ISSN 2658-5669 НАУЧНЫЕ ТРУДЫ института ран

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 ИССЛЕ-ДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ космической геодезии.





INASAN SCIENCE REPORTS





МОСКВА 2022 УДК 52 ББК 22.6 H34

НЗ4 Научные труды Института астрономии РАН. Том 7(4). -

М.: Изд-во Янус-К, 2022, 32 с., илл.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

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

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, 2022 © Коллектив авторов, 2022

INASAN Science Reports. Vol 7(3). M.: Janus-K, 2022, 32 pp.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Editorial Board

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

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, 2022 © Author team, 2022

Сдано в набор 13.12.2022. Подписано в печать 16.12.2022 Формат 60х90/8. Бумага офсетная. Уч.-изд. п.л. 4,0. Физ. п.л. 4,0. Тираж 100. Заказ №6512

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

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

Научные труды Института астрономии РАН. Том 7 (4)

Научное издание



Эволюция орбиты околоземного астероида 159402 (1999 АР10)

Емельяненко В.В., Карташова А.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследована эволюция орбиты околоземного астероида 159402 (1999 AP10) в прошлом. Проводилось интегрирование уравнений движения для 100 виртуальных объектов с начальными орбитами, взятыми из доверительной области, на промежутке времени 10 млн. лет. С вероятностью 0.8 астероид на этом промежутке времени подходил к Солнцу на расстояние менее 0.1 а. е. С вероятностью 0.2 этот объект пришел на современную орбиту с кометной орбиты.

Поступила в редакцию 28.11.2022 г. Принята в печать 01.12.2022 г.

Ключевые слова: астероид, эволюция орбиты

The orbital evolution of near-Earth asteroid 159402 (1999 AP10)

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

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The evolution of the orbit of near-Earth asteroid 159402 (1999 AP10) in the past was studied. The equations of motion were integrated for 100 virtual objects with initial orbits taken from the confidence region over a time interval of 10 million years. With a probability of 0.8, the asteroid approached the Sun at a distance of less than 0.1 AU during this time interval. With a probability of 0.2, this object entered the current orbit from a cometary orbit.

Received 28.11.2022. Accepted 01.12.2022.

Keywords: asteroid, evolution of orbit

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.4.001

1. Введение

Астероид 159402 (1999 AP10) был обнаружен 14 января 1999 г. в рамках проекта LINEAR. Этот астероид имел абсолютную звездную величину 16.1^m и период обращения 7.9 часа. Он привлек большое внимание наблюдателей в 2009 и 2020 гг., поскольку проходил на малом расстоянии (0.08 а. е.) от Земли.

В результате различных наблюдений были определены его диаметр: 1.20 ± 0.29 км¹ [1, 2, 3], таксономический класс — S тип [4, 3], орбитальные характеристики², была построена его 3D модель [3, 5].

Поэтому представляется важным рассмотреть возможные варианты динамической эволюции астероида 159402 (1999 AP10), при которой возникли эти физические свойства.

2. Метод исследования

Для исследования из базы данных JPL³ была взята орбита астероида, полученная 22 июня 2021 г. Чтобы учесть неопределенности в исходной орбите, проводилось интегрирование уравнений движения для 100 орбит из доверительной области. Учитывались возмущения от всех планет на промежутке времени 10 млн. лет с использованием симплектического интегратора задачи N тел [6]. Исследование движения каждой частицы прекращалось, если она сталкивалась с планетой или достигала орбиты с перигелийным расстоянием q < 0.005 а. е., а также в случаях перехода на орбиту с большой полуосью a > 50 а. е. или гиперболическую орбиту.

3. Эволюция орбиты в прошлом

При изучении движения 100 виртуальных частиц в прошлом, 20 частиц перешли на долгопериодические орбиты с a > 50 а. е. или были выброшены из Солнечной системы, 75 частиц достигли орбит с q < 0.005 а. е., а 5 частиц сохранились до конца интегрирования на астероидных орбитах с перигелиями в области внутренних планет (мы не зафиксировали ни одного столкновения с планетами). Естественно, что столкновения с Солнцем в наших интегрированиях вызвано неопределенностями в орбитальной эволюции и является чисто формальным, лишь указывая на прохождения объекта вблизи Солнца. Рис. 1 показывает изменение числа частиц N, достигших q < 0.1 а. е., как функции времени. 80 процентов частиц переходит на такие околосолнечные орбиты за 10 млн. лет наших интегрирований. Конечно, вследствие хаотического характера движения невозможно надежно проследить движение объекта на длительном интервале времени. Наши

 $^{^{1}} https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/1999AP10/1999AP10.2020.planning.html$

 $^{^{2}} https://ssd.jpl.nasa.gov; https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/1999AP10/1999AP10.2020.planning.html https://ssd.jpl.nasa.gov; https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/1999AP10/1999AP10.2020.planning.html https://ssd.jpl.nasa.gov; https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/1999AP10/1999AP10.2020.planning.html https://ssd.jpl.nasa.gov; https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/1999AP10/1999AP10.2020.planning.html https://ssd.jpl.nasa.gov; https://ssd.jpl.nasa.gov; https://ssd.jpl.nasa.gov/asteroids/1999AP10/1999AP10.2020.planning.html https://ssd.jpl.nasa.gov; https://ssd$

³https://ssd.jpl.nasa.gov



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

численные интегрирования дают только статистическую информацию о качественных свойствах динамического поведения астероидов типа 159402 (1999 AP10). В нашем численном моделировании частицы наиболее часто становятся околосолнечными объектами в прошлом на промежутке между 0.25 млн. лет и 2.6 млн. лет. Несомненно, что приливные и тепловые эффекты при сближениях с Солнцем должны приводить к большим изменениям поверхности астероида.

Большие изменения перигелийного расстояния для рассмотренных частиц связаны в основном с вековыми резонансами с планетами. Рис. 2 и 3 показывают характерный пример движения в резонансе v_5 с Юпитером. На промежутке времени от 100 000 лет до 40 000 лет перигелийное расстояние увеличилось с 0.1 а. е. до 1.1 а. е. Это изменение происходит при приблизительном сохранении величины $v_5 = \pi - \pi_J$, где π и π_J — долготы перигелиев для виртуальной частицы и Юпитера, соответственно.

Интересно, что пятая часть виртуальных объектов в прошлом была на долгопериодических орбитах, которые свойственны кометам (в настоящее время параметр Тиссерана относительно Юпитера равен 3.29). Такие объекты переходят в околоземную область по типичному маршруту, включающему пребывание на ор-



Рис. 2: Пример изменения перигелийного расстояния для объекта, попавшего в вековой резонанс.



Рис. 3: Изменение величины $v_5 = \pi - \pi_J$ для того же объекта, что и на рис. 2.

бите с перигелием вблизи орбиты Юпитера. Пример эволюции перигелийного расстояния и большой полуоси для одного из таких виртуальных объектов показан на рис. 4. В прошлом частица достигла орбиты с перигелием вблизи орбиты Юпитера. Затем вследствие больших возмущений от Юпитера произошла реверсия линии апсид, после которой уже афелий расположен вблизи орбиты Юпитера, а перигелий находится в околоземной области.



Рис. 4: Пример изменения большой полуоси и перигелийного расстояния для частицы, приходящей в околоземное пространство с кометной орбиты.

4. Заключение

Исследована эволюция орбиты астероида 159402 (1999 AP10) в прошлом. Поскольку движение астероида является хаотическим, то проводилось интегрирование уравнений движения для 100 виртуальных объектов с начальными орбитами, взятыми из доверительной области, на промежутке времени 10 млн. лет. С вероятностью 0.8 астероид на этом промежутке времени подходил к Солнцу на расстояние менее 0.1 а. е.

С вероятностью 0.2 этот объект пришел на современную орбиту с кометной орбиты. Вычисления проведены с использованием суперкомпьютера MVS-10P Межведомственного суперкомпьютерного центра PAH.

Список литературы

- 1. D. E. Trilling, M. Mueller, J. L. Hora, A. W. Harris, et al., Astron. J., 140, 770, 2010.
- 2. C. A. Thomas, J. P. Emery, D. E. Trilling, M. Delbó, J. L. Hora, and M. Mueller, Icarus, 228, 217, 2014.
- A. Kartashova, V. Emel'yanenko, M. Husarik, N. Kiselev, E. Bakanas, K. Antoniuk, A. Savushkin, and N. Karpov, in Moscow Solar System Symposium 12m-s3 (2021).
- 4. T. Hromakina, M. Birlan, M. A. Barucci, M. Fulchignoni, et al., Astron. and Astrophys., 656, A89, 2021.
- S. L. Jackson, B. Rozitis, L. R. Dover, S. F. Green, U. C. Kolb, A. E. Andrews, and S. C. Lowry, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 513, 3076, 2022.
- 6. V. V. Emel'yanenko, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 98, 191, 2007.

Станции колокации в космической геодезии и требования к ним

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Станции колокации в космической геодезии играют особенную роль, являясь, с одной стороны, станциями, на которых выполняются обычные геодезические измерения, но в то же время, с другой стороны, являясь станциями, связывающими различные технологии спутниковой геодезии, что позволяет производить оценку качества, точности и взаимную проверку результатов отдельных технологий космической геодезии. Создание сети станций колокации является обязательным условием для построения и мониторинга любой глобальной системы отсчета. В последнее десятилетие имеет место все возрастающая тенденция создания станций с одновременным размещением оборудования различных спутниковых технологий (станции колокации). Станции колокации должны соответствовать определенным требованиям с точки зрения установленного на них измерительного оборудования. В работе выполнен обзор существующих российских станций колокации, обозначены пути их развития и приведены требования к ним.

Поступила в редакцию 19.08.2022 г. Принята в печать 01.12.2022 г.

Ключевые слова: космическая геодезия, станции колокации

Collocation stations in space geodesy and their requirements

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Colocation stations in space geodesy play a special role, being, on the one hand, stations on which ordinary geodetic measurements are performed, but at the same time, on the other hand, being stations linking various satellite geodesy technologies, which allows evaluating the quality, accuracy and mutual verification of the results of individual space geodesy technologies. A network of collocation stations is a prerequisite for building and monitoring any global reference system. In the last decade, there has been an increasing tendency to create stations with simultaneous placement of equipment of various satellite technologies (colocation stations). The colocation stations must meet certain requirements in terms of the measuring equipment installed on them. The author reviews the existing Russian collocation stations, outlines the ways of their development and provides requirements for them.

Received 19.08.2022. Accepted 01.12.2022.

Keywords: space geodesy, colocation stations

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.4.002

1. Введение

Ядром любой существующей земной системы координат (например, международной системы координат ITRF, российских систем координат ГСК-2011, ПЗ-90.11), а также перспективной российской глобальной системы контроля геодезических параметров Земли (СКГПЗ) будут являться станции колокации (от английского слова *colocation*) — станции, оснащенные совместно установленными приборами основных геодезических технологий наблюдений и различными дополнительными датчиками.

Совместное размещение оборудования различных технологий позволяет не только интегрировать индивидуальные сети различных технологий в уникальную единую земную систему отсчета, но также оценивать качество, точность и осуществлять взаимную проверку результатов. Создание сети станций колокации является обязательным условием для мониторинга глобальной системы отсчета с точностью порядка 1 мм или выше на десятилетних временных шкалах [1]. При реализации последней версии ITRF (ITRF2020) из общего числа станций (порядка 1200 станций), измерения которых использовались для выработки общего решения, 93 станции являлись станциями колокации. Причем на этих 93 станциях, по крайней мере, одной из технологий являлось оборудование Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Следует отметить, что в мире насчитывается всего четыре станции, на которых установлено оборудование всех технологий космической геодезии. Это оборудование относится к четырем технологиям — радиоинтерферометрам со сверхдлинной базой (РСДБ), ГНСС, квантовым оптическим системам (КОС) и радиодоплеровским измерениям (ДОРИС). Причем одной из станций, оснащенной оборудованием всех четырех технологий, является российская станция Бадары (Республика Бурятия).

2. Станции колокации на территории РФ

На территории РФ основными станциями колокации являются 3 станции сети «Квазар-КВО». Сеть «Квазар-КВО» состоит из трех постоянно действующих РСДБ станций [2, 3, 4], обслуживаемых ИПА РАН (Институт прикладной астрономии Российской академии наук). Типы инструментов и технологий спутниковой геодезии, установленные на данных станциях, приведены в табл. 1.

Пункт	Спутниковые геодезические технологии и типы оборудования					
	РСДБ	ГНСС	KOC	ДОРИС	РВП	
Светлое	RT-32	Javad Delta G3T	Сажень ТМ		ИПА РАН	
Бадары	RT-32,	Javad Delta G3T	Сажень ТМ	Передатчик 3.0	ИПА РАН	
	RT-13					
Зеленчук-	RT-32,	Javad Delta G3T	Сажень ТМ		ИПА РАН	
ская	RT-13					

Таблица 1: Типы оборудования различных космических технологий, установленные на пунктах колокации сети «Квазар-КВО».

В табл. 1 применены следующие обозначения:

- RT-32, RT-13 РСДБ радиотелескопы;
- Javad Delta G3T ГНСС приемник;
- РВП радиометр водяного пара;
- Сажень ТМ квантово-оптическая система;
- Передатчик 3.0 радиопередатчик системы ДОРИС третьего поколения.

Среди других российских станций колокации следует отметить два пункта Росстандарта (Иркутск и Менделеево), на которых установлена аппаратура двух спутниковых технологий (КОС + ГНСС). Остальные пункты колокации, эксплуатируемые Роскосмосом, РАН, Росстандартом и Росреестром, оснащены, в основном, различными типами многосистемных ГНСС приемников.

Перспективы развития станций колокации на территории $P\Phi$

Научно-производственная корпорация Роскосмоса «Системы прецизионного приборостроения» планирует оснастить все три станции сети «Квазар-КВО» КОС нового поколения «Точка» [5]. ИПА РАН начал работы по установке РСДБ телескопа типа RT-13 на обсерватории Светлое и планирует оснастить абсолютным гравиметром обсерваторию Бадары [2]. Также ИПА РАН планирует оснастить геодезическим оборудованием астрофизическую обсерваторию в районе пункта Уссурийск, которая станет четвертой колокационной станцией на территории России с тремя космическими технологиями (РСДБ, КОС, ГНСС) [6, 7] (см. рис. 1).



Рис. 1: Планы расширения РСДБ сети «Квазар-КВО».

Перспективы развития зарубежных станций колокации с участием $P\Phi$

- 1. ИПА РАН совместно с Институтом геофизики и астрономии Республики Куба выполняют совместный проект по созданию российско-кубинской колокационной геодезической станции на острове Куба, в части оснащения ее оборудованием для проведения наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС)¹. Станция создается в следующих целях:
 - Получение высокоточной координатно-временной информации в интересах фундаментальных и проблемно-ориентированных исследований, в том числе для наземной поддержки ГЛОНАСС;
 - Проведение мониторинга и анализ метеорологических данных и локальных геофизических параметров по данным ГНСС, а именно временных рядов координат станции, задержек в тропосфере, параметров ионосферы, параметров вращения Земли и эфемерид навигационных спутников;
 - Создание необходимых условий для проведения фундаментальных и прикладных исследований в соответствии федеральными целевыми программами и проектами;
 - Создание необходимых условий для повышения эффективности научных исследований в области космической геодезии;
 - Дополнение фундаментального сегмента координатно-временного и навигационного обеспечения России станцией колокации в западном полушарии;
 - Получение доступа к зарубежной научной (научно-технической) инфраструктуре и получения новых компетенций.
- 2. Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» планирует оснастить зарубежные станции, расположенные в Таити (Французская Полинезия), Гран-Канария (Испания), Сан-Хуан (Аргентина), на острове Ява (Индонезия) и Энсенаде (Мексика), КОС нового поколения «Точка». Критерием выбора данных станций являются хорошие метеоусловия для проведения наблюдений, наличие местного квалифицированного персонала для эксплуатации станций и возможность последующего колоцирования лазерных систем с РСДБ и ГНСС оборудованием.
- 3. В заключении данного подраздела хотелось бы отметить, что существующих трех станций колокации сети «Квазар-КВО», расположенных на территории РФ, недостаточно для построения планируемой российской перспективной независимой глобальной системы контроля геодезических параметров Земли и предполагаемое размещение колокационных станций за рубежом значительно расширит возможности создаваемой СКГПЗ в части точности, глобальности, надежности и независимости системы. В то же самое время международное сотрудничество с существующими глобальными проектами, в частности GGOS (Global Geodetic Observing System), только усилит роль и значимость создаваемой перспективной СКГПЗ.

Требования к станциям колокации

Согласно рекомендациям GGOS [1] станции колокации должны быть оснащены следующими инструментами, которые базируются на новейших сенсорных технологиях, являются подключенными к коммуникациям реального времени, собирающими данные на самых высоких возможных частотах регистрации, эксплуатируемых автоматически с высокой надежностью:

- по крайней мере двумя геодезическими РСДБ-телескопами для обеспечения непрерывных РСДБ наблюдений (24 часа в сутки, 7 дней в неделю), включая перерывы на периоды обслуживания отдельных телескопов;
- лазерным дальномером для слежения за всеми основными спутниками, оснащенными лазерными ретрорефлекторами и, для некоторых базовых станций для слежения за Луной;
- по крайней мере тремя ГНСС приемниками и антеннами для гарантии того, что индивидуальные антенны (и приемники) могут быть модернизированы (например, для отслеживания спутников новых появляющихся ГНСС) без потери точной местной привязки к другим антеннам, таким образом обеспечивая долгосрочную стабильность на миллиметровом уровне;
- радиопередатчиком-маяком системы ДОРИС последнего поколения;
- наземными геодезическими инструментами для постоянного и автоматического мониторинга локальных связей между опорными точками космических геодезических технологий с точностью 1 мм;
- ультрастабильными генераторами для хранения и передачи времени и частоты (с помощью РСДБ, ГНСС, лазеров и т. д.);
- сверхпроводящим и абсолютным гравиметрами для поддержки гравитационных спутниковых миссий и определения движения геоцентра;
- метеорологическими датчиками для измерения давления, температуры и влажности в окрестностях станции;

 1 http://iaaras.ru/dept/habana/

- сейсмометром для обнаружения землетрясений, локализации эпицентров и определения параметров разрыва в комбинации с деформацией, определяемой другими спутниковыми методами и ГНСС-сейсмологией;
- разнообразными дополнительными датчиками (радиометры водяного пара, наклономеры, большие гироскопы, датчики грунтовых вод и др.). Если в будущем будут разработаны новые технологии наблюдений, которые обеспечат дополнительной информацией, то датчики таких наблюдений должны быть добавлены к комплекту аппаратуры основной станции.

В настоящее время ни одна российская станция колокации не обладает рекомендуемым GGOS набором установленного на ней оборудования. При создании станций колокации также следует учитывать требования, приведенные в документе [8].

3. Заключение

В статье проведен обзор существующих российских станций колокации космической геодезии и рассмотрены пути их развития как на територии России, так и за рубежом. Для мониторинга российских систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11, а также планируемой перспективной российской глобальной системы мониторинга геодезических параметров Земли необходимо увеличение существующих станций колокации, оснащенных всеми сенсорами действующих космических технологий и дополнительным оборудованием. Приведены рекомендации GGOS по желательному оснащению станций колокации. Однако, следует отметить, что выполнение указанных рекомендаций является довольно трудной задачей, так как это требует значительных материальных затрат и наличия на данных станциях высококвалифицированного персонала, способного эксплуатировать установленное разнообразное оборудование.

Список литературы

- 1. H.-P. Plag and M. Perlman, Global Geodetic Observing System, 1–332, 2009.
- 2. A. Ipatov, I. Gayazov, S. Donchenko, S. Karutin, and V. Shargorodsky, Geodesy and Geodynamics, 8, 90, 2017.
- 3. I. Gayazov, A. Ipatov, and S. Smolentsev, *Transactions of IAA RAS*, 143-149, 2013, URL http://iaaras.ru/en/library/paper/925/.
- 4. I. Gayazov, A. Ipatov, and S. Smolentsev, Applied Physics and Mathematics, 17–23, 2013.
- 5. S. Martynov, N. Parkhomenko, V. Pasynkov, M. Sadovnikov, and V. Shargorodskiy, *IAG/IERS unified analysis workshop*, 2019.
- D. Pavlov, I. Gayazov, A. Ipatov, D. Ivanov, S. Kurdubov, S. Mironova, and V. Suvorkin, IAG/IERS unified analysis workshop, 2019.
- A. Finkelstein, A. Ipatov, S. Smolentsev, V. a. Mardyshkin, L. Fedotov, I. Surkis, D. Ivanov, and I. Gayazov, in R. Navarro, S. Rogstad, C. E. Goodhart, E. Sigman, M. Soriano, D. Wang, L. A. White, and C. S. Jacobs, eds., Sixth International VLBI Service for Geodesy and Astronomy. Proceedings from the 2010 General Meeting, 106–110 (2010).
- 8. GOST P 56411-2015.

Первые результаты обработки DORIS измерений формата RINEX в центре анализа ИНАСАН

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе приводятся первые результаты обработки DORIS измерений формата RINEX (Receiver Independent Exchange Format) в центре анализа ИНАСАН — нового вида измерений системы DORIS. Приведено сравнение остаточных погрешностей радиальной скорости по результатам обработки измерений для данных формата RINEX и предшествующего формата doris2.2. Среднеквадратические ошибки для спутника Jason-2 на интервале 2008.5–2019.7 для данных формата RINEX и формата doris2.2 равны 0.427 мм/с и 0.404 мм/с, соответственно. Для спутника Cryosat2 на интервале 2021.5–2021.8 среднеквадратические ошибки форматов RINEX и doris2.2 равны 0.508 мм/с и 0.501 мм/с, соответственно. Полученные среднеквадратические ошибки сопоставлены с результатами среднеквадратических ошибок, полученными другими центрами анализа DORIS данных. Результаты сравнения подтверждают правильность применяемой методики обработки DORIS RINEX данных и используемых моделей.

Поступила в редакцию 20.09.2022 г. Принята в печать 01.12.2022 г.

Ключевые слова: система DORIS, формат RINEX, среднеквадратическая ошибка DORIS измерений

The first results of DORIS RINEX data processing at the INASAN Analysis Center

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The paper presents the first results of DORIS RINEX (Receiver Independent Exchange Format) data processing at the INASAN Analysis Center — a new type of DORIS system measurements. The comparison of the residuals of the radial velocity of measurement processing for RINEX data and the previous doris2.2 format is given. The RMS for Jason-2 satellite in the interval 2008.5–2019.7 for RINEX format data and doris2.2 format are 0.427 mm/s and 0.404 mm/s, respectively. For the Cryosat2 satellite in the interval 2021.5–2021.8 the RMS of the RINEX and doris2.2 formats are 0.508 mm/s and 0.501 mm/s, respectively. The obtained standard errors are compared with the results of standard errors obtained by other DORIS data analysis centers. The results of the comparison confirm the correctness of the DORIS RINEX data processing methodology and the models used.

Received 20.09.2022. Accepted 01.12.2022.

Keywords: DORIS system, RINEX format, standart deviation of DORIS residuals

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.4.003

1. Введение

Спутниковая доплеровская радиотехническая система DORIS (Determination d'Orbite Radiopositionnement Integres par Satellite) была разработана и реализована Французским космическим агентством (CNES) в тесном содружестве с научно-исследовательской группой космической геодезии (GRGS) и французским Национальным Институтом Географии (IGN) для высокоточного контроля орбит океанографических спутников, имеющих на борту прецизионные альтиметры, и определения координат наземных пунктов. Практическая эксплуатация системы DORIS началась в 1990 г. с запуском спутника SPOT2, оснащенного приемной аппаратурой системы DORIS. На начальном этапе эксплуатации миссии DORIS измерения для пользователей системы поставлялись в стандартном формате обмена данными типа doris1.0 и его следующих модификаций doris2.1 и doris2.2 [1]. Начиная с запуска спутника Jason-2 (2008), на котором был установлен приемник доплеровских сигналов третьего поколения типа DGXX, измерения системы DORIS стали доставляться потребителям в новом формате RINEX [2]. Данные всех последующих DORIS миссий доставляются только в формате RINEX. Для некоторых «старых» спутников (спутников, выведенных на орбиты в период апробирования формата RINEX) данные существуют как в формате RINEX, так и в формате doris2.2, что позволяет произвести сравнение результатов вычислений. Одним из главных преимуществ данных формата RINEX, по сравнению с данными формата doris2.2, является их быстрая доставка потребителям. Задержка получения потребителями измерений формата RINEX составляет 1 сутки, в то время как доставка пользователям данных формата doris2.2 составляет в среднем около 20 суток. Такая разница в доставке объясняется необходимостью предварительной обработки измерений формата doris2.2 перед их распространением.

2. Методика вычислений и полученные результаты

2.1. Методика вычислений

Обработка DORIS RINEX измерений выполнялась с помощью программного комплекса GIPSY-OASIS II, разработанного Jet Propulsion Laboratory (JPL,USA). Институт астрономии РАН (ИНАСАН), являясь одним



Рис. 1: Остаточные погрешности радиальной скорости между передатчиком и приемником для измерений форматов RINEX и doris2.2 спутника Jason-2.

из центров анализа DORIS данных Международной службы DORIS (IDS), обрабатывает и на регулярной основе поставляет свои решения IDS [3]. Изначально программный пакет GIPSY-OASIS II обрабатывал DORIS данные только формата doris2.2 и до настоящего времени нет законченной версии, способной обрабатывать данные формата RINEX, хотя ученые из института IGN (Institut Geographique National, Франция) сделали существенные шаги в этом направлении. Так как сейчас все эксплуатируемые миссии системы DORIS (8 спутников на орбите) доставляют свои измерения в формате RINEX, то для обеспечения непрерывности временных рядов обрабатываемых данных и в целях дальнейшего функционирования ИНАСАН в качестве центра анализа IDS, возникла необходимость модернизации программного пакета GIPSY-OASIS II, позволяющего обрабатывать DORIS данные формата RINEX. Методика обработки измерений системы DORIS формата RINEX, приведена в работе [4], которая была модернизирована и реализована группой космической геодезии ИНАСАН. Прежде всего объясним, в чем состоит различие между форматами doris2.2 и RINEX. При использовании формата doris2.2 приемная аппаратура спутника фиксирует число циклов частоты сигнала, излучаемого передатчиком за интервал измерений. Недостатком данного формата является то, что измерительная информация предварительно корректируется командой CNES и затем распространяется пользователям. В формате RINEX измерительная информация присутствует в «сыром» (необработанном) виде, что дает центрам анализа возможность самим осуществлять необходимые коррекции (ионосферную, временную). RINEX измерения выполняются на двух частотах и выражаются посредством фазовых и кодовых данных. Коротко суть методики использования формата RINEX в программном комплексе GIPSY-OASIS II заключается в следующем:

- фазовые и кодовые измерения, присутствующие в RINEX измерениях, с помощью алгоритма, подробно описанного в работе [5], приводятся к формату doris2.2;
- 2. выполняются дополнительные преобразования, в частности ионосферная коррекция измерений и коррекция момента времени фиксации измерений.

Также следует отметить, что так как ионосферная коррекция при трансформации формата RINEX в формат doris2.2 выполнялась самостоятельно, то в качестве конечных точек измерений (как для спутниковой, так и для наземной антенн) использовались так называемые iono-free фазовые центры, которые приведены в работе [4]. Измерения обрабатывались на суточных интервалах.



Рис. 2: Остаточные погрешности радиальной скорости между передатчиком и приемником для измерений форматов RINEX и doris2.2 спутника Cryosat2.

2.2. Результаты

По приведенной выше методике были обработаны измерения, регистрируемые приемниками, установленными на спутниках Jason-2 и Cryosat2. Измерения спутника Jason-2 были обработаны на всем интервале существования DORIS данных — с 2008.5 по 2019.7. Измерения спутника Cryosat2 были обработаны на 100суточном интервале времени — со дня 200 по день 300 2021 г. Для обоих спутников измерения существуют как в формате RINEX, так и в формат doris2.2. На рис. 1 и 2 приведены значения остаточных погрешностей радиальной скорости между передатчиком и приемником для данных форматов RINEX и doris2.2 спутников Jason-2 и Cryosat2, соответственно. В табл. 1 приведены основные характеристики результатов обработки и сопоставление с результатами других центров анализа.

Таблица 1: Основные результаты обработки DORIS данных и сравнение с результатами других центров анализа.

Центр	Спутник	Интервал	Дуга	Погрешность		Среднее число		
анализа		обработки	обработки	$({ m mm}/{ m c})$		измерений в сутки		
		(годы)	(сутки)	doris2.2	RINEX	doris2.2	RINEX	
ИНАСАН	Jason-2	2008.5 - 2019.7	1	0.404	0.427	18926	22934	
	Cryosat2	2021.5 - 2021.8	1	0.501	0.508	10003	10011	
CNES/	Jason-2	2011.0 - 2015.0	3.5	0.317	0.344	15671	15466	
CLS	Cryosat2	2011.0 - 2015.0	3.5	0.353	0.367	7711	7891	

Анализируя графики остаточных погрешностей радиальной скорости спутников Jason-2 и Cryosat2 (см. рис. 1 и рис. 2) можно отметить достаточно хорошее совпадение значений погрешностей для DORIS измерений форматов RINEX и doris2.2 на всем интервале обработки каждого спутника. Для спутника Cryosat2 совпадение почти «идеальное». Среднеквадратические ошибки радиальной скорости спутника Cryosat2 для измерений форматов RINEX и doris2.2 равны 0.508 мм/с и 0.501 мм/с, соответственно (см. табл. 1). Для спутника Jason-2 эти же значения равны 0.427 мм/с и 0.404 мм/с. Близкие значения остаточных погрешностей для разных форматов измерений подтверждают правильность методики обработки данных формата

RINEX. Имеющиеся значительные выбросы остаточных погрешностей (в 2 раза выше средних значений погрешностей) для спутника Cryosat2 (день 286) и спутника Jason-2 (в начале 2013 г. и в конце миссии) объясняются периодами обслуживания спутников, маневрами и изменениями орбиты (характерно для Jason-2). В эти интервалы времени происходит снижение точности получаемых данных или значительное уменьшение числа измерений, вплоть до их полного отсутствия.

Сравнение полученных в ИНАСАН остаточных погрешностей с остаточными погрешностями центра анализа CNES/CLS (Франция) (см. табл. 1) показывает несколько большие значения погрешностей у ИНА-САН. Это можно объяснить меньшим интервалом дуги получения решения (1 сутки у ИНАСАН и 3.5 суток у центра CNES/CLS), меньшим числом измерений у CNES/CLS и различной методикой обработки. В целом решения, полученные в центре анализа ИНАСАН, вполне отвечают по своей точности требованиям IDS.

В ближайшее время центр анализа DORIS измерений ИНАСАН планирует обработать данные всех миссий системы DORIS, распространяющих свои измерения в формате RINEX, получить объединенное мультиспутниковое решение и продолжить на регулярной основе доставлять результаты своих вычислений в IDS.

3. Заключение

В связи с появлением измерений системы DORIS в новом формате RINEX в центре анализа DORIS данных ИНАСАН разработана и апробирована методика их обработки. Среднеквадратические значения полученных результатов остаточных погрешностей RINEX измерений для двух спутниковых миссий Jason-2 и Cryosat2 (0.427 мм/с и 0.508 мм/с, соответственно) вполне сопоставимы с погрешностями обработки данных «старого» формата doris2.2 (0.404 мм/с и 0.501 мм/с) и погрешностями центра анализа CNES/CLS. Имеющиеся незначительные расхождения объясняются разными интервалами обрабатываемых орбитальных дуг, различным средним числом суточных измерений и методикой обработки. Полученные результаты подтверждают правильность разработанной методики обработки DORIS RINEX данных и используемых моделей. Используемая методика обработки RINEX измерений будет применена ко всех миссиям системы DORIS, распространяющих свои измерения в формате RINEX.

Список литературы

- 1. IDS documentation (a), Doris data export formats, cnes.
- 2. IDS documentation (b), Rinex doris 3.0, cnes.
- 3. S. Kuzin and S. Tatevian, Advances in Space Research, 58, 2561, 2016.
- 4. J.-M. Lemoine, H. Capdeville, and L. Soudarin, Advances in Space Research, 58, 2677, 2016.
- 5. S. Kuzin, INASAN Science Reports, 4, 99, 2019.

Метеорит Križevci (Хорватия) и метеороидный рой Канкрид

Терентьева А.К., Барабанов С.И.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

На основании анализа более 500 орбит метеороидных и болидных роев по опубликованным каталогам нами была установлена связь метеорита Križevci, порожденного болидом 4 февраля 2011 г. над Хорватией [1] с метеороидным роем Канкрид (No. 166 (a), [2, 3]). Известный критерий Саутворта-Хокинса дает величину $D_{\rm SH} = 0.128$, которая является вполне приемлемой для достаточно хорошего согласия орбит метеорита и роя. Динамический параметр Тиссерана указывает на астероидное происхождение роя и метеорита. Таким образом, выявлен еще один метеоритообразующий рой, который дополняет список 14 метеоритообразующих роев, найденных нами ранее [4]. Эти рои имеют важное значение с точки зрения потенциальной опасности при встрече их с Землей. В работе приводится краткая информация о таком редком явлении, которое названо А. Брезиной [5] «цепным падением» метеоритов.

Поступила в редакцию 08.11.2022 г. Принята в печать 01.12.2022 г.

Ключевые слова: метеорит, болид, метеоритообразующий рой

Meteorite Križevci (Croatia) and meteoroid stream Cancrid

Terentjeva A.K., Barabanov S.I.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Based on the analysis of more than 500 orbits of meteoroid and fireball streams according to published catalogs, we established the connection of the Križevci meteorite generated by the bolide on February 4, 2011 over Croatia [1] with a meteoroid stream Cancrid (No. 166 (a), [2, 3]). The well-known Southworth-Hawkins criterion gives a value of $D_{\rm SH} = 0.128$, which is quite acceptable for a fairly good agreement of the orbits of the meteorite and the stream. The dynamic parameter of Tisserand indicates the asteroid origin of the stream and the meteorite. Thus, this is yet another meteorite-forming stream that complements the list of 14 meteorite-forming streams that we found earlier [4]. These streams have an significance in terms of potential danger when they approach the Earth. The paper provides brief information about such a rare phenomenon, which is called the "chain fall" of meteorites by A. Brezina [5].

Received 08.11.2022. Accepted 01.12.2022.

Keywords: meteorite, fireball, meteoroid stream

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.4.004

1. Введение

Метеорит Кгіžеvсі был порожден метеороидным телом относительно малой массы (наиболее вероятно около 50 кг) и размером 30 см, который вошел в атмосферу над Хорватией вблизи полуночи 4 февраля 2011 г. в 23^h20^m40^s UT. Болид (в максимуме –13.7^m абсолютной звездной величины) был зарегистрирован пятью камерами Хорватской метеорной сети (CMN), тремя камерами в Словении и одной камерой Европейской болидной сети (EN), расположенной в Австрии [1]. В этой работе авторы приводят детальные данные о траектории болида, его скорости, торможении, фрагментации и гелиоцентрической орбите. Авторы также дают полный анализ обстоятельств падения метеорита. Метеорит выпал в 4 км севернее города Križevci, масса его составляла 291 г, был классифицирован как обыкновенный хондрит H6. По мнению авторов метеорит Križevci может быть отнесен к десятку наиболее хорошо задокументированных метеоритных падений.

2. Результаты исследования

По опубликованным каталогам нами были проанализированы более 500 орбит метеороидных и болидных роев. В результате был выявлен метеороидный рой Канкрид (No. 166 (a), [2, 3]), который может быть связан с метеоритом Križevci. В табл. 1 приведены элементы орбит и другие параметры метеорита и метеороидного роя. Известный критерий Саутворта-Хокинса для двух приведенных в таблице орбит метеорита и роя составляет величину $D_{\rm SH} = 0.128$, которая является вполне приемлемой [6] для достаточно хорошего согласия орбит, тем более для такого широкого роя как Канкриды. Этот рой состоит из трех групп или подсистем — (a), (b), (c). Метеорит Križevci имеет отношение к первой их них (a). Формально эта пара орбит ведет себя как N и S ветви (см. табл. 1), но все это в области очень малых наклонений к эклиптике на фоне сложной картины эклиптикальных радиантов.

Таким образом, можно полагать, что метеорит Križevci с достаточной степенью вероятности связан с метеороидным роем Канкрид (a).

Параметр Тиссерана (возмущающая планета — Юпитер) для роя Канкрид (a) равен $T_j = 3.53$, для метеорита Križevci $T_j = 4.30$. Такое же значение T_j для метеорита приведено в работе [1]. Оба значения соответствуют астероидному происхождению роя и метеорита.

Объект	Дата	Геоц	ентр.	V_{∞}	a	e	q	ω	Ω	i	π	Источ-
		радиант		(V_g)								ник
		α	δ	км/с	a. e.		a. e.					
Болид	2011	131.22°	$+19.53^{\circ}$	(14.46)	1.544	0.521	0.7397	254.4°	315.55°	0.64°	209.95°	1
метеорита	II 4											
Križevci												
Метеоро-	II 3–18	129.8°	$+10.04^{\circ}$	19.4	2.04	0.622	0.762	65.8°	141.2°	3.4°	207.0°	2
идный рой												
Cncds(a)												

Таблица 1: Радианты и элементы орбит болида Križevci (J1950.0) и метеоритообразующего роя Канкрид (J1950.0) (за 50 лет разница из-за прецессии составляет менее 1, что не является существенным).

¹За 50 лет разница из-за прецессии составляет менее 1°, что не является существенным. Источники:

1 - Borovička et al., [1]

2 — Terentjeva, [2, 3]. Метеороидный рой No. 166 (a)

В заключение мы не можем не сказать о следующем. В таком солидном издании как «Asteroids IV», казалось бы, должно быть описано современное состояние вопроса. В соответствующем разделе (объемом в два абзаца) «Meteorites from Meteor Showers» [7] обсуждаются три больших потока: Дракониды, Тауриды и Геминиды. В частности, был или не был meteorite-dropping фрагмент в Геминидах? Метеорит не был найден — и это при большом арсенале болидов, полученных болидными сетями, среди которых наличие метеоритообразующих болидов и их связи с метеороидными (чаще с болидными) роями не является редкостью. Но российские работы в этом плане авторам неизвестны. А на данный момент мы имеем 15 метеоритообразующих роев, из которых, кстати, один болидный рой τ -Cetids связан уже с двумя meteorite-dropping fireballs. По-видимому, еще менее известным является тот факт, что по исследованию И.С. Астаповича [5] половина метеоритов принадлежит метеорным потокам, остальные являются спорадическими. И еще, не лишне добавить. Более полувека назад И.С. Астапович [8] писал: «За последние 10–15 лет были получены фактические доказательства единства вещества, дающего метеоры и метеориты, поэтому мы не можем рассматривать их порознь, на что указывал основоположник метеорной астрономии Э.Ф. Хладный еще в конце 18 в. Слабый телескопический метеор и сверхяркий болид могут иметь одинаковое прошлое с выпавшим на Землю метеоритом. Необходимость комплексного подхода при изучении проникающего в земную атмосферу космического вещества впервые была высказана П.Н. Червинским, В.И. Вернадским и А.Е. Ферсманом уже 30 лет назад». Таким образом, обозначенная проблема, если освещается ее современное состояние, должна ставиться значительно шире.

3. Замечание о «цепном падении» метеоритов

О том, что дробление метеорного тела в атмосфере может зайти так далеко, что имеет место метеоритный дождь — явление хорошо известное (хотя и редкое). Но об одном уникальном явлении метеоритного дождя, следует, очевидно, напомнить. Об этом пишет в своей известной монографии И.С. Астапович [5]: «С падением метеорита Пултуск (Польша, 1868 I 30, число собранных метеоритов — 3000) связано явление, названное А. Брезиной «цепным падением». Он сообщает, что в тот же час упал метеорит такого же состава вблизи Леричи (Италия). Леричи лежит на обратном продолжении траектории метеорита Пултуск, но на 1600 км южнее ее. Таким образом, оба метеорита могли двигаться по параллельным путям до встречи с Землей. Возможно, им же принадлежит еще один такой же метеорит Носи-Бе (Мадагаскар)». В приведенном списке метеоритных дождей [5] с наибольшим числом отдельных экземпляров с 1803 г. (Л'Эгль, Франция) по 1947 г. (Сихотэ-Алинский, СССР), явление «цепного падения» было замечено всего лишь один раз (почти за полторы сотни лет!) в связи с падением метеорита Пултуск. Интересно было бы знать, были ли еще случаи «цепного падения» за прошедшие с тех пор годы. Мы думаем, что современные наблюдения с космических аппаратов могли бы помочь выявить такого рода уникальные явления.

Сделаем еще одно небольшое замечание к вопросу, который всегда стоял остро. То, что метеориты могут быть осколками астероидов, известно не менее 40 лет назад. А известна ли любопытная мысль И.С. Астаповича ([9], стр. 165), высказанная им около 80 лет назад? Он писал: «Судя по неправильным изменениям, яркости астероидов, по характеру и свойствам отражения от них солнечного света и по другим признакам, удалось установить, что форма небольших астероидов неправильная и что поверхность их, вероятно, такая же, как у каменных метеоритов. Значит, многие астероиды, как бы являются большими метеоритами. Верно ли обратное утверждение — не являются ли метеориты просто очень маленькими астероидами?»

4. Выводы

Выявлен очередной метеоритообразующий метеороидный рой Канкрид, относящийсяк группе найденных нами ранее 14 метеоритообразующих болидных и метеороидных роев. Эти рои имеют важное значение с точки зрения потенциальной опасности при их встрече с Землей.

Список литературы

- 1. J. Borovička, P. Spurný, D. Šegon, Ž. Andreić, et al., Meteorit. Planet. Sci., 50, 1244, 2015.
- 2. A. K. Terentjeva, Investigation of Minor Meteor Streams, volume 33 (1968).
- 3. A. K. Terentjeva, Astron. Tsirk. AN SSSR, No 415, 1–7, 1967.
- 4. A. K. Terentjeva and S. I. Barabanov, INASAN Science Reports, 6, 69, 2021.
- 5. I. S. Astapovich, in Meteor Phenomena in the Earth Atmosphere, Moscow (1958).
- 6. R. B. Southworth and G. S. Hawkins, Smithsonian Contributions to Astrophysics, 7, 261, 1963.
- 7. J. Borovička, P. Spurný, and P. Brown, in Asteroids IV, 257–280 (2015).
- 8. I. S. Astapovich, Tr. Stalinabad. Astron. Observ., 20, 78, 1954.
- 9. I. S. Astapovich, Interesting Essays on Meteorites, Odessa (2015).

Реккурентная активность аккрецирующих астрономических объектов

Тутуков А.В., Федорова А.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Многостороннее исследование продемонстрировало, что эволюция многих астрономических объектов сопровождается образованием около них газовых дисков. В числе этих объектов — молодые звезды, звезды главной последовательности, вырожденные карлики, нейтронные звезды, черные дыры в составе тесных двойных звезд, сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик. Вязкость турбулизованного конвекцией газа, магнитный ветер дисков, аккумуляция газа на внешнем краю диска и приливы могут обеспечить отвод углового момента газа и его аккрецию центральным объектом. Выполнен сравнительный анализ наблюдаемых проявлений аккреционной активности различными астрономическими объектами. Изучена возможность повышения вязкости газа за счет возникновения конвекции. Малая вязкость газа создает условия для его накопления в виде газового тора около аккрецирующего объекта. Увеличение вязкости газа вызывает в итоге «разрядку» этого тора и превращение его в квазистационарный аккреционный диск около аккретора. Активная аккреция турбулизованного конвекцией дискового газа сопровождается, как правило, возникновением магнитного звездного ветра около диска и формированием полярных джетов аккретора, способствующих потере малой части аккрецируемого газа и большей части его углового момента. Таким образом может быть обеспечена наблюдаемая реккурентная аккреционная активность различных астрофизических объектов.

Поступила в редакцию 13.10.2022 г. Принята в печать 01.12.2022 г.

Ключевые слова: аккреция, аккреционные диски, реккурентная аккреционная активность, вязкость газа дисков, конвекция в дисках

Recurrent activity of accreting astronomical objects

Tutukov A.V., Fedorova A.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

A multilateral study has demonstrated that the evolution of many astronomical objects is accompanied by the formation of gas disks near them. Among these objects are young stars, main sequence stars, degenerate dwarfs, neutron stars, black holes in close binary stars, supermassive black holes in the cores of galaxies. The viscosity of the gas turbulated by convection, the magnetic wind of the disks, the accumulation of gas on the outer edge of the disk and tides can ensure the removal of the angular momentum of the gas and its accretion by the central object. A comparative analysis of the observed manifestations of accretion activity by various astronomical objects is performed. The possibility of increasing the viscosity of the gas due to the occurrence of convection is studied. The low viscosity of the gas creates conditions for its accumulation in the form of a gas torus near the accreting object. An increase in the viscosity of the gas eventually causes the "discharge" of the torus and its transformation into a quasi-stationary accretion disk near the accretor. Active accretion of the turbulized by convection disk gas is usually accompanied by the appearance of a magnetic stellar wind near the disk and the formation of polar jets of the accretor, contributing to the loss of a small part of the accreted gas and most of its angular momentum. Thus, the observed recurrent accretion activity of various astrophysical objects can be ensured.

Received 13.10.2022. Accepted 01.12.2022.

Keywords: accretion, accretion disks, recurrent accretion activity, viscosity of the gas in disks, convection in disks

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.4.005

1. Введение

Эволюция звезд и галактик сопровождается образованием газовых дисков. Причиной их появления служит избыточный угловой момент аккрецируемого газа. Моделированию аккреционных дисков посвящена одна из самых популярных работ в астрономии [1]. При наличии достаточной вязкости газа газовый диск делится на две части: внутреннюю — аккреционную, обеспечивающую аккрецию центральным объектом, и внешнюю — декреционную, аккумулирующую угловой момент аккрецируемого вещества [2]. Основным параметром, регулирующим скорость аккреции, является вязкость газа, механизм которой пока до конца не ясен. Для безразмерной вязкости аккреция может быть описана в рамках модели α -дисков [1, 3]. В настоящее время обсуждаются три основных механизма вязкости газовых дисков. Это турбулентная вязкость газа, поддерживаемая конвекцией газа в полярных направлениях диска [4, 5, 6, 7], достаточно сильное магнитное поле [8] и звездообразовательная активность газовых дисков галактик [9]. Дополнительные возможности потери углового момента могут быть связаны с магнитным звездным ветром диска и приливным влиянием спутника аккретора. Все указанные возможности способны как поддерживать стационарный темп аккреции, так и обеспечивать реккурентный накопительно-разрядный режим газовых колец около аккретора в случае малой исходной вязкости газа. В ходе постоянного наблюдательного исследования переменных астроно-мических объектов выяснилось, что активность многих из них является следствием переменной скорости

аккреции газа центральными объектами, которыми могут быть звезды различного типа, нейтронные звезды и черные дыры. Целью настоящей статьи является сравнительный анализ аккреционной активности газовых дисков различной природы под влиянием переменной скорости аккреции.

2. Дисковые структуры в астрофизике

2.1. Диски молодых звезд: Т Таи, фуоры, протопланетные диски

Звезды образуются в ходе гравитационного коллапса плотных холодных межзвездных газопылевых облаков. Если принять, что начальная плотность такого облака определяется условием гравитационной устойчивости по Джинсу, то характерная скорость аккреции газа молодой звездой может быть оценена соотношением [10]:

$$dM/dt = 10^{-7} T^{3/2} M_{\odot}/\mathrm{yr},\tag{1}$$

где $T \sim 10$ К — температура межзвездного облачного газа в галактике, которая определяется излучением ее звезд. На основной стадии аккреции оптическая толща оболочки велика, и молодая звезда доступна для наблюдений только в инфракрасном диапазоне спектра. На поздних стадиях аккреции, когда пылевая оболочка становится прозрачной для оптического излучения звезды, скорость аккреции может быть и существенно меньше указанной величины. И звездный ветер молодой звезды, прекращая аккрецию, завершает процесс рождения новой звезды. Неизбежное вращение исходного облака предопределяет появление кратных звездных систем и протопланетных газопылевых дисков.

Теоретические оценки частоты образования планетных систем [11, 12] и результаты исследования прохождения планет по дискам родительских звезд обнаружили, что не менее трети звезд обладают планетными системами. Анализ условий образования протопланетных газовых дисков около одиночных звезд на основе наблюдаемого распределения протозвездных газовых облаков по угловому моменту приводит к выводу, что исходные размеры аккреционного диска в этом случае сравнительно малы. Они не превосходят нескольких радиусов звезды ГП [11]. Исходный размер аккреционного диска около одиночной звезды солнечной массы близок к $\sim 10 R_{\odot}$. Только вязкость газа этих дисков позже приводит их размеры к наблюдаемым размерам Солнечной системы и других планетных систем. Вязкая эволюция диска делит его на компактную внутреннюю аккреционную часть и внешнюю — протяженную декреционную, где и образуются планеты [1]. Время жизни газопылевых дисков порядка времени жизни самой звезды, исходя из того, что каждая третья звезда солнечного типа из окрестностей Солнца обнаружила присутствие такого диска [13]. Интересно, что двойственность звезды, как это выясняется сейчас, не является препятствием для образования планетных систем как около системы в целом, так и около ее компонентов. Однако образование планет около компонентов двойных звезд допускает большие угловые моменты и большие радиусы начального протопланетного диска (тора) в интервале $10 - 10^6 R_{\odot}$. Бо́льшие радиусы диска могут быть обусловлены, кроме того, аккрецией вещества протяженных вращающихся оболочек, возмущенных взаимодействием с соседними звездами.

Наблюдения звезд типа Т Тельца обнаружили, что декреционно-аккреционные диски (ДАД) молодых звезд обычно нестационарны, и скорость аккреции существенно меняется со временем [14]. На стационарной стадии газ накапливается в газовом диске-кольце около звезды. С наступлением, например, конвективной неустойчивости вязкость газа существенно увеличивается, и большая часть накопленного в кольце газа аккрецируется звездой, а его угловой момент с частью вещества поступает в протяженную декреционную часть ДАД и теряется с ветром диска, генерируемым конвекцией. Яркость звезды на стадии интенсивной аккреции значительно увеличивается, являя наблюдателю вспышку излучения. Интервалы между вспышками молодых звезд типа Т Тац имеют характерное время порядка тысячи лет, но могут достигать ~ 10⁶ лет [15].

Классическим примером молодых аккрецирующих вспыхивающих звезд являются фуоры. Они демонстрируют большое разнообразие параметров своих вспышек, увеличивающих яркость молодой звезды на несколько величин в течение нескольких лет [16]. Скорость аккреции газа при этом увеличивается от обычной ~ $10^{-7} M_{\odot}$ /год до ~ $10^{-5} M_{\odot}$ /год [17]. Естественно трактовать эти вспышки как продукт разрядной неустойчивости компактного газового диска-кольца с радиусом около 0.1 а. е. Усиленная аккреция сопровождается возникновением звездного ветра от аккреционного диска и полярных джетов аккретора [18, 19, 20].

Появление большинства ДАД около звезд сопровождает их образование. Однако недавнее обнаружение протяженных пылевых дисков около каждого десятого близкого вырожденного карлика [21] позволяет допустить и другие возможные сценарии их возникновения [22]. В частности, появление пылевых дисков около одиночных карликов может быть следствием аккреции последними вещества плотных молекулярных облаков на своем пути в Галактике. Другая возможность появления газового диска около вырожденных карликов связана с разрушением маломассивных доноров катаклизмических двойных звезд на поздних стадиях эволюции последних [10].

Современные наблюдательные возможности позволяют не только обнаружить свидетельства присутствия газопылевых дисков около звезд главной последовательности (ГП), но и исследовать их структуру, найти их основные параметры [15]. Массы центральных звезд составляют $0.2 - 2.5 M_{\odot}$, радиусы дисков достигают 200 а. е., а массы дисков равны 20–200 масс Юпитера. Более того, молодые двойные звезды демонстрируют наличие газовых дисков как около систем в целом, так и около каждого из компонентов [23]. Аккумуляция вещества исходного облака молодой звездой прекращается только с истощением его потока усиливающимся звездным ветром центральной звезды в ходе роста ее массы. Дальнейшая эволюция газонылевого диска состоит в его диффузионном расширении, росте пылинок, образовании планет в пределах 40 а. е. [11]. В ходе эволюции звезды на стадии красного сверхгиганта с массой порядка солнечной пыль и планеты в пределах 10 а. е. испаряются и поглощаются центральной звездой, а более далекая пыль, астероиды и планеты остаются уже около вырожденных карликов. Интересно отметить, что в процессе вза-имодействия далеких от своей звезды планет часть их может, ускорившись, покинуть родительскую звезду и стать самостоятельным членом галактического поля планет. Таким образом, большие размеры наблюдаемых ДАД свидетельствуют о большой вязкости их вещества, а пылевые диски около многих вырожденных карликов — о больших временах жизни реликтовых дисков, сравнимых с хаббловским временем.

2.2. Декреционные диски Ве-звезд

В начале XIX в. Лаплас предположил, что планеты Солнечной системы возникли в декреционном диске молодого и слишком быстро вращающегося Солнца. Таким образом, декреционный диск в астрофизике утвердился раньше привычного теперь аккреционного диска. Наблюдаемые Ве-звезды наглядно демонстрируют предложенное Лапласом формирование протяженных декреционных газовых дисков около быстро вращающихся массивных звезд ГП. Скорости вращения Ве-звезд, согласно наблюдениям, как правило, близки к критическим для их масс и радиусов. Причиной потери газа Ве-звездой является диффузия углового момента из сжимающегося в ходе эволюции на ГП ядра быстро вращающейся звезды в ее оболочку [24]. Характерные массы наблюдаемых Ве-звезд составляют $4 - 14M_{\odot}$, а радиусы наблюдаемой части диска достигают $60R_{\odot}$ [25] и, возможно, нескольких астрономических единиц [26]. Темп поступления газа звезды в диск или темп декреции равен $\sim 10^{-9}M_{\odot}$ /год, что примерно в десять раз превышает скорость потери вещества со звездным ветром Ве-звезды [27].

Детальное исследование поведения дисков десятка Ве-звезд со временем обнаружило нестационарный характер их эволюции [27, 28]. Нестационарность состоит в переменности блеска этих звезд с характерным временем в несколько лет. Эта переменность связана с реккурентными образованием и рассеянием (расширением) газового диска около быстровращающейся массивной звезды [28]. Расширение газового диска регулируется вязкостью его газа и временем жизни массивной звезды и позволяет, как демонстрируют наблюдения, даже образование пыли на внешнем, далеком холодном краю диска [26]. На нестационарное расширение газового диска в случае Ве-звезд накладывается нестационарность поступления газа от звезды в диск. Эволюция декреционных дисков Be-звезд сопровождается изменением α в пределах 0.1–1.0 [29]. Нижняя граница масс Ве-звез
д $\sim 4 M_{\odot}$ в этом случае отмечает верхнюю границу масс звезд, аккреция газа которыми при их образовании прекращается на границе Хаяши [10]. Следовательно, молодые звезды с меньшими массами в рамках этого сценария, имея конвективные оболочки, могут существенно уменьшить скорость своего вращения до прихода на ГП и миновать, таким образом, стадию Ве-звезды. Вероятно, нельзя исключить образование планетных систем в декреционных дисках Ве-звезд. Однако образование таких планет осложнено большой светимостью Ве-звезд, в силу чего зона аккумуляции пылевого вещества в диске оказывается слишком далеко от звезды для оперативного планетообразования за короткое время жизни этих массивных звезд. Это, впрочем, не исключает возникновения планетных систем около вырожденных карликов — продуктов эволюции Ве-звезд с массами, меньшими $8M_{\odot}$. Такие Ве-звезды избегают в конце эволюции вспышки сверхновой.

2.3. Газовые диски алголей

Диски алголей остаются среди наиболее изученных как с наблюдательной, так и с теоретической точек зрения [10]. Причиной этого является их широкая распространенность и большая яркость наблюдаемых аналогов на небе. Алгольная фаза наступает, когда первичный компонент достаточно тесной двойной системы $(a < 10^3 R_{\odot})$, исчерпав запасы водорода в своем ядре, расширяется и заполняет свою полость Роша. Характерная скорость обмена массой для этих звезд диктуется, как правило, тепловой шкалой времени донора: $3 \times 10^7 (M/M_{\odot})^2 (R_{\odot}/R) (L_{\odot}/L)$ лет. Условием возникновения и поддержания алгольной стадии является близость начальных масс звезд ГП, позволяющая аккретору оставаться компактным, избегая погружения системы в общую оболочку. Характерные наблюдаемые орбитальные периоды алголей 2–100 дней [30], скорости обмена веществом $10^{-8} - 10^{-5} M_{\odot}$ /год, при массах доноров $0.5 - 3M_{\odot}$, что отвечает максимальным размерам диска $\sim 100 R_{\odot}$ [30].

2.4. Газовые диски катаклизмических систем и рентгеновских двойных с донорами малой массы

Эти полуразделенные системы состоят из донора — звезды ГП с массой $0.1 - 1.5 M_{\odot}$ и компактного аккретора — вырожденного карлика, нейтронной звезды или черной дыры [10, 31]. Движущей силой их эволюции является магнитный звездный ветер донора при его массе $0.3 - 1.5 M_{\odot}$ и орбитальном периоде 3–20 часов, или излучение гравитационных волн системой при меньшей массе донора и орбитальном периоде, меньшем трех часов [32]. Темп обмена массой полностью определяется орбитальным периодом этих систем: при периодах, больших трех часов, он равен ~ $10^{-10}P^2 M_{\odot}$ /год (где P — период в часах), а при меньших периодах он близок к $10^{-10} M_{\odot}$ / [32, 33].

В катаклизмических двойных системах аккретор является вырожденным карликом. Примечательной особенностью этих систем является наличие предельной скорости обмена массой — $\sim 10^{-9} M_{\odot}$ /год [33], ниже которой система проявляет реккурентный характер аккреции с квазипериодическими вспышками. При меньших скоростях обмена газ сначала накапливается в газовом кольце-торе около аккретора в течение недели-года, и только с наступлением некоторой неустойчивости тор превращается в диск, а газ аккрецируется компактным аккретором в течении нескольких дней, повышая наблюдаемую яркость системы на несколько звездных величин [34, 35]. Отношение времени накопления газа в газовом торе около аккретора ко времени вспышки находится в интервале 3–20. Детальное изучение структуры вспышки с высоким, около 10^3 секунд, временным разрешением обнаружило неоднородность аккрецируемого газа, возможно, турбулизованного конвекцией [36].

В ходе «разрядки» газового тора при малых скоростях обмена в системе его газ аккрецируется вырожденным карликом, а угловой момент, вероятно, аккумулируется на внешнем крае тора с некоторой частью газа. Последовательность квазипериодических вспышек прерывается время от времени супервспышками с продолжительностью, в несколько раз превышающей продолжительность обычных вспышек. Важно, что время накопления газа перед супервспышкой близко к обычному для системы. То есть можно допустить, что часть газа в ходе обычных вспышек, сохраняя угловой момент, аккумулируется на внешнем крае аккреционного диска. После накопления некоторой «критической» массы газовый тор аккретора катаклизмической двойной разряжается полностью, производя супервспышку. Судьба углового момента газа супервспышки остается пока неясной. Он может быть возвращен в орбитальный момент, потерян с газом периферии диска за счет приливных сил или унесен с магнитным звездным ветром диска. Последний, как правило, сопровождает фазу динамической разрядки газового диска.

Рентгеновские полуразделенные двойные системы с донорами околосолнечной массы имеют в качестве аккретора нейтронную звезду или черную дыру звездной массы. Скорость обмена массой в таких системах со звездами ГП в качестве доноров регулируется магнитным звездным ветром донора, излучением гравитационных волн и ядерной эволюцией донора, если его масса превосходит солнечную [10]. Анализ условия стабильности аккреции в наблюдаемых рентгеновских двойных малой массы с орбитальными периодами от 10 минут до 100 дней показал, что приближение темпа обмена к эддингтоновскому пределу стабилизирует диск и аккрецию [37]. Уменьшение скорости обмена веществом между компонентами превращает их во вспыхивающие по примеру обычных катаклизмических двойных систем. Примеры двойной V 404 Суд с аккрецирующей черной дырой, вспыхнувшей в 1938, 1956, 1989 и 2015 г. [38], и рентгеновской двойной GRS 1716-249 [39], вспыхнувшей на сто дней в 2016–2017 гг., демонстрируют накопительный режим аккреции в рентгеновских двойных с малым темпом обмена. То есть мощность и продолжительность вспышек растет с увеличением времени между ними. Интересно отметить, что заполнение полости Роша донором не является необходимым для интенсивного обмена веществом между компонентами достаточно тесной рентгеновской двойной. В случае, когда донор является Ве-звездой, раскрученной обменом веществом на стадии, предшествующей образованию компактного остатка спутника, то декреционный диск Ве-звезды может стать эффективным поставщиком газа компактному аккретору [27]. Кроме того, для доноров, достаточно близких к своим полостям Роша, возможно возбуждение самоподдерживающегося индуцированного звездного ветра [40, 41].

Некоторые параметры газового диска-тора на фазе разрядки можно оценить, принимая конвективный диффузионный характер ее природы. Диффузионное время определяется соотношением $\tau = R^2/(vh)$, где R — радиус диска, h — его толщина, v — характерная скорость конвективных элементов в полярных направлениях диска. Для приближенной оценки скорости конвективных элементов мы предполагаем, что длина их пробега равна толщине диска, и что это расстояние проходится ими за время порядка периода вращения газа на внешнем краю диска. Тогда v = Vh/R, где V — кеплеровская скорость на внешнем краю диска. В итоге для диффузионного времени получим:

$$\tau = \tau_{\rm Kep} \ (R/h)^2,\tag{2}$$

где $\tau_{\text{Kep}} = R^{3/2}/(GM)^{1/2}$ — кеплеровское время на внешнем краю диска. Характерная продолжительность вспышек катаклизмических двойных порядка одного дня при орбитальном периоде в несколько часов, что

дает возможность оценить в рамках этой модели относительную толщину аккреционного диска на фазе его разрядки: $h/R \sim 0.2$. Реккурентный (зарядно-разрядный) характер аккреции катаклизмических систем дает нам хороший пример поведения и других астрофизических газовых дисков, которые могут иметь такой же характер аккреционного режима. Это позволяет распространить представленный сценарий эволюции дисков на другие астрономические газовые диски разной природы.

Разрушение доноров малой массы в конце эволюции катаклизмических или рентгеновских систем оставляет вырожденный карлик, черную дыру или нейтронную звезду с аккреционно-декреционным диском с массой ~ $0.1 M_{\odot}$ [10]. Ранние стадии эволюции аккрецирующего объекта с диском могут сопровождаться нестабильностью аккреции и вспышками излучения. На поздних стадиях эволюции в этом диске возможно и образование планет. Эти процессы предстоит изучить.

2.5. Газовые диски симбиотических двойных звезд

Парадоксальное сочетание спектров горячего и холодного излучения некоторых звезд было объяснено в рамках эволюции широких двойных звезд [42, 43]. При этом более массивный компонент, закончив свою эволюцию, стал вырожденным карликом с массой $M_{\rm a}$, а его спутник с массой $M_{\rm d}$ превратился в ходе своей эволюции в красный (сверх)гигант и, не заполняя свою полость Роша, теряет вещество в темпе $\dot{M}_{\rm d}$ за счет своего звездного ветра. Анализ обмена веществом между компонентами симбиотических двойных позволяет поставить задачу о физике аккреции вещества звездного ветра. Для аккреции этого вещества необходимо, чтобы угловой момент захваченного газа не превосходил предельный, равный $(GM_{\rm a}R_{\rm a})^{1/2}$. Наблюдения демонстрируют, что для симбиотических систем это условие выполняется, и диски около вырожденных компонентов действительно образуются. На месте последних могут быть нейтронные звезды и черные дыры звездных масс в случае рентгеновских двойных систем [44]. Характерные скорости аккреции в классических симбиотических двойных системах с вырожденными карликами в качестве аккретора составляют $10^{-8} - 10^{-6}M_{\odot}$ /год, а радиусы дисков достигают $100R_{\odot}$ [45]. Аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры часто достигают сверхэддингтоновских скоростей аккреции [44].

Аккреция газа компактным объектом через диск порождает целый ряд нестационарных явлений как накопительного, дискового характера [46, 47], так и вспышечного горения водорода в оболочке аккрецирующего карлика или нейтронной звезды [10]. Примером симбиотической повторной новой является LMCS 154, вспыхнувшая в 1940 и 1977 г. [48]. Интересно, что симбиотические явления, то есть проявление аккреции астрономическими объектами вещества звездного ветра, известны и среди галактических объектов. Например, найдены Е-галактики, окруженные кольцами молодых звезд [49] с радиусами, в несколько раз превосходящими радиусы самих галактик. Поскольку средняя плотность галактик с ростом их массы уменьшается, приливное разрушение молодых галактик малой массы в качестве механизма образования таких колец следует считать маловероятным. Не исключено, что наблюдаемые кольца молодых звезд Е-галактик являются продуктами звездообразования в обтекающем межгалактическом газе или в аккрецированных этими галактиками газовых кольцах. То есть активность газовых торов-колец разной природы свойственна многим аккрецирующим астрономическим объектам.

2.6. Газовые диски сверхмассивных черных дыр. Звездообразование и квазары

В центрах всех Е-галактик и балджей спиральных галактик расположены сверхмассивные черные дыры (СМЧД) (см., например, [50]). Характерные массы СМЧД достигают $10^{-4} - 10^{-2}$ массы сфероидальных компонентов их галактик, составляя $10^5 - 10^{10} M_{\odot}$ [51]. Звезды-сверхгиганты сфероидального компонента галактики теряют газ со скоростью ~ $(M/M_{\odot}) \times 10^{-11} M_{\odot}$ /год. Большая часть этого газа, прогретая взрывами сверхновых первого типа, покидает галактику в виде галактического ветра. Однако, как показывают оценки, энергии этих сверхновых недостаточно для прогрева плотного газа ядра галактики и удаления его из ядра. Этот газ аккрецируется на СМЧД. Неизбежное вращение ядерной области галактики и ее газа приводит к формированию около аккрецирующей СМЧД газового тора, становящегося диском с размером $10^5 - 10^6 R_{\odot}$ около СМЧД с массами $10^7 - 10^{10} M_{\odot}$ [52] на фазе активной аккреции. Скорость аккреции газа на СМЧД достигает в активных квазарах нескольких эддингтоновских пределов, равных $\sim 10^{-8} M_{\rm BH}$ /год [53]. Таких скоростей достаточно для образования СМЧД наблюдаемых масс в течение уже первого миллиарда лет жизни галактики, как наглядно демонстрируют наблюдения далеких молодых квазаров. Судя по отношению масс СМЧД квазаров к массам родительских галактик, которое меньше 0.01, лишь малая часть газа, возвращенного старыми звездами галактик в течение их жизни, поглощается СМЧД в их ядрах. Время удвоения массы СМЧД квазара, аккрецирующего газ на эддингтоновском пределе, почти в тысячу раз короче хаббловского времени, из чего следует, что фаза активной аккреции занимает малую часть времени жизни СМЧД в ядрах галактик. То есть, вероятно, квазары являются обычными компактными астрономическими объектами на фазе разрядки газового тора, накопленного между вспышками их аккреционной активности [54], что объясняет малую долю галактик, являющихся одновременно квазарами.

Исследование поведения яркости квазаров обнаружило ее переменность во многих шкалах времени. Амплитуда переменности блеска достигает 0^m.1 при характерных временах переменности 0.3–1000 дней, нарастая с увеличением характерного времени, но уменьшаясь с увеличением светимости квазара [55, 56]. Регистрируемое сегодня минимальное характерное время переменности достигает всего нескольких часов [57]. Характерные кеплеровские времена для СМЧД равны ~ $10^{-4} M_{\rm BH}/M_{\odot}$ сек, что для самых массивных квазаров может составлять от нескольких часов до нескольких дней [58]. Обсуждается несколько возможных причин этой переменности. Среди них — разрушение близких к СМЧД звезд фона и неоднородность газа аккреционного диска, аккрецируемого СМЧД [55, 56]. Есть еще одна возможность для заметного изменения скорости аккреции газа на СМЧД со временем. Накопление газа в ядрах галактик может вызвать в них реккурентные вспышки звездообразования [59, 9, 60, 61]. Точно так же увеличение плотности газа аккреционного кольца до некоторой критической величины вызывает в этом кольце вспышку звездообразования, турбулизующую накопленный газ. Турбулизация газа повышает его вязкость и ускоряет его аккрецию на СМЧД. Численная модель таких дисков демонстрирует реальность этого процесса [62].

Аккреционные газовые диски на стадии активной аккреции окружены коронами горячего истекающего газа [63], возможно, генерируемыми турбулентным диском. Дисковый ветер уносит часть газа и углового момента газового диска из ядра галактики, облегчая аккрецию газа центральной черной дырой [64]. В ярких квазарах обнаруживаются мощные истечения из ядерной области со скоростями до нескольких сотен солнечных масс в год, что превосходит обычный темп аккреции на СМЧД [65, 66]. Интересно, что столкновения галактик в качестве основной причины усиления активности ядра и появления квазара, вероятно, исключаются наблюдениями [67], оставляя в качестве причины ускорения аккреции конвекцию и турбулизацию газа и/или звездообразование в компактном газовом диске ядра галактики. Активное истечение газа заметно очищает полярные зоны диска от газа, образуя там две гигантские полости [68, 69] и полярные джеты — коллимированные высокоскоростные газовые потоки газа. Таким образом, анализ наблюдаемых свойств квазаров приводит к обычной для многих аккрецирующих компактных астрофизических объектов, рассматриваемых в статье, модели зарядно-разрядного газового тора-диска.

В процессе столкновения галактик, ведущего к их слиянию или разрушению, могут возникнуть одиночные СМЧД [70]. Они могут сопровождаться остатками звездного и газового компонента родительских галактик. Кроме того, двигаясь в сравнительно плотном газе ядра родительского скопления или плотном газе встреченных на пути галактик, СМЧД могут оказаться окруженными обычными декреционноаккреционными газовыми дисками и проявлять «обычные» признаки акреционной активности. Не исключено и планетообразование в таких дисках. Со временем такие объекты могут быть обнаружены.

2.7. Джеты

Джеты — узко сфокусированные, часто хорошо структурированные высокоскоростные потоки газа от аккретора в полярных направлениях аккреционных дисков [71, 72]. Как отмечено выше, генерация джетов на стадии активной аккреции наблюдается у самых разных аккреторов: от молодых звезд [73, 71, 72] и рентгеновских двойных [74] до СМЧД в ядрах квазаров [58]. В последних длина джетов достигает нескольких килопарсек. Скорость движения газа в джете близка к кеплеровской скорости газа на внутренней границе диска, у поверхности аккретора. В случае аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр она может достигать заметной доли скорости света. В частности, моделирование газодинамики джетов галактики NGC 1052 показало возможность ускорения газа джетов до нескольких десятых скорости света [75].

Формирование джетов связано, вероятно, с газодинамикой ветра диска, скорость которого увеличивается к оси вращения [76]. А движение коронального газа к этой оси в силу сохранения углового момента вызывает значительное ускорение его вращения. Вероятно, аналогичные явления происходят при образовании торнадо в земной атмосфере. Физика образования и коллимации потока газа в джете была недавно детально проанализирована Бисноватым-Коганом [4]. Коллимация может быть обусловлена как газодинамикой ветра вращающегося диска, так и магнитным полем.

Наблюдения демонстрируют, что во время стадии активной аккреции в симметричных полярных джетах образуются долгоживущие газовые уплотнения (knots), и детальное исследование этих джетов обнаружило в некоторых из них до десяти таких равнораспределенных по джету уплотнений [77, 78, 71, 79]. Эти уплотнения удаляются от аккретора со скоростью, близкой к начальной [73, 71]. То есть фактически джеты являются летописями прошлой активности аккрецирующего объекта! Распределение уплотнений в джетах отражает периоды повторения этой активности. Такие периоды определяются характерным временем диффузии (формула (2)). Для молодых звезд они составляют несколько лет [80], а для квазаров достигают 10^5 лет и более [58], что определяет длину видимых джетов.

3. Эволюция газовых дисков галактик

Типичная дисковая S-галактика является суммой двух соосных дисков, вложенных друг в друга: газового и звездного. Причем возможно, что галактики с массой более ~ $10^{10} M_{\odot}$ обладают неким темным гало, аккумулирующим основную часть гравитирующего вещества галактики и поддерживающим «плоскую» кривую вращения этих галактик на расстояниях, в несколько раз превышающих оптические размеры галактик [81]. Одна из основных возможностей обеспечения вязкости газового диска галактики связана со звездообразованием в нем [9, 82, 83, 84]. Характерное время диффузии в радиальном направлении: $\tau_D = \tau_k (R/h)^2$, где τ_k — кеплеровское время, R — радиус, а h — толщина газового диска. Для современной толщины газового диска Галактики это время превышает хаббловское, что обуславливает наблюдаемый заметный градиент химического состава звездного диска. Однако на ранних стадиях эволюции галактик и для галактик с активным звездообразованием толщина их газовых дисков порядка их радиусов, поэтому диффузия могла быть эффективным фактором химической эволюции молодых галактик. Кроме того, галактики с активным звездообразованием обнаружили усиленную аккрецию газа их центральными СМЧД, что подчеркивает роль звездообразования в турбулизации газа и в его аккреции на центральную СМЧД [85].

Важно подчеркнуть, что хотя темп звездообразования в галактиках и растет с их массой [86], он подчеркнуто бимодален. То есть для одних галактик характерное время звездообразования $\sim 3 \times 10^{10}$ лет, а для других $\sim 3 \times 10^8$ лет [87]. Первое время близко к хаббловскому, а второе — к кеплеровскому времени для галактик, которое порядка $10^8 \ (M/M_{\odot})^{1/4}$ лет [70]. Последние галактики испытывают вспышку звездообразования, обычно приписываемую столкновениям галактик [88]. Но не исключено, что эти галактики испытывают самовозбуждающуюся вспышку звездообразования в их газовом диске. Такая вспышка, увеличивая толщину газового диска, ускоряет диффузию газа в ядерную область галактики, повышая там плотность газа и ускоряя, таким образом, звездообразование в такой галактике [59, 89]. Такие вспышки по примеру других вспышечных явлений в мире газовых дисков различной природы могут быть реккурентными. Вспышки звездообразования в газовых дисках галактик сопровождаются возникновением или усилением галактического, в данном случае, ветра. Газ ветра движется со скоростями порядка параболических скоростей для соответствующих галактик, составляющих несколько сотен километров в секунду. Темп его потери галактикой равен нескольким массам Солнца в год [90]. Пыль обычно делает такие галактики инфракрасными [91]. Спиральные галактики служат хорошим примером организации процесса звездообразования в дисковых галактиках. Фактически временная история скорости звездообразования сочетается в них с пространственной под влиянием синхронизирующей роли спиральной волны плотности. Сама спираль возникает, вероятно, под влиянием дипольного компонента гравитационного потенциала. Последний появляется в результате сближений и слияний со спутниками, либо, возможно, в ходе взаимодействия газового диска галактики с ее темным гало [7], которым обладают галактики с массами более $10^{10} M_{\odot}$ [81]. Подводя итог краткому анализу эволюции газовых дисков галактик, можно прийти к выводу, что они являются типичными представителями астрофизических газовых дисков и демонстрируют их основные черты. Их вязкость определяется турбулизацией газа в результате звездообразования.

4. Условия конвективной неустойчивости астрофизических газовых дисков

В настоящее время обсуждаются три основных механизма повышения вязкости газа дисков. Это турбулентная вязкость конвективного движения газа в полярных для дисков направлениях [8, 92, 76, 6], достаточно сильное магнитное поле [3] и звездообразование в дисках галактик и СМЧД, сопровождаемое взрывами сверхновых, турбулизующими газ [9]. Все эти механизмы способны как поддерживать стационарную аккрецию газа диска центральным объектом, так и обеспечить реккурентный, накопительный режим аккреции. Сопутствующие возможности потери углового момента состоят в накоплении его на внешнем краю диска, магнитном ветре диска, передаче момента в орбитальное движение близкого спутника.

Газодинамика аккреционных дисков представляется очень сложной задачей, обремененной многими параметрами [93]. Опыт изучения структуры звезд демонстрирует, что причиной возникновения конвекции является либо высокая концентрация энерговыделения, либо высокая непрозрачность газа, вызванная его ионизацией при температурах около 10^4 K, либо пылью при температурах около 1000 K [10]. Ионизация газа повышает его непрозрачность на несколько порядков величины [3, 94]. Непрозрачность пыли, содержащейся в газе солнечного состава, близка к 0.01 T, где T — температура излучения. При испарении пыли с температурой порядка тысячи градусов непрозрачность может достигать величин, достаточных для появлении конвекции в диске. Для оценок условия возникновения конвекции газа диска в полярных направлениях примем предположение о стационарной аккреции с темпом \dot{M} . Приравняв скорость поступления гравитационной энергии в диск и скорость излучения диска, найдем:

$$T(K) = 3 \times 10^5 \, (R/R_{\odot})^{-3/4} \, (M \ \dot{M}/M_{\odot})^{1/4}, \tag{3}$$

где темп аккреции M выражается в единицах M_{\odot} /год. При выводе последней формулы предполагается, что главным источником нагрева газа диска служит гравитационная энергия аккрецируемого газа.

Примем, что причиной появления конвекции может быть увеличение непрозрачности газа при ионизации водорода (при $T = 10^4$ K), по аналогии с конвекцией в холодных оболочках звезд ГП малой массы или красных гигантов. Другой причиной появления конвекции может быть повышение непрозрачности пыли по отношению к ее собственному излучению при температурах, близких к температуре ее испарения ($T = 10^3$ K).

Структура и эволюция аккреционного диска может быть представлена следующим образом. Скорость аккреции, масса и природа аккретора определяют положение внутренней границы соответствующего диска. Положение внешней границы определяется природой диска. Для компонентов тесных двойных звезд эта граница определяется размерами полости Роша. Для одиночных молодых звезд и СМЧД внешняя граница задается диффузией газа диска. Распределение эффективной температуры по радиусу определяет положение зон конвективной неустойчивости этого диска. Можно предположить, что формирование газового аккреционного тора в зоне ионизации (при $T = 10^4$ K) или испарения пыли (при $T = 10^3$ K) обеспечивает в силу высокой вязкости газа квазистационарную аккрецию и почти постоянную яркость аккрецирующего объекта, возмущаемую, возможно, лишь неоднородностью турбулизованного конвекцией аккрецируемого газа. Действительно, пример аккрецирующего рентгеновского пульсара A0535+26 демонстрирует наличие флуктуаций аккреционного потока с частотой, соответствующей кеплеровской частоте на внутренний границе аккреционного диска. Катаклизмические двойные системы со скоростью обмена выше $10^{-9} M_{\odot}$ /год [33] демонстрируют пример стационарного аккреционного диска. Если же угловой момент аккрецируемого газа диктует формирование тора вне зон повышенного поглощения излучаемой тором энергии (при указанных выше температурах), последний остается ламинарным, и только реккурентное накопление газа в торе способно теперь возбудить конвекцию и активную аккрецию газа [6]. Таков механизм реккурентной аккреции дисков астрономических объектов различной природы.

Время диффузионной разрядки диска может быть оценено с помощью формулы (2). Характерная толщина конвективного диска ограничивается эддингтоновским пределом для потока энергии в полярных направлениях диска: $h = \dot{M} \kappa/4\pi c$. При этой оценке мы предполагаем, что длина пробега конвективных элементов равна толщине диска, а их характерная скорость в полярных направлениях диска равна $\sim V_k h/R$, где V_k — кеплеровская скорость конвективных элементов. Размер конвективной, диффузионной части диска может быть с учетом найденной ранее оценки a/H = 0.2 представлен как:

$$a/R_{\odot} = (M/M_{\odot})^{1/3} \ (\tau/\mathrm{yr})^{2/3}.$$
 (4)

Судя по продолжительности вспышек излучения, обусловленных усилением аккреции, для катаклизмических двойных размер диска — порядка солнечного радиуса, а для СМЧД квазаров он может достигать нескольких парсек.

Продолжая аналогию с конвективными оболочками звезд, можно ожидать, что конвекция способна поддерживать с помощью звуковых волн нагрев газа короны аккреционного диска и активную потерю горячего газа диском в его полярных направлениях. То есть аккреционный диск на фазе активной аккреции газа центральным объектом имеет интенсивный корональный ветер. Не исключено, что такой корональной активности аккреционного диска и газодинамики оттекающего вращающегося газа достаточно и для формирования полярных джетов — высокоскоростных хорошо коллимированных потоков газа от аккретора. Такие джеты наблюдаются у многих аккрецирующих объектов, например, у аккрецирующих звездных черных дыр — компонентов рентгеновских двойных [95] и у СМЧД [71]. И снова, ссылаясь на описанное Скуманичем [96] торможение вращения звезд малой массы солнечным магнитным звездным ветром, можно предположить возможность эффективного торможения вращения газового аккреционного диска его магнитным ветром. Эта возможность поддержания аккреции газа диска пока не исследована, хотя в некоторых случаях она может оказаться определяющей для поддержания аккреции газа на активной стадии.

Другой возможной причиной дестабилизации ламинарных газовых аккреционных дисков может быть их магнитное поле, усиливаемое дифференциальным вращением дисков, и связанные с ним магнито-гидродинамические неустойчивости, приводящие к повышению вязкости и разрядным явлениям в дисках [3, 97, 98]. Численное моделирование этих явлений остается сложной задачей, решение которой целиком определяется принятыми параметрами. Для оценок роли магнитного поля в увеличении вязкости достаточно принять, что ламинарное течение газа в диске разрушается при объемной энергии поля, превышающей таковую для газа. Условие вмороженности поля приводит к соотношению [99]: $H(\rho) = 10^9 \rho^{2/3}$ гаусс. Эта оценка дает хорошее приближение для магнитных полей атмосфер Ар звезд и вырожденных карликов. Сравнивая энергию поля с тепловой энергией газа найдем, что поле становится существенным фактором при $T < 3 \rho^{1/3}$. Возможно, что последнее условие и отделяет неустойчивые газовые диски от ламинарных при магнитном поле, достаточном для влияния на эволюцию диска.

В качестве примера, иллюстрирующего нестационарный режим аккреции в протопланетном диске, представим результаты моделирования из работы [72]. В данной работе была исследована роль конвекции в аккреционном газопылевом диске у молодой звезды солнечной массы. Эволюция кеплеровского диска изучена с помощью уравнения Прингла, описывающего изменение поверхностной плотности со временем, при этом учитывается аккреция вещества из оболочки на диск с темпом $10^{-7}M_{\odot}$ /год. Одновременно с вычислением радиальной структуры рассчитываются распределения плотности и температуры в полярном направлении в предположении, что диск является гидростатически равновесным. При расчете вертикальной структуры диска учитывается нагрев диска излучением звезды, а также вязкий нагрев газа диска. Основным фактором, управляющим эволюцией диска в рамках данной модели, является зависимость коэффициента вязкости от радиуса. Моделирование показало возможность достижения реккурентного режима аккреции в определенном интервале скоростей аккреции газа диском. Эта модель может быть полезна для объяснения вспышек молодых звездных объектов, таких как фуоры.

5. Заключение

Приведенный выше анализ наблюдаемых свойств околозвездных и галактических газопылевых аккреционных дисков демонстрирует два основных сценария их эволюции, связанных со стационарной и реккурентной аккрецией газа центральным объектом. При стационарной аккреции масса диска остается постоянной, как и яркость аккретора. При реккурентной аккреции газ сначала накапливается в торе, размеры которого определяются угловым моментом аккрецируемого вещества. После наступления неустойчивости, обусловленной увеличением вязкости газа, происходит разрядка газового тора, развитие аккреционного диска и многократное повышение яркости аккрецирующего объекта — вспышка излучения. В настоящей работе при анализе причин повышения вязкости газа основное внимание уделено роли конвекции в веществе диска в полярных направлениях. Конвекция, повышая вязкость газа, превращает на время газовый тор в стандартный аккреционно-декреционный диск.

Реккурентную аккреционную активность демонстрируют самые различные аккрецирующие астрономические объекты: молодые звезды [73, 71], рентгеновские двойные системы с аккрецирующими нейтронными звездами и черными дырами [100], катаклизмические системы [101], ядра Сейфертовских галактик [102]. Всеволновые наблюдения наглядно показали, что аккреция газа компактными объектами сопровождается (помимо формирования газовых дисков и возникновения вспышек излучения) образованием целого ряда новых структур и явлений. Среди них — горячие короны и дисковые магнитные ветры [103], образованные этими ветрами гигантские полости пониженной газовой плотности на полюсах диска [4], а также полярные джеты аккретора.

Магнитный ветер аккреционного диска, как и аналогичный звездный ветер, может быть очень эффективным механизмом потери углового момента диском наряду с вязкостью, генерируемой турбулизованной конвекцией. Увеличенная вязкость необходима для эффективной аккреции газа, накопленного в диске. Скорость газа дискового ветра близка к параболической в месте генерации ветра, а полярные полости низкой плотности, образуемые этим ветром, способны на некоторое время прервать аккрецию газа диском. Наблюдение этих полостей горячего газа осложнено, как правило, его низкой плотностью, что делает их наблюдаемыми только в рентгене, в ядрах галактик с аккрецирующими СМЧД и сравнительно плотным фоновым газом, в котором они и видны.

Джеты — хорошо сфокусированные, часто достаточно структурированные высокоскоростные потоки газа в полярных направлениях аккреционных дисков [71, 72]. Генерация джетов на стадии активной аккреции наблюдается при самых разных аккреторах: от молодых звезд [73, 71, 72] и рентгеновских двойных [74] до СМЧД в ядрах квазаров [58]. В последних длина джетов достигает нескольких килопарсек. Скорость движения газа в джете близка к кеплеровской скорости газа на внутренней границе диска, у поверхности аккретора. В случае аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр она может достигать заметной доли скорости света. Формирование джетов связано, вероятно, с газодинамикой ветра диска, скорость которого увеличивается к оси вращения [76]. А движение коронального газа к этой оси в силу сохранения углового момента вызывает значительное ускорение его вращения. Вероятно, аналогичные явления происходят при образовании торнадо в земной атмосфере.

Следует отметить, что на протяжении большей части времени формирования молодых звезд и СМЧД аккретор остается погруженным в оптически толстую газопылевую оболочку и доступен наблюдателю только в инфракрасном диапазоне спектра [104].

Подводя итоги выполненного исследования структуры и эволюции газовых дисков, можно прийти к выводу, что реккурентная активность процесса аккреции газа астрономическими объектами является общим явлением, и простая эволюционная схема этой активности приложима ко всем из них. Причиной повышения вязкости диска и ее порогового характера может быть конвекция, возникающая в зонах повышения коэффициента непрозрачности, либо магнитная вязкость диска.

А.В. Тутуков благодарен Я. Павлюченкову, Г. Бисноватому-Когану, Е. Курбатову, А. Черепащуку, Н. Шакуре за продуктивное обсуждение затронутых в настоящей статье проблем.

Список литературы

- 1. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, Astron. and Astrophys., 24, 337, 1973.
- 2. A. V. Tutukov and Y. N. Pavlyuchenkov, Astronomy Reports, 48, 800, 2004.
- 3. R. G. Martin, C. J. Nixon, J. E. Pringle, and M. Livio, New Astron., 70, 7, 2019.
- 4. G. Bisnovatyi-Kogan, in Frontier Research in Astrophysics III. 28 May 2 June 2018. Mondello (Palermo, 61 (2019).
- 5. S. A. Balbus and J. F. Hawley, Astrophys. J., 573, 749, 2002.
- 6. H. Klahr, in F. Kupka, I. Roxburgh, and K. L. Chan, eds., Convection in Astrophysics, 239, 405 (2007).
- 7. K. L. Malanchev, K. A. Postnov, and N. I. Shakura, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 464, 410, 2017.
- 8. N. Shakura and K. Postnov, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 451, 3995, 2015.
- 9. C. Firmani and A. V. Tutukov, Astron. and Astrophys., 288, 713, 1994.
- 10. A. G. Masevich and A. V. Tutukov, Evolutia zvezd : teoria i nabliudeniia (1988).
- 11. A. V. Tutukov, Soviet Astron., **31**, 663, 1987.
- 12. M. Marov, The Formation and Evolution of the Solar System, 2 (2018).
- 13. S. M. Silverberg, M. J. Kuchner, J. P. Wisniewski, A. S. Bans, et al., Astrophys. J., 868, 43, 2018.
- 14. M. Kuffmeier, S. Frimann, S. S. Jensen, and T. Haugbølle, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 475, 2642, 2018.
- 15. N. van der Marel, R. Dong, J. di Francesco, J. P. Williams, and J. Tobin, Astrophys. J., 872, 112, 2019.
- 16. L. A. Hillenbrand, C. Contreras Peña, S. Morrell, T. Naylor, et al., Astrophys. J., 869, 146, 2018.
- 17. K. R. Bell, D. N. C. Lin, L. W. Hartmann, and S. J. Kenyon, Astrophys. J., 444, 376, 1995.
- 18. K. Milliner, J. H. Matthews, K. S. Long, and L. Hartmann, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 483, 1663, 2019.
- 19. H. M. Günther, C. Espaillat, K. France, Z.-Y. Li, et al., BAAS, 51, 401, 2019.
- 20. J. E. Pringle, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 19, 137, 1981.
- 21. A. Swan, J. Farihi, and T. G. Wilson, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 484, L109, 2019.
- 22. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, Astronomy Reports, 56, 305, 2012.
- 23. C.-H. Hsieh, S.-P. Lai, P.-I. Cheong, C.-L. Ko, Z.-Y. Li, and N. M. Murillo, Astrophys. J., 894, 23, 2020.
- 24. A. V. Tutukov, Soviet Astron., 31, 663, 1987.
- 25. T. Rivinius, A. C. Carciofi, and C. Martayan, Astron. and Astrophys. Rev., 21, 69, 2013.
- J. Varga, T. Gerják, P. Ábrahám, L. Chen, K. Gabányi, and Á. Kóspál, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 485, 3112, 2019.
- 27. L. R. Rímulo, A. C. Carciofi, R. G. Vieira, T. Rivinius, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 476, 3555, 2018.
- 28. M. Honda, K. Okada, T. Miyata, G. D. Mulders, et al., Publ. Astron. Soc. Japan, 70, 44, 2018.
- 29. M. R. Ghoreyshi, A. C. Carciofi, L. R. Rímulo, R. G. Vieira, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 479, 2214, 2018.
- 30. W. Van Rensbergen and J. P. De Greve, Astron. and Astrophys., 592, A151, 2016.
- D. L. Coppejans, E. G. Körding, C. Knigge, M. L. Pretorius, P. A. Woudt, P. J. Groot, C. L. Van Eck, and A. J. Drake, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 456, 4441, 2016.
- 32. J. Iben, I. and A. V. Tutukov, Astrophys. J., 284, 719, 1984.
- 33. G. Dubus, M. Otulakowska-Hypka, and J.-P. Lasota, Astron. and Astrophys., 617, A26, 2018.
- 34. M. Otulakowska-Hypka, A. Olech, and J. Patterson, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 460, 2526, 2016.
- 35. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, Astronomy Reports, 50, 785, 2006.
- K. Paterson, P. A. Woudt, B. Warner, H. Breytenbach, C. K. Gilligan, M. Motsoaledi, J. R. Thorstensen, and H. L. Worters, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 486, 2422, 2019.
- 37. M. Coriat, R. P. Fender, and G. Dubus, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 424, 1991, 2012.
- 38. A. Archer, W. Benbow, R. Bird, E. Bourbeau, et al., Astrophys. J., 831, 113, 2016.
- 39. T. Bassi, J. Malzac, M. Del Santo, E. Jourdain, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 494, 571, 2020.
- 40. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, Astronomy Reports, 46, 765, 2002.
- 41. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, Astronomy Reports, 47, 600, 2003.
- 42. A. V. Tutukov and L. R. Yungel'Son, Astrophysics, 12, 342, 1976.
- 43. J. Iben, Icko and A. V. Tutukov, Astrophys. J. Supp., 105, 145, 1996.
- 44. R. M. Lau, M. Heida, D. J. Walton, M. M. Kasliwal, et al., Astrophys. J., 878, 71, 2019.
- 45. U. Munari and D. P. K. Banerjee, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 475, 508, 2018.
- 46. D. A. Bollimpalli, J. M. Hameury, and J. P. Lasota, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 481, 5422, 2018.
- 47. S. Karino, K. Nakamura, and A. Taani, Publ. Astron. Soc. Japan, 71, 58, 2019.
- K. Iłkiewicz, J. Mikołajewska, B. Miszalski, M. Gromadzki, B. Monard, and P. Amigo, Astron. and Astrophys., 624, A133, 2019.
- 49. P. M. Ogle, L. Lanz, P. N. Appleton, G. Helou, and J. Mazzarella, Astrophys. J. Supp., 243, 14, 2019.
- 50. C. L. Steinhardt and M. Elvis, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 402, 2637, 2010.
- 51. A. Lupi, M. Volonteri, R. Decarli, S. Bovino, J. Silk, and J. Bergeron, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 488, 4004, 2019.
- 52. J. J. Ruan, S. F. Anderson, M. Eracleous, P. J. Green, D. Haggard, C. L. MacLeod, J. C. Runnoe, and M. A. Sobolewska, Astrophys. J., 883, 76, 2019.
- 53. J. Huang, B. Luo, P. Du, C. Hu, J.-M. Wang, and Y.-J. Li, Astrophys. J., 895, 114, 2020.
- 54. M. Nenkova, M. M. Sirocky, R. Nikutta, Z. Ivezić, and M. Elitzur, Astrophys. J., 685, 160, 2008.
- 55. M. Sun, Y. Xue, J. Wang, Z. Cai, and H. Guo, Astrophys. J., 866, 74, 2018.
- 56. B. Trakhtenbrot, I. Arcavi, C. Ricci, S. Tacchella, et al., Nature Astronomy, 3, 242, 2019.
- 57. E. S. Shablovinskaya and V. L. Afanasiev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 482, 4322, 2019.

- 58. C.-Y. Hu, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 483, 3363, 2019.
- 59. H. H. Loose, E. Kruegel, and A. Tutukov, Astron. and Astrophys., 105, 342, 1982.
- 60. D. Zhao, L. C. Ho, Y. Zhao, J. Shangguan, and M. Kim, Astrophys. J., 877, 52, 2019.
- 61. J. C. do Nascimento, T. Storchi-Bergmann, N. D. Mallmann, R. Riffel, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 486, 5075, 2019.
- 62. K. Inayoshi, K. Ichikawa, J. P. Ostriker, and R. Kuiper, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 486, 5377, 2019.
- 63. D. Baron and H. Netzer, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 486, 4290, 2019.
- 64. P. Rani, C. S. Stalin, and K. D. Goswami, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 484, 5113, 2019.
- 65. Z. He, T. Wang, G. Liu, H. Wang, et al., Nature Astronomy, 3, 265, 2019.
- 66. S. V. Bogovalov, arXiv e-prints, arXiv:1805.03610, 2018.
- 67. M. A. Marshall, M. Mechtley, R. A. Windhorst, S. H. Cohen, et al., Astrophys. J., 900, 21, 2020.
- 68. D. J. Rosario, A. Togi, L. Burtscher, R. I. Davies, T. T. Shimizu, and D. Lutz, Astrophys. J. Lett., 875, L8, 2019.
- 69. M. Takami, T.-S. Chen, H. B. Liu, N. Hirano, et al., Astrophys. J., 884, 146, 2019.
- 70. A. V. Tutukov, Astronomy Reports, **63**, 79, 2019.
- 71. D. L. Meier, New Astron. Rev., 47, 667, 2003.
- 72. Y. N. Pavlyuchenkov, A. V. Tutukov, L. A. Maksimova, and E. I. Vorobyov, Astronomy Reports, 64, 1, 2020.
- 73. D. Fielding, E. Quataert, and D. Martizzi, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 481, 3325, 2018.
- R. van Boekel, A. Juhász, T. Henning, R. Köhler, T. Ratzka, T. Herbst, J. Bouwman, and W. Kley, Astron. and Astrophys., 517, A16, 2010.
- 75. C. M. Fromm, Z. Younsi, A. Baczko, Y. Mizuno, et al., Astron. and Astrophys., 629, A4, 2019.
- 76. E. Arshilava, M. Gogilashvili, V. Loladze, I. Jokhadze, B. Modrekiladze, N. L. Shatashvili, and A. G. Tevzadze, *Journal of High Energy Astrophysics*, 23, 6, 2019.
- 77. K.-S. Jhan and C.-F. Lee, Astrophys. J., 816, 32, 2016.
- 78. L.-Y. Wang, H. Shang, and T.-Y. Chiang, Astrophys. J., 874, 31, 2019.
- 79. Y. Frémat, J. Zorec, A. M. Hubert, and M. Floquet, Astron. and Astrophys., 440, 305, 2005.
- 80. Z. Vanderbosch, J. J. Hermes, E. Dennihy, B. H. Dunlap, et al., Astrophys. J., 897, 171, 2020.
- 81. I. Gallagher, J. S., D. A. Hunter, and A. V. Tutukov, Astrophys. J., 284, 544, 1984.
- 82. A. V. Tutukov and E. Kruegel, Astron. and Astrophys., 299, 25, 1995.
- 83. D. Valencia-Enríquez, I. Puerari, and I. Rodrigues, Astron. J., 157, 175, 2019.
- 84. T. Naab and J. P. Ostriker, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 55, 59, 2017.
- 85. L. P. Grimmett, J. R. Mullaney, S. Jin, E. Bernhard, E. Daddi, and K. Walters, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 487, 4071, 2019.
- 86. E. Telles and J. Melnick, Astron. and Astrophys., 615, A55, 2018.
- 87. A. M. Medling, L. Cortese, S. M. Croom, A. W. Green, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 475, 5194, 2018.
- 88. Q. Liu, E. Wang, Z. Lin, Y. Gao, H. Liu, B. Berhane Teklu, and X. Kong, Astrophys. J., 857, 17, 2018.
- 89. A. Pillepich, D. Nelson, V. Springel, R. Pakmor, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 490, 3196, 2019.
- 90. G. L. Walth, E. Egami, B. Clément, T. D. Rawle, et al., Astrophys. J., 877, 7, 2019.
- 91. N. Menci, F. Fiore, C. Feruglio, A. Lamastra, F. Shankar, E. Piconcelli, E. Giallongo, and A. Grazian, Astrophys. J., 877, 74, 2019.
- 92. Y.-F. Jiang and O. Blaes, Astrophys. J., 900, 25, 2020.
- 93. H. Cheng, W. Yuan, H.-Y. Liu, A. A. Breeveld, C. Jin, and B. Liu, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 487, 3884, 2019.
- 94. A. N. Cox, J. N. Stewart, and D. D. Lilers, Astrophys. J. Supp., 11, 1, 1965.
- 95. T. Liu, C.-Y. Song, T. Yi, W.-M. Gu, and X.-F. Wang, Journal of High Energy Astrophysics, 22, 5, 2019.
- 96. A. Skumanich, Astrophys. J., 171, 565, 1972.
- 97. K. Ichikawa, T. Kawamuro, M. Shidatsu, C. Ricci, et al., Astrophys. J. Lett., 883, L13, 2019.
- 98. T. Waters and D. Proga, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 481, 2628, 2018.
- A. Tritsis, G. V. Panopoulou, T. C. Mouschovias, K. Tassis, and V. Pavlidou, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 451, 4384, 2015.
- 100. V. Agra-Amboage, C. Dougados, S. Cabrit, and J. Reunanen, Astron. and Astrophys., 532, A59, 2011.
- 101. L. E. H. Godfrey, J. E. J. Lovell, S. Burke-Spolaor, R. Ekers, et al., Astrophys. J. Lett., 758, L27, 2012.
- 102. M. B. Shende, P. Subramanian, and N. Sachdeva, Astrophys. J., 877, 130, 2019.
- 103. R. W. Pfeifle, S. Satyapal, N. J. Secrest, M. Gliozzi, et al., Astrophys. J., 875, 117, 2019.
- 104. N. A. Tomov, M. T. Tomova, and D. V. Bisikalo, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 389, 829, 2008.

Спектральные наблюдения хромосферно-активной звезды FK Com

Саванов И.С.¹, Сачков М.Е.¹, Пузин В.Б.¹, Дзян С.^{2,3}, Ванг Х.^{2,3}, Шугаров А.С.¹, Дмитриенко Е.С.⁴, Ванг Дз.²

 $^1 {\it И}$ нститут астрономии РАН, Москва, Россия

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

⁴ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

Представлены результаты новых спектральных наблюдений хромосферно-активной звезды FK Com в 2021 и 2022 г. в Симеизской обсерватории и в обсерватории Синлонг (Xinglong, NAOC, Китай). Рассмотрена эволюция профилей линии H_{α} в спектре FK Com. Новые наблюдения показали, что зарегистрированные нами изменения формы профилей линии H_{α} аналогичны опубликованным ранее в литературе. По нашим спектрограммам, полученным для фаз вращения звезды близким к 0.7 с интервалом около года (в 2021 и 2022 г.) и полученным на обсерваториях КРNO (в 2000 г.) и NOT в 1998, 1999, 2001, 2003, 2004 г. для этой же фазы, установлены различия в профилях линии H_{α} . Вероятно, изменения профилей линии H_{α} в большей степени зависят от уровня активности звезды, чем от фазы вращения.

Поступила в редакцию 21.10.2022 г. Принята в печать 01.12.2022 г.

Ключевые слова: звезды: магнитное поле, звезды: атмосферы, звезды: хромосферы, звезды: FK Com, звезды: активность

Spectral observations of the chromospherically active star FK Com

Savanov I.S.¹, Sachkov M.E.¹, Puzin V.B.¹, Jiang X.^{2,3}, Wang H.^{2,3}, Shugarov A.S.¹, Dmitrienko E.S.⁴, Wang J.²

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

⁴Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

We present the results of new spectral observations of the chromospherically active star FK Com in 2021 and 2022 at the Simeiz Observatory and the Xinglong Observatory (NAOC, China). The evolution of the profiles of the H_{α} line in the spectrum of FK Com is considered. New observations indicate that the changes in the shape of the profiles of the H_{α} line registered by us are similar to those previously published in the literature. According to our spectra obtained for the phases of rotation of the star close to 0.7 with an interval of about a year (in 2021 and 2022) and obtained at the KPNO (2000) and NOT observatories in 1998, 1999, 2001, 2003, 2004 for the same phase, differences in the profiles of the H_{α} line are established. Probably, the changes in the profiles of the H_{α} line depend more on the level of activity of the star than on the phase of rotation.

Received 21.10.2022. Accepted 01.12.2022.

Keywords: stars: magnetic field, stars: atmospheres, stars: chromospheres, stars: FK Com, stars: activity

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.4.006

1. Введение

Хромосферно-активная звезда FK Com является прототипом переменных звезд типа FK Com, представляющих малочисленный класс одиночных быстровращающихся гигантов позднего спектральных классов G-K. С уверенностью к звездам типа FK Com отнесены три звезды: FK Com, V1794 Cyg (HD 199178) и ET Dra (BD+70959). Другие звезды, ранее причисленные к данной группе, являются двойными и исключены из нее. Несмотря на большой интерес к уточнению эволюционного статуса звезд типа FK Com (см., например, обсуждение в [1]) и установлению их возможной связи с переменными типа W UMa, за последние десятилетия достоверно не были выявлены другие звезды этого типа. В серии наших работ (см. более подробно в [2]) по фотометрическим наблюдениям телескопа Кеплер были установлены кандидаты в звезды типа FK Com, которые требуют уточнения статуса двойственности и принадлежности к звездам типа FK Com.

Одиночная звезда FK Com спектрального класса G5III-G4III обладает сильной хромосферной активностью [3, 4]. Величина проекции скорости вращения на луч зрения $V \sin i = 159 - 162$ км/с уникальна для одиночных звезд гигантов. Звезда FK Com обладает заметным дифференциальным вращением. Величина параметра дифференциального вращения установлена на уровне $\Delta\Omega = 0.08$ рад/сут. Фотосфера звезды покрыта общирными холодными пятнами (областями) площадью до 30%. Большая часть исследований звезды FK Com основана на фотометрических наблюдениях. По таким исследованиям была выявлена переменность положения долготы активной области (примерно на 180°), в дальнейшем получившая название «flip-flop» [5]. В ряде работ были найдены циклы активности FK Com продолжительностью от нескольких лет до

³Университет Китайской академии наук, Пекин, Китай

N⁰	Спектрограф	Дата наблюдений	HJD 2450000 $+$	Экспозиция	S/N	Фаза
60001	Baches	2021.06.12	9378.15	600	21	0.661
60002	Baches	2021.06.12	9378.16597	600	35	0.668
30001	Baches	2021.06.12	9378.19236	300	14	0.679
01	Baches	2021.06.12	9378.20139	300	15	0.683
02	Baches	2021.06.12	9378.20486	300	13	0.684
04	Baches	2021.06.12	9378.21667	300	15	0.689
05	Baches	2021.06.12	9378.22014	300	14	0.691
06	Baches	2021.06.12	9378.22361	300	15	0.692
07	Baches	2021.06.12	9378.22708	300	13	0.693
08	Baches	2021.06.12	9378.23056	300	14	0.695
10	Baches	2021.06.12	9378.23889	300	14	0.698
01 sp 1800	Baches	2021.06.20	9386.13542	1800	42	0.988
02 sp 1800	Baches	2021.06.20	9386.15625	1800	54	0.997
03 sp 1800	Baches	2021.06.20	9386.17778	1800	39	0.006
04 sp 1800	Baches	2021.06.20	9386.19861	1800	43	0.015
05 sp 1800	Baches	2021.06.20	9386.21944	1800	42	0.023
06 sp 1800	Baches	2021.06.20	9386.24028	1800	51	0.032
0041	HRS	2022.06.24	9754.98472	1800	52	0.66
0042	HRS	2022.06.24	9755.00695	1800	76	0.669
0043	HRS	2022.06.24	9755.02778	1800	70	0.678
0044	HRS	2022.06.24	9755.04931	1800	59	0.687
0045	HRS	2022.06.24	9755.07014	1800	61	0.695

Таблица 1: Журнал спектральных наблюдений FK Com.

десятилетия, но однозначной величины цикла активности установлено не было [6, 7, 8]. Спектр звезды обладает эмиссионными линиями H и K CaII, водородными линиями бальмеровской серии, показывающими значительную переменность.

Наконец, в седьмой статье из серии публикаций авторы [9] рассмотрели спектральные наблюдения FK Com и проанализировали данные для линии H_{α} , охватывающие более десяти лет. Результаты изучения хромосферной активности, полученные в большинстве эпох по данным H_{α} , были сопоставлены с доплеровскими картами фотосферных пятен. По данным спектрополяриметрии установлено наличие магнитного поля, которое изменялось в период наблюдений от –100 Гс до почти 300 Гс [10, 11].

В нашей работе мы приводим новые результаты спектральных наблюдений звезды FK Com, проведенных в июне 2021 г. и июне 2022 г. в Симеизской обсерватории и в обсерватории Синлонг (Xinglong, NAOC, Китай) в 2022 г.

2. Наблюдения

Наше исследование основано на двух сетах спектральных наблюдений. Первый сет получен в Симеизской обсерватории на 1-м телескопе Zeiss-1000 со спектрографом Baader Baches. Baches — компактный подвесной эшельный спектрограф среднего разрешения $R \approx 20000$ со спектральным диапазоном от 392 нм до 800 нм, предназначенный для использования совместно с телескопами апертурой менее 0.5 м и фокальным отношением f/10. Телескоп Zeiss-1000 выполнен по схеме Ричи-Кретьена с фокальным отношением f/13.3. Для более полного заполнения апертуры коллиматора спектрографа мы оснастили его апохроматическим редуктором фокуса. Спектрограф был адаптирован для работы на телескопе Zeiss-1000 — оснащен отдельным фланцем с защитным каркасом, а также модулем активной оптики Starlight AO-L с камерой подсмотра ASI178M, позволяющим эффективно удерживать звезду на щели в автоматическом режиме. В качестве приемника излучения применена охлаждаемая до -20° С КМОП-камера ZWO ASI1600MM. В наблюдениях использована щель 25×130 мкм, обеспечивающая наибольшее спектральное разрешение. При этом ширина щели соответствовала 0.5'', что при медианном качестве изображения FWHM 2'' и более приводило к потерям света на щели. Спектрограф имеет отдельный управляемый модуль калибровки с оптоволоконным вводом в спектрограф, спектральные источники — лампа с полым катодом Th-Ar и галогенная лампа накаливания.

Второй сет наблюдений получен в июне 2022 г. на 2.16-м телескопе обсерватории Синлонг (Xinglong) с использованием оптоволоконного спектрографа высокого разрешения High Resolution Fiber-fed Spectrograph (HRS) [12]. Спектрограф HRS — оптоволоконный эшелле спектрограф высокого разрешения (R = 49800с фиксированной щелью 0.19 мм), оснащенный системой калибровки по длинам волн Astro Comb с частотой 25 ГГц, изготовленной компанией Menlo Systems. Спектральный диапазон HRS составляет 365–1000 нм. Основные научные задачи — изучение экзопланет, анализ химического состава звезд, активность звезд,



Рис. 1: Нормированные профили линии H_α, полученные в Симеизской обсерватории 12 июня 2021 г. Серыми тонкими линиями нанесены единичные спектры, черной жирной линией наложен усредненный спектр. Сверху обозначена шкала длин волн, снизу — шкала скоростей относительно длины волны 6562.8 Å.



Рис. 2: Нормированные профили линии H_α, полученные в Симеизской обсерватории 20 июня 2021 г. Обозначения, как и на рис. 1.

астросейсмология и т. д. Регистрация спектров производится на ПЗС-камеру с чипом обратной засветки E2V 203-82 с улучшенной чувствительностью в синей области, формат 4096×4096 пикселей, размер пиксела составляет 12 микрон.

Результаты наблюдений двух сетов представлены в табл. 1. В первом сете наблюдений 12.06.2021 г. получено 2 спектра с экспозицией 600 с, 9 спектров с экспозицией 300 с и 20.06.2021 г. — 6 спектров с накоплением 1800 с. Во втором сете наблюдении 24.06.2022 г. зарегистрировано 5 спектров с экспозицией 1800 с.

3. Обработка

Редукция полученных кадров производилась в программном пакете DECH (Dech95, Dech20T). Все наблюдения были обработаны по стандартной методике, которая подразумевает учет «фотометрических» калибровок (bias, dark, flat), экстракцию одномерных спектров, привязку спектра к длинам волн и нормировку



Рис. 3: Нормированные профили линии H_{α} , полученные в обсерватории Синлонг 24 июня 2022 г. Обозначения, как и на рис. 1.

одномерных спектров. Привязка спектров к шкале длин волн для обоих сетов наблюдений производилась по спектрам лампы ThAr.

В результате обработки были получены данные об эмиссионных профилях линии H_{α} (рис. 1–3). На этих рисунках серыми тонкими линиями показаны единичные спектры, зарегистрированные 12.06.2021, 20.06.2021 и 24.06.2022, соответственно. Черной линией обозначен усредненный по полученным за ночь наблюдениям спектр. Отношение сигнала к шуму усредненных спектров в районе линии H_{α} равно S/N = 47 для 12 июня 2021 г., S/N = 90 - 20 июня 2021 г. и S/N = 150 - 24 июня 2022 г. Средняя фаза вращения звезды для наблюдений, полученных в Симеизской обсерватории, составляет 0.68 и 0.01 для 12 и 20 июля, соответственно, и 0.68 для среднего спектра по наблюдениям проведенным в обсерватории Синлонг. Фазы рассчитаны по эфемериде HJD = $(2 \ 439 \ 252.895 \pm 0.01) + (2.4002466 \pm 0.0000056) \cdot E$ [4]. Более подробные данные о каждом единичном спектре представлены в табл. 1.

4. Обсуждение результатов

На рис. 4 представлены профили линии H_{α} , полученные в Симеизской обсерватории и в обсерватории Синлонг. Профили имеют сложную двугорбую структуру с провалом в центре, обусловленным, вероятно, наличием околозвездного диска. Изменение двугорбой структуры профиля H_{α} может свидетельствовать о неоднородности и нестационарности околозвездного диска. В общем виде сложная структура эмиссии H_{α} является одним из разнообразных проявлений магнитной активности звезды, в том числе пятен, протуберанцев, факелов. Вспышки на разных участках поверхности звезды могут приводить к неравномерному прогреву диска. В исследованиях [9] была изучена фазовая согласованность увеличения и уменьшения эмиссии H_{α} с изменениями фотосферной активности (холодных пятен). По данным исследований связи между хромосферной и фотосферной активностью звезды FK Com на основании анализа спектров низкого разрешения авторами [9] было показано, что изменения в хромосфере могут происходить на временном масштабе в несколько часов и менее. Было установлено существование протуберанцев на высоте порядка одного радиуса звезды, которые остаются стабильными на протяжении до нескольких недель и могут влиять на нестабильность в околозвездном диске. Наши новые наблюдения показали, что зарегистрированные нами изменения формы профилей линии H_{α} аналогичны опубликованным ранее (см. в [9]). Среди них можно найти подобные как по форме, так и по интенсивности.

Как указывалось выше, в ходе наших наблюдений в Симеизской обсерватории и обсерватории Синлонг, часть спектрограмм были получены для интервалов времени, соответствующих фазам вращения звезды близким к 0.7. Согласно данным, приведенным на рис. 4, хорошо видны различия в профилях линии H_{α} , полученных в 2021 и 2022 г. Особенно они заметны в красном компоненте линии и в величине провала в центре линии. На рис. 4 также представлены (серыми линиями) профили из статьи [9], полученные на обсерватории КРNO (2000 г.) и NOT (1998, 1999, 2001, 2003, 2004 г.) для фазы 0.7. В совокупности, все эти данные находятся в согласии со сделанными в [9] заключениями о том, что изменения профилей линии H_{α} в большей степени зависят от уровня активности звезды, чем от фазы вращения.



Рис. 4: Профили линии H_{α} для фазы, примерно равной 0.7. Толстой черной линией обозначен профиль, полученный в Симеизской обсерватории, тонкой черной линией — полученный в обсерватории Синлонг, серыми линиям нанесены профили из статьи [9], полученные на обсерватории КРNO (2000 г.) и NOT (1998, 1999, 2001, 2003, 2004 г.).

К сожалению, объем нашего наблюдательного материала, полученного в 2021 и 2022 г., не позволяет сделать выводы об изменениях в хромосфере на временном масштабе в несколько часов.

Выражаем благодарность сотрудникам 2.16-метрового телескопа обсерватории Xinglong.

Работа была частично была выполнена за счет средств Open Project Program of the CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ и ГФЕН в рамках проекта №21-52-53022, NSFC-RFBR-12111530005.

Список литературы

- 1. A. D. Costa, B. L. Canto Martins, J. P. Bravo, F. Paz-Chinchón, et al., Astrophys. J. Lett., 807, L21, 2015.
- 2. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, Astrophysical Bulletin, 77, 150, 2022.
- H. Korhonen, S. V. Berdyugina, T. Hackman, R. Duemmler, I. V. Ilyin, and I. Tuominen, Astron. and Astrophys., 346, 101, 1999.
- H. Korhonen, S. V. Berdyugina, T. Hackman, I. V. Ilyin, K. G. Strassmeier, and I. Tuominen, Astron. and Astrophys., 476, 881, 2007.
- 5. L. Jetsu, J. Pelt, and I. Tuominen, Astron. and Astrophys., 278, 449, 1993.
- 6. T. Hackman, J. Pelt, M. J. Mantere, L. Jetsu, et al., Astron. and Astrophys., 553, A40, 2013.
- 7. Z. Kolláth and K. Oláh, Astron. and Astrophys., 501, 695, 2009.
- 8. K. Oláh, H. Korhonen, Z. Kővári, E. Forgács-Dajka, and K. G. Strassmeier, Astron. and Astrophys., 452, 303, 2006.
- 9. K. Vida, H. Korhonen, I. V. Ilyin, K. Oláh, M. I. Andersen, and T. Hackman, Astron. and Astrophys., 580, A64, 2015.
- H. Korhonen, S. Hubrig, S. V. Berdyugina, T. Granzer, T. Hackman, M. Schöller, K. G. Strassmeier, and M. Weber, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 395, 282, 2009.
- 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.
- Z. Fan, H. Wang, X. Jiang, H. Wu, et al., Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 128, 115005, 2016, URL https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/969/115005.

Содержание

<i>Емельяненко В.В., Карташова А.П.</i> Эволюция орбиты околоземного астероида 159402 (1999 AP10)	229
Кузин С.П. Станции колокации в космической геодезии и требования к ним	233
Кузин С.П. Первые результаты обработки DORIS измерений формата RINEX в центре анализа	
ИНАСАН	237
Терентьева А.К., Барабанов С.И. Метеорит Кгіžеvci (Хорватия) и метеороидный рой Канкрид	241
Тутуков А.В., Федорова А.В. Реккурентная активность аккрецирующих астрономических объектов	244
Саванов И.С. и др. Спектральные наблюдения хромосферно-активной звезды FK Com	255

Contents

Emel'yanenko V.V., Kartashova A.P. The orbital evolution of near-Earth asteroid 159402 (1999 AP10)	229
Kuzin S.P. Collocation stations in space geodesy and their requirements	233
Kuzin S.P. The first results of DORIS RINEX data processing at the INASAN Analysis Center	237
Terentjeva A.K., Barabanov S.I. Meteorite Križevci (Croatia) and meteoroid stream Cancrid	241
Tutukov A.V., Fedorova A.V. Recurrent activity of accreting astronomical objects	244
Savanov I.S. et al. Spectral observations of the chromospherically active star FK Com	255