 2016.
25. A. W. Mann, E. Gaidos, A. Vanderburg, A. C. Rizzuto, et al., *AJ*, **153**, 64, 2017.
26. A. C. Rizzuto, A. W. Mann, A. Vanderburg, A. L. Kraus, and K. R. Covey, *AJ*, **154**, 224, 2017.
27. A. W. Mann, A. Vanderburg, A. C. Rizzuto, A. L. Kraus, et al., *AJ*, **155**, 4, 2018.
28. A. Vanderburg, A. W. Mann, A. Rizzuto, A. Bieryla, et al., *AJ*, **156**, 46, 2018.
29. A. C. Rizzuto, A. Vanderburg, A. W. Mann, A. L. Kraus, C. D. Dressing, M. A. Agüeros, S. T. Douglas, and D. M. Krolkowski, *AJ*, **156**, 195, 2018.
30. P. C. Thao, A. W. Mann, M. C. Johnson, E. R. Newton, et al., *AJ*, **159**, 32, 2020.
31. E. Gaidos, T. Hirano, A. W. Mann, D. A. Owens, et al., *MNRAS*, **495**, 650, 2020.
32. E. Gaidos, T. Hirano, D. J. Wilson, K. France, et al., *MNRAS*, **498**, L119, 2020.
33. E. Gaidos, T. Hirano, A. L. Kraus, M. Kuzuhara, et al., *MNRAS*, **512**, 583, 2022.
34. E. Gaidos, T. Hirano, C. Beichman, J. Livingston, et al., *MNRAS*, **509**, 2969, 2022.
35. J. L. Curtis, A. Vanderburg, G. Torres, A. L. Kraus, et al., *AJ*, **155**, 173, 2018.
36. L. G. Bouma, R. Kerr, J. L. Curtis, H. Isaacson, et al., *AJ*, **164**, 215, 2022.
37. L. G. Bouma, J. D. Hartman, W. Bhatti, J. N. Winn, and G. Á. Bakos, *ApJS*, **245**, 13, 2019.
38. L. G. Bouma, J. D. Hartman, R. Brahm, P. Evans, et al., *AJ*, **160**, 239, 2020.
39. Q. Sun, S. Xuesong Wang, T. Gan, and A. W. Mann, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **22**, 075008, 2022.
40. Y. Fang, B. Ma, C. Chen, and Y. Wen, *Universe*, **9**, 192, 2023.
41. S. A. Naroenkov and M. A. Nalivkin, in B. M. Shustov and D. S. Wiebe, eds., *Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary*, 339–344 (2018).
42. S. A. Naroenkov and M. A. Nalivkin, *INASAN Science Reports*, **3**, 87, 2019.
43. S. A. Naroenkov, A. N. Tarasenko, and M. A. Nalivkin, *INASAN Science Reports*, **9**, 6, 2024.
44. D. V. Bisikalo, M. E. Sachkov, M. A. Ibrahimov, I. S. Savanov, et al., *Astronomy Reports*, **66**, 38, 2022.
45. M. A. Ibrahimov, M. A. Nalivkin, A. S. Shugarov, D. V. Bisikalo, and S. A. Ehgamberdiev, *INASAN Science Reports*, **8**, 195, 2023.
46. J. C. Merrelliod and E. Paunzen, *A&A*, **410**, 511, 2003.
47. E. Paunzen, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **38**, 435, 2008.
48. K. V. Sokolovsky and A. A. Lebedev, *Astronomy and Computing*, **22**, 28, 2018.
49. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astronomy Reports*, **61**, 80, 2017.
50. C. L. Watson, A. A. Henden, and A. Price, *Society for Astronomical Sciences Annual Symposium*, **25**, 47, 2006.
51. E. C. Bellm, S. R. Kulkarni, M. J. Graham, R. Dekany, et al., *PASP*, **131**, 018002, 2019.
52. K. Malanchev, M. V. Kornilov, M. V. Pruzhinskaya, E. E. O. Ishida, et al., *PASP*, **135**, 024503, 2023.
53. A. Y. Burdanov, V. V. Krushinsky, and A. A. Popov, *Astrophysical Bulletin*, **69**, 368, 2014.
54. M. Hippke and R. Heller, *A&A*, **623**, A39, 2019.

Исследование рядов положения геоцентра, полученных в результате обработки измерений DORIS RINEX

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе проведен гармонический анализ недельных рядов положения геоцентра, полученных в результате обработки DORIS измерений формата RINEX. Гармонический анализ недельных колебаний рядов геоцентра для объединенных решений, включающих шесть спутниковых миссий (спутники Cryosat2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a) проводился на интервале 2022.0–2024.5 гг. Спектральный анализ осцилляций геоцентра выполнен с помощью программного пакета, написанного автором статьи. В результате линейного регрессионного анализа оценивались смещение, тренд, амплитуды и фазы годовых и полугодовых гармоник положения геоцентра, которые присутствуют в объединенных спутниковых решениях. Оцененные амплитуды годовых компонентов положения геоцентра для объединенного решения имеют значения 2.8 мм, 3.6 мм и 7.2 мм для компонентов X, Y и Z, соответственно. Амплитуды полугодовых гармоник объединенного решения равны 1.6 мм, 4.4 мм и 2.6 мм для X, Y и Z компонентов, соответственно.

Поступила в редакцию 18.09.2024 г. Принята в печать 27.11.2024 г.

Ключевые слова: система DORIS, формат DORIS RINEX, положение геоцентра

Study of geocenter position series obtained as a result of DORIS RINEX measurements processing

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The paper presents a harmonic analysis of weekly series of geocenter position obtained by processing of DORIS RINEX measurements. A harmonic analysis of weekly oscillations of the geocenter series was performed for a combined solutions including six satellite missions (Cryosat2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b and Sentinel6a satellites) over the interval of 2022.0–2024.5. The harmonic analysis of geocenter oscillations was carried out using a software package written by the author of the paper. As a result of the linear regression analysis, the offset, trend, amplitudes and phases of the annual and semi-annual harmonics of the geocenter position, which are present in a combined solutions, were estimated. The estimated amplitudes of the annual components of the geocenter position for the combined solution have values of 2.8 mm, 3.6 mm and 7.2 mm for the components X, Y and Z, respectively. The amplitudes of the semi-annual harmonics of the combined solution are 1.6 mm, 4.4 mm and 2.6 mm for the X, Y and Z components, respectively.

Received 18.09.2024. Accepted 27.11.2024.

Keywords: DORIS system, DORIS RINEX format, geocenter position

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.002

1. Введение

Под геоцентром понимают центр масс планеты Земля, включая ее твердотельную, океаническую и атмосферную оболочки [1]. Теоретически положение геоцентра является хорошо определенным, но практически представляется труднодоступным. В практической геодезии геоцентр определяется посредством координат глобальной сети закрепленных на поверхности Земли станций. Поэтому реально геоцентр представляет собой центр многогранника, в вершинах которого расположены станции наблюдения. Теоретически определенное положение геоцентра и его практическая реализация не совпадают между собой. Движение центра масс нашей планеты относительно центра фигуры, образованной станциями наблюдения, называется положением геоцентра. Трехмерный вектор положения геоцентра варьируется в пределах нескольких миллиметров, что является значимой величиной при современных точностях космической геодезии, и должен учитываться при обработке измерений различных технологий спутниковой геодезии.

Центр анализа DORIS-измерений ИНАСАН (Институт Астрономии Российской Академии Наук) выполнял оценку смещений геоцентра, используя измерения системы DORIS «старого» формата (формат doris2.2). Для обработки DORIS-данных использовался и используется программный пакет GIPSY-OASIS II (Jet Propulsion Laboratory, JPL, США). Результаты анализа положения геоцентра DORIS-измерений формата doris2.2 приведены в работах [2, 3]. Начиная с запуска спутника Jason2 (2008 г.), все последующие миссии оборудованы приемниками нового поколения типа DGXX, позволяющими производить кодовые и фазовые измерения, подобно измерениям глобальных навигационных спутниковых систем, которые можно выразить в общепринятом формате RINEX (Receiver INdependent EXchange format) [4, 5]. К сожалению, используемая версия программы GIPSY-OASIS II не позволяет обрабатывать DORIS измерения, выраженные

в формате RINEX. Для осуществления возможности обработки DORIS-измерений формата RINEX группой космической геодезии ИНАСАН была реализована методика обработки RINEX-измерений [6], которая используется по настоящее время. Целью данной работы является исследование положения геоцентра для измерений нового формата DORIS-данных (формата RINEX) для объединенного спутникового решения.

2. Методика обработки данных

Для исследования положения геоцентра были обработаны RINEX-данные системы DORIS, выполняемые шестью действующими спутниковыми миссиями (Cryosat2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a). Интервал обработки для каждой отдельной спутниковой миссии составляет почти 2.5-годовой промежуток времени 2022.0–2024.5 гг. Предварительная обработка отдельных спутниковых проектов необходима для оценки орбитальных параметров миссий и выявления проблемных результатов, которые могут возникнуть в результате обработки (маневры спутников, отсутствие измерений и других причин). Затем были получены объединенные спутниковые решения (совместная обработка спутников Cryosat2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a) на интервале 2022.0–2024.5 гг. Измерения отдельных спутников проекта DORIS хранятся в виде суточных файлов формата RINEX и скачивались с сайта <https://cddis.nasa.gov>.

Обработка измерений осуществлялась с помощью программного пакета GIPSY-OASIS II (version 6.4). Следует отметить, что программный пакет GIPSY-OASIS II не способен обрабатывать данные формата RINEX. Для осуществления возможности обработки измерений формата RINEX был разработан отдельный модуль их обработки [7]. Методика обработки DORIS-данных состояла в последовательной обработке суточных измерений для каждого спутника. На ежедневной основе оценивались координаты станций, координаты спутников, параметры вращения Земли и ряд других параметров. Суточные решения объединялись в недельные решения, проектировались (удалялись неопределенности, связанные со свободно определенной системой координат) и трансформировались в «хорошо» определенную систему координат (обычно в систему ITRF (International Terrestrial Reference Frame)) [8]. При операции трансформирования оценивались семь параметров трансформации Хельмерта. Три параметра переноса данного преобразования и являются компонентами пространственного вектора положения геоцентра.

В качестве основных моделей (параметров) обработки использовались:

- 1) модель гравитационного поля Земли — `goco02s.fit2.all`;
- 2) угол отсечки измерений — 10 градусов;
- 3) учет тропосферной задержки распространения сигнала — модель GMF (Global Mapping Function);
- 4) использование кватернионов (только для спутника Jason3; следует отметить, что кватернионы существуют не для всех спутников);
- 5) применение коррекций для фазовых центров спутниковых и наземных антенн;
- 6) ионосферная коррекция измерений;
- 7) модель учета неприливных изменений потенциала Земли за счет перераспределения атмосферных и океанических масс (модель AOD1B RL06);
- 8) действующие макромодели вышеуказанных спутников;
- 9) априорные значения координат и скоростей станций — DPOD2020 (version 015) (Doris Precise Orbit Determination 2020).

3. Анализ результатов обработки

По вышеприведенной методике были обработаны RINEX-измерения системы DORIS для шести указанных спутников и объединенного решения. На рисунке 1 приведены полученные компоненты (ряды) положения геоцентра для объединенного спутникового решения с выделенными годовыми и полугодовыми составляющими.

Для гармонического анализа временных последовательностей вариаций геоцентра автором статьи была написана программа `Period`, позволяющая определять параметры годовых и полугодовых гармоник положения геоцентра, если таковые присутствуют в рядах геоцентра. В качестве параметров оценивались амплитуды и фазы гармонических составляющих совместно с трендом и постоянным смещением. Ряды осцилляций геоцентра аппроксимировались функцией

$$S(t) = a_0 + b_0(t - t_0) + \sum_{i=1}^2 A_{0_i} \sin(2\pi(t - t_0)/T_i + \varphi_{0_i}),$$

где a_0 — смещение; b_0 — тренд; A_{0_i} — амплитуда i -определяемого периода; T_i — i -период сигнала; φ_{0_i} — начальная фаза i -определяемого периода; t — время; t_0 — произвольно выбранное начальное время (мы брали t_0 1 января).

По приведенной формуле оценивались параметры аппроксимации для годовой и полугодовой составляющих вариаций геоцентра. Предшествующие исследования [3] показывают, что данные компоненты являются

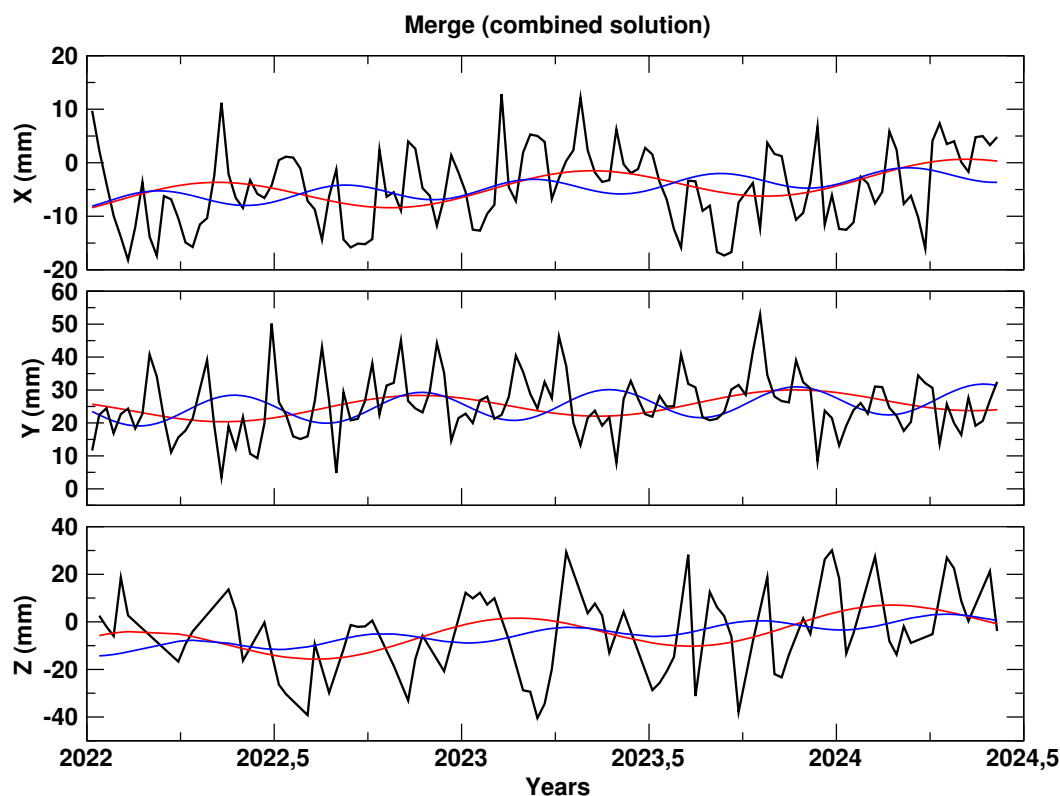


Рис. 1: Временные ряды компонентов положения геоцентра для объединенного спутникового решения. Красной и синей линиями показаны выделенные годовые и полугодовые компоненты положения геоцентра, соответственно.

наиболее значимыми с точки зрения величины амплитуды и переносимой мощности, по сравнению с другими периодическими составляющими. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1: Амплитуды и фазы годовых и полугодовых компонентов положения геоцентра для объединенного спутникового решения.

Решение	Интервал	Компонент	Годовой период		Полугодовой период	
			Ампл.(мм)	Фаза(град.)	Ампл.(мм)	Фаза(град.)
Merge (объединенное решение)	2022.0-2024.5	X	2.8 ± 1.0	79.5 ± 14.1	1.6 ± 0.8	174.5 ± 34.5
		Y	3.6 ± 1.5	242.2 ± 7.8	4.4 ± 1.5	24.2 ± 8.0
		Z	7.2 ± 0.1	151.5 ± 26.2	2.6 ± 1.8	105.8 ± 66.6

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что оцененные амплитуды годовых компонентов положения геоцентра для объединенного решения равны 2.8 мм, 3.6 мм и 7.2 мм для компонентов X, Y и Z, соответственно. Оцененные фазы годовых компонентов равны 79.5 градусов, 242.2 градуса и 151.5 градусов для X, Y и Z компонентов, соответственно. Амплитуды полугодовых гармоник оцениваются величинами 1.6 мм, 4.4 мм и 2.6 мм для X, Y и Z компонентов, соответственно. Фазы полугодовых гармоник оцениваются величинами 174.5 градусов, 24.2 градуса и 105.8 градусов для X, Y и Z компонентов, соответственно. Полугодовые амплитуды имеют меньшие значения, чем годовые амплитуды для X и Z компонентов. Амплитуды Y компонента для годовых и полугодовых составляющих положения геоцентра имеют величины одного порядка.

4. Заключение

В работе приведены результаты гармонического анализа недельных рядов положения геоцентра, полученные в результате обработки DORIS измерений формата RINEX. Временные ряды положения геоцентра были получены путем совместной обработки DORIS RINEX измерений шести действующих спутниковых миссий (спутники Cryosat2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a) на временном интервале 2022.0–2024.5

гг. Выполнен гармонический анализ недельных колебаний рядов геоцентра для объединенных решений, включающих шесть вышеуказанных спутниковых проектов на интервале 2022.0–2024.5 гг. Гармонический анализ осцилляций геоцентра проводился с помощью программного пакета, написанного автором статьи. В результате линейного регрессионного анализа оценивались смещение, тренд, амплитуды и фазы годовых и полугодовых гармоник положения геоцентра, которые присутствуют в объединенном спутниковом решении. Оцененные амплитуды годовых компонентов положения геоцентра для объединенного решения имеют значения 2.8 мм, 3.6 мм и 7.2 мм для компонентов X, Y и Z, соответственно. Фазы годовых компонентов равны 79.5 градусов, 242.2 градуса и 151.5 градусов для X, Y и Z компонентов, соответственно. Амплитуды полугодовых гармоник оцениваются величинами 1.6 мм, 4.4 мм и 2.6 мм для X, Y и Z компонентов, соответственно. Фазы полугодовых гармоник имеют значения 174.5 градусов, 24.2 градуса и 105.8 градусов для X, Y и Z компонентов, соответственно. Следует отметить, что исследуемые ряды имеют относительно короткий промежуток времени — 2.5 года. Получение более длительных рядов положения геоцентра позволит получить более надежные оценки спектрального состава рядов. Работы в этом направлении будут продолжены.

Список литературы

1. G. Petit and B. Luzum, *IERS Technical Note*, **36**, 179, 2010.
2. S. P. Kuzin, S. K. Tatevian, S. G. Valeev, and V. A. Fashutdinova, *Advances in Space Research*, **46**, 1292, 2010.
3. S. Kuzin and S. Tatevian, *Advances in Space Research*, **58**, 2561, 2016.
4. W. Gurtner, *GPS World*, **5**, 48, 1994.
5. F. Mercier, L. Cerri, and J.-P. Berthias, *Advances in Space Research*, **45**, 1441, 2010.
6. S. Kuzin, *INASAN Science Reports*, **4**, 99, 2019.
7. S. Kuzin, *INASAN Science Reports*, **7**, 237, 2022.
8. Z. Altamimi, P. Rebischung, X. Collilieux, K. Metivier, and L. Chanard, *Journal of Geodesy*, **97**, 47, 2023.

Уникальный метеоритообразующий рой внутри орбиты Земли

Терентьева А.К.¹, Леонов В.А.^{1,2}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²ВИНИТИ РАН, Москва, Россия

Выявлен уникальный болидный рой π -Леонид с орбитой, находящейся целиком внутри орбиты Земли. Он имеет астероидное происхождение и, по всей видимости, обладает начальной (доатмосферной) массой более 4 тонн. Кроме того, среди астероидов НЕО (околоземные объекты) найдено четыре астероида группы Атона с орбитами, также расположенными внутри орбиты Земли, составляющих единую астероидную ассоциацию, связанную с болидным роем π -Леонид. Изучение полученных орбитальных характеристик позволяет с достаточной степенью вероятности заключить, что все эти тела представляют собой группу связанных между собой объектов. Это, в свою очередь, приводит к выводу, что метеоритообразующие рои или отдельные метеоритообразующие тела могут быть результатом дробления этих близких к Земле астероидов или иметь с ними общее происхождение.

Поступила в редакцию 18.10.2024 г. Принята в печать 11.11.2024 г.

Ключевые слова: болидный рой, метеоритообразующее тело, астероид, орбита

A unique meteorite-forming stream inside the Earth's orbit

Terentjeva A.K.¹, Leonov V.A.^{1,2}

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²VINITI of the RAS, Moscow, Russia

A unique π -Leonid bolide swarm with an orbit located entirely inside the Earth's orbit has been identified. It has an asteroid origin and, most likely, has an initial (pre-atmospheric) mass in excess of 4 tons. In addition, among the NEA asteroids (near-Earth objects), 4 asteroids of the Aton group were found with orbits also located inside the Earth's orbit, and forming a single asteroid association related to the π -Leonid bolide swarm. The study of the obtained orbital characteristics allows us to conclude with a sufficient degree of probability that all these bodies represent a group of probably interconnected objects. This, in turn, leads to the conclusion that meteorite-forming swarms or individual meteorite-forming bodies may be the result of fragmentation of these asteroids nearby to Earth or may have a common origin with them.

Received 18.10.2024. Accepted 11.11.2024.

Keywords: fireball stream, meteorite-forming body, asteroid, orbit

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.003

1. Введение

О том, что ближайшие к Земле астероиды могут быть источником метеоритообразующих тел, известно давно [1]. Данная работа является продолжением ряда наших исследований в этом направлении [2, 3].

2. Результаты исследования

Среди 78 болидных роев каталога Fireball Streams [4] найден уникальный болидный рой π -Леонид (см. табл. 1). Его орбита целиком лежит внутри орбиты Земли. Динамический параметр Тиссерана (возмущающая планета — Юпитер) [5] $T_j = 7.60$, т.е. рой имеет астероидное происхождение. Кроме того, с этим болидным роем может быть связано довольно крупное метеоритообразующее тело (см. табл. 1) [6], которое имело начальную (доатмосферную) массу более 4 тонн. Динамический параметр Тиссерана для него $T_j = 7.95$, т.е. оно также астероидного происхождения. Значение известного критерия Саутворта-Хокинса D_{SH} [7], вычисленное для данного метеоритообразующего тела и болидного роя π -Леонид, составляет 0.17. Таким образом, с достаточной степенью вероятности можно полагать, что два этих объекта связаны между собой и болидный рой π -Леонид является метеоритообразующим. Хотя таковым он может быть и сам по себе, т.к. имеет астероидное происхождение и может содержать в себе крупные фракции.

Далее, в каталоге астероидов НЕО (околоземные объекты) [8] нами были найдены четыре астероида группы Атона, имеющие отношение к болидному рою π -Леонид и составляющие как бы единую астероидную ассоциацию. Элементы орбит этих астероидов приведены в табл. 2. Их орбиты расположены внутри орбиты Земли. Необходимо заметить следующее. Нами были просмотрены наиболее значительные из опубликованных каталогов орбит метеороидных роев: работы [9, 10, 11, 12] и др., а также известные каталоги 249 метеороидных роев А.К. Терентьевой [4]. Ни одного метеороидного роя, сходного с рассматриваемыми нами четырьмя астероидами группы Атона, не было найдено. Таким образом, существование таких роев, как π -Леониды, внутри орбиты Земли, это редкость, хотя существование отдельных метеоритообразующих тел в этой области Солнечной системы редкостью не является.

Таблица 1: Элементы орбит и другие параметры болидного роя π -Леонид и метеоритообразующего тела (J 1950). За 50 лет разница из-за прецессии составляет менее 1° , что не существенно.

Объект	Дата	Геоцентр. радиант		V_∞ , км/с	a , а.е.	e
		α , угл. гр.	δ , угл. гр.			
Болидный рой π -Леонид	25.10–06.11	146	+8	12.6	0.756	0.324
Метеорито- образ. тело	05.11.1966	166.4	–3.6	14.6	0.714	0.43
Объект	q , а.е.	ω , угл. гр.	Ω , угл. гр.	i , угл. гр.	π , угл. гр.	Источ- ники
Болидный рой π -Леонид	0.51	189	37.4	4	226.4	[4]
Метеорито- образ. тело	0.405	196.7	42	3.4	238.7	[6]

Таблица 2: Элементы орбит четырех астероидов группы Атона (J 2000). Эпоха 2460200.5 (13.09.2023) TDB.

Обозначение	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.
415713 (1998XX2)	0.74113	0.36764	0.46867	1.0136
(2001WF49)	0.75205	0.37076	0.47322	1.03088
524522 (2002VE68)	0.72364	0.41013	0.42686	1.02042
(2015WZ12)	0.72182	0.41248	0.42408	1.01955
Обозначение	ω , угл. гр.	Ω , угл. гр.	i , угл. гр.	π , угл. гр.
415713 (1998XX2)	153.0983	74.3823	6.9719	227.4805
(2001WF49)	358.4263	239.6321	17.9518	238.0584
524522 (2002VE68)	355.4059	231.4703	9.0365	226.8762
(2015WZ12)	346.3805	251.0577	3.6361	237.4382

Итак, мы имеем для исследования шесть объектов. Для каждой пары орбит из этих 6 объектов были вычислены значения критерия Саутворта-Хокинса D_{SH} (15 возможных вариантов). В табл. 3 приведены значения D_{SH} для тех пар орбит, у которых $D_{SH} \leq 0.21$.

Таблица 3: Значения критерия Саутворта-Хокинса D_{SH} для болидного роя π -Леонид, метеоритообразующего тела и четырех астероидов группы Атона.

Объекты	D_{SH}
Болидный рой — метеоритообразующее тело	0.17
Болидный рой — 1998XX2	0.10
Болидный рой — 2015WZ12	0.19
Метеоритообразующее тело — 1998XX2	0.14
Метеоритообразующее тело — 2015WZ12	0.12
1998XX2 — 2015WZ12	0.21
2015WZ12 — 2002VE68	0.13
2001WF49 — 2002VE68	0.19

Из табл. 3 видно, что орбиты болидного роя π -Леонид и метеоритообразующего тела хорошо согласуются между собой и с орбитами двух астероидов 1998XX2 и 2015WZ12, которые также согласуются между собой. Орбита астероида 2015WZ12 согласуется с орбитой 2002VE68, а последняя — с орбитой 2001WF49. В приведенной выше работе [7] авторы на примере исследования десятка больших метеороидных роев по-

казали, что близкие орбиты в рое дают значения критерия D_{SH} от 0 до 0.2. Более рассеянные рои имеют $D_{SH} = 0.21 \div 0.28$. Таким образом, в результате имеется группа из четырех вероятно взаимосвязанных объектов: π -Леониды, метеоритообразующее тело и два астероида 1998XX2 и 2015WZ12. Заметим, что эти два астероида представляют собой N и S ветви, аналогичные таковым в метеороидных роях (восходящие узлы Ω и аргументы перигелиев ω отличаются на $\pm 180^\circ$, тогда как долготы перигелиев π постоянны).

Далее мы обратились к одному из известных инвариантов — постоянной Тиссерана

$$C = \frac{1}{a} + \left(\frac{2}{a^{3/2}} \right) \sqrt{p} \cos i$$

(возмущающая планета — Юпитер) в ее классическом выражении [13, 14]. Эта постоянная Тиссерана эквивалентна постоянной интеграла Якоби в ограниченной задаче трех тел. Распределение по величине постоянной Тиссерана C было сделано нами для различных популяций малых тел [6]. В табл. 4 приведены значения постоянной Тиссерана C для всех шести объектов данной работы.

Таблица 4: Значения постоянной Тиссерана C для шести объектов из данной работы.

Объект	C
Болидный рой π -Леонид	1.46
Метеоритообразующее тело	1.53
Астероид 1998XX2	1.48
Астероид 2001WF49	1.46
Астероид 2015WZ12	1.52
Астероид 2002VE68	1.51

Из табл. 4 видно, что можно выделить две подгруппы по три объекта с почти равными значениями постоянной Тиссерана: болидный рой с двумя астероидами $C = 1.46 \div 1.48$ и метеоритообразующее тело с двумя астероидами $C = 1.51 \div 1.53$. Равенство констант Тиссерана C_1 и C_2 означает, что некогда данные тела могли двигаться по одной орбите. Если же смотреть в целом, то вся группа этих шести объектов имеет близкие значения C , и потому можно предположить, что они могут быть взаимосвязаны.

3. Заключение

1. Существование таких взаимосвязанных объектов с орбитами, находящимися внутри орбиты Земли, приводит к выводу, что метеоритообразующие рои или отдельные метеоритообразующие тела могут быть результатом дробления вышеуказанных астероидов. Таким образом, внутри земной орбиты может существовать постоянный источник образования метеоритообразующих тел. И так как среди них могут находиться достаточно крупные тела, они могут быть небезопасными при их встрече с Землей. Поэтому данная задача должна быть в центре внимания исследователей метеорных явлений и тех организаций, которые занимаются проблемой космических угроз.

2. С помощью метеорных патрулей по фото- и видеонаблюдениям необходимо выяснить, насколько активен и регулярен болидный рой π -Леонид.

Список литературы

1. J. Borovička, P. Spurný, and P. Brown, in P. Michel, F. E. DeMeo, and W. F. Bottke, eds., *Asteroids IV*, 257–280 (2015).
2. A. K. Terentjeva and E. S. Bakanas, *Solar System Research*, **55**, 379, 2021.
3. A. N. Terentjeva and S. I. Barabanov, *INASAN Science Reports*, **8**, 186, 2023.
4. A. K. Terentjeva, in C. I. Lagerkvist, H. Rickman, and B. A. Lindblad, eds., *Asteroids, Comets, Meteors III*, 579 (1990).
5. D. Jewitt, The Active Asteroids, Keck Observatory Archive LRIS U088LA, 2015.
6. A. K. Terentjeva, *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, **15**, 258, 1989.
7. R. B. Southworth and G. S. Hawkins, *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **7**, 261, 1963.
8. JPL's Solar System Dynamics (SSD) web-site. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/sb/neos.html/>.
9. B. A. Lindblad, in K. Y. Kondratyev, M. J. Rycroft, and C. Sagan, eds., *Space Research XI*, **13**, 287 (1971).
10. B. A. Lindblad, *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **12**, 14, 1971.
11. A. F. Cook, in C. L. Hemenway, P. M. Millman, and A. F. Cook, eds., *NASA Special Publication*, volume 319, 183 (1973).
12. P. Spurný, *Planetary and Space Science - PLANET SPACE SCI*, **45**, 541, 1997.
13. L. Kresak, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, **33**, 104, 1982.
14. H. Kosai, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **54**, 237, 1992.

Исследование взаимодействия планеты земной массы и планетезимального диска

Олейник О.С., Емельяненко В.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В настоящее время предполагается, что осколочные околозвездные диски являются результатом столкновения планетезималей, оставшихся после формирования планет. В результате таких столкновений рождается микронная пыль, наблюдаемая в осколочных дисках. Это возможно, если орбиты планетезималей возбуждены в достаточной степени. В данной работе предложен механизм возбуждения диска вследствие гравитационного взаимодействия планеты земной массы с внешним диском планетезималей. Установлено, что в результате этого взаимодействия планета может мигрировать внутрь диска. При этом планета несколько раз проходит через весь диск, меняя направление миграции при достижении границ диска. Под действием планетных возмущений эксцентриситеты и наклоны орбит планетезималей увеличиваются до значений, достаточных для того, чтобы столкновения планетезималей стали разрушительными и приводили к появлению пылевых структур.

Поступила в редакцию 04.11.2024 г. Принята в печать 30.11.2024 г.

Ключевые слова: миграция планет, протопланетные диски, взаимодействие планеты и диска

Study of the interaction between an Earth-mass planet and a planetesimal disk

Oleynik O.S., Emel'yanenko V.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

It is presently assumed that circumstellar debris disks are a result of collisions of planetesimals, which are leftovers of the planet formation. In such collisions, micron-sized dust forms, which is observed in debris disks. This is possible if planetesimal orbits are sufficiently excited. In this work we suggest a mechanism of the disk excitation due to the gravitational interaction of an Earth-mass planet with an outer planetesimal disk. It is shown that the planet can migrate to the inner part of the disk because of this interaction. In the process, the planet crosses the entire disk switching the migration direction upon reaching the disk borders. Under the action of planetary perturbations eccentricities and inclinations of planetesimal orbits increase up to values sufficient to make planetesimal collisions violent enough so that they lead to formation of dust structures.

Received 04.11.2024. Accepted 30.11.2024.

Keywords: planet migration, protoplanetary discs, planet-disk interaction

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.004

1. Введение

Осколочный диск (debris disk) — это этап жизни околозвездного диска, следующий после того, как основная часть его газовой составляющей рассеется. В настоящий момент известно более тысячи осколочных дисков [1]. Они видны за счет излучения пылевых частиц в инфракрасном (ИК) диапазоне в результате поглощения излучения звезды.

Пылевой компонент осколочного диска необходимо восполнять, поскольку время жизни наблюдаемой пыли меньше возраста системы звезда-диск [2, 3]. Основным механизмом восполнения пыли, по всей видимости, являются столкновения между планетезималями [4, 5]. Для образования пыли вследствие столкновений необходимы достаточно высокие значения относительных скоростей планетезималей [5], возникающие при значительном отличии эксцентриситетов и наклонов орбит от нуля [6].

Существуют два наиболее часто упоминаемых в литературе механизма динамического возбуждения орбит частиц диска. Однако каждый из них имеет свои недостатки. Первый механизм возмущения орбит частиц за счет самогравитации планетезималей требует нереалистично большой массы диска [7]. Второй механизм, основанный на вековых возмущениях планетезималей планетой-гигантом, требует большого эксцентриситета орбиты планеты [8].

Мы предлагаем новый механизм возбуждения планетезимального диска, в котором орбиты планетезималей возмущаются планетой с относительно небольшой массой (порядка массы Земли), находящейся вблизи внутренней границы диска.

2. Модель

Как и в случае пояса Койпера в Солнечной системе, типичный осколочный диск, по всей видимости, представляет собой кольцо пылеобразующих планетезималей, расположенное на расстоянии нескольких десятков астрономических единиц от звезды [9, 10, 11]. Такие диски называются внешними [5]. В настоящей статье

рассматривается гравитационное взаимодействие планетезимального диска около звезды с солнечной массой и планеты с массой равной M_E (масса Земли), находящейся вблизи внутренней границы внешнего диска.

Мы изучаем динамический процесс на раннем этапе эволюции планетной системы после исчезновения газового диска. Основная цель данной работы — выяснить степень возбуждения планетезимального диска вследствие гравитационного влияния мигрирующей планеты. Поэтому мы рассмотрели простую модель, в которой в начальный момент планета находится на почти круговой орбите недалеко относительно внешнего диска (на расстоянии одного радиуса сферы Хилла от внутреннего края диска). Это позволяет сэкономить вычислительные ресурсы для достижения основной цели работы, не рассматривая предыдущую историю движения планеты. Начальное значение большой полуоси планеты $a_{p1} = 29.7$ а.е., эксцентриситета $e = 0.01$, наклона 0.05° . В начальный момент планетезимали также движутся по почти круговым орбитам. Начальные значения эксцентриситетов и наклонов орбит планетезималей были распределены равномерно в интервалах $(0, 0.01)$ и $(0^\circ, 0.5^\circ)$, соответственно. Большие полуоси планетезималей a распределялись по степенному закону a^{-1} в интервале от 30 а.е. до 40 а.е. Такие начальные условия являются естественными для системы, образовавшейся в газопылевом диске, и подобные предположения применялись в большом числе работ по исследованию миграции планет в планетезимальных дисках (например, [12, 13, 14, 15]). Начальная масса диска выбрана равной $40 M_E$, близкой к массе диска за орбитой Нептуна в модели Ниццы (например, [13, 15, 16]).

В численных экспериментах планетезимальный диск содержал 8982 объектов, имеющих одинаковую массу. Время интегрирования уравнений движения выбрано равным 20 миллионам лет. Проводилось численное решение уравнений движения в задаче N тел с помощью симплектического интегратора [17]. Применялся широко распространенный подход [13, 15], в котором полностью учитывается гравитационное взаимодействие между планетой и планетезималиями, но планетезимали не взаимодействуют между собой. Объекты удалялись из интегрирования, если большая полуось $a > 1000$ а.е. или перигелийное расстояние $q < 0.05$ а.е.

3. Результаты

Вследствие гравитационного взаимодействия с планетезимальным диском планета мигрирует. График миграции планеты представлен ниже на рис. 1. Планета заходит внутрь диска, меняет направление миграции, дважды доходя до внешнего края диска. На момент времени $t = 10^5$ лет планета доходит до середины диска (36 а.е.) и разворачивается. Затем, доходя до внутреннего края диска, планета снова меняет направление миграции. Внешнего края диска планета впервые достигает в момент $t = 1.1 \cdot 10^6$ лет, второй раз — в момент $t = 1.5 \cdot 10^7$ лет. Планета стремится мигрировать сквозь весь диск, при этом, доходя до его края, она не покидает диск, а меняет направление миграции. Процесс взаимодействия планеты и диска, а также и эволюции орбиты планеты, имеет как систематическую, так и случайную составляющую. Действительно, как видно на рис. 1, зависимость расстояния планеты от времени имеет хаотическую составляющую, однако возможно выделить общий тренд и судить о направлении миграции.

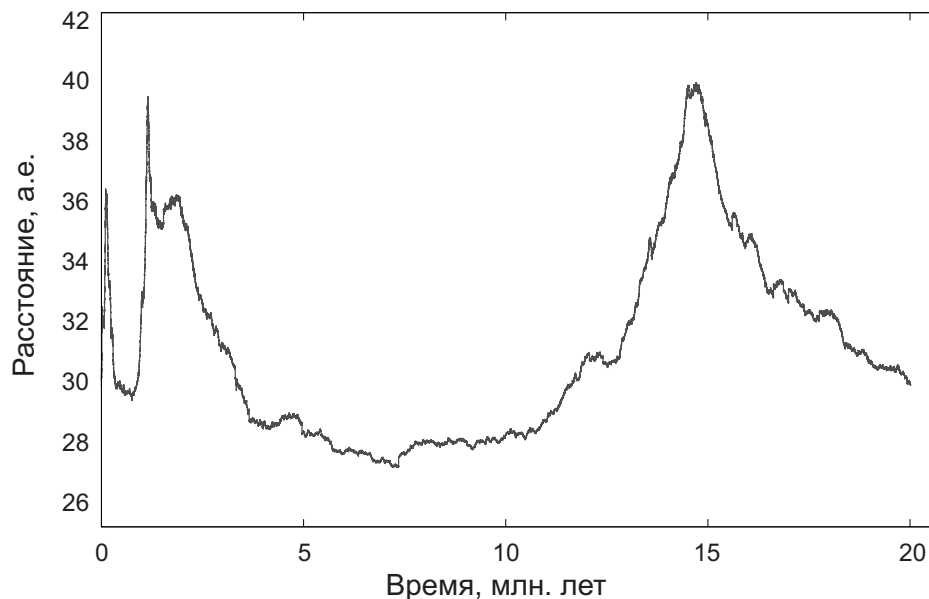


Рис. 1: Миграция планеты с массой $1 M_E$ в диске с массой $40 M_E$.

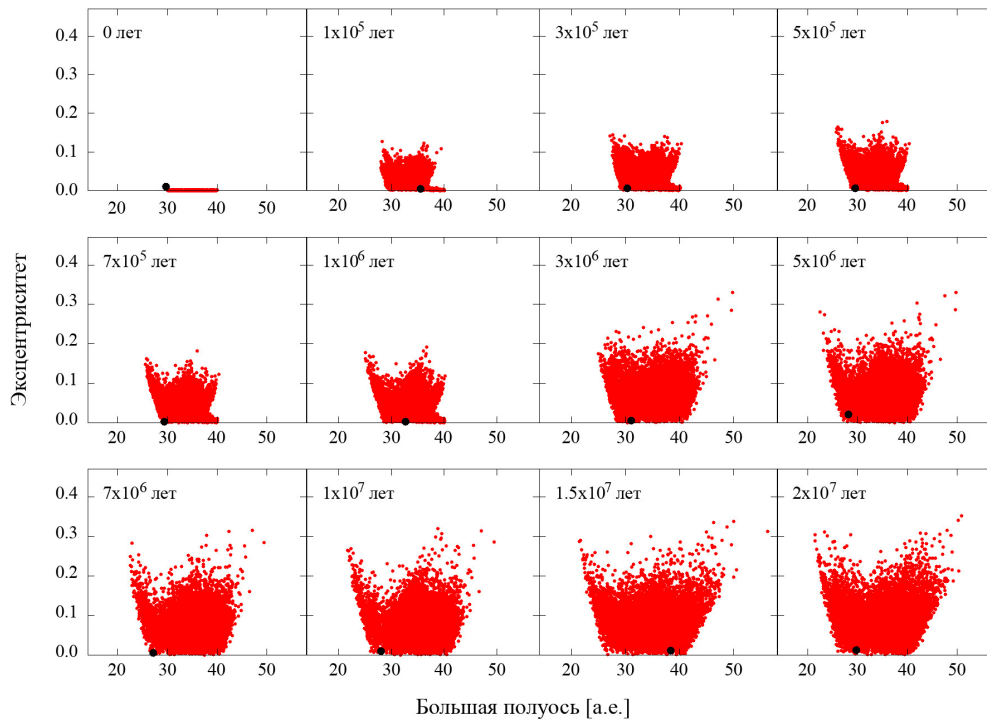


Рис. 2: Эволюция зависимости эксцентриситетов от большой полуоси планетезималей (красные точки) при миграции планеты с массой $1 M_E$ (черная точка).

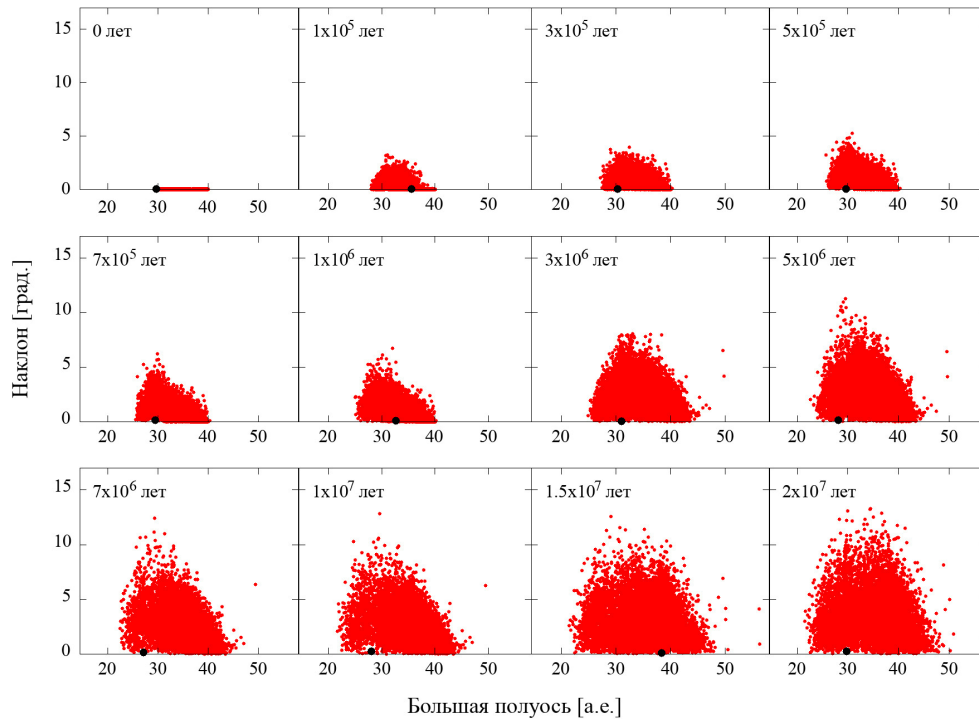


Рис. 3: Эволюция зависимости наклонов от большой полуоси планетезималей (красные точки) при миграции планеты с массой $1 M_E$ (черная точка).

Впервые явление обратимой миграции было обнаружено авторами работы [18]. В ней рассматривался динамический процесс с участием планеты с массой порядка массы Нептуна. В настоящей работе мы пока-

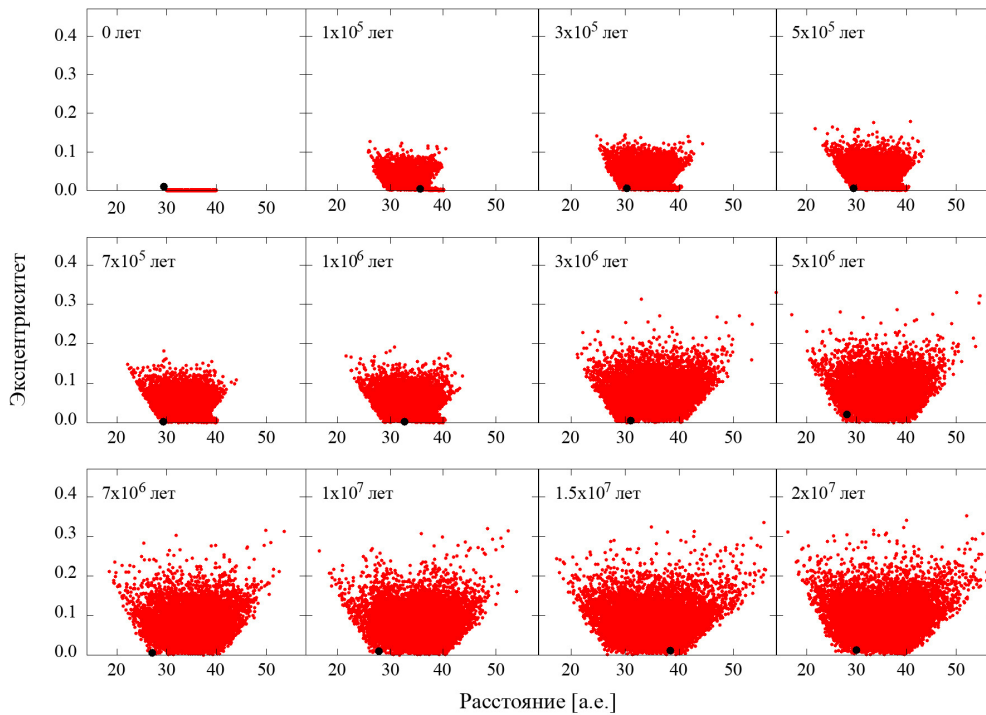


Рис. 4: Эволюция зависимости эксцентриситетов планетезималей (красные точки) от расстояния при миграции планеты с массой $1 M_E$ (черная точка).

зали, что в планетезимальном диске может происходить обратимая миграция и планеты с гораздо меньшей массой (порядка массы Земли).

При взаимодействии с планетой распределение частиц (планетезималей) в диске меняется. На рис. 2 и 3 представлены распределения эксцентриситетов и наклонов частиц в зависимости от большой полуоси. Для анализа наблюдательных осколочных дисков более интересными являются распределения эксцентриситетов и наклонов орбит в зависимости от расстояний до звезды, которые представлены на рис. 4 и 5. Видно, что в результате действия планетных возмущений границы планетезимального диска раздвигаются. До момента $t = 3 \cdot 10^6$ лет орбиты частиц в части диска, близкой к его внешнему краю, остаются невозбужденными (рис. 2 и 4). Действительно, как показано на рис. 1, к этому моменту времени планета впервые успевает пройти через весь диск.

В результате рассмотренного динамического процесса планета возвращается к внутреннему краю диска, где она уже слабо взаимодействует с планетезималями. Основная часть планетезималей сохраняется на орбитах с эксцентриситетами, достигающими 0.3, и наклонами, превышающими 10° .

4. Заключение

Исследовано гравитационное взаимодействие планеты земной массы с внешним диском планетезималей. Найдено, что в результате этого взаимодействия планета может мигрировать внутрь диска. Под действием возмущений от планеты эксцентриситеты и наклоны орбит планетезималей увеличиваются до значений, достаточных для того, чтобы столкновения планетезималей стали разрушительными и приводили к появлению пылевых структур.

Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера МВС-10П Центра коллективного пользования Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН. Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания.

Список литературы

1. P.-C. Cao, Q. Liu, N.-H. Liao, Q.-C. Yang, and D. Huang, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **23**, 085002, 2023.
2. D. E. Backman and F. Paresce, in E. H. Levy and J. I. Lunine, eds., *Protostars and Planets III*, 1253 (1993).
3. A. Moro-Martín, S. Wolf, and R. Malhotra, *ApJ*, **621**, 1079, 2005.
4. M. C. Wyatt, *ARA&A*, **46**, 339, 2008.
5. A. V. Krivov, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **10**, 383, 2010.
6. T. Costa, T. D. Pearce, and A. V. Krivov, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **527**, 7317, 2024.

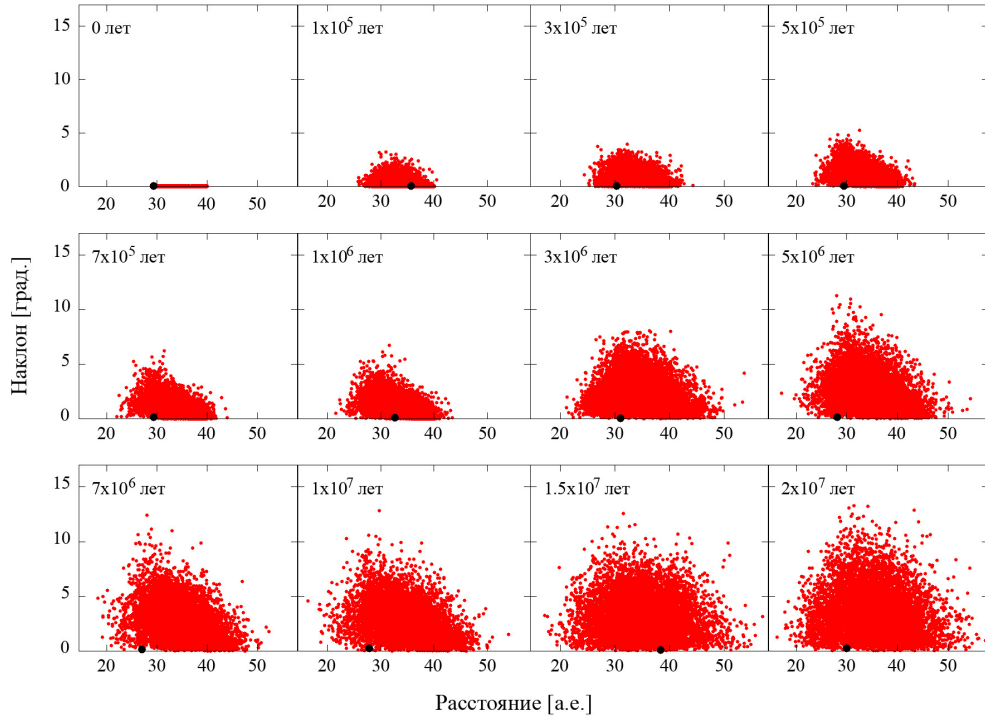


Рис. 5: Эволюция зависимости наклонов планетезималей (красные точки) от расстояния при миграции планеты с массой $1 M_{\text{Е}}$ (черная точка).

7. T. D. Pearce, R. Launhardt, R. Ostermann, G. M. Kennedy, et al., *A&A*, **659**, A135, 2022.
8. A. J. Mustill and M. C. Wyatt, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **399**, 1403, 2009.
9. R. L. Akeson, D. R. Ciardi, R. Millan-Gabet, A. Merand, et al., *ApJ*, **691**, 1896, 2009.
10. M. Wyatt, *Debris Disks: Probing Planet Formation*, 1–26 (2018).
11. A. Boccaletti, *Comptes Rendus. Physique*, **24**, 1, 2023.
12. A. Morbidelli, R. Brasser, K. Tsiganis, R. Gomes, and H. F. Levison, *A&A*, **507**, 1041, 2009.
13. D. Nesvorný and A. Morbidelli, *AJ*, **144**, 117, 2012.
14. N. A. Kaib and S. S. Sheppard, *AJ*, **152**, 133, 2016.
15. P. Griveaud, A. Crida, A. C. Petit, E. Lega, and A. Morbidelli, *A&A*, **688**, A202, 2024.
16. A. Crida, *Reviews in Modern Astronomy*, **21**, 215, 2009.
17. V. V. Emel'yanenko, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, **98**, 191, 2007.
18. R. S. Gomes, A. Morbidelli, and H. F. Levison, *Icarus*, **170**, 492, 2004.

Исследования хромосферной активности звезды FK Com на основе спектральных наблюдений

Пузин В.Б.¹, Саванов И.С.¹, Дзян С.^{2,3}, Ванг Х.^{2,3}, Шугаров А.С.¹, Ванг Дз.^{2,3}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Национальная обсерватория Китая, Китайская академия наук, Пекин, Китай

³Университет Китайской академии наук, Пекин, Китай

В работе представлены результаты анализа новых спектральных наблюдений хромосферно-активной звезды FK Com, проведенных в апреле 2024 года на обсерватории Синлонг (Xinglong, NAOC, Китай). Проанализирована эволюция профилей линии H α в спектре FK Com в районе фаз 0.18 и 0.57. Новые наблюдения показывают, что зарегистрированные нами профили линии H α имеют сложную структуру формируемую различными хромосферно-активными регионами атмосферы звезды. Профиль линии H α значительно изменяется со временем, сравнимым с периодом вращения звезды FK Com. Тем не менее, сравнение профилей линии с такими же профилями, полученными нами ранее и полученными в исследованиях других авторов, свидетельствует в пользу того, что переменность структуры профиля линии H α не имеет выраженной периодичности и вероятнее всего не зависит от фазы вращения звезды. Малая интенсивность излучения в линии H α , установленная при новых наблюдениях, указывает на низкую активность звезды на период проведения наблюдений.

Поступила в редакцию 02.09.2024 г. Принята в печать 08.10.2024 г.

Ключевые слова: звезды FK Com, хромосферно-активные звезды, магнитная активность

Studies of the chromospheric activity of the FK Com star based on spectral observations

Puzin V.B.¹, Savanov I.S.¹, Jiang X.^{2,3}, Wang H.^{2,3}, Shugarov A.S.¹, Wang J.^{2,3}

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (NAOC), Beijing, China

³University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Beijing, China

The paper presents the results of new spectral observations of the chromospherically active star FK Com conducted in April 2024 at the Xinglong Observatory in China. The evolution of the H α line profiles in the spectrum of FK Com in the regions of phases 0.18 and 0.57 was analyzed. New observations have revealed that the recorded profiles of the H α line have a complex structure formed in various chromospheric active regions on the star's surface. The H α line profile changes significantly over time comparable to the rotation period of FK Com, but a comparison with previous observations and those obtained by other researchers suggests that the variability in the H α profile structure is not periodical and likely does not depend on the rotational phase of the star. The lower intensity of the new H α profile indicates minimal activity at the time of observation.

Received 02.09.2024. Accepted 08.10.2024.

Keywords: FK Com stars, chromospherically active stars, magnetic activity

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.005

1. Введение

Среди многообразия переменных звезд особое место занимает малочисленный класс одиночных быстро вращающихся гигантов позднего спектрального класса G-K — переменные звезды типа FK Com. В настоящее время к числу звезд типа FK Com с уверенностью относят три звезды: FK Com — прототип класса переменных звезд, V1794 Cyg (HD 199178) и ET Dra (BD+70959). Несмотря на большой интерес к звездам типа FK Com и исследования их возможной эволюционной связи с переменными типа W UMa [1], эволюционный статус звезд до сих пор однозначно не определен и новых звезд типа FK Com достоверно не установлено. Звезды показывающие активность, подобную звездам типа FK Com, изначально причисленные к данной группе, в последующих исследованиях были исключены из нее из-за обнаруженной двойственности. В серии наших работ [2, 3, 4, 5], посвященных поиску кандидатов в звезды типа FK Com по фотометрическим данным космического телескопа Кеплер, были установлены кандидаты, показывающие фотометрические проявления подобные звездам типа FK Com, но требующие уточнения статуса двойственности и дополнительных доказательств принадлежности к звездам типа FK Com.

Одиночная быстро вращающаяся звезда FK Com спектрального класса G4III–G5III, проявляющая сильную хромосферную активность, является ярким представителем и прототипом этого класса переменных звезд [6, 7]. Величина проекции скорости вращения на луч зрения $V \sin i \approx 160$ км/с является уникальной для одиночных гигантов. Для звезды FK Com является характерным присутствие дифференциального вращения установленного на уровне $\Delta\Omega = 0.08$ рад/сут. Фотосфера звезды покрыта обширными запятными областями с пониженной температурой, площадь которых достигает 30% поверхности. За более чем 40 лет

исследований звезды FK Com накоплен большой массив фотометрических данных, на основании которых выявлена переменность положений долготы активной пятенной области (смещение примерно на 180°), в дальнейшем такое явление получило название «flip-flop» [8]. Также по фотометрическим данным были установлены циклы активности FK Com продолжительностью от нескольких лет до десятилетия. Тем не менее для уточнения длительных циклов активности необходим более длительный ряд данных [9, 10, 11, 12]. Хромосферная активность звезды ярко проявляется в спектрах эмиссионных линий H, K, CaII b водородных линиях бальмеровской серии. В работе [13] проведен анализ большого массива спектральных данных, охватывающий более 10 лет. Анализ был основан на сопоставлении переменности линии H α с фотосферными картами. По спектрам низкого разрешения обнаружены хромосферные изменения на временном масштабе несколько часов и меньше. По спектрам высокого разрешения установлено наличие протуберанцев, соразмерных с радиусом звезды и стабильных в течении нескольких периодов обращения звезды. Какой либо четкой связи пятенной активности с переменностью профилей линии H α установлено не было. Спектрополяриметрические наблюдения показали наличие у звезды FK Com магнитного поля, которое меняется от ста до трехсот Гаусс [14, 15]. На основе ультрафиолетовых наблюдений [16] установлена обширная и активная корона со структурами, которые возможно подпитываются за счет поверхностной активности и вспышек.

В нашей работе представлены результаты новых спектральных наблюдений звезды FK Com, выполненных в апреле 2024 года на обсерватории Синлонг (Xinglong, NAOC, Китай).

2. Наблюдения и обработка

Наши новые исследования хромосферной активности звезды FK Com основаны на наблюдениях, полученных в апреле 2024 года на 2.16-м телескопе обсерватории Синлонг Национальной астрономической обсерватории Китая (NAOC, Xinglong) с использованием оптоволоконного спектрографа высокого разрешения High resolution Fiber-fed Spectrograph (HRS) [17].

Спектрограф HRS — это оптоволоконный Эшелле спектрограф высокого разрешения, среднее разрешение по диапазону длин волн (365–1000 нм) при щели 0.19 мм составляет $R \approx 50000$. Калибровка по длинам волн осуществляется по спектру ThAr лампы, для высокопрецизионных спектральных исследований используется калибровка Astro-Comb с частотой 25 ГГц, изготовленной компанией Menlo Systems. Регистрация спектров производится на ПЗС-камеру с чипом обратной засветки E2V 203-82 с улучшенной чувствительностью в синей области, размер чипа 4096×4096 пикселей, размер пикселя составляет 12 микрон. Основные направления исследований, для которых используется спектрограф HRS — изучение экзопланет, анализ химического состава атмосфер звезд, активность звезд, астросейсмология и т.д.

Журнал наблюдений FK Com представлен в табл. 1. Наблюдения проведены в течении двух ночей, 20-го и 21-го апреля. В первую наблюдательную ночь получены 12 спектров, во вторую 5 спектров. Экспозиции для всех спектров составляли 1800 с.

Таблица 1: Журнал спектральных наблюдений звезды FK Com проведенных в апреле 2024 г. (2.16-м телескоп обсерватории Синлонг, HRS).

№ файла 202404+	объект	дата наблюдений	HJD 2460000+	экспозиция, с	S/N	phase rot.
20047	FK Com	2024.04.20	0420.99846	1800	70	0.137
20048	FK Com	2024.04.20	0421.02069	1800	41	0.146
20049	FK Com	2024.04.20	0421.04291	1800	38	0.155
20050	FK Com	2024.04.20	0421.06513	1800	33	0.165
20051	FK Com	2024.04.20	0421.08735	1800	37	0.174
20052	FK Com	2024.04.20	0421.10957	1800	38	0.183
20053	FK Com	2024.04.20	0421.13110	1800	31	0.192
20054	FK Com	2024.04.20	0421.15332	1800	33	0.201
20056	FK Com	2024.04.21	0421.19776	1800	39	0.220
20057	FK Com	2024.04.21	0421.21999	1800	35	0.230
20058	FK Com	2024.04.21	0421.24707	1800	33	0.240
20059	FK Com	2024.04.21	0421.26929	1800	37	0.250
21044	FK Com	2024.04.21	0421.99704	1800	20	0.552
21045	FK Com	2024.04.21	0422.01927	1800	37	0.562
21046	FK Com	2024.04.21	0422.04149	1800	25	0.571
21047	FK Com	2024.04.21	0422.06371	1800	40	0.580
21048	FK Com	2024.04.21	0422.08593	1800	51	0.590

Обработка полученных кадров производилась в программном пакете DECH (Dech95, Dech-fits) [18]. Первоначальная редукция спектров заключалась в учете кадров «bias», построения маски для экстракции и учета рассеянного света в спектрографе, деление на спектр плоского поля. Привязка спектров к длинам волн произведена по спектрам ThAr-лампы, точность решения дисперсионной кривой составила порядка 0.003 Å. Линия H α попадает на края смежных порядков, поэтому для последующего анализа линия H α усреднялась по двум порядкам с учетом веса краевого эффекта и нормировалась на единицу.

В результате обработки данных были получены два набора данных состоящие из 12 и 5 профилей линии H α в диапазоне фаз вращения звезды 0.137–0.25 и 0.55–0.59, соответственно (табл. 1). Фазы вращения звезды были рассчитаны на середину экспозиций с использованием эфемериды HJD = (2439252.895 $\pm$ 0.01) + (2.40002466 $\pm$ 0.0000056) $\times$ E [11]. В табл. 1 указаны порядковый номер кадра спектра, имя объекта, дата наблюдений, юлианская дата середины экспозиции, величина времени экспозиции, соотношение сигнал/шум в районе линии H α , фаза вращения, рассчитанная на середину экспозиции.

3. Обсуждение результатов

На рис. 1 и 2 представлены профили линии H α звезды FK Com, полученные 20 и 21 апреля 2024 года. Профили линии нормированы на единицу (вертикальная ось). На нижней горизонтальной оси графиков отложена шкала скоростей относительно длины волны 6562.8 Å, значение скорости указаны в км/с. На верхней горизонтальной оси указаны длины волн в Å. Профили линии H α нанесены с учетом гелиоцентрической поправки скорости на момент середины экспозиции. Тонкими серыми линиями обозначены единичные спектры, черной линией нанесены усредненные спектры по 12 и 5 спектрам соответственно.

Как видно из графиков, профили линии H α в обоих случаях имеют сложную структуру, с ярко выраженной двугорбостью. Стабильный «провал» на околонулевой скорости, по видимому, свидетельствует о наличии околосветного диска. У профилей линии H α наблюдается значительная переменность двугорбой структуры на различных фазах, что свидетельствует о неоднородности и нестационарности околосветного диска и его сложном взаимодействии с фотосферой звезды. Сложная структура линии H α обусловлена разнообразием проявления магнитной активности звезды, пятенной активностью, протуберанцами, факелами и т.д. (см. ссылки выше), которые имеют значительные размеры и вероятно влияют на структуру короны и околосветного диска. Кроме того, вспышки в различных областях звезды приводят к неравномерности прогрева диска, что также отражается на сложности профиля линии H α . Как уже было отмечено во введении, в исследованиях [13] исследовалась фазовая согласованность переменности линии H α с пятенной

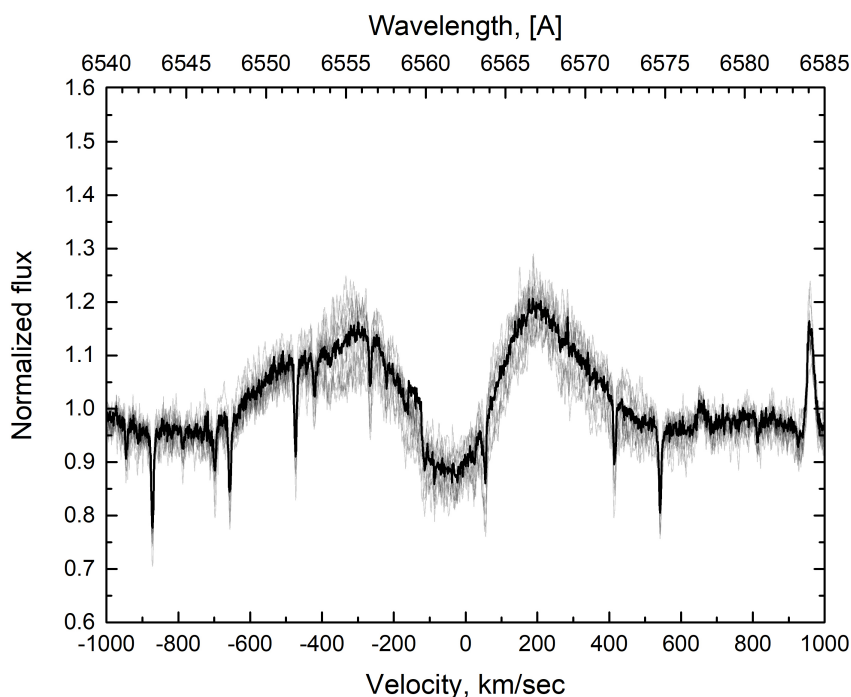


Рис. 1: Нормированные профили линии H α , полученные 20 апреля 2024 г. Серыми тонкими линиями обозначены единичные спектры (ph=0.137-0.25), черной линией обозначен усредненный профиль (ph=0.18).

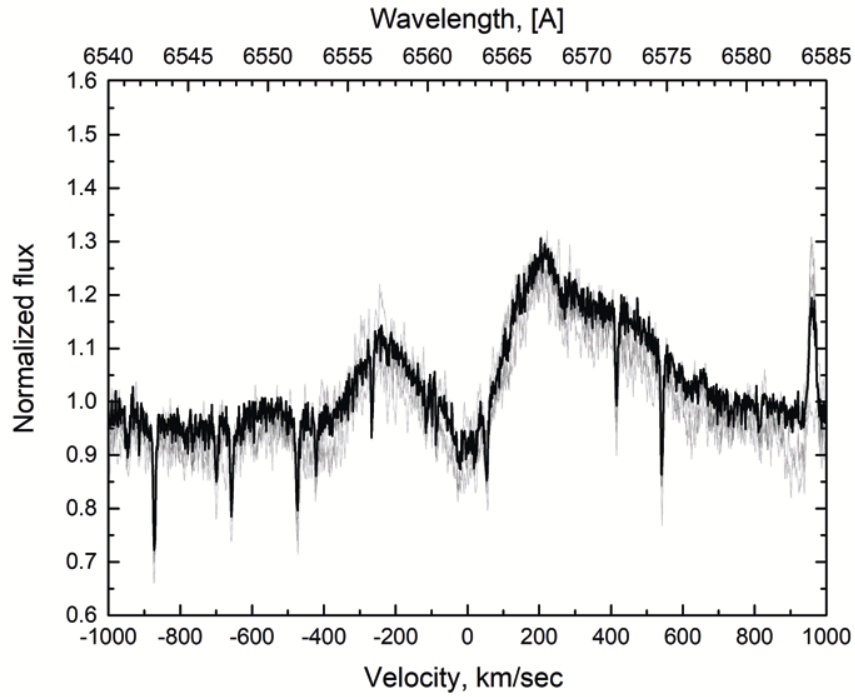


Рис. 2: Нормированные профили линии $H\alpha$, полученные 21 апреля 2024 г. Серыми тонкими линиями обозначены единичные спектры ($ph=0.55-0.59$), черной линией обозначен усредненный профиль ($ph=0.57$).

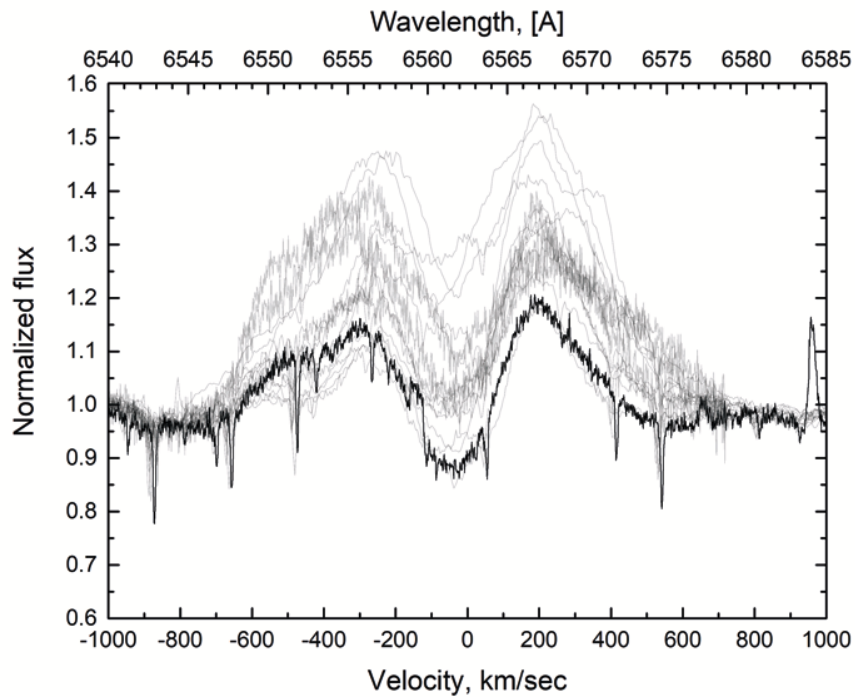


Рис. 3: Нормированные профили линии $H\alpha$. Серыми тонкими линиями обозначены единичные спектры, полученные ранее на фазах 0.17–0.195, черной линией — усредненный профиль ($ph=0.18$) полученный в апреле 2024 г.

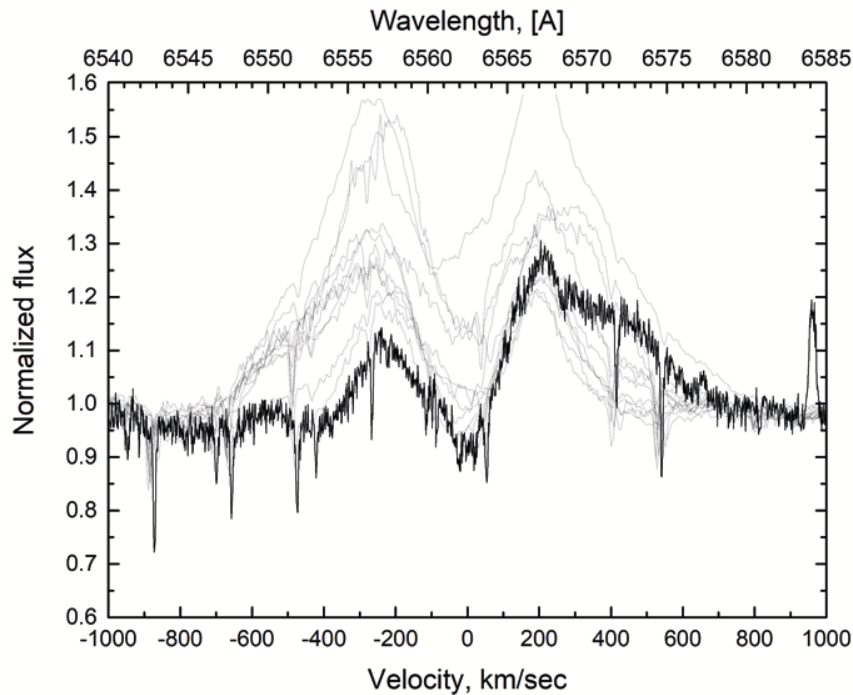


Рис. 4: Нормированные профили линии $H\alpha$. Серыми тонкими линиями обозначены единичные спектры, полученные ранее на фазах 0.56–0.587, черной линией — усредненный профиль ($ph=0.57$) полученный в апреле 2024 г.

активностью фотосферы. Авторы работы на основе спектров низкого разрешения установили, что активность хромосферы происходит на временных масштабах в несколько часов и меньше. По спектрам высокого разрешения установлено наличие протуберанцев на высотах до одного радиуса звезды, которые остаются стабильными до нескольких недель и могут оказывать влияние на процессы протекающие в околозвездном диске. Полученные нами профили линии $H\alpha$ аналогичны полученным ранее другими авторами (рис. 3 и 4).

На рис. 3 и 4 показаны профили линии $H\alpha$ (обозначения и масштаб осей аналогичны рис. 1 и 2), зарегистрированные нами в апреле 2024 года (черные линии, фазы 0.18 и 0.57 соответственно) и полученные другими авторами в период с 1997–2010 г. (тонкие серые линии). Для анализа были выбраны ранее опубликованные данные для фаз 0.17–0.195 (рис. 3) и 0.56–0.587 (рис. 4). Сравнение профилей показывает, что в обоих случаях есть как сходство, так и отличие форм крыльев линии. Однако в обоих случаях интенсивность линии находится на низком уровне, что может свидетельствовать об уменьшении активности звезды на период проведения наблюдений.

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам 2.16 метрового телескопа обсерватории Син-лонг (Xinglong NAOC) за помощь в проведении наблюдений.

Список литературы

1. A. D. Costa, B. L. Canto Martins, J. P. Bravo, F. Paz-Chinchón, et al., *ApJL*, **807**, L21, 2015.
2. V. B. Puzin, I. S. Savanov, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports*, **58**, 471, 2014.
3. V. B. Puzin, I. S. Savanov, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports*, **61**, 693, 2017.
4. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astrophysical Bulletin*, **77**, 150, 2022.
5. I. S. Savanov, E. S. Dmitrienko, X. Jiang, H. Wang, M. E. Sachkov, A. S. Shugarov, and V. B. Puzin, *Astronomy Reports*, **66**, 1287, 2022.
6. H. Korhonen, S. V. Berdyugina, T. Hackman, R. Duemmler, I. V. Ilyin, and I. Tuominen, *A&A*, **346**, 101, 1999.
7. H. Korhonen, S. V. Berdyugina, T. Hackman, I. V. Ilyin, K. G. Strassmeier, and I. Tuominen, *A&A*, **476**, 881, 2007.
8. L. Jetsu, J. Pelt, and I. Tuominen, *A&A*, **278**, 449, 1993.
9. T. Hackman, J. Pelt, M. J. Mantere, L. Jetsu, et al., *A&A*, **553**, A40, 2013.
10. Z. Kolláth and K. Oláh, *A&A*, **501**, 695, 2009.
11. K. Oláh, H. Korhonen, Z. Kóvári, E. Forgács-Dajka, and K. G. Strassmeier, *A&A*, **452**, 303, 2006.
12. V. B. Puzin, I. S. Savanov, E. S. Dmitrienko, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, and A. Y. Burdanov, *Astrophysical Bulletin*, **71**, 189, 2016.
13. K. Vida, H. Korhonen, I. V. Ilyin, K. Oláh, M. I. Andersen, and T. Hackman, *A&A*, **580**, A64, 2015.

14. H. Korhonen, S. Hubrig, S. V. Berdyugina, T. Granzer, T. Hackman, M. Schöller, K. G. Strassmeier, and M. Weber, *MNRAS*, **395**, 282, 2009.
15. V. B. Puzin, I. S. Savanov, I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, and E. S. Dmitrienko, *Astrophysical Bulletin*, **69**, 321, 2014.
16. T. R. Ayres, V. Kashyap, S. Saar, D. Huenemoerder, et al., *ApJS*, **223**, 5, 2016.
17. Z. Fan, H. Wang, X. Jiang, H. Wu, et al., *PASP*, **128**, 115005, 2016.
18. G. A. Galazutdinov, *Astrophysical Bulletin*, **77**, 519, 2022.

Вариант реализации системы приема и контроля информации для наземного комплекса проекта «Спектр-УФ»

Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Приводится альтернативный вариант реализации системы приема, предварительной обработки, контроля информации для наземного научного комплекса проекта «Спектр-УФ», который мог бы быть реализован собственными силами ИНАСАН. Описан предлагаемый состав альтернативного варианта, содержащий малошумящий усилитель с преобразованием частоты, АЦП, приемник-демодулятор, программный декодер и программный сервисный менеджер. Для каждой из указанных составных частей системы приема, предварительной обработки, контроля информации приведена краткая информация по возможной технической реализации, учитывающая в том числе возможность размещения части оборудования в лабораторном корпусе Звенигородской обсерватории ИНАСАН. Предложенный вариант характеризуется высокой степенью автоматизации, меньшей стоимостью и повышенной надежностью системы. Описанная система может быть реализована силами ИНАСАН при принятии соответствующего решения совместно с заказчиком.

Поступила в редакцию 29.11.2024 г. Принята в печать 13.12.2024 г.

Ключевые слова: УФ-астрономия, наземный научный комплекс, «Спектр-УФ»

Option for implementing a system for receiving and monitoring information for the ground complex of the Spektr-UV project

Arkhangelsky R.N., Iosipenko S.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

An alternative version of the implementation of the system of reception, preliminary processing, control of information for the ground-based scientific complex of the Spektr-UV (Spectrum-UV) project is presented, which could be implemented by INASAN. The proposed composition of an alternative variant containing a low-noise frequency conversion amplifier, an ADC, a demodulator receiver, a software decoder and a software service manager is described. For each of these components brief information is provided on possible technical implementation, including the possibility of placing part of the equipment in the laboratory building of the Zvenigorod INASAN Observatory. The proposed option is characterized by a high degree of automation, lower cost and increased reliability of the system. The described system can be implemented by INASAN forces when making the appropriate decision together with the customer.

Received 29.11.2024. Accepted 13.12.2024.

Keywords: UV astronomy, ground-based scientific complex, Spektr-UV

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.006

1. Введение

В рамках проекта по созданию космической обсерватории «Спектр-УФ» ИНАСАН [1], в том числе, создает Наземный научный комплекс (ННК) для управления комплексом научной аппаратуры (КНА), получения, обработки, анализа, архивирования и распространения полученной с него научной информации в рамках научной программы [2]. Аппаратура приема научных данных (АПНД) будет размещена на двух наземных станциях на базе Звенигородской и Симеизской обсерваторий ИНАСАН. АО «НПО Лавочкина» является соисполнителем работ и разрабатывает Систему приема, предварительной обработки, контроля информации (СПИ) для ННК. В данной статье представлен альтернативный вариант системы приема, предварительной обработки и контроля информации, предложенный ИНАСАН, который мог бы быть создан собственными силами института.

В варианте предложенном ИНАСАН детально проработана интеграция программного обеспечения в информационную структуру ННК [3]. Также в отличие от предложенного соисполнителями варианта заложен принцип высокоавтоматизированной системы, не требующий постоянного дежурства операторов. Это в свою очередь значительно удешевляет использование системы, упрощает работу операторов и повышает ее надежность.

2. Формирование состава ЦД-УФ

В состав альтернативного варианта системы приема, предварительной обработки и контроля информации (СПИ) входит:

- малошумящий усилитель с преобразованием частоты (МШУ);
- АЦП;

- приемник-демодулятор (программный или внешний цифровой);
- программный декодер;
- программный сервисный менеджер.

Далее приведем краткую информацию по вышеуказанным основным составным частям СПИ.

2.1. Малошумящий усилитель

С учетом возможности размещения части оборудования в лабораторном корпусе Звенигородской обсерватории ИНАСАН, выполняющего роль пилон станции, предполагается использование интегрированного МШУ, который последовательно выполняет следующие задачи:

- предварительно усиливает сигнал в диапазоне используемых эфирных частот (7.2–7.8 ГГц);
- ограничивает полосу частот с помощью полосового фильтра;
- переносит частоту в L-диапазон;
- усиливает сигнал с помощью выходного усилителя;
- модулирует сигнал для передачи по волоконно-оптическим линиям связи.

Параметры МШУ приведены далее в табл. 1. Оптический трансивер может быть выполнен в виде отдельного блока.

Таблица 1: Параметры МШУ.

Параметр	Значение
Шумовая температура, не более	40 К
Коэффициент усиления	40–60 дБ
Неравномерность АЧХ	± 0.5 дБ
КСВН на входе, не более	1,25
Выходная мощность, не менее	10 дБмВт
Тип входа	Волновод

Настройки полосового фильтра (ППФ) зависят от параметров предварительного тракта МШУ и центральной частоты. Вносимые ППФ в такт потери не должны превышать 1 дБ, количество резонаторов — не менее 5.

В основе медиаконвертера для использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) находится лазерный диод, который формирует модулированный оптический сигнал. Конвертер является серийным промышленным универсальным устройством, работающем в широком диапазоне частот и модулирующим по амплитуде лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 1310$ нм.

Многомодовый (или одномодовый — зависит от реализации трансивера, на рынке присутствуют оба варианта) волоконно-оптический кабель длиной около 150–200 м (для имеющейся схемы размещения в Звенигородской обсерватории) и около 900 м (для Симеизской обсерватории) обеспечивает поступление сигнала на вход аналогичного ресивера на стороне размещения основного активного оборудования. Собственными потерями для линии ВОЛС при такой длине можно пренебречь. Существенным значением является неравномерность АЧХ самого трансивера в используемой полосе частот и его коэффициент шума, который не должен быть более 7–8 дБ. Использование более сложных трансиверов со спектральным уплотнением сигнала в данном проекте не требуется. Конструкция МШУ с преобразованием частоты означает использование промежуточного преобразователя частоты в L-диапазон.

2.2. Аналогово-цифровой преобразователь

В качестве АЦП применяется серийно производимый мезонинный модуль Insys FM214x1GTRF, который имеет следующие возможности:

- два канала АЦП 14 бит 1 ГГц;
- квадратурная демодуляция;
- прямое преобразование сигнала.

Частотный диапазон входных сигналов АЦП от 0.01 до 1.2 ГГц, что позволяет использовать его в схеме аппаратуры приема научных данных (АПНД) после понижающего конвертера. Максимальная полоса принимаемого сигнала — 580 МГц. Изготовителем поддерживается удобный набор инструментов (DAQ Tools), который можно использовать также при создании собственного специального программного обеспечения (СПО) или интегрировать настройки и контрольные параметры в формуляры АПНД.

Конструктивно данный АЦП используется в наборе с внешним автономным FMC-блоком Insys FMC130E. Передача данных в демодулятор производится по интерфейсу USB (при локальном тестировании или ис-

пользовании ноутбука) или по интерфейсу Ethernet 1000Base-T (при установке в штатную стойку). Использование современных моделей АЦП с SFP-модулями позволяет использовать волоконно-оптический кабель по другой схеме, не используя сигнал рабочей частоты. Это также зависит от типа уже имеющегося кабеля и иных особенностей тракта.

2.3. Приемник-демодулятор

Демодулятор в современной реализации зачастую изготавливается вместе с декодером и сервисным менеджером в рамках единого цифрового блока станции телеметрического обеспечения. Блок имеет ЦП достаточной производительности, позволяющей демодулировать принимаемые данные. При этом используется вход после преобразования на стандартную рабочую частоту 75 ГГц, аналогично серийным зарубежным модулям TT&C типа Zodiac Cortex. Регистратор может работать в паре с любым промышленным приемником, позволяющим производить оцифровку сигнала рабочей частоты, либо использовать встроенную плату ЦАП.

В АПНД планируется использовать оригинальный программный регистратор-демодулятор разработки ИНАСАН, работающей на стандартной серверной аппаратной платформе Intel Xeon Scalable любого поколения с поддержкой относительно быстрой памяти (не хуже DDR4-2400) и с функциями ЦП RDT/SST (позволяет целенаправленно концентрировать вычислительную нагрузку нескольких ядер в «запаздывающем» процессе).

Так, при использовании процессора модели второго поколения и «среднего» уровня Gold 6230 (Cascade Lake) с 20 ядрами и 40 потоками, с базовой частотой 2.1 ГГц, регистратор позволяет формировать квадратурный сигнал, а демодулятор позволяет демодулировать QPSK/BPSK-сигнал со скоростями до 100 Мбит/с, что перекрывает потребности проекта «Спектр-УФ».

Чтобы реализовать все функции телеметрической системы в рамках одного конструктива, рекомендуется использовать двухпроцессорные системы.

2.4. Декодер

Декодер представляет собой набор Unix-процессов, архитектурно совместимых с API демодулятора и позволяющих проводить декодирование сигнала (LDPC, турбо-коды), выделение кадров телеметрической информации, передачу кадров в сервисный модуль и сохранение статистической информации для отображения на web-формах объективного контроля АПНД. Декодер использует доступные функции автоматической балансировки нагрузки Intel Scalable для бесконфликтной работы вместе с демодулятором в рамках единой хост-системы. Разделение функций с помощью гипервизора может улучшить управляемость и надежность системы за счет некоторого снижения общей производительности.

2.5. Сервисный модуль

Сервисный модуль реализует следующие функции:

- интерфейса обмена с абонентом-потребителем по упрощенному SLE-протоколу;
- интерфейса обмена целеуказаниями для наведения антенной системы;
- нотификации (извещения) ННК о событиях АПНД;
- межоператорского обмена персоналом АПНД;
- отображения информации планирования задействования станций и ограничений;
- интерфейса управления составными частями АПНД;
- доступа и воспроизведения архивной телеметрической информации и статистических данных.

Сервисный модуль рекомендуется размещать в виде отдельной виртуальной машины под управлением гипервизора АПНД. Программное обеспечение сервисного модуля слабо зависит от особенностей аппаратных средств АПНД. В настоящее время ИНАСАН имеет задел по результатам работ предыдущих лет, включая интерфейсные и функциональные макеты программного обеспечения (ПО). Наиболее важная часть сервисного ПО — SLE компонент и система удаленного управления (RCS) — имеет клиент-серверную архитектуру с «третьим звеном» в соответствии с рекомендациями CCSDS. «Третье звено» имеет обозначение CRCS и располагается на аппаратных средствах в ЦОД ННК. Станционные комплекты ПО обозначаются LRCS и располагаются в пуле виртуальных машин непосредственно на каждой станции АПНД. Каждый комплект LRCS связан с CRCS. Максимально технологически допустимое количество LRCS — не менее 6.

CRCS является точкой предоставления сервиса АПНД. Архитектура определяется некоторым набором интерфейсов, которые обеспечивают:

- взаимодействие с потребителем;
- простоту переключения между станциями;
- мониторинг с рабочих мест ННК устройств и оборудования станций;
- управление наземными станциями (в том числе управление алгоритмами автоматизации);

- гарантированное получение ТМИ при наличии сигнала необходимого качества;
- расчет и передачу целеуказаний;
- формирование и передачу рабочих графиков задействования станций;
- получение отчетов о проведенных сеансах связи.

CRCS управляется собственными настройками, имеет собственный параметрический архив (по некоторой аналогии с информационно-телеметрическим обеспечением ННК) и архив событий. Экземпляр CRCS специально не резервируется, кроме как общими средствами обеспечения отказоустойчивости, используемого в центр обработки данных (ЦОД) гипервизора.

Взаимодействие CRCS и LRCS сокетно-ориентированное. ННК автоматически или с использованием веб-клиента через RCS отправляет команды и запросы, которые обрабатываются на стороне, как собственно LRCS, так и на станционной аппаратуре.

CRCS — это программное обеспечение, «центральная» часть системы удаленного управления, работающая под управлением UNIX-системы одной из виртуальных машин ЦОД ННК. CRCS проектируется как относительно универсальное средство для работы с CCSDS SLE-совместимыми наземными станциями. В настоящее время CRCS существует в виде программного прототипа, разработанного с использованием среды Figma. В программной платформе SCOS-2000 существует отдельный продукт для формирования специальных средств мониторинга Indra Genius, который содержит готовые наборы данных для наземных станций. Несмотря на то что сам инструмент в настоящее время недоступен для ИНАСАН, анализ данных позволяет детально проработать UX/UI-логику в любой удобной среде прототипирования.

CRCS включает в себя:

- ядро, которое занимается формированием и обработкой абонентских запросов/ответов, работает с храняемыми структурами данных;
- линейный модуль (или прокси-модуль), который занимается обработкой данных с LRCS;
- пользовательский интерфейс (НМИ), включая файлы шаблонов, стилей, представления и т.д. — в зависимости от выбранного фреймворка.

Серверные веб-компоненты могут располагаться на едином веб-сервере ННК. Структурная схема показана на рис. 1.

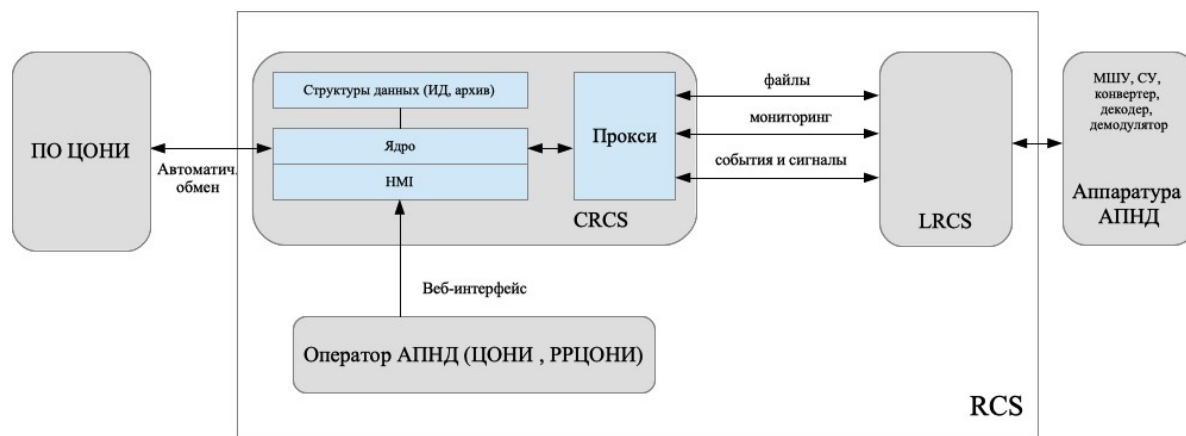


Рис. 1: Структурная схема CRCS.

Пользовательский интерфейс (см. рис. 2) отражает логику работы с системой и включает в себя следующие зоны:

- основная область графического формуляра, отображающая контролируемую систему или ее часть, каждая станция отображается как имеющий цвет (в соответствии со статусом устройства) набор блоков;
- область отображения контекстных параметров (верхняя статусная строка), отображающая пользователя ННК и его привилегии, режим работы со станцией АПНД (локальный или удаленный), режим записи параметров, статус контекстной системы и т.д.;
- зона уведомлений, расположенная внизу экрана и состоящая из вкладок по уровням важности (в примере — сообщения (messages), тревожные сигналы (alarms) и отработанные сигналы);
- область меню, расположенная в правой части, где находятся основные группы задач.

Для CRCS определены только два уровня привилегий — административный и пользовательский.

Определены 6 основных цветовых кодов состояний:



Рис. 2: Общий вид интерфейса CRCS.

- зеленый, система активная и/или находится в штатном режиме — LCRS получает статусную информацию по данному блоку, она полностью соответствует ожидаемым значениям;
- красный, тревожный сигнал — LCRS получает статусную информацию по данному блоку и, как минимум, значение одного из параметров вышло за допустимые значения;
- оранжевый, соответствует красному уровню, но для которого оператор поставил отметку «принято к сведению»;
- синий, блок на обслуживании — такой статус присваивается вручную оператором;
- белый или светло-серый, блок фактически отсутствует — такой статус присваивается вручную оператором;
- коричневый, нет связи — LCRS не получает данных с этого блока.

Если с основного экрана перейти к формуляру конкретной станции (просто выбрав ее), то будет отображена ее условная мнемосхема. На рис. 3 показана условная станция, состоящая из 7 элементов контроля, 5 из которых указаны как «на обслуживании», один указан как отсутствующий, и только для ACU (система управления приводом) выставлен статус «норма».

При указании на систему ACU всплывает окно (см. рис. 4) контрольных параметров данного блока (в данном случае наименования параметров были взяты из БД SCOS-2000).

Для каждого отображаемого параметра указано значение М (мониторинг), С (параметр задается как часть процесса управления устройством) или М&С (мониторинг и управление). Дано текстовое описание параметра, его текущее значение и физическая величина. По двойному щелчку на строке М&С-параметра открывается окно изменения значения.

Каждый контролируемый параметр может быть выбран из базы данных архива АПНД. Непосредственно в окне поиска можно настроить режим записи данного параметра:

- записывать всегда, каждые n секунд, на протяжении указанного календарного периода;
- записывать только если значение параметра изменилось;
- записывать только если значение параметра изменилось более, чем на указанное значение;
- записывать только при выполнении определенных условий.

Кроме того, можно указать ограничения для формирования предупреждения и тревоги (warning/alarm limits) для данного параметра.

Просмотр записанных данных доступен через пункт Data меню Archive. Изменение параметра отображается как в табличном, так и графическом виде (см. рис. 5 на примере углов места и азимута антенны).

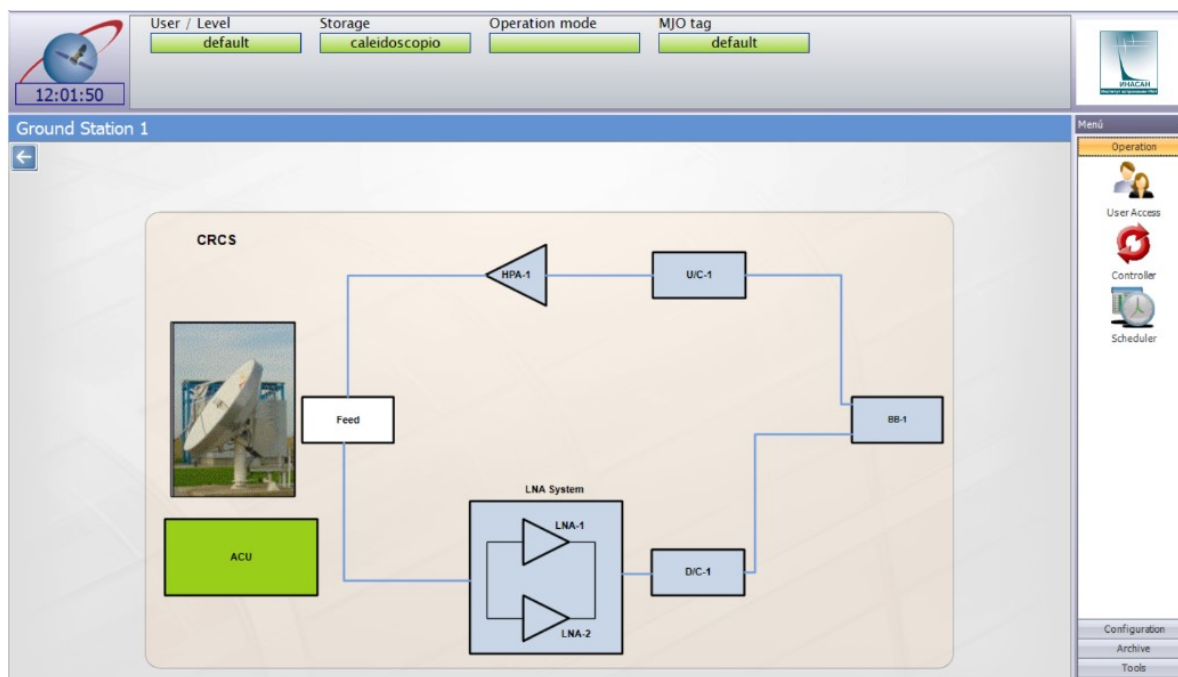


Рис. 3: Пример станционной мнемосхемы.

M	Local/Remote	Remote	
M&C	User Level	2	
M	Tracking Mode	ENABLED	
M	Tracking Submode	ENABLED	
M&C	Antenna Name	Antenna	
M&C	Position [Az]	50.0000	Degrees
M&C	Position [El]	60.0000	Degrees
M&C	Position [Pol]	10.0000	Degrees
M	Time of the measurement position	12	
M&C	Soft limit enabled	ENABLED	
M	Last steptrack peak time	1.0	Degrees
M	Last steptrack peak [El]	1.0	Degrees
M	Last steptrack peak [Az]	1.0	Degrees
M&C	RF Input	1.0	
M&C	Attenuation	1.0	
M&C	Active Steptracking	ON	
C	Tracking Receiver Frequency		
C	Antenna stop		
C	Resume tracking		
C	Stop tracking		
C	Acknowledge and attempt to clear all syste...		

Рис. 4: Пример отображения и задания контрольных параметров СУ приводом.

В ядре RCS находится общий сервер целеуказаний АПНД, который позволяет рассчитывать и рассылать изменения на все станции проекта.

Прокси-модуль предназначен для реализации обменов между CRCS и LRCS посредством четырех основных TCP-сокетов:

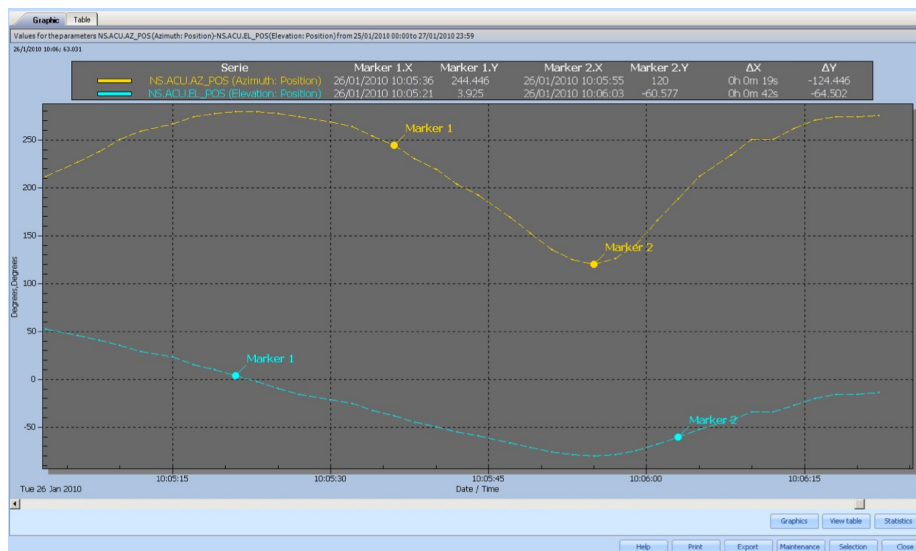


Рис. 5: Просмотр записанных параметров.

- сокет мониторинга, пакеты приходят от LRCS каждый раз по факту изменения параметра;
- сокет команд, LRCS принимает пакеты от авторизованных хостов;
- сокет событий и сокет тревоги, пакеты всех событий приходят от LRCS; CRCS записывает эти данные в архив событий.

Отдельно формируются keepalive-пакеты, которые передаются регулярно для проверки доступности сервиса LRCS. LRCS отвечает пакетами на два сокета — командный и мониторинговый.

3. Заключение

ИНАСАН представлен альтернативный вариант реализации системы приема, предварительной обработки и контроля информации. Описанная в данной статье система может быть реализована силами ИНАСАН при принятии совместно с заказчиком соответствующего решения о перераспределении работ между соисполнителями. Это позволит сделать систему высокоавтоматизированной, не требующий постоянного дежурства операторов, что позволит удешевить эксплуатацию системы, упростить работу операторов и повысить надежность.

Список литературы

1. M. Sachkov, B. Shustov, and A. I. Gomez de Castro, *Proceedings of the SPIE*, **9144**, 914402, 2014.
2. M. Sachkov, S. Sichevsky, and E. Kopylov, *Proceedings of the SPIE*, **13094**, 1309457, 2024.
3. Minstroj Rossii, *Metodicheskie rekomendacii po proektirovaniyu centrov obrabotki dannyh*, 2019.

Принципы функционирования центра обработки научной информации проекта «Спектр-УФ»

Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

ИНАСАН является головным исполнителем по созданию наземного научного комплекса для управления комплексом научной аппаратуры в рамках проекта «Спектр-УФ». В состав указанного наземного научного комплекса, в том числе, входит центр обработки научной информации, выполняющий задачи по формированию программы наблюдений, а также предварительной обработки, хранению и дальнейшей передаче наблюдательной информации. В данной статье приводится описание логики функционирования, организационной структуры, а также информация о серверном и сетевом обеспечении рабочих мест центра обработки научных данных из состава наземного научного комплекса проекта «Спектр-УФ». В конце делается заключение о возможности технической реализации предложенным способом, а также о наличии трудностей в реализации организационной структуры с разделением задач и ответственности между исполнителями.

Поступила в редакцию 29.11.2024 г. Принята в печать 13.12.2024 г.

Ключевые слова: УФ-астрономия, наземный научный комплекс, «Спектр-УФ»

Operating principles of the scientific data processing center of the Spektr-UV project

Arkhangelsky R.N., Iosipenko S.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

INASAN is the lead contractor for the creation of a ground-based scientific complex for the management of a complex of scientific equipment within the framework of the Spektr-UV project. The above-mentioned ground-based scientific complex includes a scientific information processing center that performs tasks for the formation of an observation program, as well as pre-processing, storage and further transmission of observational information. This article describes the logic of functioning, organizational structure, as well as information about the server and network support of the scientific data processing center jobs from the ground-based scientific complex of the Spektr-UV project. At the end, a conclusion is made about the possibility of technical implementation in the proposed way, as well as about the difficulties in implementing an organizational structure with the division of tasks and responsibilities between performers.

Received 29.11.2024. Accepted 13.12.2024.

Keywords: UV astronomy, ground-based scientific complex, Spektr-UV

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.007

1. Введение

В рамках создания Наземного научного комплекса (ННК) для управления комплексом научной аппаратуры (КНА), получения, обработки, анализа, архивирования и распространения полученной в рамках проекта «Спектр-УФ» [1] научной информации ИНАСАН разработан вариант центра обработки научной информации (ЦОНИ), который мог бы быть создан институтом совместно с АО «НПО Лавочкина» [2]. Необходимо отметить, что в состав ННК входят схожие по названию, но отличающиеся по функционалу составные части: центр обработки научной информации (ЦОНИ), обеспечивающий непосредственные технические работы с инструментом и российский региональный центр обработки научной информации (РРЦОНИ), обеспечивающий научного потребителя. Функции ЦОНИ:

- управление комплексом научной аппаратуры;
- формирование программы наблюдений;
- предварительная обработка наблюдательной информации;
- передача в РРЦОНИ обработанной информации;
- хранение наблюдательной информации.

Функции РРЦОНИ:

- формирование перечня заявок на наблюдения;
- обработка, хранение и передача участникам программы наблюдательной информации.

В данной статье приведены основные принципы функционирования и техническое описание ЦОНИ.

2. Логика функционирования

В состав ЦОНИ функционально входят:

- система технологического планирования (СТП), которая объединяет функции генератора краткосрочного научного плана (имеющего технологический вид POS-файла) и компилятора научной командно-программной информации;

- система информационно-телеметрического обеспечения (ИТО).

ЦОНИ отвечает за технологическое планирование работ с точки зрения целевого назначения обсерватории. Это означает, что ЦОНИ предоставляет средства штатной подготовки программы работ — как краткосрочной (STP), так и долгосрочной (LTP).

Также ЦОНИ имеет всю технологическую информацию для формирования оптимизированного файла DBOB — файла наблюдательных возможностей, который позволяет ННК максимизировать отдачу от инструментов и спланировать, в том числе, калибровочные сеансы, необходимые для достижения научных целей.

Система технологического планирования ЦОНИ:

- предоставляет автоматизированные программные средства для планирования;
- использует заявки и хранящуюся в них информацию о наблюдениях (содержит свой упрощенный менеджер заявок, работающий с COF-файлами);
- использует сквозной рабочий план (SSF), который также содержит тени, засветки и интервалы зон видимости наземных станций; использует технологические данные о состоянии бортового ЗУ, энергобалансе, маневрах КА;
- формирует пригодный для использования в центре управления полетами (ЦУП) файл краткосрочного плана (POS), в котором в привязке ко времени находятся все необходимые операции.

Если используется построенная на базе программного обеспечения ЦУП НПО Лавочкина единая система планирования, то POS-файл просто открывается оператором ЦУП для дальнейшей компоновки трех директивных файлов — собственно интегрированного массива командно-программной информации (PTF), файла сеанса для закладки на наземную станцию (OTF) и набора команд для наземных станций (STF).

Для этого используются дополнительные данные, изначально сформированные системой баллистико-навигационного обеспечения специального программного обеспечения ЦУП (файл FPP). Поскольку комплекс баллистико-навигационного обеспечения не имеет прямого доступа к научному архиву (НА) ННК, такие данные синхронизируются посредством ЦОНИ. Очевидно, что данные OTF/PTF не должны конфликтовать с FPP. Такая проверка проводится автоматически. Изначального учета данных ограничений при верстке сеанса недостаточно, т.к. данные FPP могут быть изменены в произвольный момент, асинхронно с любыми другими событиями планирования.

Однако, стоит отметить, что использование единого программного обеспечения планирования не является штатным вариантом для КА на платформе «Навигатор», где используется технологическая связка программное обеспечение планирования + информационно-логический стенд МОКБ «Марс». Скорее всего, потребуется дополнительное преобразование данных. В отличие от имеющейся технологии работы с платформой «Навигатор», в «Спектр-УФ» также используется автоматизированный план задействования станций, где параметры станций (комплекты, литеры, режимы и т.д.) задаются на этапе планирования. В целях обеспечения единого подхода к использованию наземных средств, оператор ЦОНИ может изменять некоторые данные, касающиеся станций аппаратуры приема научных данных, а также справочно использовать остальную информацию STF.

Информационная схема системы технологического планирования показана на рис. 1.

Необработанная телеметрическая информация поступает в ЦОНИ из двух источников: со станций приема научных данных и со станций НКУ. Непосредственным абонентом НКУ, взаимодействующим с ЦОНИ является сектор главного конструктора.

Телеметрическую информацию от станций приема научных данных получают и обрабатывают средства ИТО ЦОНИ, расположенные в центре обработки данных (ЦОД) ННК. Это исключает дублирование телеметрических потоков, снижает задержки при получении информации.

Открытым вопросом является штатное размещение программного клиента управления станциями приема научных данных и соответствующие функции администрирования. С одной стороны, планирование на уровне команд для наземных станций — прерогатива ЦОНИ; с другой стороны, при отсутствии практической интеграции НКУ и ННК организационно представляется наиболее эффективной работа технологической группы в Звенигородской обсерватории.

3. Организационная структура ЦОНИ

Представляется оптимальной работа персонала ЦОНИ на средствах центра управления полетами (ЦУП) в НПО Лавочкина, а размещение серверного оборудования ЦОНИ — на средствах центрального узла связи (ЦУС, ЦОД) НПО Лавочкина, для которого упрощается задача организации каналов связи, обеспечения режима и процессов квалифицированной эксплуатации оборудования.

В случае, если по каким-либо причинам размещение ЦОНИ в НПО Лавочкина невозможно, то оборудование и рабочие места размещаются в лабораторном корпусе Звенигородской обсерватории ИНАСАН.

График работы смен: рабочее время, с учетом выходных дней (сокращенная смена). Нетрудоемкий контроль круглосуточного автоматического приема в ЦОНИ ТМИ со станций приема научных данных мо-

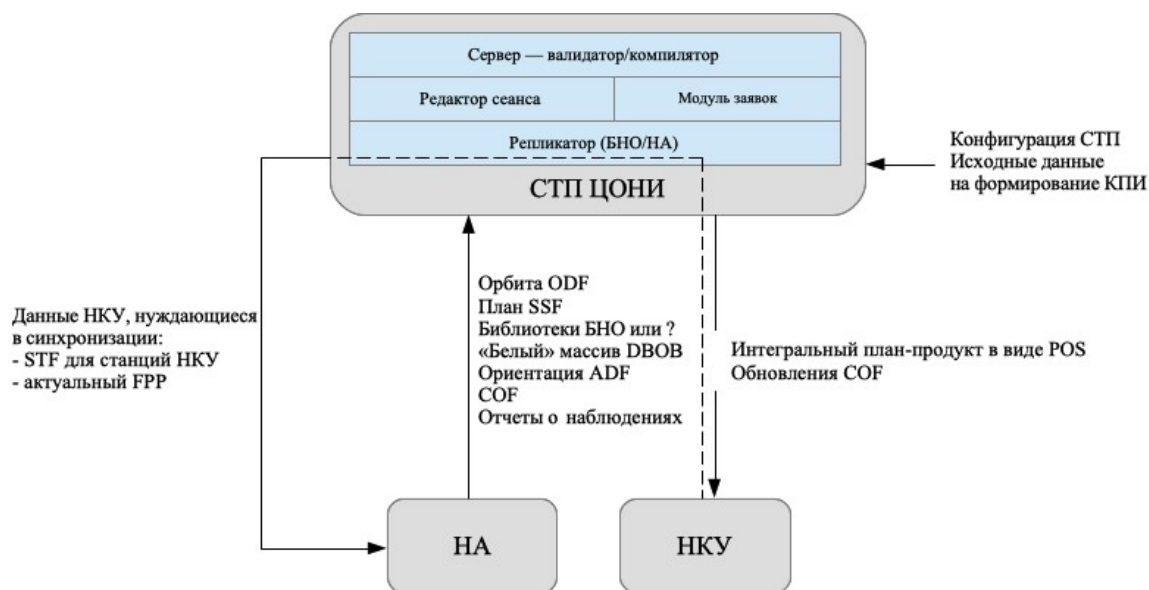


Рис. 1: Информационная схема СТП ЦОНИ.

жет выполнять общая дежурная смена ЦУП НПО Лавочкина или персонал ИНАСАН в Звенигородской обсерватории (по согласованию).

Персонал ЦОНИ работает на типовых рабочих местах (РМ) с использованием серверного и сетевого оборудования, обслуживание и эксплуатацию которого проводит служба эксплуатации ЦУП НПО Лавочкина. В работе дежурной смены задействовано три рабочих места:

- планировщик ЦОНИ (инженер-исследователь ННК);
- анализатор ЦОНИ (инженер-исследователь ННК);
- технолог (специалист ЦУП).

Рабочие места взаимозаменяемые. При необходимости присутствия в ЦОНИ научного специалиста, ему временно выделяется одно из указанных рабочих мест. Рабочие места оснащены необходимыми средствами для документирования и связи. Организуется зона для размещения средств коллективного отображения. Для ЦУП ЦНИИмаш допускается организация одного рабочего места технолога ЦОНИ (специалист НПОЛ или ЦНИИмаш). Полностью дублировать сектор ЦОНИ в ЦУП не требуется. Персонал ЦОНИ размещается в отдельном помещении ЦУП НПО Лавочкина, площадь 15–25 м².

4. Серверное и сетевое обеспечение, обеспечение рабочих мест

В категорию оборудования серверной стойки входят:

- 3 аппаратных сервера, объединенных в пул с помощью гипервизора xcp-ng, совместимого с РРЦОНИ;
- 2 системы хранения данных для организации блочных дисков;
- 2 коммутатора;
- коммутатор SAN;
- необходимое монтажное, сетевое, кабельное оборудование, конструктив.

Долгосрочное хранение информации производится на средствах РРЦОНИ.

Основные технологические особенности:

- обмены ЦОНИ с РРЦОНИ информацией планирования интегрированы в специальное программное обеспечение планирования;
- для обеспечения температурного режима монтаж аппаратуры осуществляется в шкафах, выполненных по стандарту МЭК297;
- часть вычислительной нагрузки (прежде всего информационно-телеметрического обеспечения) может выноситься в ЦОД ННК.

Состав технических средств ЦОНИ приведен на рис. 2.

Предварительный перечень комплектующих представлен в табл. 1.

Вариант расположения рабочих мест ЦОНИ в ЦУП НПО Лавочкина (ЦУП-Л) показан на рис. 3.

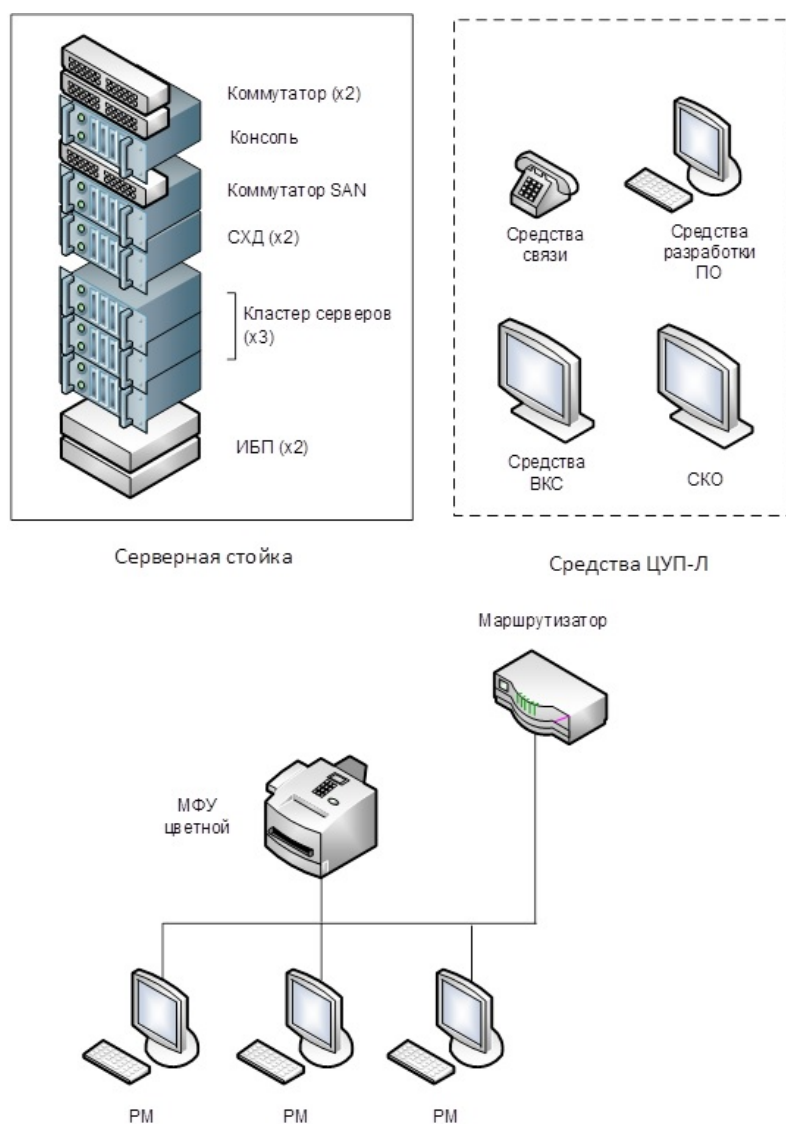


Рис. 2: Состав технических средств ЦОНИ.

Таблица 1: Параметры МШУ.

№ п/п	Наименование	Количество
Серверная стойка		
1.1	Сервер стоечный	3*
1.2	Система хранения данных (комплект с дисками от 20 Тб)	2*
1.3	Управляемый коммутатор	2*
1.4	Коммутатор SAN	1*
1.5	Источник бесперебойного питания стоечный от 2.5 КВт	2*
1.6	Консоль управления стоечная	1
1.7	Маршрутизатор	1*
1.8	Кабельный комплект	1
1.9	Шкаф серверный	1
Рабочие места		
2.1	Моноблок рабочего места	3
2.2	МФУ	1

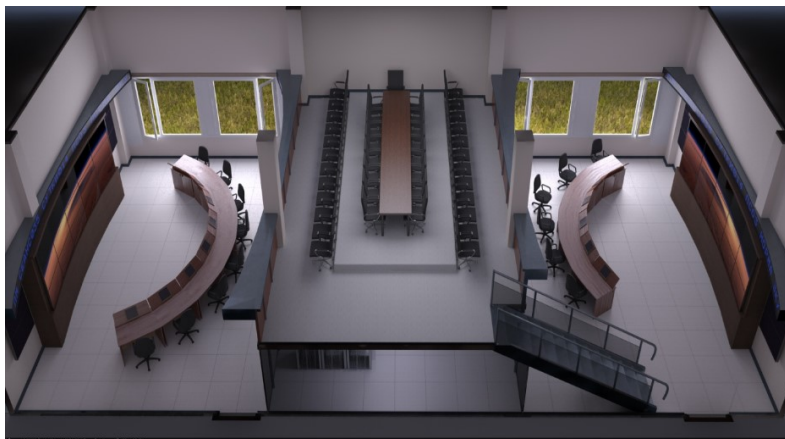


Рис. 3: Расположение РМ ЦОНИ в зале ЦУП НПО Лавочкина.

5. Заключение

В статье кратко была описана логика функционирования и организационная структура, дано описание обеспечения рабочих мест центра обработки научных данных. В целом создание ЦОНИ является технически реализуемой задачей, при этом большая сложность сценариев использования обуславливает наличие трудностей в реализации организационной структуры с разделением задач и ответственности между исполнителями.

Список литературы

1. M. Sachkov, B. Shustov, and A. I. Gomez de Castro, *Proceedings of the SPIE*, **9144**, 914402, 2014.
2. M. Sachkov, S. Sichevsky, and E. Kopylov, *Proceedings of the SPIE*, **13094**, 1309457, 2024.

Фотометрическое исследование карликовой новой TCP J18173469+1803499

Тарасенков А.Н.¹, Соколовский К.В.^{2,3}, Короткий С.А.^{4,5}, Нароенков С.А.¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Астрономическое отделение, Университет Иллинойса в Эрдана-Шампейн, Эрдана, США

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

⁴Астроферма Астроверты, Нижний Архыз, Россия

⁵Обсерватория Ка-Дар, Домодедово, Россия

Мы представляем исследование карликовой новой TCP J18173469+1803499. Она была обнаружена во время широкопольного обзора New Milky Way (NMW) на Астроферме Астроверты, и в течение 9 ночей мы выполняли фотометрический мониторинг этого объекта в полосах BVRI с помощью нового 50-см роботизированного телескопа Кисловодской обсерватории ИНАСАН. Были обнаружены сверхгорбы с периодом 0.0592 суток, которые имели малую амплитуду в начале вспышки, но на 9 сутки после начала вспышки приобрели большую амплитуду и симметричную пилообразную форму. Мы проанализировали фотометрическое поведение TCP J18173469+1803499 по результатам наших наблюдений. Наличие сверхгорбов и амплитуда вспышки, составляющая более 8 звездных величин позволяют отнести этот объект к карликовым новым типа WZ Sge.

Поступила в редакцию 20.10.2024 г. Принята в печать 12.12.2024 г.

Ключевые слова: карликовые новые, фотометрия, индивидуальный объект: TCP J18173469+1803499

Photometric study of dwarf nova TCP J18173469+1803499

Tarasenkov A.N.¹, Sokolovsky K.V.^{2,3}, Korotkiy S.A.^{4,5}, Naroenkov S.A.¹

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²Department of Astronomy, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA

³Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

⁴Astroverti Astrofarm, Nizhniy Arkhyz, Russia

⁵Ka-Dar Observatory, Domodedovo, Russia

We present analysis of a dwarf nova TCP J18173469+1803499. It was discovered during the New Milky Way (NMW) wide-field survey at Astroverti astrofarm, and during 9 nights we performed photometric monitoring of this object in BVRI bands with a new 50-cm robotic telescope of Kislovodsk observatory of the Institute of Astronomy of the RAS. We detected superhumps with a period of 0.0592 days, with a small amplitude at the beginning of the outburst. However, on the 9th day after the start of the outburst they acquired a large amplitude and a symmetrical sawtooth shape. We analyzed the photometric behavior of TCP J18173469+1803499 based on our observations. The presence of superhumps and a flare amplitude of more than 2 magnitudes allow us to classify this object as a dwarf nova of the WZ Sge type.

Received 20.10.2024. Accepted 12.12.2024.

Keywords: dwarf novae, photometry, individual: TCP J18173469+1803499

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.008

1. Введение

Карликовые новые — катаклизмические переменные, представляющие из себя системы из аккрецирующего белого карлика и звезды донора — звезды главной последовательности или субгиганта спектрального класса *K* или *M*. Звезда-донор заполняет полость Роша и поставляет вещество на белый карлик, вокруг которого формируется аккреционный диск [1]. Карликовые новые демонстрируют вспышки, амплитуда которых может достигать 10^m и по форме кривых блеска которых обычно классифицируют данные объекты [2]. Большая амплитуда вспышек и отсутствие четкого периода их повторения делают карликовые новые важными целями для малых телескопов [3]. Для их наблюдения создаются центры координации наблюдений на небольших инструментах, например VSNET [4].

Часто в подобных наблюдательных кампаниях принимают участие как любительские, так и профессиональные обсерватории, и определяющими факторами успешных наблюдений являются наличие системы быстрого оповещения наблюдателей после обнаружения вспышки и автоматизация самого наблюдательного процесса. Инструменты, задействованные в настоящем исследовании, как раз являются роботизированными, что позволило успешно провести фотометрические исследования карликовой новой TCP J18173469+1803499.

2. Обнаружение объекта ТСР J18173469+1803499

Во время обзора New Milky Way (NMW) [5] с помощью обзорной камеры (на основе телеобъектива 135 мм, f/2.0 и ПЗС-камеры SBIG STL-11000M), установленной на Астроферме Астроверты, 2024-09-27.8058 UT был обнаружен источник с блеском 12.6^m в белом свете¹. На снимках, полученных предыдущей ночью в 2024-09-26.7722 UT, объект был слабее 14^m .

Система автодетектирования на основе пакета VaST [6] обнаруживает появление нового объекта, сравнивая списки звезд, видимых на паре кадров, полученных со сдвигом, со списком звезд, найденных на опорном кадре. Вычитание изображений не используется. Для обнаружения звезд и измерения их яркости VaST используется пакет SExtractor [7]. Сдвиг между парой кадров второй эпохи помогает отличить дефекты изображения (положение которых фиксировано относительно ПЗС детектора) от объектов, неподвижных относительно неба. Опорный кадр представляет собой глубокий снимок, полученный с той же камерой в хороших условиях. Съемка производится без фильтра с экспозицией 20 сек. Нуль-пункт инструментальной шкалы звездных величин устанавливается используя величины V звезд из каталога Tycho-2 [8], видимых на снимках. Астрометрическая привязка снимков осуществляется с помощью кода Astrometry.net [9] с последующим определением локальных поправок к общему астрометрическому решению кадра в районе каждого измеряемого объекта. Такой метод позволяет достичь точности определения координат порядка $2''$ при масштабе изображения обзорной камеры $13.8''/\text{pix}$ (поле зрения камеры составляет $15^\circ \times 10^\circ$).

Источник отождествлен со звездой Gaia DR3 4523672311648740992 (18:17:34.807 +18:03:48.84 J2000; $G=21.0$; $BP=21.0$; $RP=21.2$ [10]) и получил обозначение ТСР J18173469+1803499. Т. Ванмюнстер сообщил² об обнаружении сверхгорбов у ТСР J18173469+1803499 на основе наблюдений, полученных 29/30 сентября, и на основании этого сделал вывод о принадлежности объекта к карликовым новым типа SU UMa.

3. Наблюдения в Кисловодской обсерватории ИНАСАН

Мы проводили фотометрический мониторинг ТСР J18173469+1803499 в полосах $BVRI$ с 28 сентября по 12 октября 2024 г. в течение девяти ночей на 50-см телескопе Astrosib RC500 Кисловодской обсерватории ИНАСАН. Телескоп оборудован sCMOS-камерой ZWO ASI6200MM Pro, позволяющей получать кадры с мертвым временем менее 1 секунды, что важно для наблюдения быстро переменных объектов. Поле зрения инструмента — $20' \times 30'$, размер пикселя — $0.377''$ при биннинге 2. Телескоп способен проводить наблюдения в дистанционном и роботизированном режимах [11].

Наблюдения проводились с экспозицией 90 секунд и последовательной сменой фильтров. За время наблюдений получена 1271 оценка блеска. Общая кривая блеска приведена на рис. 2. Фотометрия ТСР J18173469+1803499 на полученных кадрах производилась с помощью программы AstroimageJ [12], разработанной для высокоточной фотометрии и позволяющей непосредственно во время обработки наблюдений отбросить звезды сравнения, у которых выявлена переменность.

В качестве звезд сравнения были выбраны близкие звезды поля, их звездные величины брались из каталога Syntphot Gaia DR3 [10], как из единственного источника, содержащего звездные величины более чем 200 тысяч звезд во всех широко используемых фотометрических системах, в том числе $UBVRI$ Джонсона-Козинса, с глубиной до 18 величины в фильтре V . Поисковая карта с отмеченным положением объекта и звезд-стандартов приведена на рис. 1.

4. Анализ кривой блеска

Мы проанализировали фотометрическое поведение ТСР J18173469+1803499 с целью подтверждения классификации объекта и исследования его характеристик. В течение первых 7 суток с момента начала вспышки звезда демонстрировала монотонное падение блеска. На кривой блеска присутствовали незначительные вариации с амплитудой менее 0.05^m ; явной периодичности изменения блеска на данном этапе вспышки выявлено не было. 5 октября 2024 года на кривой блеска стали проявляться сверхгорбы. На следующую ночь их амплитуда достигла 0.11^m , и стала явно видна характерная пилообразная форма кривой блеска. 7 октября амплитуда сверхгорбов была максимальной — 0.25^m , затем начала уменьшаться. Сверхгорбы имеют асимметричную форму: нисходящая ветвь примерно в два раза дольше, чем восходящая. Кривая блеска во вспышке ахроматична — показатель цвета $B - V$ равен 0.3^m , а $V - R$ и $R - I$ близки к 0^m . На различных фазах сверхгорбов показатели цвета неизменны. Амплитуда вспышки составляет 8.5^m в полосе g по данным AAVSO VSX. Наличие суперхампов и высокая амплитуда вспышки позволяют отнести этот объект к карликовым новым типа WZ Sge. Кривые блеска от 6, 7 и 9 октября 2024 г., где сверхгорбы видны наиболее явно, приведены на рис. 3.

¹<http://www.cbat.eps.harvard.edu/unconf/followups/J18173469+1803499.html>

²<http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailman3/hyperkitty/list/vsnet-alert@ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/message/SFSKMXDHYYJ25NHEFX4RFJIEUWNUZZSQ/>

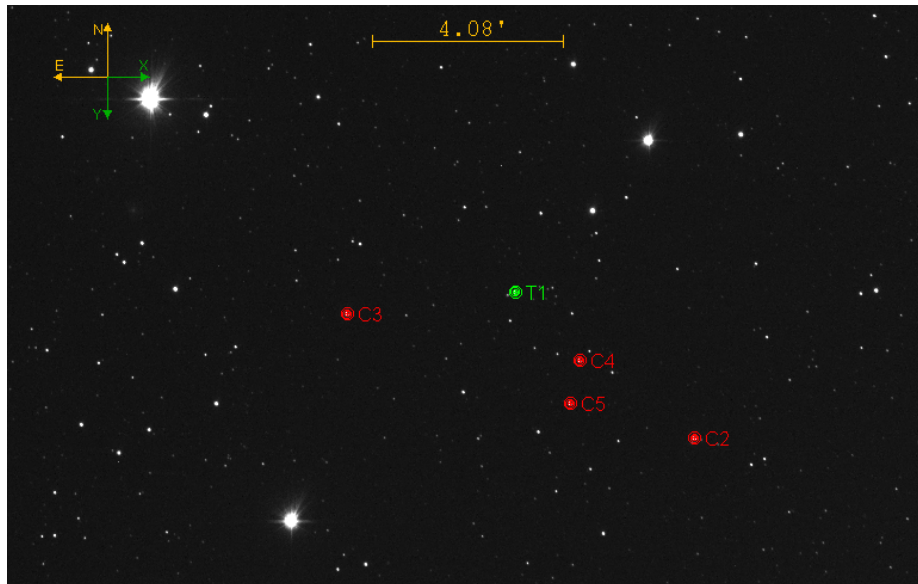


Рис. 1: Поисковая карта для TCP J18173469+1803499, созданная на основе кадра в полосе V . Исследуемый объект отмечен зеленым, звезды сравнения — красными кружками.

Мы определили период сверхгорбов с помощью программы WinEFK³, основные алгоритмы которой описаны в работе [13]. Для этого использовались реализованные в программе алгоритмы Диминга [14] и Лафлера-Кинмана [15]. Период сверхгорбов составил 0.0592^d , кривая блеска от 6 октября в фильтре V , свернутая с данным периодом, показана на рис. 4.

5. Обсуждение

Обнаружение сверхгорбов на кривой блеска TCP J18173469+1803499 позволяет классифицировать этот объект как карликовую новую типа SU UMa. Однако более глубокое исследование, в частности — нахождение

³<http://www.vgoranskij.net/software/WinEFengVers2015-09-08.zip>

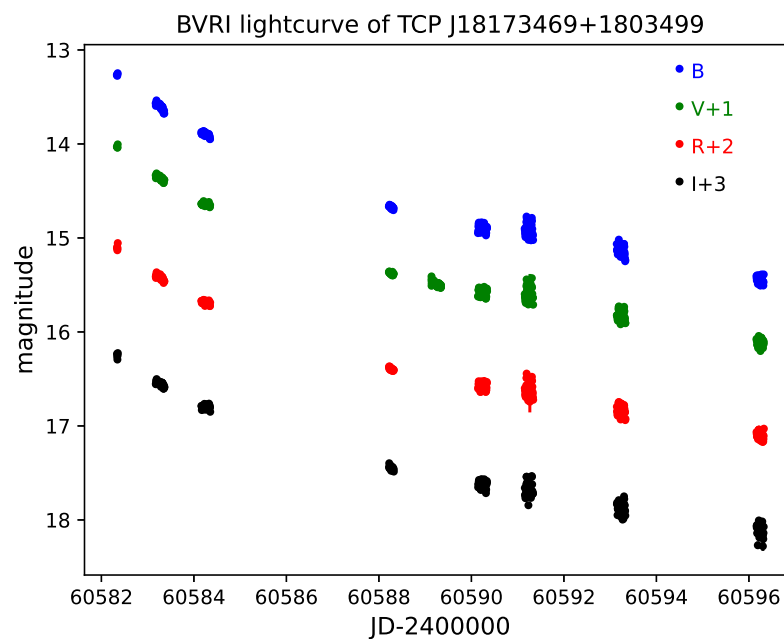


Рис. 2: Кривая блеска TCP J18173469+1803499, полученная на Astrosib RC500.

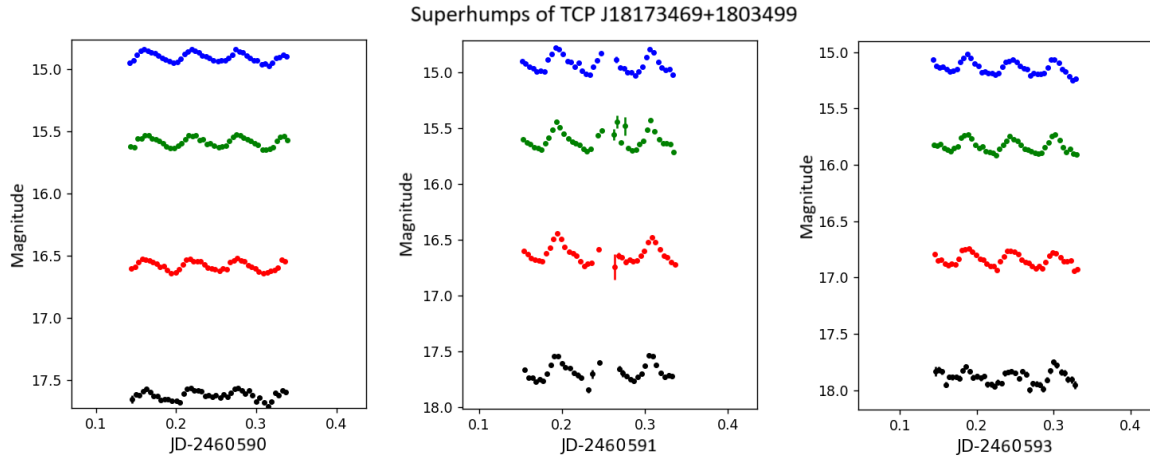


Рис. 3: Кривые блеска TCP J18173469+1803499 во время отдельных ночей. Обозначения полос как на рис. 2.

орбитального периода, потребует дополнительных наблюдений на крупных телескопах вне вспышки. Но уже сейчас можно сделать вывод, что орбитальный период близок к 0.06^d , поскольку период сверхгорбов отличается от орбитального на несколько процентов [16].

Анализ наблюдений ZTF [17] при помощи интерактивного интерфейса SNAD [18] показал отсутствие вспышек за 3 года, предшествовавших наблюдениям. Согласно данным обзора ASAS-SN [19], объект не демонстрировал вспышек за период как минимум 10 лет, предшествующих описанному выше событию. Следовательно, длительность суперцикла может быть очень велика. Вместе с большой амплитудой вспышек это указывает на принадлежность объекта к звездам типа WZ Sge — подтипу звезд SU UMa, характеризующемуся наряду с наличием супервспышек отсутствием обычных вспышек и суперциклом длительностью в десятки лет [20].

Из-за редкости и большой амплитуды вспышек, впервые обнаруженная вспышка ранее неизвестной карликовой новой типа WZ Sge может быть спутана с другими типами транзиентов, в первую очередь с классическими новыми [21], а также с более редкими красными новыми [22], оптическими вспышками маломассивных рентгеновских двойных систем («рентгеновские новые» [23]) и вспышками молодых звезд типа FU Ori и EX Lup [24].

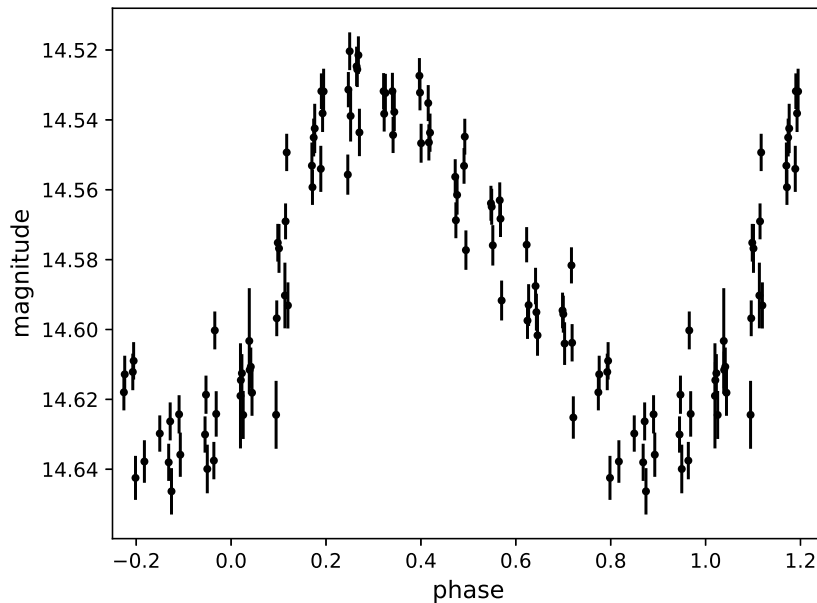


Рис. 4: Кривая блеска, свернутая с периодом 0.0592^d .

Спектроскопические наблюдения являются наилучшим способом понять природу вновь обнаруженной вспышки, но в их отсутствие надежно классифицировать новый объект часто позволяют фотометрические наблюдения. Карликовые новые можно отличить от классических по цветам и наблюдаемой звездной величине. Для карликовых новых во вспышке характерны белые цвета горячего аккреционного диска. Классические новые сразу после максимума блеска [25] тоже белые, но они будут или очень яркими (типичная новая будет ярче 10^m на расстоянии 15 пк в отсутствие поглощения), или испытывать значительное покраснение. Обнаружение же сверхгорбов является надежным признаком того, что объект является именно карликовой новой (хотя напоминающая сверхгорбы переменность наблюдалась и в рентгеновской двойной системе [26]).

6. Заключение

Проведенные нами наблюдения карликовой новой ТСР J18173469+1803499 являются доказательством эффективности малых инструментов для исследования карликовых новых звезд. Фотометрия, полученная на телескопах полуметрового класса, позволяет сделать выводы не только о типе объекта, но и о таких его важных свойствах, как период сверхгорбов, показатели цвета, скорость затухания. Однако для наиболее полного исследования карликовых новых необходимы скоординированные наблюдения множества небольших инструментов. Учитывая возможность наших телескопов вести наблюдения в автоматическом режиме, мы планируем в будущем присоединиться к подобному проекту, организованному японскими астрономами [27].

Мы выражаем благодарность И.Б. Волошиной за ценные советы по наблюдению и исследованию карликовых новых звезд и В.П. Горанскому за возможность использования программы WinEFK.

Список литературы

1. C. Hellier, *Cataclysmic Variable Stars* (2001).
2. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astronomy Reports*, **61**, 80, 2017.
3. W. S. G. Walker and B. F. Marino, *Southern Stars*, **30**, 168, 1982.
4. D. Nogami, T. Kato, A. Imada, M. Uemura, R. Ishioka, H. Yamaoka, and H. Baba, *Astronomical Herald*, **98**, 635, 2005.
5. K. Sokolovsky, S. Korotkiy, and A. Lebedev, in P. A. Woudt and V. A. R. M. Ribeiro, eds., *Stellar Novae: Past and Future Decades*, **490**, 395 (2014).
6. K. V. Sokolovsky and A. A. Lebedev, *Astronomy and Computing*, **22**, 28, 2018.
7. E. Bertin and S. Arnouts, *A&A Sup.*, **117**, 393, 1996.
8. E. Høg, C. Fabricius, V. V. Makarov, S. Urban, et al., *A&A*, **355**, L27, 2000.
9. D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, M. Blanton, and S. Roweis, *AJ*, **139**, 1782, 2010.
10. Gaia Collaboration, A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, et al., *A&A*, **674**, A1, 2023.
11. S. A. Naroenkov, A. N. Tarasenkova, and M. A. Nalivkin, *INASAN Science Reports*, **9**, 6, 2024.
12. K. A. Collins, J. F. Kielkopf, K. G. Stassun, and F. V. Hessman, *AJ*, **153**, 77, 2017.
13. V. P. Goranskij, *Peremennye Zvezdy Prilozhenie*, **2**, 323, 1976.
14. T. J. Deeming, *Ap&SS*, **36**, 137, 1975.
15. J. Lafler and T. D. Kinman, *ApJS*, **11**, 216, 1965.
16. Y. Osaki, *PASP*, **108**, 39, 1996.
17. E. C. Bellm, S. R. Kulkarni, M. J. Graham, R. Dekany, et al., *PASP*, **131**, 018002, 2019.
18. K. Malanchev, M. V. Kornilov, M. V. Pruzhinskaya, E. E. O. Ishida, et al., *PASP*, **135**, 024503, 2023.
19. C. S. Kochanek, B. J. Shappee, K. Z. Stanek, T. W. S. Holien, et al., *PASP*, **129**, 104502, 2017.
20. T. Kato, *PASJ*, **67**, 108, 2015.
21. L. Chomiuk, B. D. Metzger, and K. J. Shen, *ARA&A*, **59**, 391, 2021.
22. A. Pastorello, E. Mason, S. Taubenberger, M. Fraser, et al., *A&A*, **630**, A75, 2019.
23. Y. Wang, E. C. Bellm, A. Crossland, W. I. Clarkson, A. Mazzi, R. Riddle, R. R. Laher, and B. Rusholme, *ApJ*, **962**, 91, 2024.
24. L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet, *ARA&A*, **54**, 135, 2016.
25. S. van den Bergh and P. F. Younger, *A&A Sup.*, **70**, 125, 1987.
26. K. Nijima, M. Kimura, Y. Wakamatsu, T. Kato, et al., *arXiv e-prints*, arXiv:2107.03681, 2021.
27. T. Kato, A. Imada, M. Uemura, D. Nogami, et al., *PASJ*, **61**, S395, 2009.

Двухканальные фотоэлектрические поляриметры (POLSHAKH) Крымской астрофизической обсерватории и обсерватории Пик Терскол: принципиальная схема, конструкция и результаты первых наблюдений

Шаховской Д.Н.¹, Киселев Н.Н.¹, Долгополов А.В.¹, Антонюк К.А.¹, Иванов Ю.С.^{2,3}, Карпов Н.В.^{3,4}, Тарадий В.К.³, Савушкин А.А.¹, Рябов А.В.⁵, Таран А.В.¹

¹ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

² Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина

³ Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, Киев, Украина

⁴ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

⁵ Астрономическая обсерватория Одесского национального университета им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина

Описывается конструкция, оптическая схема и результаты исследований двух новых двухканальных фотоэлектрических поляриметров 2.6-м (f/16) телескопа ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории и 2-м (f/8) RCC телескопа обсерватории Пик Терскол. Поляриметры предназначены для измерения параметров линейной и круговой поляризации как в широкополосных фильтрах UBVR, так и в специальных узкополосных фильтрах различных небесных тел. Возможности использования приборов демонстрируются на примерах наблюдений поляриметрических стандартов и различных астрофизических объектов (звезды, кометы, спутники планет). Показано, что параметры инструментальной поляризации не превосходят 0.04% в BVRI фильтрах, они мало меняются от сезона к сезону, что делает возможным, после их исключения, изучать тонкие поляриметрические эффекты небесных тел. Учитывая выдающийся вклад Н.М. Шаховского в развитие поляриметрического метода и его аппаратного обеспечения, созданные поляриметры получили название POLSHAKH.

Поступила в редакцию 08.11.2024 г. Принята в печать 16.12.2024 г.

Ключевые слова: поляриметры, инструментальная поляризация, фотометрические полосы UBVR, поляриметрические наблюдения

Dual-channel photoelectric polarimeters (POLSHAKH) of the Crimean Astrophysical Observatory and the Terskol Peak Observatory: basic design, construction, and first observation results

Shakhovskoy D.N.¹, Kiselev N.N.¹, Dolgoplov A.V.¹, Antonyuk K.A.¹, Ivanov Yu.S.^{2,3}, Karpov N.V.^{3,4}, Taradiy V.K.³, Savushkin A.A.¹, Ryabov A.V.⁵, Taran A.V.¹

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny, Russia

² Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ International Center for Astronomical, Medical, and Ecological Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴ Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵ Astronomical Observatory of I.I. Mechnikov Odessa National University, Odessa, Ukraine

The article describes the design, optical scheme and results of studies of two new dual-channel photoelectric polarimeters of the 2.6-m (f/16) ZTSh telescope of the Crimean Astrophysical Observatory and the 2-m (f/8) RCC telescope of the Terskol Peak Observatory. The polarimeters are designed to measure the parameters of linear and circular polarizations both in broadband UBVR filters and in special narrowband filters of various celestial bodies. The capabilities of the devices are demonstrated by examples of observations of polarimetric standards and various astrophysical objects (stars, comets, planetary satellites). It is shown that the parameters of instrumental polarization do not exceed 0.04% in BVRI filters, they change little from season to season, which makes it possible, after their exclusion, to study subtle polarimetric effects of celestial bodies. Considering the significant contribution of N.M. Shakhovskoy to the development of the polarimetric method and its instrumental support, the polarimeters were named POLSHAKH.

Received 08.11.2024. Accepted 16.12.2024.

Keywords: polarimeters, instrumental polarization, UBVR photometric bands, polarimetric observations

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.009

1. Введение

Физические характеристики небесных тел изучаются посредством анализа свойств пришедшего от них излучения. Свет обладает волновыми свойствами, описываемыми системой уравнений для электрического и магнитного полей. Полными характеристиками излучения являются интенсивность и параметры поляризации. Последние характеризуют степень асимметрии в распределении электрических векторов и направление их

максимальных колебаний (линейная поляризация) и/или вращения (эллиптическая/круговая поляризация). Векторные характеристики электромагнитной волны можно измерить с помощью специальных устройств (поляроиды, призмы, фазовые пластинки), на основе которых конструируются поляриметры. Тем самым появляется возможность изучить полные характеристики излучения. Причем чувствительность поляризационных характеристик к физическим свойствам изучаемых объектов иногда значительно эффективнее спектрофотометрических свойств излучения. С этой целью развиваются методы и приборы поляриметрических измерений.

Одними из первых исследователей свойств поляризованного излучения различных астрофизических объектов были крымские астрофизики Н.М. Шаховской и Ю.С. Ефимов. Они внесли огромный вклад в развитие поляриметрических методов, а также в создание поляриметрических приборов. В 1961 г. Н.М. Шаховской и Н.А. Димов создали первый поляриметр Крымской астрофизической обсерватории (КраО) [1]. Для получения независимых от изменений яркости измерений поляризации у быстропеременных объектов прибор был изготовлен с вращающимся со скоростью 1 об/с модулятором (поляроид). Результаты [1, 2, 3, 4], полученные с этим поляриметром, были впечатляющими. Н.М. Шаховской открыл переменную поляризацию излучения затменно-двойных звезд типа β Lyr [5], что отражено Т. Герельсом в хронологии выдающихся поляриметрических событий [6]. С участием Ю.С. Ефимова в 1969 в КраО был создан поляриметр с оптимальной, с точки зрения подавления атмосферных эффектов, частотой модуляции (33 об/с) [7, 8]. Этот прибор с несколькими существенными модернизациями [9, 10] долгое время использовался на 2.6-м телескопе ЗТШ. Однако поляриметр, даже в последней модификации, оставался одноканальным, с 50% потерей света на призме Франка-Риттера, невысокой квантовой эффективностью ФЭУ-136. Его дальнейшая модернизация была невозможна, что сделало актуальной задачу создания нового прибора.

В 2011 г. проф. Джеймс Хаф (James Hough, Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, Hatfield, United Kingdom) передал в КраО оборудование, используя которое инициативная группа сотрудников КраО, Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО НАНУ), Астрономической обсерватории Одесского национального университета им. И.И. Мечникова (АО ОНУ), Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины (МЦАМЭИ) решила построить два современных апертурных фотоэлектрических поляриметра для 2.6-м (f/16) телескопа ЗТШ (КраО) и 2-м (f/8) RCC телескопа фирмы Carl Zeiss обсерватории Пик Терскол (МЦАМЭИ). В настоящей работе приводятся описание новых поляриметров, принципа измерений поляризованного излучения, характеристик инструментальной поляризации и результаты первых наблюдений различных астрофизических объектов.

2. Блок-схема двухканальных поляриметров

В основу принципа измерения параметров поляризации положена схема, состоящая из непрерывно вращающейся с высокой частотой четвертьволновой (или полуволновой) пластинки, с последующим расщеплением света на две ортогонально поляризованные компоненты с помощью призмы Волластона. Принципиальная блок-схема созданных поляриметров показана на рис. 1, где отмечены основные узлы и оптические элементы. Основные различия поляриметров 2.6-м телескопа КраО и 2-м телескопа обсерватории Пик Терскол связаны с разными относительными отверстиями — f/16 и f/8, соответственно.

Для удобства работы с поляриметрами и их обслуживания была выбрана конструктивная схема, состоящая из отдельных узлов, каждый из которых по своим направляющим устанавливается в корпус прибора. Повторяемость установки узлов составляет не менее 0.1 мм, что обеспечивает сохранность юстировки оптических элементов поляриметров.

Блок диафрагм (рис. 1: 1). На входе поляриметра находится турель с четырьмя круглыми диафрагмами, изготовленными из диэлектрического материала. Пятое пустое гнездо служит для поиска и предварительной установки объекта. Поле диафрагм подсвечивается с регулируемой яркостью. Линейные и угловые размеры диафрагм приведены в табл. 1. Турель диафрагм с приводом от шагового двигателя обеспечивает воспроизводимость повторной установки диафрагмы с точностью ± 0.1 мм.

Устройство подсмотра (рис. 1: 2). Узел подсмотра диафрагм, состоит из ПЗС камеры Meade DSI II, объектива и механизма ввода-вывода с оптической оси отклоняющего зеркала. Устройство совмещено с эталонным источником света, излучение которого перебрасывается на вход прибора при введенном зеркале подсмотра. Устройство подсмотра позволяет контролировать положение наблюдаемого объекта в диафрагме. Изображение объекта в поле зрения искателя и в диафрагме выводится на экран компьютера. Поле зрения устройства подсмотра около 2 угловых минут в фокальной плоскости телескопа.

Блок фазовых пластинок (модулятор) (рис. 1: 4). Этот блок состоит из электродвигателя постоянного тока с полым валом и встроенным датчиком угла его положения. К валу двигателя крепится съемный узел с суперхроматическими четвертьволновой или полуволновой фазовыми пластинками APSAW с покрытием MgF_2 (изготовлены В. С. Самойловым, ГАО НАНУ) и линзой поля. Размещение линзы поля во вращающемся узле фазовой пластинки позволяет избежать влияния на измерения паразитных фазовых сдвигов в стекле линзы, расположенной перед поляризационным анализатором.

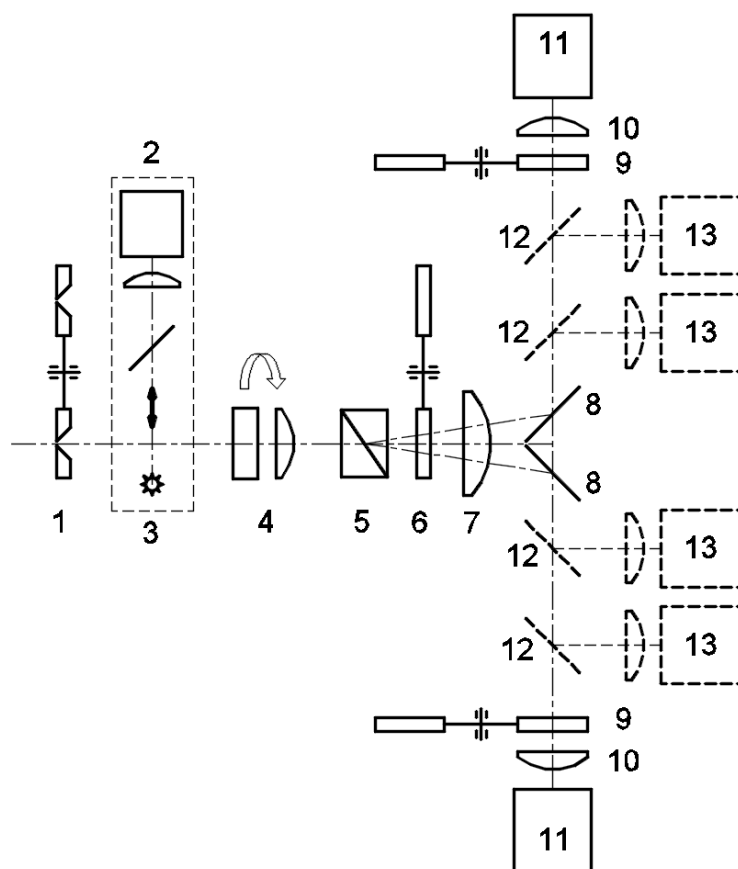


Рис. 1: Принципиальная блок-схема двухканальных поляриметров, установленных на 2.6-м телескопе ЗТШ КрАО и 2-м RCC телескопе обсерватории Пик Терскол (МЦАМЭИ). 1 — турель с входными диафрагмами на 5 позиций; 2 — узел подзора диафрагм; 3 — эталонный источник; 4 — вращающаяся четвертьволновая (или полуволновая) пластинка с линзой поля (модулятор); 5 — призма Волластона; 6 — турель нейтральных фильтров на 5 позиций; 7 — коллективная линза; 8 — отклоняющие зеркала; 9 — турель со сменными светофильтрами на 8 позиций; 10 — линзы Фабри; 11 — фотоумножители. Пунктиром показаны дихроичные фильтры (12) и приемники излучения (13) для расширения возможностей поляриметра в будущем.

Конструкция приборов позволяет оперативно проводить смену фазовых пластинок без снятия поляриметров с телескопов. Диаметр пластинок составляет 20 мм, а световой диаметр — 18.5 мм. Воспроизводимость ориентации пластинок относительно вала двигателя при повторной установке не хуже 0.1° . Зависимости фазовых сдвигов пластин от длины волны показаны на рис. 2. Частота вращения фазовой пластинки составляет около 30 об/с. Сигнал встроенного датчика положения ротора поступает на контроллер прибора, который обеспечивает синхронное интегрирование сигнала в пределах 16 -ти секторов по 11.25° на каждые пол-оборота ротора.

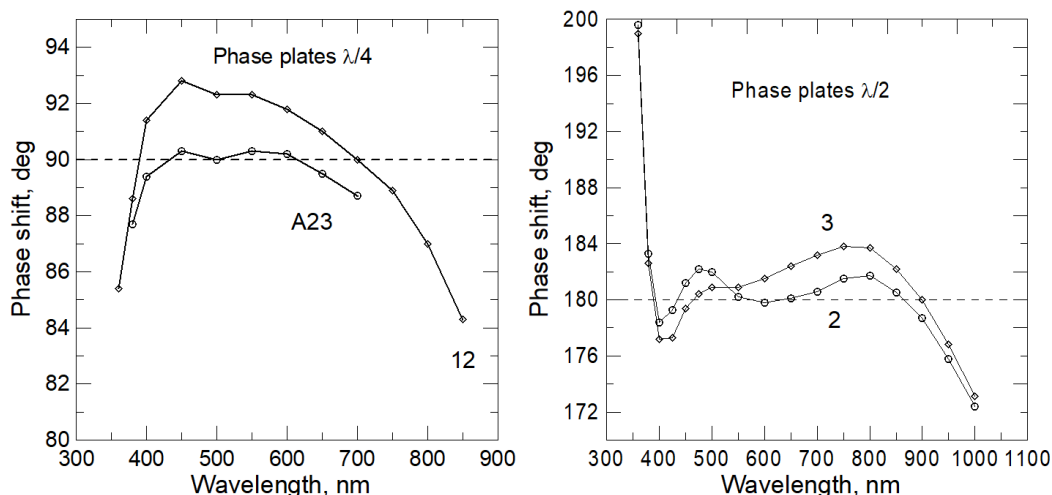
Блок призмы Волластона (рис. 1: 5). Кальцитовая призма Волластона расщепляет пучок на два луча с ортогональными колебаниями электрических векторов. Световой диаметр призм составляет 20 мм, угол расхождения лучей 20° . С учетом работы в широком диапазоне температур, призмы Волластона не склеены, а помещены в герметичные капсулы, наполненные иммерсионным маслом.

Турель с нейтральными фильтрами (рис. 1: 6). Нейтральные фильтры используются для наблюдений программных объектов и поляриметрических стандартов ярче $\approx 7^m$. Пропускание нейтральных фильтров показано на рис. 3.

Линза-коллектив и отклоняющие зеркала (рис. 1: 7, 8). Линза-коллектив сопрягает фокальную плоскость телескопа и линзы Фабри и уменьшает расходимость пучков до уровня, приемлемого для интерференционных фильтров. Разделитель пучков, состоящий из двух плоских зеркал, направляет свет в «красный» и «синий» блоки поляриметра. Каждый из блоков состоит из турели светофильтров на восемь позиций, линзы Фабри и фотоумножителя. Между зеркалами и турелями имеются установочные места для дихроичных фильтров, которые могут быть использованы для увеличения числа каналов регистрации до шести (по три детектора на блок).

Таблица 1: Размеры входных диафрагм в поляриметрах КраО и обсерватории Пик Терскол.

Поляриметр 2.6-м телескопа ЗТШ (f/16)		Поляриметр 2-м RCC телескопа (f/8)	
Диаметр, мм	Диаметр, угл. сек	Диаметр, мм	Диаметр, угл. сек
1	5	0.4	5
2	10	0.8	10
3	15	1.2	15
6	30	2.4	30
22.5 (пустое гнездо)	112	22.5 (пустое гнездо)	290

Рис. 2: Зависимость фазового сдвига от длины волны: слева) пластинки $\lambda/4$ (A23 — КраО, 12 — Терскол); справа) пластинки $\lambda/2$ (2 — КраО, 3 — Терскол).

Турель фильтров (рис. 1: 9). Турели имеют восемь позиций для установки светофильтров диаметром 1 дюйм. Спецификация стекол, обеспечивающих наблюдения в фотометрических полосах, близких к системе UBVRJ Джонсона-Кузинса [11], в «красном» и «синем» каналах представлены в табл. 2.

В свободные гнезда турелей по мере необходимости можно вставить узкополосные кометные фильтры из наборов NASA и ESA, изготовленных для наблюдений кометы Хейла-Боппа. Фильтры любезно предоставлены Drs. D.G. Schleicher (Lowell Observatory) и R. Schulz (ESA). Характеристики узкополосных кометных фильтров представлены в табл. 3.

Нормированные кривые пропускания UBVRJ фильтров («красный» канал) и UVB фильтров («синий» канал) представлены на рис. 4 и 5, соответственно.

Фотоумножители (рис. 1: 11). Приемником излучения в «красном» канале служит фотоумножитель HAMAMATSU R943-02 с системой термоэлектрического охлаждения Photocool TE-206TSRF. Фотоумножитель при рабочем напряжении питания 1800 В и при температуре -10° имеет темновой ток ~ 10 имп/сек. Приемником излучения в «синем» канале служит неохлаждаемый фотоумножитель ЕМІ 6556В, который при рабочем напряжении питания 1400 В и температуре $+10^\circ$ имеет темновой ток ~ 5 имп/сек. Оптическая схема двухканального поляриметра приведена на рис. 6.

3. Система управления и регистрации

Система управления и регистрации состоит из специально разработанной платы контроллера, с установленными на ней микроконтроллером ATmega 162, и тремя микроконтроллерами ATmega 48, программного обеспечения микроконтроллеров, программы управления на ПК с ОС Windows. Связь контроллера с ПК осуществляется посредством гальванически развязанного преобразователя интерфейсов RS-232/RS-422.

Контроллер обеспечивает счет импульсов ФЭУ отдельно в каждом из 16 секторов положения фазовой пластинки (строб) и измерение длительности каждого строба с точностью 0.5 мкс (каждый из ATmega 48 является счетчиком для двух каналов регистрации). Контроллер позволяет осуществлять счет импульсов от шести ФЭУ одновременно, с учетом возможной модернизации прибора с увеличением числа каналов.

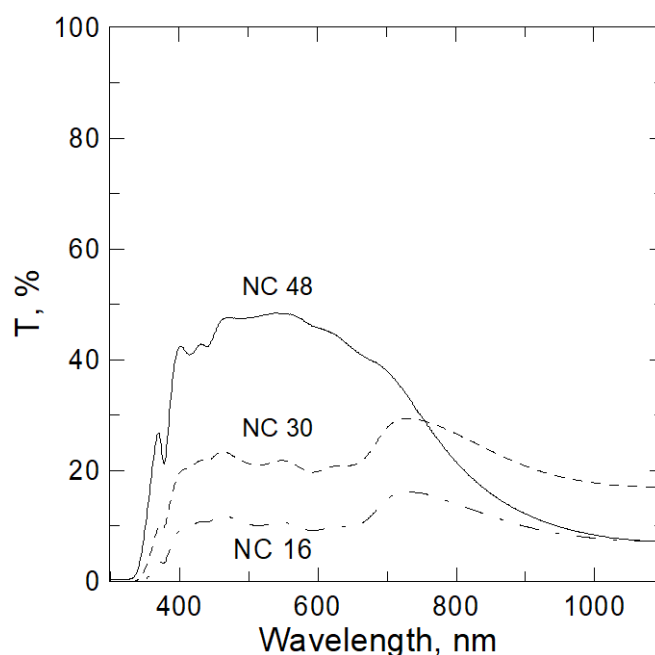


Рис. 3: Зависимость пропускания нейтральных фильтров от длины волны.

Мертвое время счетчиков импульсов не более 50 нс. Время накопления сигнала задается в пределах от одного оборота фазовой пластинки (около 30 мс) до 20 секунд (всегда целое число оборотов). В конце периода накопления на ПК передаются для каждого из активных каналов регистрации по 16 трехбайтовых отсчетов накопленных импульсов и 16 общих для всех каналов отсчетов суммарной длительности стробов каждого сектора. Контроллер также обеспечивает управление турелью диафрагм, подсветкой диафрагм, тремя турелями фильтров, устройством ввода/вывода зеркала подсмотра, запуск и остановку двигателя

Таблица 2: Характеристики широкополосных фильтров, установленных в поляриметрах КрАО и обсерватории Пик Терскол (центральная длина волны и полная ширина на полувысоте).

п/п	«Красный» канал		«Синий» канал	
	Стекла, Hamamatsu R943-02	Полоса, λ_0 /FWHM, Å	Стекла, ЕМІ 6556 В	Полоса, λ_0 /FWHM, Å
1	УФС-6 (1 мм) + СЗС-21 (2 мм)	U, $\lambda_{3759}/333$	УФС-5 (1 мм)	U, $\lambda_{3605}/736$
2	СС-5 (1 мм) + СЗС-21 (2 мм)	B, $\lambda_{4381}/1191$	СС-5 (1 мм)	B, $\lambda_{4345}/1174$
3	ЖС-18 (1 мм) + СЗС-21 (2 мм)	V, $\lambda_{5317}/674$	ЖС-18 (1 мм)	V ¹ , $\lambda_{4504}/804$
4	СЗС-27 (2 мм) + ОС-13 (3 мм)	R ² , $\lambda_{6880}/2310$		
5	Фильтр R λ_{6400} Å	R ³ , $\lambda_{6826}/1588$		
6	«Красный» λ_{7000} Å (5 мм)	I ⁴ , $\lambda_{8093}/1881$		

Примечания: 1 — красная граница полосы V «синего» канала формируется спектральным пропусканием фотоумножителя ЕМІ 6556 В; 2 — комбинация стекол изготовлена в САО РАН для полосы R поляриметра КрАО; 3 — полоса R поляриметра обсерватории Пик Терскол формируется комбинацией спектрального пропускания фильтра λ_{6400} Å и спектральным пропусканием фотоумножителя Hamamatsu R943-02; 4 — полоса I формируется комбинацией спектрального пропускания фильтра λ_{7000} Å и спектральным пропусканием фотоумножителя Hamamatsu R943-02. Для UVV полос «синих» каналов учтена спектральная зависимость прозрачности атмосферы по данным работы [12].

Таблица 3: Характеристики узкополосных кометных фильтров (центральная длина волны и полная ширина на полувысоте), используемых в поляриметрах КраО и обсерватории Пик Терскол.

Узкополосные кометные фильтры для поляриметра КраО		Узкополосные кометные фильтры для поляриметра обсерватории Пик Терскол	
Выделяемая область излучения	Полоса, λ_0/FWHM , Å	Выделяемая область излучения	Полоса, λ_0/FWHM , Å
ОН	λ3090/62	CN	λ3870/50
NH	3362/58	C ₃	4060/70
УС (ультрафиолетовый континуум)	3448/84	ВС («синий» континуум)	4430/40
CN	3870/62	C ₂	5125/125
C ₃	4062/62	NH ₂	6630/40
CO ⁺	4266/64	RC («красный» континуум)	6840/90
ВС («синий» континуум)	4450/67		
C ₂	5141/118		
ГС («зеленый» континуум)	5260/56		
H ₂ O ⁺	7020/170		
RC («красный» континуум)	7128/58		

модулятора. Программа на ПК под ОС Windows представляет пользователю возможность управления всеми механизмами с помощью контроллера, запись данных измерений в файл и предварительную обработку данных наблюдений.

4. Вычисление параметров поляризации

Перед дальнейшей обработкой отсчеты переводятся в интенсивности делением их на длительность стробов. Затем вычисляется интенсивность фона неба отдельно для каждого из 16 секторов. При первичной обработке в ходе наблюдений всегда вычитается последнее из предыдущих измерений фона неба.

При модуляции вращением фазовой пластинки, интенсивность, измеряемая после модулятора и поляризационного анализатора, в зависимости от угла поворота модулятора ϕ может быть записана для полу-

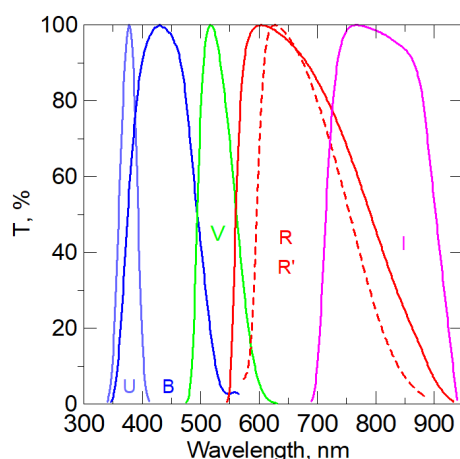


Рис. 4: Нормированные кривые пропускания фотометрических полос «красного» канала с учетом спектральной чувствительности фотоумножителя Hamamatsu R943-02: UBVR I — полосы пропускания фильтров, используемых в поляриметре КраО; UBVR' I — полосы пропускания фильтров, используемых в поляриметре обсерватории Пик Терскол.

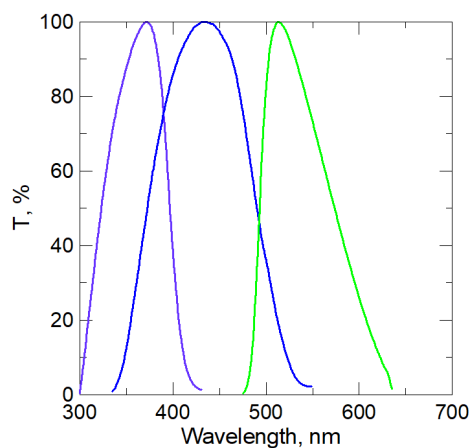


Рис. 5: Нормированные кривые пропускания UVB фильтров «синего» канала с учетом спектральной чувствительности фотомножителя ЕМІ 6556 В и прозрачности атмосферы.

волновой пластинки как

$$I = \langle I \rangle (1 + p \sin(4(\phi - \phi_0))). \quad (1)$$

Для четвертьволновой пластинки измеренная интенсивность записывается как

$$I = \langle I \rangle (1 + v \sin(2(\phi - \phi'_0)) + 0.5 p \sin(4(\phi - \phi_0))). \quad (2)$$

В этих уравнениях p и v — это степени линейной и круговой поляризации входящего излучения, ϕ_0 и ϕ'_0 — нуль-точки угла модуляции, зависящие от ориентации и направления вращения фазовой пластинки. ϕ также зависит от позиционного угла плоскости поляризации входящего излучения.

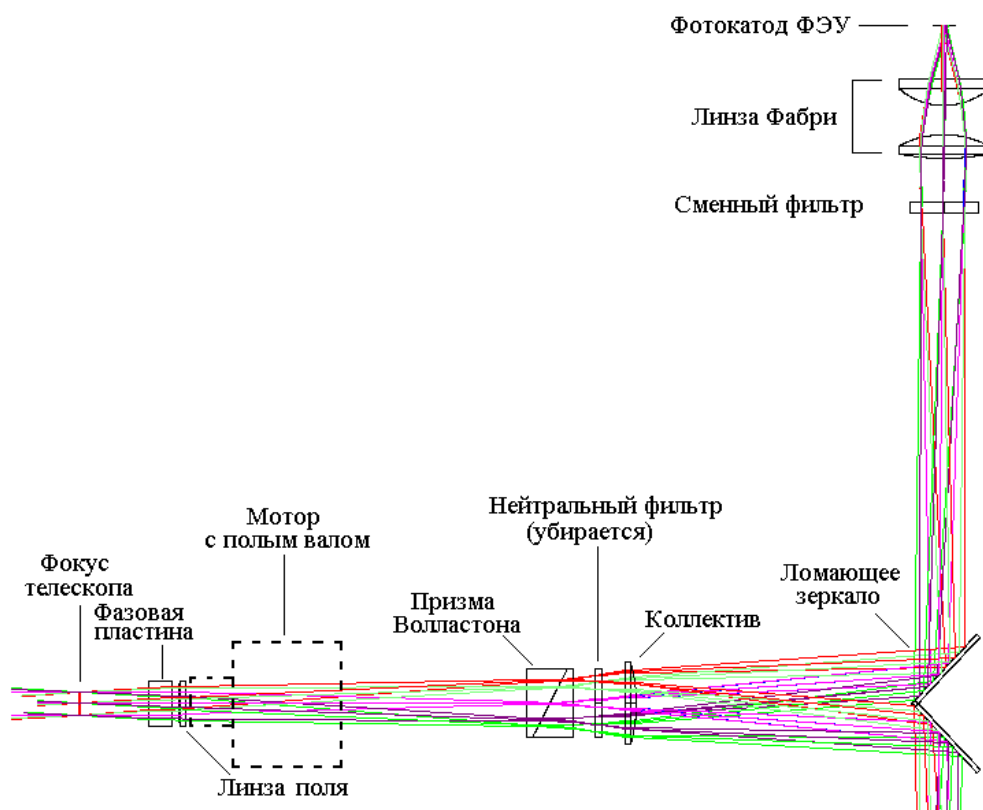


Рис. 6: Оптическая схема двухканального поляриметра. После ломающих зеркал показан только один из двух симметричных блоков.

Отсюда видно, что предпочтительным методом измерения линейной поляризации является модуляция полуволновой пластинкой, поскольку амплитуды модуляции с четвертьволновой пластинкой необходимо для получения истинных значений поляризации умножать на 2 вместе с ошибками их измерения. Таким образом, задача вычисления параметров поляризации сводится к измерению амплитуды и фазы второй и четвертой гармоник синусоидального колебания с частотой вращения модулятора. Поскольку первая гармоника не имеет физического смысла, полный период переключения секторальных каналов можно сделать половиной периода вращения и оценивать первую и вторую гармонику.

Приведенные выше формулы (1) и (2) относятся к мгновенной интенсивности, а реально измеряется средняя интенсивность в секторе. Факторы эффективности (отношение средних и мгновенных амплитуд) для регистрации в 16-ти секторах составляют 0.993 и 0.974 для первой и второй гармоник соответственно. Таким образом, дальнейшее увеличение числа секторов не приводит к заметному выигрышу. Выбор 16-ти для числа секторов также обусловлен удобством использования быстрого Фурье-преобразования (FFT) для оценивания амплитуд. Для линейной поляризации коэффициенты Фурье-преобразования, после деления на фактор эффективности, непосредственно дают параметры Стокса в инструментальной системе. Для круговой поляризации простой оценкой ее абсолютной величины, вычисляемой непосредственно в процессе наблюдений, является амплитуда первой гармоники. Более эффективное ее оценивание, использующее априорное значение фазы ϕ'_0 , а также определение знака круговой поляризации, выполняется только при окончательной обработке, с учетом калибровки по стандартным источникам с известной круговой поляризацией.

При первичной обработке в ходе наблюдений для каждой серии вычисляются средние значения нормированных параметров Стокса в инструментальной системе и их среднеквадратичные ошибки, без использования весов для индивидуальных измерений. При вычислении накопленных средних по наблюдениям одного объекта, параметры Стокса, полученные в отдельных сериях, усредняются с весами, равными обратной дисперсии данных в соответствующей серии.

5. Параметры инструментальной поляризации

В каждый период наблюдений программных объектов проводились наблюдения поляризационных стандартов с нулевой (малой $\leq 0.02\%$) поляризацией из списков [13, 14]. Величины параметров Стокса оказались небольшими ($\leq 0.02\%$, кроме полосы В на ЗТШ, где инструментальная поляризация достигает 0.05%) и стабильными от сезона к сезону. Примеры параметров Стокса q и u и инструментальной поляризации двух поляриметров показаны в табл. 4 и 5. Для определения нуль-пунктов инструментальных позиционных углов наблюдались поляризационные стандарты с высокой степенью поляризации, взятые из работ [15, 16]. Они также приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4: Параметры Стокса q_i и u_i , инструментальной поляризации и нуль-пункты позиционных углов PA_i для поляриметра КрАО, определенные по наблюдениям 2–3 февраля 2019 г.

«Красный» канал			
Фильтр	$q_i \pm \sigma_{qi}, \%$	$u_i \pm \sigma_{ui}, \%$	$PA_i \pm \sigma_{Pi}, \text{град}$
R	-0.010 ± 0.007	0.020 ± 0.007	90.9 ± 1.0
I	-0.014 ± 0.008	0.021 ± 0.012	95.1 ± 1.0
«Синий» канал			
B	0.025 ± 0.006	-0.050 ± 0.006	0.9 ± 1.0
V	0.011 ± 0.011	-0.017 ± 0.025	-0.5 ± 1.0

6. Результаты первых наблюдений

6.1. Спутник Юпитера Европа

Европа является одним из наших программных объектов на протяжении нескольких лет. Однако точность предыдущих наблюдений была невысокой. Имеющийся в базе данных «Polarimetry of planetary satellites» [17] разброс степени поляризации, определенной разными авторами, значителен и составляет около 0.5% . Интерес к этому спутнику был также вызван участием Н.Н. Киселева и В.К. Розенбуш в международной группе для проведения квазисинхронных поляриметрических наблюдений Европы на 2.6-м телескопе КрАО и на 8.1-м телескопе VLT (ESO) с поляриметром SPHERE-ZIMPOL. Целью наблюдений в ESO было обнаружение особенностей поляризации локальных областей Европы в местах выхода воды из разломов

Таблица 5: Параметры Стокса q_i и u_i , инструментальной поляризации и нуль-punkte позиционных углов PA_i для поляриметра обсерватории Пик Терскол, определенные по наблюдениям 3–5 апреля 2019 г.

«Красный» канал			
Фильтр	$q_i \pm \sigma_{qi}$, %	$u_i \pm \sigma_{ui}$, %	$PA_i \pm \sigma_{Pi}$, град
R	0.012 ± 0.008	0.010 ± 0.013	95.8 ± 0.6
I	0.010 ± 0.007	0.006 ± 0.011	100.6 ± 0.7
«Синий» канал			
B	-0.001 ± 0.013	0.011 ± 0.009	11.3 ± 0.5
V	0.004 ± 0.006	0.008 ± 0.009	5.4 ± 0.5

(криовулканов) ледяной поверхности Европы. Наши наблюдения Европы планировались как калибровочные для данных, полученных с поляриметром SPHERE-ZIMPOL. SPHERE-ZIMPOL обладает заметной и нестабильной инструментальной поляризацией из-за того, что он используется в фокусе Нэсмита. Поэтому точность наблюдений с SPHERE-ZIMPOL не превышает 0.1%, в то время как точность наших наблюдений составляет 0.02%.

Наблюдения Европы были проведены в течение 9 ночей в период апрель–июнь 2018 г. на 2.6-м телескопе ЗТШ с новым двухканальным поляриметром, позднее установленном на 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол. В 2019 г. наблюдения были продолжены на поляриметрах обеих обсерваторий для того, чтобы охватить больший диапазон фазовых углов. Результаты наблюдений в фильтре V представлены на рис. 7. Здесь нормированные параметры Стокса q и u приведены в системе отсчета, привязанной к плоскости рассеяния. Неожиданным результатом наших наблюдений явилось то, что точка инверсии фазовой кривой поляризации у Европы оказалась близкой к фазовому углу $\alpha = 6^\circ$, в то время как, например, Чигладзе [18] определил точку инверсии на $\alpha \approx 10^\circ$. Наши наблюдения также не подтвердили ни наличия второй точки инверсии поляризационной кривой Европы на фазовом угле около 1° , обнаруженную Чигладзе, ни поворота плоскости поляризации на 45° на фазовом угле $\alpha \approx 0.5^\circ$, обнаруженного Мороженко [19].

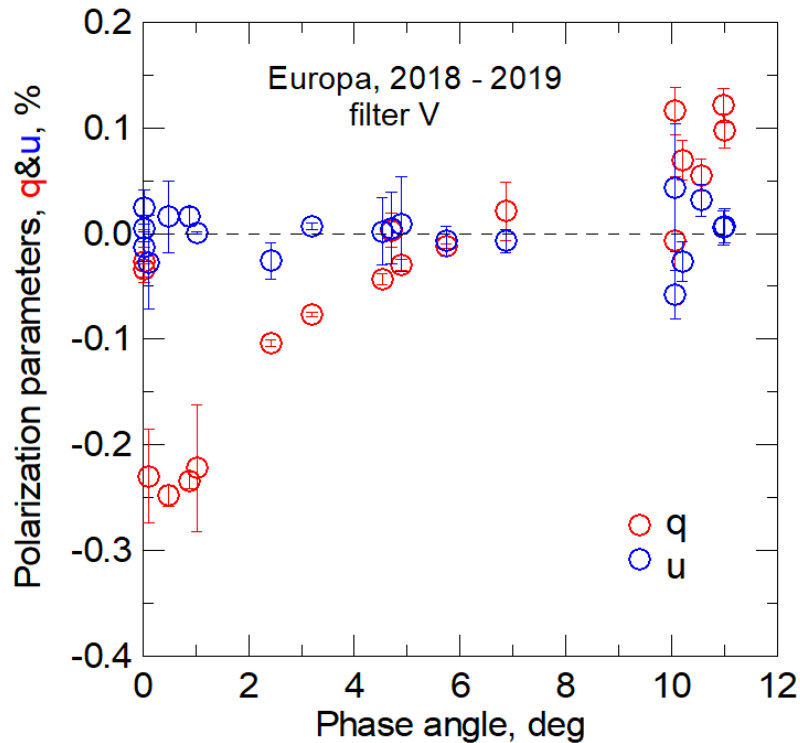


Рис. 7: Фазовые зависимости нормированных параметров Стокса q и u отраженного света Европы в фильтре V. Разброс параметра u около 0 характеризует реальную ошибку определения степени поляризации, которая в большинстве случаев не превосходит 0.03%.

Дополнительно к наблюдениям Европы были проведены наблюдения нескольких звезд в окрестности Юпитера для контроля стабильности измерений, поскольку Европа наблюдалась на больших воздушных массах, ~ 3 . Результаты наблюдений звезд в полосах VRI приведены в табл. 6, в которой P и θ — это степень поляризации и угол плоскости поляризации, соответственно.

Полученные результаты наблюдений Европы и звезд в окрестности Юпитера переданы в Институт планетологии и астрофизики (Гренобль, Франция), где происходит сбор и анализ данных наблюдений Европы на наших телескопах и VLT. Обработка полученных изображений Европы на поляриметре SPHERE-ZIMPOL продолжается.

Таблица 6: Поляризация звезд в окрестности Юпитера в период апрель-июнь 2018 г.

2018, UT	HD	$P_V \pm \sigma, \%$	$\theta_V \pm \sigma, \text{Deg}$	$P_R \pm \sigma, \%$	$\theta_R \pm \sigma, \text{deg}$	$P_I \pm \sigma, \%$	$\theta_I \pm \sigma, \text{deg}$
Apr. 13.08	136700					0.454 ± 0.053	39.4 ± 3.4
Apr. 15.00	126203	$0.114 \pm 0.012^*$	$82.9 \pm 2.9^*$	0.073 ± 0.019	83.1 ± 7.6	0.039 ± 0.021	66.5 ± 15.15
Apr. 15.94	136700	$0.573 \pm 0.016^*$	$70.6 \pm 0.8^*$				
May 05.00	133411	$1.082 \pm 0.012^*$	$63.9 \pm 0.3^*$	1.052 ± 0.031	64.6 ± 0.8	1.032 ± 0.024	63.7 ± 0.7
May 06.98	129829	$0.025 \pm 0.100^*$	$170.5 \pm 11.2^*$	0.036 ± 0.030	138.4 ± 23.8	0.070 ± 0.025	25.1 ± 0.4
May 24.96	129829	$0.101 \pm 0.020^*$	$1.6 \pm 5.5^*$	0.276 ± 0.059	104.4 ± 6.2		
June 07.87	133411	1.102 ± 0.015	65.0 ± 0.4	1.086 ± 0.012	63.6 ± 0.3	0.988 ± 0.024	63.6 ± 0.7
June 14.90	136700	$0.568 \pm 0.014^*$	$74.9 \pm 0.7^*$	0.550 ± 0.014	73.6 ± 0.7	0.492 ± 0.034	76.6 ± 2.0

Примечания: *Средние значения параметров поляризации P и θ в полосе V по измерениям в двух каналах. 13 апреля наблюдения проводились на рассвете, а 24 мая были проходящие облака и Луна.

6.2. Кометы

В период с апреля 2018 г. по октябрь 2019 г. в КрАО и на Терсколе были проведены наблюдения шести короткопериодических комет (29P/Swassmann-Wachmann 1, 38P/Stephan-Oterma, 46P/Wirtanen, 68P/Klemola, 123P/West-Hartley, 260P/McNaught) и 4-х долгопериодических комет (C/2017 T2 (PanSTARRS), C/2018 Y1 (Iwamoto), C/2018 N2 (ASASSN), C/2018 W2 (Africano)) в фильтрах BVRI и в узкополосных кометных фильтрах. Интегральный блеск комет находился в пределах 10–15 зв. вел. За исключением немногочисленных данных для комет 29P/Schwassmann-Wachmann 1 и 46P/Wirtanen измерения поляризации других комет ранее не проводились.

Одной из задач поляриметрии комет является сравнение характеристик фазовых зависимостей поляризации коротко- и долгопериодических комет, имеющих разные места образования и эволюцию. Измеренная степень поляризации рассеянного излучения комет в фильтре R представлена на рис. 8. Как видно, все кометы показывают типичную фазовую зависимость поляризации с минимумом отрицательной поляризации около -1.5% .

6.3. Транзиентный источник AT2019abn

В целях проверки эффективности поляриметров для наблюдений слабых объектов были проведены наблюдения оптического транзиента AT2019abn (на момент наших наблюдений около 16.8^m в полосе r-ZTF, близкой к полосе r системы SDSS). Объект AT2019abn был обнаружен ZTF (Zwicky Transient Facility) в галактике M51 22 января 2019 г. [20] и достиг максимального блеска через 16 дней [21]. Поляриметрические наблюдения этого объекта были проведены на ЗТШ 2 марта 2019 г. (JD 58545.53, 40 дней после обнаружения) в фильтре R, общая продолжительность наблюдений около 2.5 часов, чистое время накопления на объекте 3400 с. Усредненный результат наших наблюдений: степень поляризации $P_R = (3.98 \pm 0.47)\%$; позиционный угол плоскости поляризации $PA_R = 136^\circ \pm 7^\circ$.

AT2019abn отнесен к новому и немногочисленному классу транзиентов ILRT (Intermediate Luminosity Red Transient) [21], происхождение которых не вполне понятно. Все такие источники имеют значительное покраснение из-за поглощения пылью, околозвездной или межзвездной в родительской галактике. Оценка величины экстинкции критически важна для оценки их физических параметров. По спектральным наблюдениям для AT2019abn в [21] получены две оценки покраснения: $E(B - V) = 1.0^m$ для возраста 6 суток и $E(B - V) = 0.7^m$ — для 20 суток, причем различие интерпретируется как реальное, вызванное уничтожением

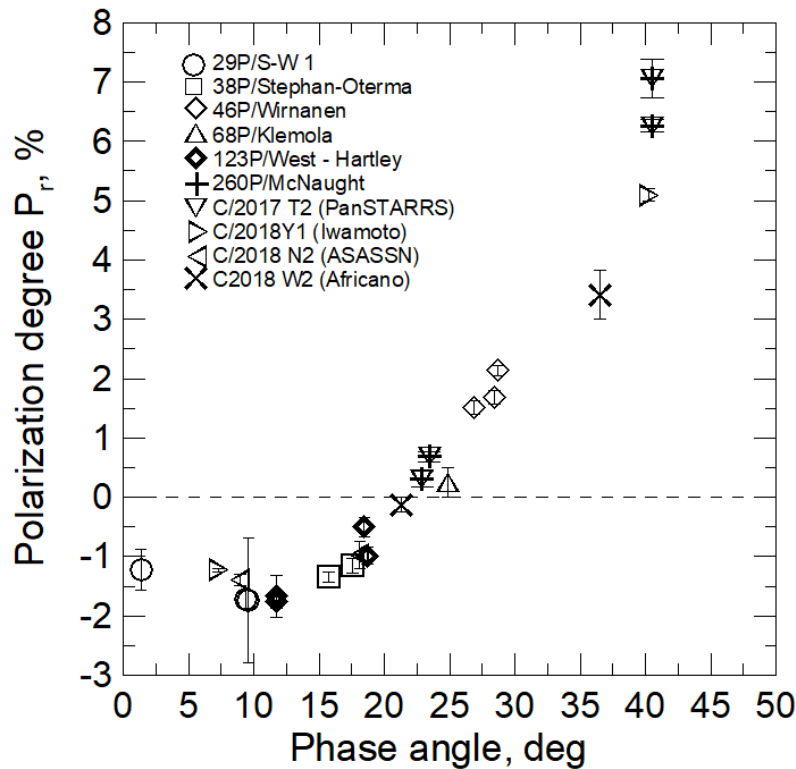


Рис. 8: Измеренная степень поляризации рассеянного излучения 10 комет в фильтре R.

околозвездной пыли в результате вспышки. Если наблюдаемая поляризация имеет межзвездную природу, то можно оценить межзвездное покраснение $E(B - V) \geq 0.4^m$, используя статистическое соотношение между степенью межзвездной поляризации и величиной покраснения [13]. На межзвездный характер поляризации указывает позиционный угол плоскости поляризации, перпендикулярной направлению темного «волокна» в M51, на границе которого находится источник.

7. Дальнейшая модернизация поляриметров

Конструкция прибора позволяет увеличить число каналов регистрации до шести установкой дополнительных дихроичных фильтров перед турелями сменных фильтров и дополнительных приемников излучения. Приемниками могут быть как ФЭУ, для чего существующая система управления имеет 4 резервных счетных канала, так и многоканальные приемники, обладающие необходимым быстродействием (не менее 250 кадров в секунду), как, например, EMCCD камеры.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность проф. Джеймсу Хафу (James Hough, Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, Hatfield, United Kingdom) за передачу оборудования, на основе которого были изготовлены поляриметры. Узкополосные кометные фильтры были любезно предоставлены Drs. D.G. Schleicher (Lowell Observatory) и R. Schulz (ESA), за что мы им выражаем глубокую признательность. Авторы благодарны М. Mishchenko и Т. Kostyuk (NASA) за поддержку данной работы. Мы также благодарим Е.В. Жужулину за помощь в проведении наблюдений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. N. M. Shakhovskoi and N. A. Dimov, *Izv. KrAO*, **27**, 291, 1962, [in Russian].
2. N. Shakhovskoi, *Soviet Astronomy*, Vol. 7, p. 806, **7**, 806, 1964.
3. N. Shakhovskoi, *Astr. Zu.*, **40**, 1055, 1963.
4. N. M. Shakhovskoi, *Kandidatskaya dissertatsiya*, Ph.D. thesis, Krymskaya Astrofizicheskaya Observatoriya (KrAO), Nauchny, Russia, 1964, [in Russian].

5. N. M. Shakhovskoi, *Astronomicheskii Zhurnal*, **39**, 755, 1962, [in Russian].
6. T. Gehrels, ed., *Planets, stars and nebulae studied with photopolarimetry* (1974).
7. Y. S. Efimov, *Izv. Krymskoi Astrofiz. Obs.*, **41**, 42, 1970, [in Russian].
8. N. M. Shakhovskoi and Y. S. Efimov, *Izv. KrAO*, **45**, 90, 1972, [in Russian].
9. N. M. Shakhovskoi, I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, and A. V. Khalevin, *Izv. Krymskoi Astrofiz. Obs.*, **97**, 91, 2001, [in Russian].
10. S. V. Kolesnikov, V. V. Breus, N. N. Kiselev, and I. L. Andronov, *Odessa Astron. Publ.*, **29**, 74, 2016, [in Russian].
11. M. S. Bessell, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **43**, 293, 2005.
12. I. G. Glushneva and V. T. Doroshenko, *Astronomicheskij Tsirkulyar*, **754**, 1, 1973.
13. K. Serkowski, D. Mathewson, and V. Ford, *Astrophysical Journal*, vol. 196, Feb. 15, 1975, pt. 1, p. 261-290., **196**, 261, 1975.
14. G. D. Schmidt, R. Elston, and O. L. Lupie, *Astronomical Journal (ISSN 0004-6256)*, vol. 104, no. 4, p. 1563-1567., **104**, 1563, 1992.
15. D. Turnshek, R. Bohlin, R. Williamson, O. Lupie, J. Koornneef, and D. Morgan, *Astronomical Journal (ISSN 0004-6256)*, vol. 99, April 1990, p. 1243-1261, 1344-1377., **99**, 1243, 1990.
16. J.-C. Hsu and M. Breger, *Astrophysical Journal, Part 1*, vol. 262, Nov. 15, 1982, p. 732-738., **262**, 732, 1982.
17. S. Zaitsev, V. Rosenbush, and N. Kiselev, Polarimetry of planetary satellites v1.0, NASA Planetary Data System, 2012, URL <http://sbn.psi.edu/pds/resource/satpol.html>.
18. R. A. Chigladze, *Investigation of the Polarimetric Properties of the Galilean Satellites of Jupiter and Planet Uranus*, Ph.D. thesis, Abastumany Astrophysical Observatory, 1989, [in Russian].
19. O. Morozhenko, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, **17**, 45, 2001.
20. J. Nordin, V. Brinnel, M. Giomi, et al., *Transient Name Server Discovery Report*, **141**, 2019.
21. J. E. Jencson, S. M. Adams, H. E. Bond, S. D. Van Dyk, et al., *The Astrophysical Journal Letters*, **880**, L20, 2019.

Наблюдение сверхновой SN2023ixf в течение года после ее вспышки

Николенко И.В.¹, Аршинкин С.С.¹, Маслов И.А.², Шенаврн В.И.³

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

В мае 2023 г. на телескопе Цейсс-1000 (Симеизская обсерватория ИНАСАН) был введен в эксплуатацию поляриметр для наблюдения протяженных объектов (главным образом комет). С этим поляриметром мы провели серию наблюдений сверхновой SN2023ixf с июля 2023 г. по июль 2024 г. Кроме того мы сделали несколько измерений этой сверхновой, используя ИК-фотометр Крымской астрономической станции ГАИШ (КАС МГУ). Здесь приводятся результаты измерений яркости сверхновой в спектральных полосах UBVRIJHKLM и оценки величины линейной поляризации для спектральных для спектральных полос BVRI, как самой Сверхновой, так и, расположенной рядом с ней, области галактики M101. В сентябре 2023 г. Сверхновая заметно покраснела, а в мае-июле 2024 г. ослабла до уровня, сравнимого с соседними источниками в галактике.

Поступила в редакцию 06.09.2024 г. Принята в печать 12.12.2024 г.

Ключевые слова: поляризационные наблюдения, сверхновая SN2023ixf, спектральный поток, линейная поляризация

Observation of a Supernova SN2023ixf within a year after its outbreak

Nikolenko I.V.¹, Arshinkin S.S.¹, Maslov I.A.², Shenavrin V.I.³

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

³Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

In May 2023, a polarimeter was commissioned on the Zeiss-1000 telescope (Simeiz INASAN Observatory) to observe extended objects (mainly comets). With this polarimeter, we conducted a series of observations of the Supernova SN2023ixf from July 2023, to July 2024. In addition, we made several measurements of this Supernova using the infrared photometer of the Crimean Astronomical Station GAISH (CAS MSU). Here are the results of measurements of the brightness of the Supernova in the spectral bands UBVRIJHKLM and estimates of the magnitude of linear polarization for the spectral bands BVRI, both the Supernova itself and the region of the galaxy M101 located next to it. In September 2023, the supernova turned noticeably red, and in May-July 2024, it weakened to a level comparable to neighboring sources in the galaxy.

Received 06.09.2024. Accepted 12.12.2024.

Keywords: polarimetric observations, supernova SN2023ixf, spectral flux, linear polarization

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.010

1. Observations

Observations in the UBVRI spectral bands were carried out in Simeiz (Crimea) on the Zeiss-1000 telescope [1] of the Institute of Astronomy RAS with a FLI PL16803 camera (4096 × 4096 – 9 micron pixels) in binning mode 8 × 8 through a polarising light filter rotated alternately in three positions at 120°. The advantage of the polarimeter [2] used is the possibility to promptly remove the polarising light filter from the field of view and to carry out ordinary photometric observations even without refocusing the telescope. The observations in the JHKLM bands were carried out on the 1.25-m telescope of the Crimean Astronomical Station of GAISH (KAS MSU) with a modulating photometer [3] with a liquid nitrogen-cooled single-element InSb photodiode.

2. Calibration

For photometric calibration, we used the spectral fluxes of stars from the Vizier SED service [4], which were integrated taking into account the transmission of light filters [5] and the spectral sensitivity of the camera (Table 1). To calibrate the measurements in the JHKLM bands, the star BS5191 was used.

3. Results

Table 2 presents the results obtained from measurements in the UBVRI bands. The flux drop from SN2023ixf over the observation period is clearly visible. In addition to the spectral fluxes, the table shows the (B+V)/(R+I) colour estimate. Over the interval July-September 2023 the supernova is noticeably reddened. Observations in May and July 2024 show that its emission has weakened below the level of $10^{-15} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, and according to

Table 1: Operating bands of the Zeiss-1000 equipment and the received spectral fluxes, in units of ($10^{-15} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) of the calibration stars (J2000) for these bands.

Stripe	U	B	V	R	I
Wavelength, nm	376	445	551	639	797
Equivalent width, nm	53	101	88	132	126
14:04:02.9 +54:18:18	106	144	135	115	88
14:03:35.9 +54:20:30	9	17	24	23	22
14:03:45.2 +54:16:16	56	85	89	73	56
14:03:13.4 +54:15:42	45	80	103	96	91

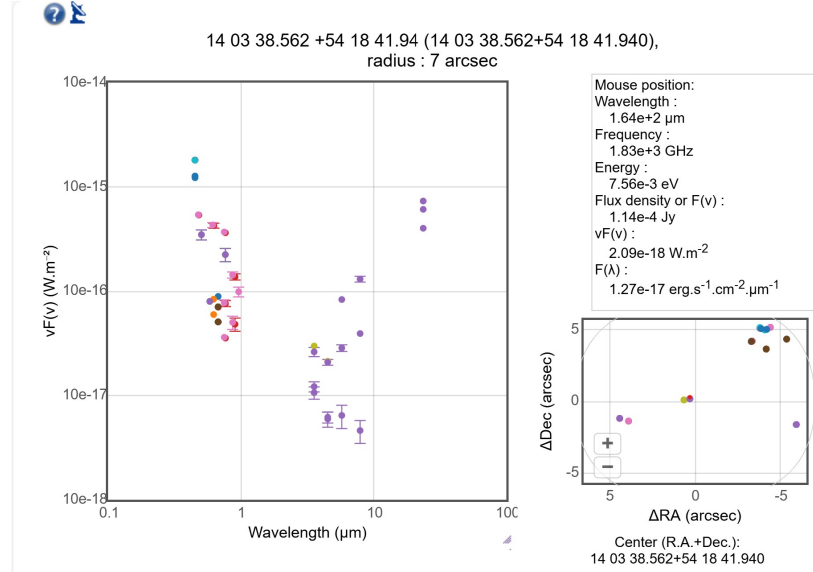


Figure 1: Spectral fluxes and positions of sources near the supernova from the data [4].

[4] (Fig. 1) near the position of the SN2023ixf several sources with comparable spectral fluxes are observed, which can affect the measurement results. Table 3 shows the spectral fluxes of the SN2023ixf JHKLM bands, averaged over the measurement periods. In February 2024 the infrared emission from the supernova was already below the detection threshold.

Table 4 presents the linear polarization Stokes parameters [6] for SN2023ixf and the galaxy M101 in which it erupted, obtained by averaging data from several nights of observations. The parameters were determined by [7] correlation polarimetry, measuring the correlation between the polarisation vector components and brightness. The $0 - 30''$ zone was used for SN2023ixf and the $30 - 180''$ zone was used for the galaxy in sectors of positional angles $180 - 360^\circ$ to the direction towards the centre of M101. The smaller polarisation value for SN2023ixf compared to the neighbouring region of M101 indicates that it is not deeply embedded in the spiral arm of the galaxy, while the polarisation direction of SN2023ixf for the radiation in the R band in July 2023 was perpendicular to the polarisation direction of the galaxy.

Table 2: Spectral flux ($10^{-15} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) from the supernova SN2023ixf and its colour over the period of our observations.

Date	JD	U	B	V	R	I	(B+V)/(R+I)
16–19/07/23	2460144	95 ± 9	311 ± 5	402 ± 3	397 ± 4	267 ± 2	1.07 ± 0.01
21–25/07/23	2460149	94 ± 14	254 ± 10	353 ± 13	340 ± 35	267 ± 2	1.03 ± 0.07
18–22/09/23	2460208	20 ± 13	22 ± 3	49 ± 5	86 ± 7	56 ± 6	0.50 ± 0.40
07–19/05/24	2460445	3 ± 3	5.6 ± 1.1	3.4 ± 0.8	4.4 ± 0.6	2.7 ± 0.3	1.26 ± 0.70
05–14/07/24	2460502	-3 ± 5	2.2 ± 0.7	1.7 ± 0.4	1.3 ± 0.2	0.9 ± 0.3	1.69 ± 1.08

Table 3: Spectral flux ($10^{-15} \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) from the supernova SN2023ixf in the infrared spectral region.

Date	JD	J	H	K	L	M
28-31/07/23	2460155	105 ± 12	41 ± 5	25 ± 3	20 ± 9	2 ± 19
01-02/02/24	2460342	9 ± 12	0 ± 4	3 ± 2	3 ± 4	1 ± 12

Table 4: Estimates of linear polarisation parameters (%) pointing towards the centre of the M101 from SN2023ixf (16-24 July 2023) and the galaxy around Supernova.

Spectral band		B	V	R	I
SN2023ixf	Q/I	-0.1 ± 0.6	-0.2 ± 0.6	$+0.6 \pm 0.2$	-0.1 ± 0.4
0 – 30'' 180 – 360°	U/I	-0.4 ± 0.6	-0.1 ± 0.3	-0.5 ± 0.3	-0.1 ± 0.5
M101	Q/I	$+0.2 \pm 1.1$	-0.5 ± 0.7	-0.2 ± 0.5	-2.4 ± 0.9
30 – 180'' 180 – 360°	U/I	-0.5 ± 1.0	-0.6 ± 0.7	-0.9 ± 0.6	-1.3 ± 0.9

Acknowledgements

The results of this work are based on observational data obtained at the 1-m Zeiss-1000 telescope of the INASAN (CSRF) and the 1.25-m telescope of the KAS MSU. The instrumentation complex of the Zeiss-1000 telescope of INASAN can be used for ground support of the Spektr-UV experiment.

References

1. S. Kryuchkov, I. Maslov, I. Nikolenko, and O. Ugolnikov, *Aspects of Modern Problems of Mechanics and Informatics: Collection of Scientific Articles. MOSCOW: IKI RAN*, 188, 2018.
2. I. Nikolenko and S. Arshinkin, *Scientific conference with international participation ‘VIII Bredikhinskie readings*, 16, 2023.
3. A. Najip, V. Shenavrin, and V. Tikhonov, *Proceedings of the State Astronomical Institute of Moscow State University*, 1986.
4. <http://vizier.unistra.fr/vizier/sed/>.
5. http://ulisse.pd.astro.it/Astro/ADPS/Systems/Sys_136/index_136.html.
6. M. Born and E. Wolf, *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (Pergamon Press) (1959).
7. I. Maslov, S. Kryuchkov, I. Nikolenko, and O. Munitsyn, V.A. Ugolnikov, *Investigations of the Crimean Astrophysical Observatory*, **111** (1), 34, 2015.

Дни открытых дверей в Звенигородской обсерватории ИНАСАН

Вибе А.А.

Дом детского творчества, Звенигород, Россия

Звенигородская обсерватория Института астрономии Российской академии наук отметила в 2024 году свое 65-летие. На протяжении этих лет существенной составной частью работы обсерватории была и остается деятельность, связанная с астрономическим образованием и популяризацией астрономии. В обсерватории всегда проводились лекции, занятия со школьниками, студентами и курсантами военных училищ, съемки образовательных и новостных сюжетов и интервью для различных телевизионных каналов. С 2009 года важным элементом этой деятельности стал фестиваль «Дни открытых дверей», проводимый совместно Институтом астрономии РАН и Домом детского творчества г. Звенигород. Первые дни открытых дверей были проведены в рамках акции «Сто часов астрономии» Международного года астрономии и оказались настолько успешными, что проводятся с тех пор ежегодно, каждый раз привлекая в обсерваторию сотни, а иногда даже тысячи гостей.

Поступила в редакцию 04.10.2024 г. Принята в печать 16.12.2024 г.

Ключевые слова: популяризация астрономии, дополнительное образование, любительская астрономия

Open door events at the INASAN Zvenigorod Observatory

Wiebe A.A.

House of Children's Creativity, Zvenigorod, Russia

The Zvenigorod Observatory of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences celebrated its 65th anniversary in 2024. Over the years, activities related to astronomical education and popularization of astronomy have been and remain a significant part of the observatory's agenda. The observatory has always hosted lectures, classes with schoolchildren, students and cadets of military schools, filming educational and news stories and interviews for various TV channels. Since 2009, an important element of this activity is the festival "Open Doors Days", held jointly by the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences and the House of Children's Creativity of Zvenigorod. The first Open Doors Days were held as part of the "One Hundred Hours of Astronomy" campaign of the International Year of Astronomy and were so enormously successful that they have been held annually since then, each time attracting hundreds, and sometimes even thousands, of guests to the observatory.

Received 04.10.2024. Accepted 16.12.2024.

Keywords: communicating astronomy, supplementary education, amateur astronomy

DOI: 10.51194/INASAN.2024.9.4.011

1. Введение

Звенигородская обсерватория Института астрономии Российской академии наук отметила в 2024 году свое 65-летие. На протяжении всех этих лет важным элементом работы обсерватории была и остается деятельность, связанная с астрономическим образованием и популяризацией астрономии. В обсерватории всегда проводились лекции, занятия со школьниками, студентами и курсантами военных училищ, съемки образовательных и новостных сюжетов и интервью для различных телевизионных каналов. С 2009 года важным элементом этой деятельности стал фестиваль «Дни открытых дверей», проводимый совместно Институтом астрономии РАН и Домом детского творчества г. Звенигород. Первые дни открытых дверей были организованы в рамках акции «Сто часов астрономии» Международного года астрономии¹ и оказались настолько успешными, что проводятся с тех пор ежегодно, каждый раз привлекая в обсерваторию сотни, а иногда даже тысячи гостей.

2. Программа дней открытых дверей

Изначально фестивали длились по четыре дня — с четверга по воскресенье, — однако практика показала, что достаточно проводить их только в выходные. Поскольку дни открытых дверей уместно посвятить дням осеннего и весеннего равноденствия, их даты выбираются в сентябре-октябре и марте-апреле по возможности ближе к видимости Луны в первой четверти. В каждый из дней фестивали организуется три сеанса (шесть сеансов за два дня), рассчитанных на два часа. На каждом сеансе при пасмурной погоде проводится экскурсия по обсерватории и научно-популярная лекция. При ясном небе во время дневных экскурсий можно посмотреть на Солнце, во время вечерних сеансов проводятся только наблюдения.

Во время экскурсии по обсерватории экскурсанты посещают фотопавильон с историческими инструментами и павильоны с профессиональными и любительскими телескопами и узнают об их назначении и

¹<https://www.iau.org/public/oao/100-hours-of-astronomy/>



Рис. 1: Во время экскурсии на астрографе.

работе. Фотопавильон привлекает к себе внимание как сочетание мастерской и музея. В нем есть пара исторических инструментов и несколько новых, используемых для различных отладочных и испытательных работ. Они ярко показывают, как сильно изменились приборы за ничтожный срок — всего 65 лет! При ясном небе здесь можно посмотреть на Солнце, Луну, планеты и звезды в самый старый прибор обсерватории — Бинокулярную морскую трубу БМТ-110.

В башне астрографа — единственного рефрактора в обсерватории — оказывается уместным рассказ об истории развития астрономической техники. Здесь же можно в подробностях проиллюстрировать проведение астрономических наблюдений в «доцифровую эпоху», когда «романтическая», хотя и тяжелая ручная работа с телескопом была куда больше похожа на обычное представление о работе астронома, максимально напоминающей не высокую науку, а манипуляции звездочета (рис. 1).

Камера ВАУ всегда производит большое впечатление своими огромными размерами. Она уже не используется для проведения профессиональных наблюдений, ее здание является историческим, и обустройство комнаты наблюдателя такими же историческими экспонатами, приборами и сопутствующими предметами привлекает большое внимание экскурсантов возможностью непосредственно прикоснуться к недавнему, но уже хорошо забытому прошлому.

Телескоп «Цейсс-600» является прекрасным примером современного применения небольшого телескопа для отработки и наладки самых последних разработанных приборов, которые будут применяться на крупных телескопах и обсерваториях. Помещение телескопа передает рабочую обстановку и серьезные научные исследования, что всегда вызывает много разнообразных вопросов экскурсантов.

В 2009 г. в обсерватории появился телескоп «Meade» — современный любительский инструмент, приобретение которого не по силам рядовому любителю астрономии, поэтому наличие его на обсерватории дает громадное преимущество при наблюдениях. 40-сантиметровый объектив телескопа позволяет наслаждаться «прогулками» по Луне, которую можно практически потрогать! Но это не единственное достоинство телескопа. Не меньший интерес и даже ажиотаж вызывает возможность своими руками покрутить купол павильона — незабываемое зрелище и потрясающие эмоции для далеких от астрономии людей. Мы часто встречаемся с посетителями, которые приезжают на обсерваторию неоднократно, чтобы снова все это увидеть и ощутить.

Телескоп-робот, спрятавшийся в павильоне-шарике, недоступен для осмотра, поэтому рассказы о нем сродни мифам и легендам. Полностью автоматические наблюдения, без участия человека, не смущают современных «компьютеризированных» людей, но вот когда телескоп иногда во время вечерних сеансов сам открывает «забрало» и начинает вращаться — зрелище производит на всех потрясающий эффект!

Неизменно большой интерес у посетителей вызывают горизонтальные солнечные часы, изготовленные специально для обсерватории обучающимися астрономического объединения «Галактика» и студии художественной керамики «Сирий» (руководитель И.А. Куприянова) Дома детского творчества города Звенигород в 2018 году. Часы являются уникальным инструментом, с их помощью наглядно демонстрируется отличие

местного истинного солнечного времени от гражданского, объясняются причины этого отличия — декретное время, неравномерность движения Земли вокруг Солнца, долгота места. Также на солнечных часах изображены 13 знаков, из них 12 знаков зодиака. Для многих является открытием, что даты знаков зодиака не совпадают с датами прохождения Солнца по соответствующим зодиакальным созвездиям. Так можно наглядно показать, что астрологические прогнозы не имеют никакого отношения к науке.

Как правило, после впечатляющей экскурсии многие экскурсанты остаются отдохнуть и послушать популярные астрономические лекции. Их читают сотрудники ИНАСАН и педагог Дома детского творчества (автор этой статьи). Слушатели узнают подробности о Солнце, Луне, звездах, экзопланетах, космических угрозах, новости об исследованиях Солнечной системы и многое другое. После лекции экскурсанты задают астрономам волнующие их вопросы, например, о перспективах развития астрономии, о российских астрономических проектах, о современном астрономическом образовании школьников и многом другом. Для лекторов это хорошая возможность представить небольшой аудитории новую лекцию, выявить ее достоинства и недостатки, понять интерес и склонности сегодняшних слушателей к тематике лекции.

Наблюдения — самая интересная часть сеанса — проводятся только при ясном небе. На дневных сеансах во время экскурсий посетителям предоставляется возможность посмотреть на Солнце в любительские телескопы «Селестрон», астрограф, а также в солнечный телескоп «Коронадо», предоставляемый Домом детского творчества, оценить активность Солнца по наличию на нем солнечных пятен, факельных полей и протуберанцев и узнать об их происхождении. Кроме Солнца иногда на дневном небе удастся рассмотреть Венеру и ее фазу.

На вечерних наблюдениях посетители в астрограф, «Meade», «Селестрон» и в бинокляр БМТ-110 могут рассмотреть Луну, Марс, Юпитер и Сатурн со спутниками, двойные и разноцветные звезды, туманности (Кольцо, Гантель, Большая туманность Ориона), скопления (η и χ Персея, Плеяды, шаровое скопление М13), галактику Туманность Андромеды. Немногие могут похвастаться опытом наблюдений, поэтому такие мероприятия всегда пользуются неизменным успехом. Часто на фестивали приезжают любители астрономии из Московского астроклуба со своими инструментами. Все желающие могут заглянуть в них и сравнить качество изображения астрономических объектов в большие и маленькие телескопы.

На днях открытых дверей случаются интересные погодные и атмосферные явления. Так в марте 2022 года прошла короткая и бурная метель с громом, а в апреле 2023 года во время вечерних наблюдений Луны и Венеры над обсерваторией разгорелось полярное сияние (рис. 2). Многочисленные гости обсерватории были ошеломлены таким неожиданным и завораживающим зрелищем.



Рис. 2: Наблюдения Луны и Венеры (в левой части кадра) 23 апреля 2023 г. сопровождалось ярким полярным сиянием (фото автора статьи).

За два дня обсерваторию посещает от 300 до 2000 человек из Москвы и Московской области, и многие из них обещают приехать еще. Все гости очарованы радушием и горячим гостеприимством обсерватории и с энтузиазмом принимают участие в экскурсиях, лекциях и наблюдениях.

3. Заключение

Дни открытых дверей на Звенигородской обсерватории помогают привлечь больше детей на занятия в астрономические кружки, заинтересовать их работой ученого-астронома, а также предоставить возможность задать интересующие вопросы, прояснить неясности, увидеть астрономические объекты своими глазами, «вживую», и прикоснуться к такому загадочному и неизменно интересному звездному небу.

Хочется выразить огромную благодарность всем сотрудникам Института астрономии РАН и особенно сотрудникам обсерватории, которые помогают в воплощении такой востребованной и несомненно перспективной деятельности — просвещении населения. Нужной, в первую очередь, для подрастающего поколения, чтобы суметь вдохнуть в него дух романтики, любопытства, зацепить и увлечь самым объективным способом познания мира — наукой.

Содержание

<i>Тарасенков А.Н., Нароенков С.А., Наливкин М.А.</i> Наблюдательная программа по обнаружению транзитных экзопланет в рассеянных скоплениях	125
<i>Кузин С.П.</i> Исследование рядов положения геоцентра, полученных в результате обработки измерений DORIS RINEX	130
<i>Терентьева А.К., Леонов В.А.</i> Уникальный метеоритообразующий рой внутри орбиты Земли	134
<i>Олейник О.С., Емельяненко В. В.</i> Исследование взаимодействия планеты земной массы и планетезимального диска	137
<i>Пузин В.Б., Саванов И.С., Дзян С., Ванг Х., Шугаров А.С., Ванг Дз.</i> Исследования хромосферной активности звезды FK Com на основе спектральных наблюдений	142
<i>Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.</i> Вариант реализации системы приема и контроля информации для наземного комплекса проекта «Спектр-УФ»	148
<i>Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.</i> Принципы функционирования центра обработки научной информации проекта «Спектр-УФ»	155
<i>Тарасенков А.Н., Соколовский К.В., Короткий С.А., Нароенков С.А.</i> Фотометрическое исследование карликовой новой TCP J18173469+1803499	160
<i>Шаховской Д.Н., Киселев Н.Н., Долгополов А.В., Антонюк К.А., Иванов Ю.С., Карпов Н.В., Тарадий В.К., Савушкин А.А., Рябов А.В., Таран А.В.</i> Двухканальные фотоэлектрические поляриметры (POLSHAKH) Крымской астрофизической обсерватории и обсерватории Пик Терскол: принципиальная схема, конструкция и результаты первых наблюдений	165
<i>Николенко И.В., Аршинкин С.С., Маслов И.А., Шенаврн В.И.</i> Наблюдение сверхновой SN2023ixf в течение года после ее вспышки	177
<i>Вибе А.А.</i> Дни открытых дверей в Звенигородской обсерватории ИНАСАН	180

Contents

<i>Tarasenkov A.N., Naroenkov S.A., Nalivkin M.A.</i> Observational program to detect transiting exoplanets in open clusters	125
<i>Kuzin S.P.</i> Study of geocenter position series obtained as a result of DORIS RINEX measurements processing	130
<i>Terentjeva A.K., Leonov V.A.</i> A unique meteorite-forming stream inside the Earth's orbit	134
<i>Oleynik O.S., Emelyanenko V.V.</i> Earth-like planet migration in planetesimal discs	137
<i>Puzin V.B., Savanov I.S., Jiang X., Wang H., Shugarov A.S., Wang J.</i> Studies of the chromospheric activity of the FK Com star based on spectral observations	142
<i>Arkhangelsky R. N., Iosipenko S.</i> Option for implementing a system for receiving and monitoring information for the ground complex of the Spektr-UF project	148
<i>Arkhangelsky R. N., Iosipenko S.</i> Operating principles of the scientific data processing center of the Spectr-UV project	155
<i>Tarasenkov A.N., Sokolovsky K.V., Korotkiy S.A., Naroenkov S.A.</i> Photometric study of dwarf nova TCP J18173469+1803499	160
<i>Shakhovskoy D.N., Kiselev N.N., Dolgoplov A.V., Antonyuk K.A., Ivanov Yu.S., Karpov N.V., Taradiy V.K., Savushkin A.A., Ryabov A.V., Taran A.V.</i> Dual-channel photoelectric polarimeters (POLSHAKH) of the Crimean Astrophysical Observatory and the Terskol Peak Observatory: basic design, construction, and first observation results	165
<i>Nikolenko I. V., Arshinkin S.S., Maslov I.A., Shenavrin V.I.</i> Observation of a Supernova SN2023ixf within a year of its outburst	177
<i>Wiebe A.A.</i> Open door events at the INASAN Zvenigorod Observatory	180