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.



ISSN 2658-5669



НАУЧНЫЕ ТРУДЫ INASAN института РАН БСІЕЛСЕ ВСІЕЛСЕ КЕРОВТЗ







МОСКВА 2020 УЛК 52 ББК 22.6 H34

НЗ4 Научные труды Института астрономии РАН. Том 5(4). -

М.: Изд-во Янус-К, 2020, 56 с., илл.

ISSN 2658-5669

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, 2020 © Коллектив авторов, 2020

INASAN Science Reports. Vol 5(4). M.: Janus-K, 2020, 56 pp.

ISSN 2658-5669

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, 2020 © Author team, 2020

Сдано в набор 01.09.2020. Подписано в печать 14.09.2020 Формат 60х90/16. Бумага офсетная Уч.-изд. п.л. 7,0. Физ. п.л. 7,0. Тираж 100. Заказ №7534

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 5 (4)

Научное издание



Современные проблемы астрономии: звездообразование и скопления

Самусь Н.Н.^{1,2}, Малков О.Ю.¹, Поляченко Е.В.¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. Штернберга, Москва, Россия

Авторы представляют серию аналитических обзоров современного состояния проблем звездной астрономии. Данная статья посвящена анализу вопросов, связанных с исследованием звездных скоплений и звездообразования. Обзор преимущественно базируется на докладах, сделанных на конференции «Современная звездная астрономия» (САО РАН, октябрь 2019 г.).

Modern problems of astronomy: stellar clusters and star formation

Samus N.N.^{1,2}, Malkov O.Yu.¹, Polyachenko E.V.¹

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

We provide a series of analytic reviews of problems of the modern stellar astronomy. The key topic of this paper is study of stellar clusters and star formation. It is mostly based on talks presented at the tenth annual conference on Modern Stellar Astronomy, held in Special Astrophysical Observatory of the RAS in Oct 2019.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.001

1. Введение

В данной работе представлен аналитический обзор современных задач, стоящих перед звездной астрономией. Он создан, преимущественно, по материалам докладов, представленных на десятой конференции из цикла «Современная звездная астрономия». Она была проведена 7–11 октября 2019 г. в САО РАН. Помимо САО РАН, организаторами конференции выступили ГАИШ МГУ, ИНАСАН и Астрономическое общество.

Сайт конференции: https://www.sao.ru/hq/lsfvo/MSA2019/index.html.

Обзор разбит на следующие разделы: «Звездные скопления и ассоциации», «Звездообразование», «Экзопланеты», «Инструменты». В последнем разделе приведены заключительные замечания.

2. Звездные скопления и ассоциации

Доклады этого раздела характеризовались широтой тематики и разнообразием подходов.

Е.О. Васильев и Ю.А. Щекинов (ЮФУ, АКЦ ФИАН) в рамках трехмерной численной модели рассмотрели динамику сверхоблочек, образованных вспышками небольшого количество (до 20) сверхновых в звездных скоплениях малой массы. Характеристики сверхоболочек могут служить для выявления звездных скоплений малой массы в галактическом диске.

А.Ф. Селезнев, В.В. Никифорова, М.В. Кулеш, В.М. Данилов (УрФУ) и Дж. Карраро (Университет Падуи, Италия) обратились к данным Gaia DR2, позволяющим детально изучать динамическое состояние рассеянных звездных скоплений, а также исследовать их протяженные внешние области. В докладе были представлены первые результаты, относящиеся к скоплениям Плеяды, α Персея, Ruprecht 147 [1].

Е.С. Постникова, Н.В. Чупина и С.В. Верещагин (ИНАСАН) использовали данные Gaia DR2 для оценки влияния приливных сил и дифференциального вращения Галактики на пространственную форму Плеяд.

А.А. Диканева ($K(\Pi)\Phi Y$) и С.Н. Фабрика (САО РАН) рассмотрели метод определения межзвездного поглощения для скоплений по спектральным распределениям энергии отдельных звезд, построенным по фотометрическим данным. Наблюдаемые распределения сравнивались с теоретическими, основанными на моделях атмосфер, при различной величине модельного межзвездного поглощения. Проведено сравнение результатов с данными других авторов.

А.Т. Байкова, В.И. Корчагин, Н.О. Буданова и В.В. Бобылев (ГАО РАН и ЮФУ) воспользовались опубликованными параметрами 147 шаровых скоплений и на основе параметров орбит разделили их на галактические подсистемы балджа, толстого диска и гало [2].

С.Н. Нуритдинов и И.У. Таджибаев (Национальный университет Таджикистана) обратились к нерешенной с 1920-х гг. проблеме отсутствия корреляции классов концентрации шаровых скоплений Шепли-Сойер с какими-либо физическими характеристиками скоплений. Они воспользовались современными данными наземных и космических наблюдений, провели моделирование функции видимой плотности распределения звезд и определили значение параметра, характеризующего степень концентрации звезд к центру, для 26 шаровых скоплений Галактики. Новый параметр концентрации коррелирует с большинством других параметров скоплений.

Г.С. Усков, С.Н. Фабрика, А.Ф. Валеев и А.С. Винокуров (ИКИ РАН, САО РАН) по данным космического телескопа Chandra в молодых звездных скоплениях галактики NGC 3256 выделили 22 кандидата в ультраяркие рентгеновские источники (ULX), оценили жесткость и спектр ярких объектов, изучили их долгопериодическую переменность. Возрасты скоплений, ассоциирующихся с кандидатами в ULX, оказались меньше 10 млн. лет.

М.Е. Шарина, В.В. Шиманский, М.И. Маричева и А.Н. Хайрутдинова (САО РАН и К(П)ФУ) по данным об интегральном спектре определили химический состав девяти старых низкометалличных внегалактических шаровых скоплений, в основном находящихся в карликовых галактиках, в сравнении с массивными шаровыми скоплениями Галактики. Рассчитывались синтетические спектры, основанные на моделях атмосфер, функцией масс звазд, физическими характеристиками скоплений. Метод позволяет оценивать возраст скоплений, содержание гелия в атмосферах звезд. Результаты имеют большое значение для понимания феномена множественных звездных популяций [3].

Доклад И.А. Ачаровой и М.Е. Шариной (ЮФУ, САО РАН) изучали нуклеосинтез в шаровых скоплениях, основываясь на химическом составе окологалактических облаков — остатков тех облаков, где формировались шаровые скопления. Авторы подчеркивают важность подобных исследований для понимания природы механизма взрывов сверхновых Іа от короткоживущих предшественников.

3. Звездообразование

Очень много докладов было представлено по тематике звездообразования. Выполнялись как теоретические и исследования, так и наблюдательные (оптические и радиоастрономические) работы, посвященные областям звездообразования в нашей Галактике и во внегалактических системах.

С.О. Фомин и А.Е. Дудоров (ЧГУ) исследовали магнитную ионизационно-тепловую неустойчивость в аккреционных дисках молодых звезд с учетом нестационарной ионизации, модельных функций охлаждения и нагрева, магнитного поля и вращения. Изучена раскачка неустойчивых магнитно-звуковых волн.

Н.С. Каргальцева, А.Е. Дудоров и С.А. Хайбрахманов (ЧГУ и УрФУ) провели численное моделирование коллапса вращающихся замагниченных протозвездных облаков с массой 10 М_☉ до момента образования центрального оптически непрозрачного ядра. Использовался двумерный магнитогазодинамический код. Найдены значения параметров, при которых образуются диски и протозвезды.

А.С. Медведев и С.Н. Фабрика (САО РАН) обратились к теоретической интерпретации значительно повышенного (по сравнению с солнечным) содержания никеля в релятивистских струях объекта SS 433 (V1343 Aql). Они предположили, что никель образуется в ядерных реакциях столкновительного типа в области формирования струй. Разработана модель и найдены условия, обеспечивающие согласие содержания никеля с наблюдениями. Слелан вывод, что сверхкритические аккреционные диски могут служить дополнительным источником нуклеосинтеза во Вселенной.

С.А. Дроздов и Ю.А. Щекинов (АКЦ ФИАН) провели моделирование инфракрасного и субмиллиметрового спектра излучения звездного скопления на ранней стадии его эволюции. Основной вклад в поток излучения дает эмиссия нагретой пыли. Проанализирован прогрев пыли в результате поглощения ультрафиолетовых квантов от молодых горячих звезд и прогрев ударными волнами оболочек сверхновых. Рассмотренные условия могут соответствовать начальным стадиям звездообразования, в условиях высокой экстинкции в плотных молекулярных облаках.

Т.А. Мовсесян, Т.Ю. Магакян и А.В. Моисеев (Бюраканская АО и САО РАН) использовали наблюдения со сканирующим интерферометром Фабри-Перо на телескопе БТА для измерения собственных движений спектрально выделенных структур в направленном потоке Хербига-Аро НН 83. В головном ударном фронте истечения выделены две структуры со значительно различающимися лучевыми скоростями, смещенные относительно друг друга и отличающиеся по морфологии. Наблюдения во вторую эпоху показали, однако, что структуры имеют одинаковые собственные движения. С этими результатами хорошо согласуются ранее выполненные теоретические расчеты, согласно которым в ударном фронте образуются две структуры, представляющие собой переднюю ударную волну и область обратного ударного возбуждения, которые могут иметь различные лучевые скорости.

Т.А. Мовсесян, Т.Ю. Магакян, С.Н. Додонов и М.Г. Геворкян (Бюраканская АО и САО РАН) на 1-м телескопе Шмидта провели наблюдения ассоциации Mon R1 в узкополосных фильтрах для выявления объектов Хербига-Аро и коллимированных потоков. Обнаружены три направленных истечения, связанных с яркими ИК-источниками, один из которых может быть причислен к классу «гигантских потоков». Найдены еще пять объектов Хербига-Аро, источники которых пока не выявлены. Результаты свидетельствуют об активном звездообразовании в области Mon R1.

М.С. Кирсанова, П.Э. Боли, А.В. Моисеев и Д.З. Вибе (ИНАСАН, МФТИ, САО РАН) провели наблюдения зоны НІІ S235 в гигантском молекулярном облаке G174+2.5, окрестности которой представляют собой область активного звездообразования. Наблюдения на 1-м телескопе САО проводились в четырех спектральных линиях с использованием перестраиваемого фильтра МаНГаЛ. Электронная плотность в S235 составляет 80–600 см⁻³, причем наиболее плотная часть зоны НІІ более глубоко погружена в газ молекулярного облака. S235 расположена на ближнем к наблюдателю крае молекулярного облака. Физические условия в S235 и ее окрестностях напоминают условия в туманности Конская Голова.

Н.С. Дмитриенко и П.Э. Боли (МФТИ), с соавторами из Института астрономии им. М. Планка в Германии, Н. Linz и I. Georgiev, представили доклад, посвященный изучению молекулярных истечений из массивного молодого звездного объекта G192.16-3.82. Спектральные и фотометричские данные были получены при помощи Большого бинокулярного телескопа LBT (США). Наблюдения проводились в ближнем ИКдиапазоне. На спектрах в линиях молекулярного водорода выделены узлы истечений, имеющие эпизодический характер. Определены собственные движения узлов. Сделан вывод об активной аккреции вещества на молодую массивную звезду.

Исследователи из УрФУ и ИПФ С.В. Салий, И.И. Зинченко и А.М. Соболев провели наблюдения шести областей звездообразования на 30-м радиотелескопе IRAM на частотах 327–334 и 342–350 ГГц. Зарегистрировано излучение примерно в 20 линиях метанола, а также в линиях ряда других молекул. Получены предварительные оценки физических параметров наблюдавшихся объектов.

Данные того же 30-м радиотелескопа IRAM И.В. Петрашкевич и А.Ф. Пунанова (УрФУ) использовали для исследования фракционирования дейтерия в плотных ядрах в области звезообразования L1688. Авторы наблюдали линии N₂H⁺(1–0) и N₂D⁺(1–0) в направлении пяти плотных ядер. Были определены лучевые концентрации молекул и построены карты отношения содержаний N₂D⁺ к N₂H⁺.

А.Ф. Пунанова и А.И. Васюнин с соавторами Р. Caselli (Институт внеземной физики Общества им. М. Планка, Германия) и А. Howard представили карты переходов (2–1) и (3–2) метанола в направлении шести дозвездных ядер в области звездообразования L1495 в Тельце и осуществили поиск корреляций между содержанием метанола и видимым поглощением. В направлении пяти ядер видны кольцевые структуры в линиях метанола, в то время как у одного, предположительно самого молодого, ядра максимум излучения метанола примерно совпадает с пиком излучения пыли. Вероятно, в этом ядре еще не сформировалась зона вымерзания CO.

О.Л. Рябухина и И.И. Зинченко (ИПФ и ИНАСАН) по наблюдениям на радиотелескопе APEX изучили молодое и относительно близкое межзвездное молекулярное облако G351.78-0.54, имеющее форму волокна, в южной части которого находится область звездообразования IRAS 17233-3606. Определена температура газа, лучевая концентрация H₂ и N₂H+, выделены сгустки повышенной концентрации газа и определены их параметры. Из анализа данных о детали самопоглощения в спектрах определены характеристики оболочки IRAS 17233-3606.

И.И. Зинченко (ИПФ), Ш.-Ю. Лиу и Ю.-Н. Су (Тайвань) изучили область звездообразования S255IR, где несколько лет назад была зарегистрирована вспышка светимости массивной протозвезды, связанная с эпизодом дисковой аккреции. Проведены детальные исследования объекта по наблюдениям с интерферометрами SMA, VLA и ALMA. Обнаружена новая мазерная линия метанола, в которой также зарегистрирована переменность. Детально изучена структура излучающей области, определены физические параметры ее элементов [4].

Д.А. Ладейщиков и О.С. Баяндина (Коуровская обсерватория УрФУ) на основе литературных данных выполнили статистический анализ распределения метанольных мазеров I класса в Галактике. Распределение мазеров метанола I класса на диаграмме «галактическая долгота — лучевая скорость» в целом повторяет распределение мазеров метанола II класса. Большая часть мазеров метанола I класса располагаются в Молекулярном Кольце Галактики, где находятся большинство горячих ОВ-звезд. Основное отличие в распределении мазеров I и II класса — наличие большого числа мазеров метанола I класса в Центральной молекулярной зоне.

В то время как большинство докладов было посвящено областям звездообразования в нашей Галактике, было и несколько работ, посвященных внегалактической тематике.

С.Н. Фабрика, А.С. Винокуров, А.Е. Костенков, К.Е. Атапин, О.Н. Шолухова и Ю.Н. Соловьева (САО РАН) обнаружили звезду очень высокой массы (более 150 масс Солнца) в южной галактике NGC 5408. Ее температура — около 30000 К. В спектре наблюдаются мощные эмиссии с профилями типа Р Суд. В этой же галактике найдена черная дыра промежуточной массы (около 200–400 масс Солнца) со сверхкритическим диском. Объект переменен как в оптическом, так и в рентгеновском диапазоне, а его спектр показывает сильные изменения, возможно, связанные с прецессией диска.

К.И. Смирнова и Д.З. Вибе (УрФУ и ИНАСАН) по данным о линиях СО и НІ в спектрах ряда галактик, как нормальных, так и пекулярных, исследовали кинематику газа для комплексов звездообразования. Выделенные комплексы по данным в линии СО, разделились на две группы. В первой из них поток в линии растет с увеличением разброса скоростей, а во второй — уменьшается, что интерпретируется как указание на различие возраста комплексов. В докладе И.С. Прошиной, А.Ю. Князева и О.К. Сильченко (ГАИШ МГУ и обсерватория SALT, ЮАР) была исследована выборка галактик с УФ-кольцами по спектрам с длинной щелью, полученным на 11-м телескопе SALT. Спектры изученных линзовидных галактик характеризуются наличием сильных эмиссионных линий. Определены скорости газового и звездного населения. Исследован механизм возбуждения линий на различных расстояниях от центров галактик. В галактиках выборки обнаружены кольцеобразные области звездообразования. Газ, в котором детектируется звездообразование, имеет примерно солнечную металличность, независимо от металличности звезд в этой области [5].

Ф.А. Копылова и А.И. Копылов (САО РАН) использовали архивные данные для изучения динамических и фотометрических характеристик 40 групп и скоплений галактик локальной Вселенной (0.02 < z < 0.045). Исследован темп звездообразования в центральных областях и ближайших окрестностях этих систем. Доля галактик с подавленным звездообразованием максимальна в центральных областях скоплений галактик, а дальше уменьшается, но все же остается выше, чем в поле [6].

4. Экзопланеты

Бурно развивающимся разделом астрофизики являются исследования экзопланет.

Л. Тал-Ор (Ариэльский университет, Израиль) посвятил свой доклад обзору CARMENES, в котором используется двухканальный спектрограф, позволяющий измерять лучевые скорости карликов спектрального класса M с точностью до 1 м/с. За три года слежения за 325 М-карликами удалось обнаружить свыше десятка новых экзопланет. Среди них есть планеты земной массы в обитаемой зоне. Параметры некоторых из обнаруженных планет трудно объяснить в рамках существующих теорий формирования планетных систем. Возможности инструмента позволяют также изучать фотосферную активность, вращение, силу магнитного поля звезд программы, состав атмосферы горячих Юпитеров.

В.К. Игнатов, Н.И. Бондарь, А.А. Шляпников, М.А. Горбунов и М.А. Горбачев (КрАО РАН и К(П)ФУ) проанализировали, как проявляются магнитная активность и наличие экзопланет в фотометрической переменности звезд нижней части главной последовательности. Для этого использовались наблюдательные данные многочисленных наземный и космических обзоров. На коротких интервалах времени обнаруживаются вспышки объектов. При наблюдениях, охватывающих годы и десятилетия, возможно выявление циклических изменений блеска, связанных с периодическими изменениями магнитной активности.

А.С. Перминов и Э.Д. Кузнецов (УрФУ) путем численного интегрирования уравнений движения на интервале в 1 млн. лет изучили динамическую эволюцию трех систем с экзопланетами: HD 141399, HD 160691 (по четыре известных планеты) и HD 39194 (три известных планеты). Для этих систем известны только верхние пределы масс планет. Найдены пределы изменения элементов орбит в зависимости от начальных условий моделирования. При определенных начальных условиях элементы орбит остаются малыми на всем интервале моделирования. Таким образом, критерий стабильности делает возможным наложение ограничений на возможные значения неизвестных элементов орбит.

Астрономы КрАО РАН и ГАО РАН О.В. Козлова, И.Ю. Алексеев, М.А. Погодин и М.И. Домбровская доложили краткие результаты многолетнего спектрального мониторинга с высоким разрешением (R = 25000) четырех Ае-звезд Хербига (AB Aur, HD 36112, MWC 480 и CQ Tau), у которых происходит активный процесс образования планет. Найдено, что изменения в эмиссионной спектральной линии Н α показывают долговременный тренд, на который наложены более быстрые изменения, с характерным временем от 700 до 1500 сут. У двух звезд (CQ Tau и MWC 480) спектральная переменность связана с появлением пыли во внутренних областях оболочки. Эти результаты авторы рассматривают как подтверждение активного процесса образования планет у звезд программы.

5. Инструменты

Количество докладов по тематике астрономических инструментов было сравнительно небольшим.

А.С. Бескакотов, А.Ф. Максимов, Ю.Ю. Балега, В.В. Дьяченко и Д.А Растегаев (САО РАН) доложили об испытаниях инфракрасного спекл-интерферометра для 6-м телескопа БТА, в котором использован InGaAs-детектор Snake-640. Проведено сравнение с действующим спекл-интерферометром видимого диапазона. В нашей стране САО РАН является безусловным лидером спекл-интерферометрических наблюдений.

Докладчики из ИСЗФ СО РАН А.Ю. Шиховцев, П.Г. Ковадло, В.П. Лукин, А.В. Киселев и Д.Ю. Колобов представили разработку системы адаптивной оптики с контуром определения искажений на разных высотах для Большого солнечного вакуумного телескопа, Крупного телескопа КСТ-3, запланированного в рамках Meranpoekta «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН».

6. Заключение

Конференция «Современная звездная астрономия — 2019» проводилась 7–11 октября 2019 г. в САО РАН и была десятой конференцией этого цикла. Предыдущие конференции проводились в ГАИШ МГУ (Москва),

Результаты, представленные на конференции, отличались новизной, оригинальностью и актуальностью, а доклады вызвали большой интерес аудитории, что нашло отражение в большом количестве вопросов, заданных докладчикам, и в бурных дискуссиях в кулуарах. Очевидно, линейка конференций «Современная звездная астрономия» будет продолжена.

Организаторы конференции благодарят руководство Специальной астрофизической обсерватории РАН за теплый прием и хорошие условия для проведения конференции.

Список литературы

- 1. V. M. Danilov and A. F. Seleznev, Astrophysical Bulletin, 75, in press, 2020.
- 2. A. T. Bajkova, G. Carraro, V. I. Korchagin, N. O. Budanova, and V. V. Bobylev, arXiv e-prints, arXiv:2004.13597, 2020.
- 3. M. E. Sharina and V. V. Shimansky, arXiv e-prints, arXiv:2004.05957, 2020.
- 4. I. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, K.-S. Wang, and Y. Wang, ApJ, 889, 43, 2020.
- 5. I. S. Proshina, A. Y. Kniazev, and O. K. Sil'chenko, AJ, 158, 5, 2019.
- 6. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.

Современные проблемы астрономии: исследования звезд

Малков О.Ю.¹, Поляченко Е.В.¹, Самусь Н.Н.^{1,2}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. Штернберга, Москва, Россия

Авторы представляют серию аналитических обзоров современного состояния проблем звездной астрономии. Данная статья посвящена анализу вопросов, связанных с исследованием двойных и переменных звезд. Обзор преимущественно базируется на докладах, сделанных на конференции «Современная звездная астрономия» (САО РАН, октябрь 2019 г.).

Modern problems of astronomy: stellar research

Malkov O.Yu.¹, Polyachenko E.V.¹, Samus N.N.^{1,2}

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

We provide a series of analytic reviews of problems of the modern stellar astronomy. It is mostly based on talks presented at the tenth annual conference on Modern Stellar Astronomy, held in Special Astrophysical Observatory of the RAS in Oct 2019. The key topic of this paper is study of binary and variable stars.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.002

1. Введение

В данной работе представлен аналитический обзор современных задач, стоящих перед звездной астрономией. Он создан, преимущественно, по материалам докладов, представленных на десятой конференции из цикла «Современная звездная астрономия». Она была проведена 7–11 октября 2019 г. в САО РАН. Помимо САО РАН, организаторами конференции выступили ГАИШ МГУ, ИНАСАН и Астрономическое общество.

Сайт конференции: https://www.sao.ru/hq/lsfvo/MSA2019/index.html.

Обзор разбит на следующие разделы: «Двойные и кратные звезды», «Переменные звезды», «Пекулярные и массивные звезды». В последнем разделе приведены заключительные замечания.

2. Двойные и кратные звезды

А.А. Дудник ($K(\Pi)\Phi Y$) проанализировала методику определения параметров карликовых новых. В начале 21 века в ряде работ по исследованию спектров катаклизмических переменных в ультрафиолетовом диапазоне был использован метод моделирования профилей линий Лаймановской серии HI для определения параметров атмосфер белых карликов. В последующих расчетах были получены фундаментальные параметры. В докладе были представлены результаты моделирования трех систем: TY Psc, FL Psc, V455 And с определением их фундаментальных параметров и параметров атмосфер белых карликов. Согласование теоретических и наблюдаемых спектров исследуемых систем проведено в двух режимах: ручном и автоматическом. Таким образом удалось доказать эффективность используемого метода и корректность получаемых результатов.

Доклад О.Ю. Малкова (ИНАСАН) был посвящен полуразделенным системам. Скомпилирован самый полный список полуразделенных затменных систем с линиями обоих компонентов в спектре. В нем представлены надежные значения орбитальных элементов (период, большая полуось) и физических параметров (масса, радиус, температура, светимость, спектральный класс) компонентов ~ 120 систем. Обсуждалась существующая система классификации полуразделенных систем (горячие, классические алголи, холодные). Специальное внимание было уделено представителям редких наблюдательных классов: системам с инверсией параметров (случаи, когда более горячий компонент имеет меньшую светимость или массу), обсуждался их эволюционный статус [1].

Гигантские радиовспышки микроквазара Лебедь X-3 обсуждались в докладе A.B. Шевченко (САО РАН). Были представлены результаты мониторинга микроквазара в рамках международной программы исследований ярких рентгеновских двойных звезд в различных диапазонах электромагнитного спектра. Поиск и изучение корреляций между переменным рентгеновским, радио- и гамма-излучением является ключевым моментом для понимания процесса формирования струйных выбросов из аккрецирующего на черную дыру (или нейтронную звезду) вещества. Обсуждались результаты ежедневных многочастотных измерений на радиотелескопе РАТАН-600 в течение трех периодов вспышечной активности объекта в 2016–2019 гг. С апреля по июнь 2019 г. был впервые применен режим многоазимутальных измерений на антенной системе «Южный сектор с перископом», когда в течение 5.5 часов ежедневно проводилось по 31 измерению плотностей потоков Лебедь X-3 на частотах 4.7, 8.6, 15 и 30 ГГц. Таким образом, на РАТАН-600 впервые проведены исследования внутрисуточной переменности, которые особенно ценны в период гигантских радиовспышек. Новые данные будут использованы для создания модели синхротронного излучения в струях микроквазаров.

Доклад Н.В. Пить (КрАО РАН) был посвящен периодическим процессам карликовой новой V503 Суд после сверхвспышки 2018 г. Фотометрические исследования карликовой новой V503 Суд были проведены в течение 24 ночей в Крымской астрофизической обсерватории в 2018 г. Наблюдения охватывают различные стадии активности системы: сверхвспышку, одну нормальную вспышку и спокойное состояние. В минимуме блеска и в нормальных вспышках у V503 Суд обнаружены изменения блеска с периодом ранее известным как 0.07669 сут, причем их амплитуда в минимуме блеска существенно больше (0.6^m – 1.2^m), чем во время нормальной вспышки (0.05^m). Предполагается, что отрицательные сверхгорбы вызваны нодальной прецессией наклонного аккреционного диска.

А.А. Татарникова (ГАИШ МГУ) доложила об эффекте эллипсоидальности у симбиотических звезд. В докладе были приведены результаты многолетних наблюдений ряда симбиотических звезд (T CrB, BF Cyg, YY Her, CI Cyg и др.) в ближнем ИК диапазоне. Наблюдения проводились с целью поиска эллипсоидальной переменности у холодных компонентов этих двойных систем. До относительно недавнего времени предполагалось, что холодные компоненты могут заполнять полость Роша только у повторных симбиотических новых (T CrB, например), но не у классических симбиотических звезд (к которым относятся все другие объекты из списка). Анализ наблюдений авторов, а также литературных данных показал, что многие симбиотические звезды демонстрируют эффект эллипсоидальности, причем среди объектов встречаются, как аномальная классическая C3 V1413 Aql (которая за последние почти 40 лет наблюдений находилась в спокойном состоянии всего около года), так и ни разу не вспыхивавшая за всю историю наблюдений звезда RW Hya. Это означает, что степень заполнения полости Роша холодным компонентом, а значит и темп потери вещества, не может являться единственным фактором, определяющим тип активности симбиотической звезды.

Лунные покрытия на 6-м телескопе САО РАН обсуждались в докладе В.В. Дьяченко (САО РАН). С 2015 г. на спекл-интерферометре 6-м телескопа САО РАН проводятся наблюдения лунных покрытий звезд. За счет применения двух различных методов высокого углового разрешения на одном и том же инструменте оказалось возможным использовать преимущества каждого из методов, а также проверить ограничения методов в области их пересечения. Обсуждались наблюдательные ограничения метода лунных покрытий в САО. Основными направлениями в работе по наблюдениям лунных покрытий являются измерение угловых размеров гигантов и измерение проекций угловых расстояний и разностей блеска между компонентами двойных систем. До замены главного зеркала БТА в 2018 г. в ходе наблюдений лунных покрытий были разрешены диски семи звезд, 4 звезды были разрешены на компоненты, 16 звезд не были разрешены.

Е.В. Шмайлова (САО РАН) доложила о первых результатах наблюдений лунных покрытий в различных диапазонах спектра. Наблюдения методом лунных покрытий на 6-м телескопе САО РАН достигают предела разрешения лучше 1 мсд. Авторами был предложен новый метод наблюдений, позволяющий получать кривые лунных покрытий одновременно в различных диапазонах спектра, выполнены измерения оптических характеристик прибора и проведены первые наблюдения лунных покрытий с использованием модифицированной оптической системы. По наблюдениям в январе 2019 г. с применением нового метода звезда HD 38365 была обнаружена как двойная с расстоянием между компонентами около 0.1 угловой секунды. Соотношение яркостей составляет от 1:15 в красной части спектра до 1:10 в инфракрасной. Полученные результаты иллюстрируют применимость предложенной оптической схемы для исследования двойных звезд на малых угловых масштабах.

А.И. Ихсанова ($K(\Pi)\Phi Y$) проанализировала кривые блеска поляра V808 Aur. Поляры представляют собой двойные системы, состоящие из сильно замагниченного (10-100 MFc) белого карлика и аккрецирующего холодного красного карлика. Вещество холодного компонента аккрецирует на поверхность белого карлика через точку Лагранжа и, при достижении магнитосферы белого карлика, движется вдоль линий магнитного поля в направлении его магнитных полюсов. При попадании вещества холодной компоненты на поверхность белого карлика образуется горячая ударная область ($\sim 10^8 \text{ K}$). В рамках данной работы был реализован новый подход в изучении процессов аккреции в полярах. Суть метода заключалась в моделировании вариаций блеска, возникающих при затмении холодным компонентом аккреционной струи с нахождением ее параметров. Полученная на 6-метровом телескопе БТА кривая блеска поляра V808 Aur была успешно описана в рамках модели. Авторами были получены следующие параметры системы: размеры ударной области, угол наклона орбитальной плоскости и азимутальный угол конца баллистической траектории.

А.Ю. Князев (Южноафриканская астрономическая обсерватория) обсуждал в своем докладе соотношение масса-светимость (СМС) для быстро и медленно вращающихся звезд. СМС является фундаментальным законом, используемым в различных областях астрофизики. Оно особенно важно для построения начальной функции масс из функции светимости звезд. Независимое определение звездной массы и светимости возможно только для компонентов некоторых наблюдательных типов двойных звезд. Основным источником для диапазона масс $m/m_{\odot} > 1.5$ являются разделенные затменные системы главной последовательности, имеющие в своих спектрах линии обоих компонентов (затменные двойные с линиями обоих компонентов в спектре, DLEB). В настоящее время, однако, для получения звездных масс используются короткопериодические DLEB, где, как известно, компоненты синхронизированы с орбитальным вращением, медленно вращаются и, следовательно, эволюционируют не так, как одиночные звезды. Исходя из этого, можно предполагать, что используемое в настоящее время CMC может быть не совсем верным для диапазона масс $m/m_{\odot} > 1.5$. Компоненты долгопериодических DLEB предположительно не синхронизированы с орбитальным вращением. Следовательно, они являются быстрыми ротаторами и эволюционируют как одиночные звезды. Предполагается, что только эти данные могут быть использованы для построения CMC и других соотношений для диапазона масс $M/M_{\odot} > 1.5$. Авторы приступили к реализации пилот-проекта по построению CMC с использованием долгопериодических DLEB, где спектральные наблюдения для этого проекта должны проводится с использованием эшелле спектрографа HRS Южного Африканского Большого Телескопа (SALT). В докладе были представлена выборка, наблюдения, методика анализа, а также первые результаты [2].

Доклад Д.Н. Нуртдиновой ($K(\Pi)\Phi Y$) был посвящен определению и анализу параметров тесной двойной системы Konkoly J064029.1+385652.2. В работе исследованы фундаментальные параметры этой малоизученной тесной двойной системы. Спектрометрические наблюдения выполнены на спектрографе SCORPIO 6-м телескопа БТА САО РАН. Получены нормированные спектры для всех фаз орбитального периода и методом кросс-корреляции измерены наборы лучевых скоростей sdO-субкарлика. В комбинации с оценками лучевых скоростей вторичного компонента переопределены значения масс компонентов. Мультиполосные фотометрические наблюдения выполнены на телескопе PTT-150. Построены наблюдаемые фазовые кривые блеска в полосах VR, включающие оценки блеска в фазах полного главного затмения. С применением метода облучаемых звездных атмосфер, выполнено численное моделирование теоретических кривых блеска и спектров системы и их согласование с наблюдениями. В результате получены оптимальные и допустимые наборы параметров обоих компонентов. Полученные значения параметров не полностью согласуются с эволюционными треками ядер планетарных туманностей (sdO-субкарликов) и звезд главной последовательности малых масс. В частности, температура и светимость главного компонента соответствуют массе $M = 0.47 M_{\odot}$, что характерно для sdB-субкарликов. Данный результат объясняет отсутствие у системы Konkoly J064029.1+385652.2 планетарной туманности. Масса вторичного компонента $M = 0.40 M_{\odot}$ характерна для маломассивных звезд ГП в предкатаклизмических переменных, но приводит к оценке радиуса на 35% больше наблюдаемого. Сделан вывод о необходимости дальнейшего уточнения масс компонентов системы [3].

Исследованию двойной системы HIP 18856 был посвящен доклад П.Д. Ефремовой (К(П)ФУ). Был представлен результат построения орбиты этой двойной звезды. В исследовании были использованы данные астрометрического спутника HIPPARCOS, спекл-интерферометрические данные из литературы и полученные на телескопе БТА САО РАН в 2007–2019 гг. Для построенной орбиты рассчитана сумма масс, найдены физические параметры компонентов. Выполнено сравнение полученной орбиты и фундаментальных параметров с данными других авторов. Сравнение показало, что новое орбитальное решение корректнее старого, так как оно точнее описывает новые наблюдательные данные. Также на основе классификации качественной оценки орбит был определен статус новой орбиты как «надежная», что означает покрытие данными орбиты примерно наполовину с достаточными величинами невязок.

А.С. Винокуров (САО РАН) доложил о результатах исследования ультраяркого рентгеновского источника (ULX) UGC6456 X-1. Объект обладает очень высокой переменностью рентгеновского (порядка 100 раз в диапазоне 0.3–10 кэВ) и оптического (1.3 звездной величины в полосе V) потоков. Максимум рентгеновской светимости UGC6456 X-1 превышает 10⁴⁰ эрг/с, абсолютная звездная величина в максимуме блеска превышает –8 звездную величину, что делает его одним из ярчайших в оптическом диапазоне ULX. Переменность носит непериодический характер, природа которого пока не ясна. В оптических спектрах UGC6456 X-1 обнаружены широкие эмиссионные линии водорода, гелия I и гелия II, что говорит об истечении мощного ветра в этом объекте.

Доклад Н.Р. Дёминовой (К(П)ФУ) был посвящен анализу характеристик молодых предкатаклизмических переменных с sdB-субкарликами. В работе впервые выполнен анализ фундаментальных параметров большой выборки систем типа HW Vir — молодых предкатаклизмических переменных (ПП) с sdBсубкарликами. При численном моделирования спектров, кривых блеска и лучевых скоростей получены наборы параметров предкатаклизмических переменных NSVS 14256825, Lan 30 и SDSS J162256. Спектроскопические наблюдения выполнены на БТА САО РАН, фотометрические — на PTT-150 и Цейсс-1000 САО РАН. В рамках их комплексного исследования построены наблюдаемые кривые блеска систем в полосах BVR с их теоретическими описаниями, рассчитанными с учетом эффектов несферичности и отражения. Наблюдаемые спектры объектов в разных фазах согласованы с синтетическими с нахождением параметров и химического состава атмосфер sdB-субкарликов. Измеренные наборы их лучевых скоростей проанализированы с учетом влияния эффектов отражения. Показано, что при амплитуде таких эффектов до 0.2 mag искажения формы таких кривых минимальны и не позволяют определять отношения масс компонентов. Впервые обобщены и исследованы полученные и представленные в литературе данные о массах, радиусах и температурах 17 ПП типа HW Vir. Сделан вывод о необходимости фиксации значения массы их главных компонентов для получения фундаментальных параметров данных систем. Построены зависимости «массасветимость» и «масса-радиус» для их вторичных компонентов. Сделан вывод о том, что избыток радиусов относительно модельных прогнозов для звезд ГП наблюдается практически во всех системах при отсутствии избытков светимости, характерных для ПП с sdO-субкарликами.

Исследование относительного движения в системе ADS 48 обсуждалось в докладе O.B. Кияевой (ГАО PAH). В каталоге Gaia DR2 представлены точные положения и собственные движения трех компонентов звезды ADS 48, их параллаксы и лучевые скорости на эпоху 2015.5. По этим данным вычислены мгновенные относительные положения и движения компонентов, которые являются основой для получения орбиты методом параметров видимого движения. Только на основе наблюдений Gaia DR2 вычислено семейство орбит пары AB, из которого выбраны те, которые лучше всего согласованы с пулковскими наблюдениями. Сравнение с первыми наблюдениями XIX в. позволило независимо оценить сумму масс компонентов в диапазоне 1.15 < M(A + B) < 1.4 масс Солнца. Детальный анализ однородных пулковских наблюдений внешней пары AB-F показал возмущение с периодом 11 лет. Обсуждались причины данного возмущения [4].

Доклад А.А. Митрофановой (САО РАН) посвящался корректности орбитальных решений, полученных по малому набору точек, на примере орбиты НІР 53731. НІР 53731 представляет собой двойную систему, которая состоит из звезд спектральных классов КО и К9. Спекл-интерферометрические наблюдения получены авторами данного доклада на телескопе БТА САО РАН с 2007 по 2019 г. (20 измерений). Анализ новых данных в совокупности с ранее опубликованными позволил построить корректную орбиту НІР 53731 и уменьшить уже известное значение орбитального периода системы в два раза. В результате проведенного исследования двумя методами были определены: сумма масс компонентов, массы каждого компонента и их спектральные классы. На основе качественной классификации орбит орбитальному решению был присвоен статус 2 — «хорошая орбита» (наблюдения покрывают больше половины орбитального периода и соответствуют разным фазам).

3. Переменные звезды

В.Е. Панчук (САО РАН) докладывал о спектроскопии мирид в оптическом диапазоне. Сообщалось о программе спектроскопического мониторинга долгопериодических переменных звезд, находящихся на стадии асимптотической ветви гигантов (AGB). Эта программа является дополнением к исследованиям звезд на стадии (post-AGB) и родственных объектов. Объективным основанием для выполнения указанных программ на спектрографе НЭС БТА являются относительно низкие значения изменений лучевых скоростей, характеризующих кинематику атмосфер и оболочек звезд на этих стадиях. Мириды известны неустойчивостью фотометрических параметров и различием амплитуд изменения лучевых скоростей (от цикла к циклу). Все это находит объяснение в рамках модели околозвездной оболочки, достаточной для формирования молекулярного спектра в оптическом диапазоне. Обсуждалась природа эмиссий в линиях атомов, ионов и молекул, интерпретировались результаты спектрополяриметрии.

Доклад А.С. Расторгуева (МГУ, Физический факультет, ГАИШ МГУ) был посвящен зависимости «период — светимость» для цефеид Галактики. По мультифазным измерениям эффективных температур с привлечением дополнительных данных миссии Gaia DR2 усовершенствованным методом Бааде-Беккера-Весселинка построены зависимости «период — радиус» и «период — светимость» для 33 цефеид Галактики. Выведены и использованы оригинальные цветовые калибровки эффективных температур сверхгигантов.

Е.А. Суслина (ГАИШ МГУ) обсудила в своем докладе наблюдаемые свидетельства неоднородности пылевых затмений молодых звезд. Из анализа фотометрических и спектральных данных звезды CQ Tau авторы показали, что околозвездные пылевые облака у звезд типа UX Ori закрывают звездный диск неравномерно, что в свою очередь приводит к следующим эффектам. Наблюдаемый закон покраснения оказывается более серым, чем закон покраснения, отвечающий свойствам пылинок. Это обстоятельство ставит под сомнение выводы об увеличенном среднем размере пылинок в околозвездном окружении звезд типа UX Ori или AA Tau, которые сделаны из фотометрических наблюдений. Профили спектральных линий испытывают искажения, наподобие возникающих вследствие эффекта Росситера-Маклафлина у двойных звезд. Анализ этих искажений в перспективе позволит изучать распределение пылевого поглощения в картинной плоскости, т.е. увидеть пылевые облака на просвет.

А.А. Федотьева (МГУ, Физический факультет) представила модель околозвездной пылевой оболочки углеродной мириды V CrB. Был представлен анализ данных BVJHKLM фотометрии V CrB, полученных в 1989–2018 гг. Определен период пульсаций V CrB: в ИК-диапазоне он оказался равным 355.2^d, а в оптическом — 352^d. В фильтрах JHK, помимо периодических пульсаций, хорошо заметны синусоидальные изменения среднего уровня блеска с характерным периодом ~ 8300 суток. По данным фотометрии, архивным наблюдениям спутников ISO и IRAS и данным спекл-поляриметрии V CrB построена модель околозвездной пылевой оболочки. Основные параметры модели: сферически симметричная оболочка с плотностью ~ r^{-2} , $\tau(K) = 0.35$, внутренний и внешний радиусы оболочки составляют соответственно 8 а.е. и 40000 а.е. Оболочка содержит сферические углеродные пылинки (67% по массе) и пылинки из карбида кремния (33% по массе). Пылинки с радиусом 0.5 мкм составляют 90% массы оболочки. Оставшиеся 10% массы приходятся на более мелкую пыль с радиусом 0.1 мкм. Мелкая и крупная пыль имеют одинаковый химический состав и пространственное распределение. Существование мелкой пыли позволяет объяснить сравнительно большую долю рассеянного света, разрешенного методом спекл-поляриметрии в видимом диапазоне. При этом полная масса пылевой составляющей оболочки ~ 2 × 10⁻⁵ M_{\odot} . Температура звезды, принятая в работе на основе анализа спектра в ближнем ИК-диапазоне, в максимуме блеска составила 3000 K, а в минимуме блеска — 2400 K. Построенная модель пылевой оболочки позволяет одинаково хорошо воспроизвести наблюдаемое SED и в максимуме, и в минимуме блеска [5].

Доклад Ю.Н. Соловьевой (САО РАН) был посвящен новым LBV-кандидатам в галактиках NGC 247 и NGC 4736. Объекты демонстрируют типичные для хорошо изученных LBV-звезд спектральные линии: широкие и яркие эмиссионные линии водорода и гелия Не I, имеющие профили Р Суg, эмиссионные линии железа Fe II, кремния Si II, азота N II и углерода С II, а также запрещенные линии железа [Fe II], азота [N II], кислорода [O I] и кальция [Ca II]. Исследуя линии водорода окружающих объекты туманностей, авторы оценили значения межзвездного поглощения, а также оценили значение температуры фотосферы объектов. Исследование кривых блеска объектов из галактики NGC 247 не выявило значительного изменения блеска ($\Delta B = 0.3^{\rm m}$, $\Delta V = 0.1^{\rm m}$ для 004703-204708.4 ($M_{\rm bol} \sim -10.6^{\rm m}$), $\Delta B = 0.2^{\rm m}$ и $\Delta V = 0.1^{\rm m}$ для 004702-204739.9 ($M_{\rm bol} \sim -10.7^{\rm m}$)). Объект NGC 4736₁ ($M_{\rm bol} \sim -11.5^{\rm m}$) продемонстрировал переменность блеска $\Delta V = 1.1^{\rm m}$ и $\Delta B = 0.9^{\rm m}$ между 2005 и 2018 гг. (по данным HST и 2.5-м телескопа КГО). Объект принадлежит к типу LBV звезд. NGC 4736₂ ($M_{\rm bol} < -10.0^{\rm m}$) показывает профили Р Суg, и его спектр изменился с 2015 по 2018 г. Переменность блеска NGC 4736₂ составляет $\Delta V = 0.5^{\rm m}$ и $\Delta B \approx 0.4^{\rm m}$. Изменение блеска NGC 4736₃ ($M_{\rm bol} \sim -8.4^{\rm m}$) составляет 0.2^m. Следовательно, последние два объекта остаются в статусе LBV-кандидатов

А.Е. Костенков (САО РАН) представил результаты моделирования двух Галактических LBV звезд (luminous blue variable): MN112 и P Cyg. Используя не-ЛТР код для расчета распиряющихся звездных атмосфер CMFGEN, авторы определили основные параметры звезд и ветра. MN112 и P Cyg имеют в своих спектрах эмиссионные линии водорода, He I, N II, Si II и Fe III. Обе звезды в этих состояниях можно отнести к классу поздних WNLh звезд с большим содержанием водорода. Авторы оценили отношение гелия к водороду He/H равным 0.33 для MN112 и 0.29 для P Cyg (по числу атомов) при переизбытке азота и дефиците углерода и кислорода. Большинство спектральных линий было хорошо воспроизведено в моделях с температурой $T_{\rm eff} = 19500$ K и светимостью $L = 1.0 \times 10^6 L_{\odot}$ для MN112 и температурой $T_{\rm eff} = 18500$ K, $L = 6.0 \times 10^5 L_{\odot}$ для P Cyg.

О.Н. Шолухова (САО РАН) обсудила в своем докладе разнообразие видов массивных звезд в галактиках М31 и М33. В последние несколько лет произошел прорыв в классификации звезд высокой светимости, занимающих верхнюю часть диаграммы Герцшпрунга-Рессела. Авторы представили эту диаграмму для массивных звезд галактик М31 и М33, включая несколько различных типов звезд с эмиссионными линиями: подтвержденных ярких голубых переменных (LBVs), кандидатов LBVs, B[e]-сверхгигантов и теплых гипергигантов. Чтобы отнести звезду к одному из подклассов, необходим долговременный мониторинг в оптической и инфракрасной областях. Авторы представили спектральные и фотометрические исследования LBV-кандидатов в М31 и М33. Основываясь на данных 6-м телескопа, 3.5-м телескопа Апачи Поинт, архивных данных, были оценены их температуры и светимости по спектральным распределениям энергии и сделаны выводы о массах и возможном эволюционном статусе.

М.А. Тимиркеева (Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева) сделала доклад о рентгеновском излучении радиопульсаров. В настоящее время детальные данные получены для 61 радиопульсара, излучающего в рентгеновском диапазоне от 0.1 до 10 кэВ. Проведено сравнение ряда параметров пульсаров, громких и тихих в рентгеновском диапазоне. Показано, что жесткое излучение наблюдается, в основном, у радиопульсаров с высокими значениями скорости потерь энергии вращения dE/dt и магнитного поля на световом цилиндре $B_{\rm lc}$. Дальнейший поиск рентгеновского и гамма излучения от этих объектов можно вести целенаправленно, выделив из всей совокупности радиопульсаров источники с указанными особенностями.

Доклад А.В. Бакланова (КрАО РАН) был посвящен фотометрическим исследованиям V1432 Aql в 2019 г. V1432 Aql является уникальным объектом, в своем малочисленном подклассе асинхронных поляров. Это — единственный известный объект данного типа, у которого наблюдаются затмения. Также только у V1432 Aql, среди асинхронных поляров, период осевого вращения белого карлика больше орбитального периода. В настоящее время в системе происходит процесс синхронизации осевого и орбитального движения белого карлика. В работе были представлены результаты исследования затменного асинхронного поляра V1432 Aql по наблюдениям, полученным в июле-августе 2019 г. на 38-см телескопе КрАО. Проведенный анализ позволил уточнить эволюцию осевого вращения белого карлика в системе V1432 Aql.

А.И. Галеев (К(П)ФУ) представил результаты фотометрических исследований на телескопах обсерватории TUBITAK новых переменных звезд, открытых по наблюдениям на спутнике Gaia. Начиная с 2015 г. на Российско-Турецком телескопе (PTT-150) и метровом телескопе (T100) Национальной обсерватории TUBITAK (Турция) проведено более 50 наблюдений объектов, вспышки которых зафиксированы на спутнике Gaia. Получены фотометрические и спектроскопические данные для около 40 звезд-кандидатов в катаклизмические переменные. Для десяти объектов были обработаны фотометрические наблюдения и изучены кривые блеска. Было показано, что звезды, которые, как ожидается, являются кандидатами в катаклизмические переменные, проявляют различное поведение. Так, для звезды Gaia14adn обнаружена переменность, характерная для пульсирующих переменных типа RR Lyr. Для новой катаклизмической переменной Gaia14aae, относящейся к звездам типа AM CVn, по данным для 10 ночей наблюдений на телескопах PTT-150 и T100, уточнено значение периода, составляющее 49.7 минут и построена фазовая кривая изменения блеска, демонстрирующая глубокие затмения более чем на $2.5^{\rm m}$, что позволяет идентифицировать объект Gaia14aae как затменный поляр.

С.Ю. Горда (Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ) доложил о результатах фотометрической и спектральной переменности молодой звезды V645 Cyg. Звезда V645 Cyg является массивной звездой с диском, которая, вероятно, недавно вышла из вещества родительского облака. В окрестности звезды наблюдается метанольное мазерное излучение на частоте 6.7 ГГц. Метанольный мазер квазипериодический с периодом 180–190 дней; его переменность коррелирует с фотометрической переменностью в фильтрах V и R. Представлены результаты оптического фотометрического и спектрального мониторинга, который проводится в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ с 2018 г. В настоящее время проводятся инфракрасные наблюдения в фильтрах J, H, K, L, M на фотометре Крымской астрономической станции ГАИШ, а также сопутствующий мониторинг метанольного мазера в Вентспилсе, Латвия.

Доклад Р.Я. Жучкова ($K(\Pi)\Phi Y$) был посвящен поиску и исследованию переменных звезд с использованием малых инструментов. Несмотря на проведение многих роботзированных обзоров неба, поиск и исследование переменных звезд остаются актуальными задачами, которые могут решаться как автоматически, так и в ручном режиме. При этом возможно использовать время на небольших (в т.ч. учебных) инструментах, тем самым повышая эффективность их работы и совмещая реализацию научных и учебных задач. Данная работа проведена с использованием 28-см телескопа AC КФУ для поиска и фотометрического анализа переменных объектов и 1.5-м телескопа РТТ-150 (Турецкая национальная обсерватория) для обеспечения спектроскопических наблюдений обнаруженных звезд с целью спектральной классификации и построения кривой лучевых скоростей. Протестирована методика детектирования и исследования переменных в поле инструмента, до уровня полноты обзора (17 mag) выявлены как имевшиеся в каталогах, так и новые переменные объекты. Построены кривые блеска, проведена спектрофотометрическая классификация, для одного объекта построена кривая лучевых скоростей [6].

А.Е. Костенков (САО РАН) представил предварительные результаты расчета моделей протяженных атмосфер для звезд с температурой в диапазоне 12000–40000 К и темпом потери массы $10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot}$ год $^{-1}$ при различных скоростях ветра и химических составах. Большое количество объектов, имеющих эмиссионные спектры, такие как яркие голубые переменные (LBV звезды), B[e]-сверхгиганты, ультраяркие рентгеновские источники (ULXs) часто имеют эффективные температуры менее 20000–25000 К. Определение основных параметров ветра по эмиссионным линиям в оптическом диапазоне для объектов с эффективной температурой менее 25000 К затруднено ввиду отсутствия явных независимых маркеров (например, отношение эквивалентных ширин линий He II и He I). Определение температуры и темпа потери массы для таких «холодных» атмосфер возможно по другим косвенным признакам, например, абсорбционному компоненту линий Бальмеровской серии, для которого критическим фактором являются как температура, так и темп потери массы (увеличение количества нейтрального водорода может привести к резкому росту поглощения в линиях Лаймановской серии). Поэтому для определения основных параметров протяженной атмосферы необходим расчет большого количество моделей ввиду связанности всех параметров. В работе представлены результаты расчета сеток моделей в виде диаграмм эквивалентных ширин для выбранных линий водорода, Не, С, N, Si и Fe, а также результаты исследований некоторых эмиссионных объектов при помощи рассчитанных моделей.

А.Н. Саркисян (САО РАН) представил результаты исследования пяти кандидатов в яркие голубые переменные (Luminous Blue Variables, LBV) в галактике М31 и одного LBV кандидата в нашей Галактике. Были проведены одновременные спектральные наблюдения в оптическом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах на БТА и 3.5-метровом телескопе обсерватории Апачи Пойнт. Спектры исследуемых кандидатов показывают характерные для LBV признаки: мощные широкие водородные линии, линии He I, Fe II, [Fe II]. Авторы оценили температуры, радиусы, величины межзвездного поглощения и светимости звезд по их спектральным распределениям энергии. Болометрические светимости кандидатов оказались сходными со светимостями известных LBV звезд в М31. Обнаружение фотометрической переменности (порядка 0.25 зв. величины в полосе V) у одного из кандидатов J004341.84+41112.0 позволило классифицировать его как LBV. Звезда J004415.04+420156.2 показала характерные для B[e]-сверхгигантов признаки. Объект J004411.36+413257.2 был классифицирован как Fe II звезда. Еще два объекта J004621.08+421308.2 и J004507.65+413740.8 были отнесены к гипергигантам. Авторы впервые получили спектр LBV кандидата из нашей Галактики MN112 в ближнем ИК диапазоне. Авторы использовали оптический и ИК спектры MN112 для сравнения со спектрами других LBV кандидатов и обнаружили идентичность спектров MN112 и J004341.84+41112.0. На схожесть природы этих двух объектов также указывает совпадение их эффективных температур. Это косвенно подтверждает статус LBV у MN112, который должен быть подкреплен переменностью блеска при последующих наблюдениях.

Доклад А.В. Хруслова (ГАИШ МГУ, ИНАСАН) был посвящен исследованию цефеид с двойной и множественной периодичностью. Используя данные общедоступных электронных фотометрических архивов (ASAS-SN, NSVS, 1SWASP) авторами был выявлен ряд классических цефеид с двойной периодичностью, пульсирующих в основной моде и первом обертоне, в первом и втором обертонах, а также одна цефеида пульсирующая сразу в трех модах. Для двух цефеид первого и второго обертонов были получены ряды ПЗС наблюдений в фотометрических полосах В, V и R, выявлены систематические изменения периодов. Кроме того, найдена одна цефеида сферической составляющей Галактики с двойной периодичностью, пульсирующая в основной моде и первом обертоне. Среди звезд этого подтипа цефеид, выделенного недавно исследователями группы проекта OGLE, обнаруженная авторами переменная имеет наибольший блеск.

С.А. Трушкин (САО РАН) представил результаты измерений вспышечного излучения от транзиентного рентгеновского магнетара ХТЕ J1810-197 в ежедневных наблюдениях с 19 декабря 2018 г. по 21 апреля 2019 г. на Северном секторе РАТАН-600. Снова, как и 11 лет назад в 2006 г., после яркой рентгеновской вспышки магнетара 8 декабря 2018 г. были детектированы слабые радиоимпульсы. С 19 по 27 декабря в ходе последовательного прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности телескопа были обнаружены близкие по времени импульсы (P = 5.54 с) на частотах 2.3, 4.7, 8.2 и 11.2 ГГц. Отношение сигнал/шум для одиночных импульсов составляло от 2 до 20 на разных частотах для временного интервала 7.8 мс. Позже авторы перешли на 132-секундное накопление излучения магнетара с помощью режима, когда рупоры приемников движутся синхронно с источником. Таким образом магнетар в течение 25 периодов вращения находился в луче антенны. Поток и субструктура импульсов менялись от импульса к импульсу до 10 раз. Далее с 14 марта 2019 г. авторы использовали один из трех четырехканальных радиометров на частоте 4.7 ГГц, временно снятый с программы поиска быстрых радиовсплесков на Западном секторе телескопа. Сразу стало ясно, что при временном разрешении 250 микросекунд и при полосе узких каналов 150 МГц, импульсы субструктуры главного импульса становятся значительно уже и ярче. По запаздыванию времени прихода импульсов с уменьшением частоты канала авторы подтвердили меру дисперсии DM = 178 пк/см³, которая была измерена в 2006 г., хотя сами импульсы на 4.7 ГГц с полной длительностью около 200 мс состояли от одного до десяти субимпульсов различной амплитуды и длительностью 10-50 мс. Средний спектр одиночного импульса в декабре 2018 г. хорошо аппроксимировался степенным спектром со спектральным индексом: -1.5 ± 0.2 , значению характерному для радиопульсаров. Плотности потока отдельных импульсов достигали 5 Ян на частоте 4.7 ГГц и 2 Ян на 8.2 ГГц. В течение всего цикла измерений магнетар ХТЕЈ1809-197 был самым ярким радиопульсаром в Млечном пути, и это состояние с постепенным падением среднего потока сохранялось до 21 апреля 2019 г., когда наблюдения были прерваны. В мае 2019 г. импульсное радиоизлучение уже не детектировалось.

4. Пекулярные и массивные звезды

И.И. Романюк (САО РАН) представил результаты исследований магнитных полей химически пекулярных звезд, выполненные на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа в последнее десятилетие. Исследования велись в трех основных направлениях:

- 1. магнитные поля звезд в ассоциации Орион ОВ1;
- 2. магнитные поля сверх-медленных ротаторов;
- 3. магнитные поля избранных звезд с целью построения магнитных моделей.

Получены новые важные данные: в частности найдено, что в ассоциации Орион OB1 доля магнитных звезд по отношению к нормальным резком падает с возрастом. Построены магнитные модели для десятка звезд, в том числе для двух сверхмедленных ротаторов с периодами вращения 16 и 29 лет.

Доклад В.Д. Бычкова (САО РАН) был посвящен изучению магнитных полей звезд. Прямые измерения магнитного поля звезд проводятся уже более 70 лет и за это время было исследовано более 2700 объектов, для которых получено более 50000 прямых наблюдательных оценок магнитного поля. На основании этого наблюдательного материала можно сделать вывод о том, что магнитными полями различной конфигурации

различной напряженности обладают все звезды. Для более 350 звезд изучена переменность магнитных полей, определены параметры этой переменности. Был представлен обзор сформировавшихся представлений о магнитных полях различных типов звезд.

М.В. Юшкин (САО РАН) исследовал молекулы в спектрах звезд высокой светимости. В результате выполнения многолетней программы спектроскопических исследований звезд высокой светимости на телескопе БТА обнаружены объекты, демонстрирующие молекулярный спектр в оптическом диапазоне при температуре центральной звезды от 6000 до 10000 К. У ряда звезд молекулярные линии отождествлены впервые, причем этому помогло сопоставление спектров сверхгигантов со спектрами комет. Возможно, само появление молекул в газовой фазе в околозвездных оболочках связано с испарением пылинок, вызванным быстрым разогревом фотосферы центральной звезды на кратковременных стадиях эволюции. Исследование картины лучевых скоростей выявляет различную кинематику околозвездного вещества, находящегося в разных фазах, что свидетельствует об отсутствие равновесия как химического, так и динамического.

В.Д. Бычков (САО РАН) доложил об экстремально медленном вращении звезды Przybylski (HD 101065). Очень вероятно, что звезда Przybylski обладает самым длинным известным магнитным периодом, который равен примерно 188 годам. Для определения периода авторы использовали данные из литературных источников, а также собственные, полученные с использованием спектрополяриметра HARPSpol на 3.6-м телескопе ESO в La Silla в 2015–2017 гг. К сожалению, интервал времени магнитного мониторинга, на котором основан анализ, составляют всего 43 года (~ 23% от периода), поэтому оценка периода носит весьма ориентировочный характер. В докладе обсуждались как чрезвычайно длительный период, так и некоторые другие уникальные особенности этой очень интересной звезды.

Также В.Д. Бычков (САО РАН) исследовал физическую переменность магнитного поля у некоторых звезд. Наблюдаемая переменность продольных эффективных полей у основной массы звезд происходит вследствие вращения, т.е. изменение проекции величины продольного магнитного поля на луч зрения. Это чисто геометрический эффект, и он никак не связан с изменением параметров самого магнитного поля. Проведя ряд измерений с периодом вращения, авторы получают наблюдаемую магнитную фазовую кривую. В некоторых случаях наблюдается изменение магнитной фазовой кривой со временем, т.е. происходит изменение параметров самого магнитного поля. Это относится к вспыхивающим и некоторым Ae/Be звездам. Благодаря использованию новых высокоточных измерений удалось заметить подобные изменения и у некоторых Ap-звезд. Т.е., вероятно, у этих объектов эволюция магнитного поля происходит на несколько порядков быстрее, чем предсказывает теория. Это дает повод обратить внимание на такие эффекты и исследовать их особенно тщательно.

Доклад В.Г. Клочковой (САО РАН) посвящался Желтому квартету в Галактике. Были обобщены результаты многолетнего спектрального мониторинга на БТА с разрешением $R \ge 60000$ желтых гипергигантов в северной полусфере Галактики. В спектрах этих F-G звезд предельной светимости, компактно расположенных в верхней части Г-Р диаграммы, найдено разнообразие спектральных особенностей: различные типы профиля $H\alpha$, наличие (или отсутствие) запрещенных и разрешенных эмиссий, а также оболочечных компонентов. Изучена переменность спектральных деталей различной природы. Определены абсолютная светимость, скорость расширения околозвездных оболочек, амплитуда пульсаций. Доказана достоверность статуса гипергиганта для V1427 Aql; зафиксированы проявления значительной динамической нестабильности верхних слоев атмосферы ρ Саѕ после выброса 2017 г. и расслоение ее газовой оболочки; доказано отсутствие компаньона в системе гипергиганта V509 Саѕ; сделан вывод о приближении гипергиганта V1302 Aql к низкотемпературной границе Желтого Войда.

В докладе О.И. Крисановой (ГАО РАН) рассматривалась выборка ОВ-звезд по данным каталога Gaia DR2. Выборка содержит около 6000 звезд, среди них около 2000 звезд имеют оценки лучевых скоростей. В результате решения основных кинематических уравнений были найдены параметры кривой галактического вращения. К ним относятся значение угловой скорости вращения Галактики и две ее производные.

А.В. Моисеева (САО РАН) представила результаты измерений фундаментальных параметров и магнитного поля для магнитной СР-звезды с большой депрессией на уровне континуума HD 96003. Данная работа является продолжением серии статей по изучению подобных объектов. Спектрополяриметрические данные для исследуемого объекта получены на Основном звездном спектрографе, который установлен в фокусе Насмит-2 6-м телескопа БТА. Рабочий спектральный диапазон — 4400 – 4970 Å, среднее разрешение спектров R = 15000. Для исследуемой звезды было накоплено достаточное количество материала для проведения детального анализа: магнитного моделирования, определения фундаментальных параметров (эффективная температура, поверхностная гравитация, светимость, масса, радиус, возраст), скорости вращения и периода вращения, приблизительной оценки химического состава.

О.Ю. Малков (ИНАСАН) описал в своем докладе существующие и планируемые большие фотометрические обзоры и обсудил проблемы кросс-отождествления объектов в этих обзорах. Полученная в результате кросс-отождествления многоцветная фотометрия (дополняемая, при наличии, сведениями о тригонометрических параллаксах и спектральной классификации) используется для определения параметров звезд и межзвездного поглощения. Разработанная для этой цели методика апробирована на ряде высокоширотных ($|b| > 15^{\circ}$) направлений, и полученные результаты показали хорошее согласие с независимыми наблюдениями [7].

5. Заключение

Конференция «Современная звездная астрономия — 2019» проводилась 7–11 октября 2019 г. в САО РАН и была десятой конференцией этого цикла. Предыдущие конференции проводились в ГАИШ МГУ (Москва), ГАО РАН (Санкт-Петербург), ЮФУ (Ростов), КГО МГУ (Кисловодск), УрФУ (Екатеринбург), ИНАСАН (Москва).

Результаты, представленные на конференции, отличались новизной, оригинальностью и актуальностью, а доклады вызвали большой интерес у аудитории, что нашло отражение в большом количестве вопросов, заданных докладчикам, и в бурных дискуссиях в кулуарах. Очевидно, линейка конференций «Современная звездная астрономия» будет продолжена.

Организаторы конференции благодарят руководство Специальной астрофизической обсерватории РАН за теплый прием и хорошие условия для проведения конференции.

Список литературы

- 1. O. Y. Malkov, Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.
- 2. A. Kniazev, O. Malkov, I. Katkov, and L. Berdnikov, Research in Astronomy and Astrophysics, 20, in press, 2020.
- 3. D. N. Nurtdinova, V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and E. N. Irtuganov, Astronomical and Astrophysical Transactions, **32**, in press, 2020.
- 4. O. V. Kiyaeva, R. Y. Zhuchkov, and I. S. Izmailov, Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.
- A. A. Fedoteva, A. M. Tatarnikov, B. S. Safonov, V. I. Shenavrin, and G. V. Komissarova, Astronomy Letters, 46, 38, 2020.
- 6. I. N. Nikonorov and R. Y. Zhuchkov, Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.
- 7. O. Malkov, D. Kovaleva, S. Sichevsky, and G. Zhao, Research in Astronomy and Astrophysics, 20, in press, 2020.

Современные проблемы астрономии: Галактика и галактики

Поляченко Е.В.¹, Самусь Н.Н.^{1,2}, Малков О.Ю.¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. Штернберга, Москва, Россия

Авторы представляют серию аналитических обзоров современного состояния проблем звездной астрономии. Данная статья посвящена анализу вопросов, связанных с исследованием нашей Галактики Млечный путь и других галактик. Обзор преимущественно базируется на докладах, сделанных на конференции «Современная звездная астрономия» (САО РАН, октябрь 2019 г.).

Modern problems of astronomy: Milky Way Galaxy and other galaxies

Polyachenko E.V.¹, Samus N.N.^{1,2}, Malkov O.Yu.¹

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

We provide a series of analytic reviews of problems of the modern stellar astronomy. It is mostly based on talks presented at the tenth annual conference on Modern Stellar Astronomy, held in Special Astrophysical Observatory of the RAS in Oct 2019. The key topic of this paper is study of structure, kinematics and dynamics of Milky Way Galaxy and other galaxies.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.003

1. Введение

В данной работе представлен аналитический обзор современных задач, стоящих перед звездной астрономией. Он создан, преимущественно, по материалам докладов, представленных на десятой конференции из цикла «Современная звездная астрономия». Она была проведена 7–11 октября 2019 г. в САО РАН. Помимо САО РАН, организаторами конференции выступили ГАИШ МГУ, ИНАСАН и Астрономическое общество.

Сайт конференции: https://www.sao.ru/hq/lsfvo/MSA2019/index.html.

Обзор разбит на следующие разделы: «Строение, кинематика и динамика Галактики», «Галактики», «Динамика гравитирующих систем». В последнем разделе приведены заключительные замечания.

2. Строение, кинематика и динамика Галактики

Доклады, представленные в этой секции, были посвящены широкому кругу вопросов, касающихся динамики Галактики и отдельных ее подсистем, химического состава, свойств межзвездной среды и др.

На основе данных космического телескопа Gaia DR2 и полученных ранее трехмерных карт поглощения Г.А. Гончаров и А.В. Мосенков (ГАО РАН) предложили уточненную модель пространственного распределения пыли в окрестности Солнца. Модель предполагает наличие двух пересекающихся слоев пыли, лежащих в плоскости Галактики и в поясе Гулда. В облачных комплексах Скорпиона-Змееносца-Стрельца и Персея-Тельца-Ориона вклад пояса Гулда в покраснение сравним со вкладом экваториального слоя пыли. Предложенная модель дает весьма точные оценки в средних и высоких широтах ($|b| > 25^{\circ}$) и в радиусе 200 пк от Солнца. Для выборки гигантов определены нормальные цвета и их вариации в зависимости от высоты. Найдено не зависящее от модели довольно большое покраснение сквозь весь слой пыли в направлении галактических полюсов.

В докладе П.Б. Иванова, В.Н. Лукаша, С.В. Пилипенко и М.С. Пширкова (АКЦ ФИАН) обсуждается возможность обнаружения аккрецирующих изолированных черных дыр звездной массы в центре Галактики с помощью космических миссий «Миллиметрон» и «Джеймс Уэбб». На основе простой полуаналитической модели формирования спектра излучения в субмиллиметровой и инфракрасной области изолированной аккрецирующей черной дыры звездной массы за счет синхротронного излучения было показано, что эта возможность существенно зависит от отношения величины темпа аккреции к значению Бонди-Хойла-Литтлтона.

А.Т. Байкова и В.В. Бобылев (ГАО РАН) исследуют возможность формирования рассеянных звездных скоплений и звездных ассоциаций при пролете шаровых скоплений сквозь галактический диск. На основе данных каталога Gaia DR2 и численного моделирования орбит шаровых скоплений были выявлены девять подобных эпизодов [1].

А.В. Веселова и И.И. Никифоров (СПбГУ) обращают внимание на то, что параметры сегментов спиральных рукавов Галактики, определенные по классическим цефеидам, существенно зависят от их возраста. Так, для рукавов Стрельца-1, Стрельца-2 и Местного обнаружено значимое различие углов закрутки, а для рукава Стрельца-2 и рукава Персея — значимое различие положений точек пересечения сегментами направления на центр Галактики. Результаты моделирования показывают, что наблюдаемые зависимости могут быть объяснены только при учете радиальной компоненты скорости возмущения от спиральной волны.

В.В. Бобылевым и А.Т. Байковой (ГАО РАН) по литературным данным была составлена выборка рассеянных звездных скоплений с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2. На ее основе уточняются параметры вращения Галактики и спиральной волны плотности. Показано, что помимо вращения вокруг галактической оси z, имеется значимое ненулевое вращение всей выборки вокруг оси x с угловой скоростью 0.48 ± 0.15 км/с/кпк [2].

М.Л. Гожа, В.А. Марсаков и В.В. Коваль (ЮФУ) исследуют химический состав в атмосферах переменных звезд типа RR Lyr галактического поля. Показано, что относительные содержания титана, скандия и иттрия в лиридах, богатых металлами, меньше, чем в звездах поля аналогичной металличности. Обсуждаются ошибки определения перечисленных химических элементов. Отмечается, что все эти переменные принадлежат по кинематике либо к тонкому, либо к толстому дискам Галактики [3].

Химическая неоднородность толстого диска нашей Галактики обсуждается в докладе В.А. Марсакова, В.В. Коваль и М.Л. Гожи (ЮФУ). На основе анализа зависимости [α /Fe] от [Fe/H] у шаровых скоплений, переменных типа RR Lyr поля и близких F-G-звезд поля сделан вывод о том, что в толстом диске можно различить по крайней мере три компонента. Самый старый — это металличные шаровые скопления, которые образовались из единого протогалактического облака вскоре после начала вспышек в нем сверхновых типа Ia. Другой компонент состоит из звезд поля тонкого диска. Он образовался при взаимодействии с довольно массивной карликовой галактикой-спутником. Третья подсистема состоит из звезд этой захваченной галактики-спутника [4].

И.И. Никифоров и А.В. Веселова (СПбГУ) обсуждают прогресс в определении галактоцентрического радиуса Солнца и в особенности недавние успехи проекта GRAVITY. Показывается, что при современных оценках остаточной скорости центральной черной дыры не исключены ее осцилляции в регулярном поле в плоскости Галактики на масштабе 10–20 пк, однако существенные вертикальные осцилляции представляются маловероятными.

В докладе В.И. Корчагина, А.В. Хоперскова и С.С. Храпова (ЮФУ) исследуются свойства спиральной структуры Галактики. В полученных ими численных моделях диска Галактики спустя примерно один млрд. лет формируется бар с длиной большой полуоси около 3 кпс. Вне бара развивается многорукавный спиральный узор, который может быть представлен как суперпозиция 2-, 3- и 4-рукавных неустойчивых спиральных мод. На поздних стадиях эволюции выживает 3- и 4-рукавный спиральный узор, который прослеживается на протяжении более трех млрд. лет.

А. Громов и И.И. Никифоров (СПбГУ) обсуждают ряд вопросов, связанных с применением штеккелевских потенциалов для построения реалистичных моделей Галактики. Представленная ими ранее модель обладала неправдоподобным вертикальным распределением плотности. Для решения данной проблемы предлагается несколько подходов. С целью нахождения потенциала в плоскости Галактики предложен и применен метод разделения мазеров на две группы, каждая из которых характеризуется своей природной дисперсией скоростей.

Используя новейшие спектроскопические данные о содержании кислорода и железа в цефеидах, Р.В. Ткаченко и Ю.Н. Мишуров (НИИ физики ЮФУ) получили усредненные радиальные распределения этих элементов вдоль Галактического диска. Вопреки тому, что эти элементы имеют разные источники, они показывают очень похожие радиальные распределения, основной особенностью которых является протяженное плато в области 7–9 кпк. Авторами представлена модель нуклеосинтеза в галактическом диске, которая объясняет наблюдаемые распределения химических элементов. Нетривиальное радиальное распределение указанных элементов связывается с влиянием коротационного резонанса и турбулентной диффузии. Разработанный статистический метод позволяет оценить средние массы выбросов элементов от разных источников и их процентный вклад в химическую эволюцию галактического диска.

В.А. Усик, И.И. Никифоров и А.В. Веселова (СПбГУ) доложили результаты совместного моделирования вертикальной структуры дисковой галактической подсистемы и средней поверхности диска Галактики с учетом природной и измерительной дисперсий, на основе каталога классических цефеид. Показано, что локальная (по малой окрестности Солнца) и нелокальная оценки смещения Солнца относительно средней поверхности диска Галактики оказываются близки. Однако нелокальная оценка вертикального стандартного отклонения цефеид значимо отличается от локальной, что ставит вопрос о необходимости учета случайных ошибок расстояний, использования более сложных моделей вертикального распределения вне окрестности Солнца, возможной зависимости дисперсии от расстояния до центра Галактики.

Н.Н. Бурсов, С.А. Трушкин, П.Г. Цыбулев, Н.А. Нижельский и А.А. Кудряшова (САО РАН) исследовали радиоисточники на частоте 4.7 ГГц на склонении Крабовидной туманности по наблюдениям, полученным на РАТАН-600. Радиоисточники отождествлены с источниками радиокаталогов базы данных CATS¹,

¹cats.sao.ru

и по этим данным построены их спектры. По известным оптическим и инфракрасным каталогам большинство источников были отождествлены с галактиками и квазарами. На РАТАН-600 впервые в режиме быстрой радиометрии были обнаружены несколько гигантских импульсов (до 100 Ян) от пульсара PSRJ0534+22 в Крабовидной туманности.

С.В. Жуйко, Н.Д. Уткин, А.А. Чемель и А.К. Дамбис (ГАИШ МГУ) уточнили собственные движения нескольких наиболее слабых и далеких высокоскоростных звезд и характер их кинематики в гравитационном поле Галактики. Были построены пучки возможных орбит звезд в Галактическом поле и оценена вероятность их происхождения из области Галактического центра.

Н.О. Буданова, А.Т. Байкова, В.В. Бобылев и В.И. Корчагин (НИИ физики ЮФУ, ГАО РАН) исследовали химический состав подсистем шаровых скоплений Галактики. Кинематические свойства скоплений позволяют отчетливо выделить три подсистемы: бар-балдж, гало, и диск Млечного Пути. Среднее значение металличности дисковой подсистемы равно [Fe/H] = -0.96 ± 0.11 dex и имеет статистически значимое отличие от металличности объектов гало [Fe/H] = -1.58 ± 0.05 dex. Среднее значение химсостава объектов, входящих в область бара-балджа, равно [Fe/H] = -0.95 ± 0.08 dex, что статистически неотличимо от средней металличности шаровых скоплений диска. Разделение объектов гало на объекты, вращающиеся в сторону вращения диска Млечного Пути и в противоположном направлении, не обнаруживает статистически значимых различий в их химических составах, что указывает на ошибочность предположения о различной природе проградных и ретроградных шаровых скоплений гало [5].

3. Галактики

Доклады, представленные в этой секции, были посвящены широкому кругу вопросов, касающихся исследования активных ядер галактик, формирования баров, методик определения параметров спиральных узоров, механизма динамо и др.

Д.В. Козлова, А.В. Моисеев и А.А. Смирнова (УрФУ и САО РАН) доложили результаты наблюдений протяженных эмиссионных облаков в сейфертовской галактике Mrk 78, выполненных на телескопе БТА методами длиннощелевой и 3-D спектроскопии. Было показано, что обнаруженные на расстоянии 12–16 кпк от ядра два газовых облака, лежащие вне плоскости звездного диска, ионизированы излучением активного ядра галактики. Полученный на 6-м телескопе спектр галактики, расположенной на оптических изображениях в непосредственной близости от обнаруженных газовых облаков, указывает на то, что это далекая галактика фона с красным смещением z = 0.38.

Исследованию активных ядер галактик (АЯГ) был посвящен доклад Е.А. Малыгина, Р.И. Уклеина, Е.С. Шабловинской, Е.А. Перепелицына и А.А. Гроховской (К(П)ФУ и САО РАН). Метод фотометрического эхокартирования в среднеполосных фильтрах, адаптированный для наблюдений на 1-м телескопе Цейсс-1000 САО РАН, был применен к АЯГ с широкими линиями в диапазоне красных смещений 0.1 < z < 0.8. В докладе представлено описание методов наблюдений и обработки данных, приведена выборка объектов с демонстрацией стабильности используемого метода.

Сообщение Е.С. Шабловинской и В.Л. Афанасьева (САО РАН) было посвящено радиоисточнику S5 0716+714, обладающему рядом уникальных характеристик. Были представлены результаты 9-часового поляриметрического мониторинга этого объекта с 70-секундным разрешением, выполненного на 6-м телескопе БТА САО РАН. Анализ наблюдательных данных выявил внутрисуточную переменность интегрального и поляризованного потока на характерных временах порядка 1.5 часов. Представленная численная модель поляризации в джете с прецессирующей спиральной структурой магнитного поля согласуется как с полученными наблюдательными данными, так и с результатами других авторов.

Е.А. Михайлов и В.В. Пушкарев (МГУ) доложили о механизме динамо генерации магнитных полей в галактиках. Стандартное планарное приближение оказывается недостаточным при изучении объектов, для которых существенна вертикальная структура поля. В связи с этим предлагается использовать RZ-модель, которая учитывает зависимость от расстояния до экваториальной плоскости. В ходе исследования были получены критические значения динамо чисел для галактик с большой полутолщиной диска, построены характерные зависимости магнитного поля от координат. Показано, что в отличие от планарного приближения, принципиально возможна генерация полей дипольной симметрии.

Н.Я. Сотникова, И.А. Тихоненко и А.А. Смирнов (СПбГУ) исследовали орбитальный состав линзовидных и ящикообразных баров в дисковых галактиках. На основе выполненных ими расчетов задачи N-тел моделей дисковых галактик были проанализированы основные орбитальные частоты и резонансные орбиты. Это позволяет выявить регулярные орбиты, связать их с морфологией бара и объяснить почему именно эти орбиты доминируют в данной многокомпонентной модели.

Определению параметров спиральных узоров на основе многополосной фотометрии посвящен доклад A.B. Мосенкова (ГАО РАН). В основе анализа лежит аппроксимация фотометрических срезов, выполненных поперек спиральных ветвей, аналитической функцией и извлечение параметров спиралей из полученных параметров аппроксимации (ширины спиральных ветвей, асимметричности, угла закрутки). Алгоритм применен к выборке из 173 галактик, отобранных из обзора SDSS в разных фотометрических полосах. Для 28 хорошо разрешенных галактик определены искомые параметры спиралей для большого набора полос — от УФ до субмиллиметровой области спектра. Построены корреляции параметров спирального узора от глобальных параметров галактик и параметров декомпозиции на отдельные фотометрические компоненты (диск, балдж, бар, активное ядро) [6].

В докладе А.А. Марчука, С.С. Савченко и А.В. Мосенкова (ГАО РАН) был предложен новый метод определения радиусов коротаций для галактик, параметры спирального узора которых были получены из анализа фотометрических срезов изображений SDSS поперек спиральных ветвей. В основе метода лежит сравнение внутренней и внешней полуширины рукава на различном расстоянии от центра галактики. Для ряда случаев показано, что найденные с применением предложенного метода радиусы коротации согласуются с известными значениями, полученными классическими методами (метод Tremaine-Weinberg и Font-Beckman), однако предлагаемый метод оказывается более простым в реализации и может быть применен к изображению спиральной галактики только в одном оптическом фильтре.

П.А. Усачев, В.П. Решетников и С.С. Савченко (ГАО РАН и САО РАН) сделали обзор далеких галактик, видимых с ребра, с целью наблюдательной проверки теоретических утверждений о росте дисков в ходе их эволюции. Показано, что при z < 1 вертикальная шкала звездных дисков галактик не показывает заметных изменений. Получены свидетельства в пользу дифференциальной эволюции радиальных шкал: яркие спиральные галактик на $z \sim 1$ выглядят укороченными по сравнению с близкими объектами, галактики малой светимости не показывают признаков эволюции. Для галактик с абсолютной звездной величиной $M_B < -18.5$ наблюдаемое изменение вертикального масштаба может быть описано законом $(1 + z)^{-1}$ [7].

Сообщение А.А. Смирнова и Н.Я. Сотниковой (СПбГУ) посвящено численному моделированию баров спиральных галактик с вертикальной асимметрией. Представлены результаты моделирования для 14 моделей с различными параметрами дисков и классических балджей. Показано, что наличие в галактике классического балджа малой массы, B/D = 0.1, приводит к совершенно симметричной эволюции бара практически независимо от начальных параметров звездного диска. Бары во всех моделях, где балдж отсутствует или имеет меньшую массу ($B/D \le 0.05$), теряют вертикальную симметрию, причем дважды. Данные расчеты показывают, что классические балджи и центральная концентрация газа могут быть главными причинами малой встречаемости асимметричных баров в локальной Вселенной.

В докладе Д.А. Захаровой, Н.Я. Сотниковой, А.А. Смирнова и С.С. Савченко (СПбГУ) обсуждаются условия, при которых образование баров в дисковых галактиках затруднено. Для ряда галактик получены оценки массы темного вещества в пределах четырех масштабов экспоненциального звездного диска. В галактиках NGC 2841, NGC 3521, NGC 5055 и NGC 7331 она оказалась равной или несколько меньше массы барионного вещества. Численное моделирование показывает, что в этом случае заметный бар не образуется, если у галактики нет балджа. На конечных этапах эволюции модели можно заметить лишь небольшое овалоподобное искажение изофот.

Доклад Н.А. Тихонова (САО РАН) был посвящен методике поиска ярчайших звезд в галактиках за пределами местной группы. В качестве исходного материала использовались снимки космического телескопа Хаббл. Отобранные объекты с большой степенью вероятности являются молодыми массивными звездами. Предполагается их дальнейшие спектральные исследования.

Фотометрическим и спектральным исследованиям сейфертовских галактик NGC 4151 и NGC 7469 был посвящен доклад С. Шомшековой, Э.К. Денисюка, Р.Р. Валиуллина, А.В. Кусакина, И.В. Ревы и М.А. Кругова (Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Казахстан). Фотометрические наблюдения проводились в фильтрах B, V, R. Получены оценки блеска и построены кривые блеска [8]. На основе спектральных наблюдений измерены абсолютные потоки излучения в эмиссионных линиях Hα, [NII], [SII].

4. Динамика гравитирующих систем

Доклады, представленные в этой секции, были посвящены широкому кругу вопросов, касающихся исследования скоплений галактик, нелинейных механизмов формирования галактик, их спиральных структур и др.

Используя наблюдательные данные о кривой вращения и дисперсии скоростей, Р.В. Золотарёв, В.И. Корчагин, Б.Б. Жмайлов и Р.Р. Дибиров (ЮФУ) проводят численное моделирование бесстолкновительной динамики диска галактики NGC 1566. Произведен ряд расчетов с применением технологии параллельных вычислений на графических процессорах (CUDA). Выполнено сравнение с наблюдаемыми морфологией спиральной структуры галактики и угловой скоростью вращения ее спирального узора [9].

Ф.А. Копылова и А. И. Копылов (САО РАН) доложили об исследованиях пекулярных движений скоплений галактик в областях сверхскоплений Corona Borealis, Bootes, Z5029/A1424, A1190, A1750/ A1809. По данным SDSS каталога определены пекулярные движения 57 скоплений и групп галактик в областях сверхскоплений галактик и в поле. В сверхскоплениях наблюдаются значительные пекулярные движения вдоль луча зрения. Оценена средняя пекулярная скорость всей выборки относительно СМВ [10]. В сообщении А.А. Муминова, С.Н. Нуритдинова и Ф.У. Ботирова (НУ Узбекистана) обсуждаются особенности принудительного фазового перемешивания в нестационарных динамических системах, частным случаем которого является бурная релаксация Линден-Белла, и его применение в космогонии сверхскоплений галактик. В рассматриваемой модели ранней стадии эволюции Вселенной материя находится в турбулентном состоянии и выделенный объем испытывает случайные воздействия. Показано, что статистический эффект случайных воздействий приводит к формированию плоской, дискообразной системы, что вероятно может в какой-то мере иметь отношение к формированию сверхскоплений галактик.

Доклад Ж.М. Ганиева и С.Н. Нуритдинова (НУ Узбекистана) посвящен анализу мелкомасштабных возмущений на фоне нелинейных нестационарных моделей дискообразных самогравитирующих систем. Получены дисперсионные уравнения конкретных мелкомасштабных мод возмущений для одной известной пульсирующей модели диска с анизотропной диаграммой скоростей. Для них построены критические диаграммы «вириальный параметр — степени вращения» и вычислены соответствующие инкременты нарастания неустойчивости.

К.Т. Миртаджиева (Астрономический институт АН РУз) и К.А. Маннапова (НУ Узбекистана) исследуют роль темной материи гало в эволюции нестационарных дисков спиральных галактик. Показано, что в случае неравновесного диска бар-мода не является главной неустойчивостью на ранней стадии эволюции. Представлена и исследуется нелинейно пульсирующая модель диска в присутствии пассивного эллипсоидального гало однородной плотности.

В докладе Ю.М. Торгашина (ИНАСАН) обсуждается влияние радиальных градиентов поверхностной плотности на формирование крупномасштабных структур в газовом диске галактики со скачком скорости на кривой вращения. В результате развития неустойчивости могут формироваться как регулярные спирали, так и псевдо-кольцевые структуры. Исследовано влияние сильной неоднородности равновесной поверхностной плотности на возбуждение неустойчивых мод. Характерные времена формирования структур оказываются порядка 1 млрд. лет.

5. Заключение

Конференция «Современная звездная астрономия — 2019» проводилась 7–11 октября 2019 г. в САО РАН и была десятой конференцией этого цикла. Предыдущие конференции проводились в ГАИШ МГУ (Москва), ГАО РАН (С-Петербург), ЮФУ (Ростов), КГО МГУ (Кисловодск), УрФУ (Екатеринбург), ИНАСАН (Москва).

Результаты, представленные на конференции, отличались новизной, оригинальностью и актуальностью, а доклады вызвали большой интерес у аудитории, что нашло отражение в большом количестве вопросов, заданных докладчикам, и в бурных дискуссиях в кулуарах. Очевидно, линейка конференций «Современная звездная астрономия» будет продолжена.

Организаторы конференции благодарят руководство Специальной астрофизической обсерватории РАН за теплый прием и хорошие условия для проведения конференции.

Список литературы

- 1. A. T. Bajkova and V. V. Bobylev, MNRAS, 488, 3474, 2019.
- 2. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astronomy Letters, 45, 208, 2019.
- 3. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.
- 4. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, and V. V. Koval', Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.
- 5. N. O. Budanova, A. T. Bajkova, V. V. Bobylev, and V. I. Korchagin, Astronomy Reports, 63, 998, 2019.
- 6. A. Mosenkov, S. Savchenko, and A. Marchuk, arXiv e-prints, arXiv:2003.13994, 2020.
- 7. P. A. Usachev, V. P. Reshetnikov, and S. S. Savchenko, Research in Astronomy and Astrophysics, 20, in press, 2020.
- 8. S. A. Shomshekova, E. K. Denissyuk, R. R. Valiullin, A. V. Kusakin, I. V. Reva, and M. A. Krugov, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **20**, in press, 2020.
- 9. R. V. Zolotarev, V. I. Korchagin, B. B. Jmailov, and R. R. Dibirov, Astronomical and Astrophysical Transactions, **32**, in press, 2020.
- 10. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, Astronomical and Astrophysical Transactions, 32, in press, 2020.

Предложения по выбору структуры и состава системы контроля геодезических параметров Земли

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Российский сегмент системы контроля геодезических параметров Земли (ГПЗ) должен будет использовать (а также расширить) текущее созвездие спутников, имеющих отношение к задачам и целям системы, и миссий, запланированных на следующие десятилетия, интегрируя их в одну систему наблюдений. Фундаментом для этой интеграции являются существующие глобальные наземные сети станций слежения различных космических геодезических технологий: интерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), спутниковой лазерной дальнометрии (СЛД), лунной лазерной дальнометрии (ЛЛД), глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и доплеровской системы DORIS. Система контроля ГПЗ должна объединить эти сети слежения с наземными гравиметрическими сетями. Система контроля ГПЗ дополнит космический сегмент и глобальную наземную сеть воздушно-наземными кампаниями с целью калибровки и валидации системы, регионального уплотнения и уточнения параметров системы. Ассимилирование этих наблюдений в модели погоды, климата, океанологии, гидрологии, изучения льдов и процессов в твердой Земле фундаментально увеличит понимание роли поверхностных изменений и динамики развития нашей планеты. Кроме того, через одновременный анализ плотной сети микроволновых измерений спутниками ГНСС, низкоорбитальных аппаратов (HOA) и земных поверхностных измерений появляется новая мощная техника зондирования состава атмосферы. Система контроля ГПЗ будет иметь два совершенно разных аспекта: (1) «организационный аспект», связанный с созданием таких компонентов, как руководящий комитет, научные группы, рабочие группы, и т.д., и (2) «комплекс наблюдательных средств системы контроля ГПЗ», включающая инфраструктуру различных типов аппаратуры, спутниковых миссий, и центров данных и анализа. В статье рассмотрены предложения, выдвинутые автором, по выбору структуры и состава системы контроля ГПЗ.

Suggestions for choosing the structure and composition of the system for monitoring geodetic parameters of the Earth

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Russian segment of the system for monitoring geodesic parameters of the Earth (GPE) as a system will have to use (and expand) the current constellation of satellites related to the tasks and goals of the system, and missions planned for the next decades, integrating them into a single observation system. The foundation for this integration is the existing global ground-based tracking station networks of various space geodesic technologies: very long base interferometry (VLBI), satellite laser ranging (SLR), lunar laser ranging (LLR), global navigation satellite systems (GNSS), and the DORIS Doppler system. The system for monitoring GPE should combine these tracking networks with ground-based gravimetric networks. The system for monitoring GPE will complement the space segment and the global ground network with air and ground campaigns to calibrate and validate the system, regional densification, and refinement system parameters. Assimilating these observations into models of weather, climate, oceanology, hydrology, and the study of ice and processes in the solid Earth will fundamentally increase understanding of the role of surface changes and the dynamics of our planet's development. In addition, through simultaneous analysis of a dense network of microwave measurements GNSS satellites, low-earth orbiters (LEO) and earth surface measurements are developing a new powerful technique for sensing the composition of the atmosphere. The system for monitoring GPE will have two completely different aspects: (1) the "organizational aspect" related to the establishment of components such as a steering committee, scientific groups, working groups, etc., and (2) "the system for monitoring GPE itself", which includes infrastructure for various types of equipment, satellite missions, and data and analysis centers. The article discusses proposals suggested by the author for choosing the structure and composition of the system for monitoring GPE.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.004

1. Введение

Российский сегмент системы контроля ГПЗ будет состоять из многоуровневой инфраструктуры, охватывающей наземные сети наблюдений, искусственные спутники Земли, инфраструктуру на Луне и квазары. Наземная инфраструктура включает в себя не только глобальные сети нескольких геометрических и гравиметрических технологий, но также многочисленные центры данных, аналитические центры и веб-службы, необходимые для определения и поддерживания опорных систем координат, а также для доступности данных системы контроля ГПЗ для широкого круга пользователей и их приложений. В настоящее время большинство российских спутниковых геодезических сетей входят в соответствующие конкретной технологии международные службы.

Несмотря на значительные международные усилия, принимаемые в настоящее время, большинство сетей по-прежнему характеризуются пространственно-неравномерными распределениями и, следовательно, имеют большие пробелы в охвате поверхности Земли. Для некоторых методов, таких как спутниковая лазерная локация, пространственные разрывы велики, что значительно ограничивает достижимую спутниковы-

ми лазерными технологиями точность. Особое значение имеют станции, на которых расположены несколько наблюдательных технологий (колокация), что позволяет интегрировать продукты данных технологий в единой, согласованной системе координат. В данное время требуется около 40 равномерно-распределенных базовых (core) станций, т.е. станций с тремя или более различными космическими геодезическими технологиями, расположенными совместно [1]. Сейчас в Южном полушарии наблюдается большая нехватка лазерных станций. Без ликвидации этого зазора многие из самых требовательных пользователей системы контроля ГПЗ не будут получать продукты необходимой точности [2]. Спутниковые сети системы контроля ГПЗ будут состоять из низкоорбитальных спутников (гравиметрические и альтиметрические миссии), спутников, оснащенных лазерными отражателями (типа LAGEOS) и космических аппаратов ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы). Низкоорбитальные спутники обеспечивают наблюдения, связывающие перемещения масс и поверхностных движений твердой Земли, льдов и океанов. Непрерывность измерений является ключевым вопросом инфраструктуры. Спутники с лазерными отражателями необходимы для определения связи системы координат с центром масс Земли (геоцентром), что является обязательным требованием для изучения глобальных процессов. Эти спутники имеют очень длительные времена жизни, но их количество довольно мало. Сигналы от спутников ГНСС должны обеспечивать основу перспективной системы контроля ГПЗ и являются «рабочей лошадью» системы. В настоящее время более 400 станций ГНСС, которые расположены в более чем 80-ти странах мира, позволяют осуществлять точный мониторинг глобальной системы отсчета и доступ к системе отсчета в любое время и в любом месте на Земле. Без свободно доступа к сигналам ГНСС впечатляющее развитие геодезии за последние два десятилетия было бы невозможным. Сегодня средства слежения за Луной состоят из лазерных лунных отражателей, которых также недостаточно для построения лунной системы координат. Радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ) использует радиосигналы, излучаемые квазарами, и обеспечивают уникальные наблюдения, которые особенно важны для мониторинга параметров вращения Земли (ПВЗ). ПВЗ обеспечивают связь между небесной (ICRF) и земной (ITRF) системами отсчета. На самом деле, РСДБ измерения являются единственным космическо-геодезическим методом, способным одновременно контролировать ITRF, ICRS и вращение Земли. Более того, в отличие от других космических геодезических методов, РСДБ определяет масштаб ITRF, прямо отслеживающий скорость света, который необходим для различных долгосрочных целей системы контроля ГПЗ, включая изменения в глобальной гидрологии и повышения уровня моря. Наблюдения с помощью наземных гравиметров, как абсолютных, так и относительных, обеспечивают основы для изучения многих геофизических явлений, в том числе свободных колебаний Земли, твердых земных и океанских приливов, поверхностной нагрузки, изменений в ледовых щитах и уровне моря. Абсолютная гравиметрия, совмещенная с геометрическими методами, является технологией, поддерживающей SLR измерения, в наложении ограничений между началом системы отсчета и центром масс Земной системы.

2. Структура и состав системы контроля ГПЗ

Предлагаемая автором система контроля ГПЗ, основанная на рекомендациях международной глобальной системы наблюдений (GGOS) [2] будет иметь пять основных уровней оборудования и объектов наблюдений, которые либо активно выполняют наблюдения, либо пассивно наблюдаются, либо наблюдают и наблюдаются:

- Уровень 1: наземная геодезическая инфраструктура;
- Уровень 2: низкоорбитальные спутниковые миссии (LEO);
- Уровень 3: спутники GNSS и спутники типа Lageos;
- Уровень 4: планетарные миссии и геодезическая инфраструктура на планетах;
- Уровень 5: внегалактические объекты.

Перечисленные пять уровней вне зависимости от того, являются ли средства, используемые в них, активными или пассивными, передатчиками, приемниками или приемопередатчиками, связаны между собой многими типами измерений для формирования интегрированной геодезической наблюдательной системы. Предложенная комбинированная инфраструктура системы контроля ГПЗ позволяет определение и поддержание глобальных геодезических систем отсчета и определение гравитационного поля Земли и ее вращения.

Задачи, стоящие перед системой контроля ГПЗ, обуславливают включение в нее следующих основных компонентов:

 центры наземных средств наблюдений, специфические для каждой космической геодезической технологии, которые производят сбор, предварительный анализ измерительных данных и выработку уникальных продуктов для каждой технологии;



Рис. 1: Предлагаемая структурная схема системы контроля ГПЗ, учитывающая рекомендации международной глобальной системы наблюдений [2].

2. организации, комбинирующие продукты отдельных космических геодезических технологий для получения объединенных серий продуктов, не зависящих от конкретной специфической технологии;

- 3. органы, предлагающие космические геодезические миссии (или проекты, связанные с геодезией) в сотрудничестве с заинтересованными ведомствами и международными организациями для осуществления непрерывных геодезических миссий по наблюдению за изменяющимся со временем гравитационным полем Земли, изменяющимися морской и ледовой поверхностями, а также для поддержки геометрической и гравиметрической опорных систем отсчета;
- 4. орган, ответственный за координацию наблюдательных сетей и систему коммуникации, для разработки, поддержания и совершенствования сети станций системы контроля ГПЗ;
- 5. орган стандартизации, ответственный за определение опорных систем отсчета и геодезических постоянных;
- 6. координирующая организация, ответственная за координацию всех компонентов системы контроля ГПЗ и обеспечивающая связь с потребителями системы.

Структурная схема системы контроля ГПЗ, учитывающая рекомендации международной глобальной системы наблюдений [2], приведена на рис. 1.

3. Заключение

В статье автором предложены структура и состав системы контроля геодезических параметров Земли, которые могут быть рекомендованы для построения российского сегмента GGOS. Приведенные структура и состав системы контроля ГПЗ учитывают рекомендации международной глобальной системы наблюдений. Следует отметить, что предлагаемая структура системы контроля ГПЗ обеспечивает гибкость системы и способность ее изменения для полного удовлетворения запросов пользователей.

Список литературы

- 1. S. P. Kuzin, INASAN Science Proceedings, 5, 137, 2020.
- 2. H. P. Plag and M. Perlman, Global Geodetic Observing System, 1–332, 2009.

Наземные средства измерений системы контроля геодезических параметров Земли и направления их развития

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Наземные средства измерений различных спутниковых технологий космической геодезии являются и будут являться ядром системы контроля геодезических параметров Земли (ГПЗ), вносящим вклад в построение земной системы координат и мониторинг Земли. На наземных станциях системы контроля ГПЗ будет размещено оборудование основных космических геодезических технологий, кроме того, большинство станций наблюдений должны быть оснащены вспомогательными дополнительными датчиками и оборудованием (например, метеорологические датчики, радиометры водяных паров и т.д.), и на многих станциях должны быть расположены приборы различных технологий для обеспечения колокации. Совместное размещение оборудования различных технологий на одной станции (колокация) позволяет не только интеграцию индивидуальных сетей различных технологий в уникально земную систему отсчета (ITRF), но также оценку качества, точности и взаимной проверке результатов. В работе автором предложен набор средств измерений наземной инфраструктуры системы контроля ГПЗ, необходимый для решения технологий и перспективных задач системы контроля ГПЗ и рассмотрены общие направления формирования основных технологий наземной инфраструктуры.

Ground measuring instruments of the system for monitoring geodesic parameters of the Earth and the directions of their development

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Ground-based measuring instruments of various satellite technologies of space geodesy are and will be the core of the system for monitoring geodesic parameters of the Earth (GPE), contributing to the construction of the Earth's coordinate system and to Earth monitoring. The main space geodesic technologies will be installed at the ground stations of the system for monitoring GPE, in addition, most of the observation stations should be equipped with auxiliary additional sensors and tools (for example, meteorological sensors, water vapor radiometers, etc.), and many stations must have devices of various technologies for colocation. The colocation of different technologies allows not only the integration of individual networks of different technologies into a unique terrestrial reference system (ITRF), but also the assessment of quality, accuracy, and mutual verification of the results. The author of the paper proposes a set of measurement tools for the ground infrastructure of the system for monitoring GPE, which is necessary for solving current and future tasks of the system for monitoring GPE and the general directions of the formation the main technologies of ground infrastructure are considered.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.005

1. Введение

Основным элементом системы контроля ГПЗ будет являться сеть всех наземных геодезических станций, вносящая вклад в построение земной системы координат и мониторинг процессов, происходящих на нашей планете. В наземный сегмент системы контроля ГПЗ должны быть включены:

- 1. глобальная сеть РСДБ (радиоинтерферометры со сверхдлинной базой) станций;
- 2. глобальная сеть лазерных станций, лоцирующих спутники и Луну;
- 3. глобальная сеть станций ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы);
- 4. глобальная сеть DORIS станций;
- 5. глобальная сеть сверхпроводящих гравиметров, состоящая из постоянно работающих станций и станций, эпизодически оккупируемых абсолютными гравиметрами;
- 6. глобальная сеть станций измерения приливов;
- 7. глобальная сеть геодезических станций для высокоточной передачи и измерения времени и частоты;
- 8. вспомогательные измерительные средства (метеостанции, радиометры водяных паров и т.д.), которыми должны быть дополнены станции различных технологий.

2. Направления формирования наземного сегмента системы контроля ГПЗ

РСДБ станции и направления их развития

Сеть РСДБ станций системы контроля ГПЗ, предположительно, должна состоять из порядка 40 глобально распределенных станций с одним-двумя телескопами на каждой станции. Эти телескопы должно быть типа VLBI2010 [1]. Система VLBI2010 должна удовлетворять следующим критериям: низкая стоимость конструкции, низкая стоимость работы, быстрые анализ и доставка окончательных результатов. Для этого центральным элементом новой системы станет малогабаритная антенна наблюдательной системы (диаметр тарелки порядка 12 м) совместно с глобальными высокоскоростными сетями связи. Более низкая чувствительность малой антенны, в отличие от существующих 20 м антенн, будет компенсирована более высокой скоростью слежения, как минимум 5 градусов/сек, и более высокой скоростью регистрации наблюдательных данных (8–16 Гбит/с и выше), что позволит иметь гораздо больше наблюдений для обработки. Наблюдения будут выполняться в широком, непрерывном диапазоне частот 2–18 ГГц, позволяющем ограничение любой радиочастотной интерференции. Следует отметить неравномерное распределение РСДБ станций на поверхности Земли. РСДБ станции отсутствуют на территориях Африки, Южной Америки и Азии. Для решения задачи построения глобальной земной системы координат с точностью определения наземных пунктов на уровне 1 мм [2] необходимо скорейшее разрешение указанного недостатка распределения пунктов РСДБ.

Лазерные станции наблюдения спутников и Луны и направления их развития

Поскольку сеть лазерных станций должна обеспечивать стабильность начала земной системы координат на уровне порядка 1 мм на десятилетнем интервале [2], такая сеть должна состоять из 30–40 глобально распределенных пунктов, оснащаться измерительными системами четвертого поколения с высокой частотой излучения сигналов $(10^2 - 10^3 \ {\Gamma} \mu)$, детекторами с более высокой квантовой эффективностью (лавинными фотодиодами, квадрантными фотоумножителями, пикселизированными детекторами), а также обеспечивать более короткие временные интервалы между измерениями при повышенном уровне автоматизации работы. Сеть лазерных станций должна обеспечивать: передачу потоков данных в реальном масштабе времени, централизованный контроль работоспособности станции, улучшенную калибровку и диагностику. Более высокая частота измерений будет способствовать более быстрому проведению спутниковых измерений и улучшенному чередованию наблюдаемых спутников. Передача данных в масштабе реального времени улучшит текущий цикл доступности измерительной информации с 1 до 2 часов. Многие возможности лазерных систем четвертого поколения в настоящее время уже имеются в действующих лазерных станциях [2]. Несколько лазерных станций (4–5) должны быть оснащены оборудованием для зондирования Луны. Желательно, чтобы «лунные» станции были размещены на различных континентах для получения несмещенной оценки параметров.

Станции ГНСС и направления их развития

Сеть ГНСС станций системы контроля ГПЗ должна состоять из нескольких тысяч ГНСС пунктов. Все станции должны быть оборудованы современными приемниками, отслеживающими все спутники ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, COMPASS и аналогичных навигационных спутниковых систем, находящихся на стадиях разработки). Приемники будут регистрировать все основные кодовые и фазовые измерения на всех несущих частотах. Станции должны иметь равномерное глобальное распределение по поверхности Земли и плотно охватывать все основные тектонические плиты. Основные станции (т.е. станции, расположенные совместно с оборудованием других космических геодезических технологий) должны быть оснащены более чем одним приемником и антенной для разрешения проведения модернизации оборудования без потери точности и непрерывности временных рядов измерений. Все РСДБ, лазерные и большинство DORIS станций должны быть оборудованы ГНСС приемниками. Станции должны быть оборудованы каналами передачи данных в режиме реального времени и возможностью сбора данных с частотой дискретизации несколько десятков Гц [2].

DORIS станции и направления их развития

Сеть DORIS станций системы контроля ГПЗ должна состоять из 60–70 станций. Однородное глобальное распределение станций должно охватывать все основные тектонические плиты. Сеть должна обеспечить поддержку текущих спутниковых миссий и планируемых будущих миссий, по крайней мере, до 2030 г. На станциях должны быть установлены радиопередатчики системы DORIS четвертого поколения, или последующие более современные маяки, которые улучшат качество и надежность измерений [3].

3. Предложения по составу наземных измерительных средств системы контроля геодезических параметров Земли

Суммируя проведенный в предыдущем разделе анализ требований к наземным сетям системы контроля ГПЗ, с учетом опыта многолетнего функционирования и рекомендаций международных служб IVS, ILRS, IGS, IDS, IERS, GGOS, автор разработал рекомендации по составу наземных средств наземной инфраструктуры, необходимый для полноценного решения целевых задач системы контроля ГПЗ. Эти предложения могут быть использованы для построения российского сегмента системы GGOS (международная глобальная система геодезических наблюдений). Предлагаемый состав наземного оборудования включает в себя следующие компоненты:

- 1. Сеть, состоящая примерно из 40 глобальных и равномерно распределенных основных станций наблюдения. Эти станции оснащены совместно установленным оборудованием основных геодезических технологий наблюдений и различными дополнительными датчиками. Сеть таких станций является обязательным условием для мониторинга глобальной системы отсчета с точностью 1 мм или лучше на десятилетних временных шкалах. Данные станции будут оснащены следующими инструментами:
 - 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/лунным 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, 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 DORIS 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 гравиметрических спутниковых миссий и определения геоцентра;
 - метеорологическими датчиками для измерения давления, температуры и влажности в окрестностях станции;
 - 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 водяных паров, наклономеры, большие гироскопы, датчики грунтовых вод и др.).
- 2. Сеть РСДБ станций, предположительно состоящая из порядка 40 глобально распределенных станций с одним-двумя телескопами на каждой. Эти телескопы должно быть типа VLBI2010.
- 3. Сеть из 30–40 глобально распределенных лазерных станций, совмещенных с ГНСС, РСДБ станциями, гравиметрами и маяками системы DORIS. Четыре станции (на четырех разных континентах) должны иметь возможность лунной дальнометрии. Все станции лазерной сети должен быть совмещены с ГНСС станциями, и, кроме того, некоторое число станций должно быть оснащено оборудованием других технологий.
- 4. ГНСС сеть из нескольких тысяч станций. Эта сеть будет иметь основополагающее значение для взаимосвязи (путем колокации инструментов) со всеми другими сетями и обеспечивать положение всех датчиков системы контроля ГПЗ в уникальной глобальной системе координат.
- 5. Сеть DORIS из 60–70 глобально распределенных станций, охватывающих все основные тектонические плиты.
- 6. Сеть, состоящая из порядка 30 гравиметрических станций, которые должны быть совмещены с оборудованием основных станций. Каждая из этих станций должна состоять из сверхпроводящего и абсолютного гравиметров, которые непрерывно измеряют ускорение силы тяжести и его временные вариации.

- 7. Постоянная глобальная океаническая сеть донных регистраторов давления в количестве 50–100 датчиков.
- Совместное размещение инструментов различных технологий на одной станции (колокация). Колокация оборудования не должна ограничиваться только космическими геодезическими технологиями, но также включать дополнительные датчики, которые помогают интеграции и комбинированию полученных решений.

4. Заключение

В статье рассмотрен набор средств измерений наземной инфраструктуры системы контроля ГПЗ и показаны направления их развития. С учетом анализа и рекомендаций международных геодезических служб автором предложен состав наземного оборудования системы контроля ГПЗ. Предложенный вариант наземного оборудования может быть использован для построения российского сегмента системы GGOS.

Список литературы

- 1. A. Niell, A. Whitney, B. Petrachenko, W. Schluter, et al., IVS 2005 Annual Report, 13–40, 2006.
- 2. H.-P. Plag and M. Perlman, Global Geodetic Observing System, 1–332, 2009.
- 3. J. Saunier, Advances in Space Research, 58, 2725, 2016.

Результаты наблюдений астероида Дон Кихот в обсерватории Санглох

Кохирова Г.И.¹, Иванова А.В.^{2,3,4}, Рахматуллаева Ф.Д.¹

¹Институт астрофизики Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

²Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранска Ломница, Словацкая Республика

³Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

⁴Астрономическая обсерватория им. Т. Шевченко Киевского национального университета, Украина

В работе представлены результаты многоцветных оптических наблюдений астероида (3552) Дон Кихот, проведенных в Международной астрономической обсерватории Санглох в июле 2018 г. Определен видимый и абсолютный блеск астероида в фильтрах VRI. Анализ кривых блеска астероида показал значительное изменение блеска в период наблюдений от 11.5 до 13.1 абсолютных звездных величин. Зарегистрированная вспышка астероида связана с его активностью, типичной для комет. Полученная оценка эффективного диаметра астероида 18–19 км хорошо согласуются с имеющимися данными. Показано, что объект, очень вероятно, является ядром угасшей кометы. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Results of observations of asteroid Don Quixote at the Sanglokh observatory

Kokhirova G.I.¹, Ivanova A.V.^{2,3,4}, Rakhmatullaeva F.D.¹

¹Institute of Astrophysics of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Astronomical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Tatranska Lomnica, Slovak Republic

³Main astronomical observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

⁴Astronomical Observatory named after T. Shevchenko, Kiev National University, Kiev, Ukraine

The results of the multi-color optical observations of asteroid (3552) Don Quixote, performed at the Sanglokh observatory in July 2018 are presented. The apparent and absolute brightness of the asteroid in the VRI filters was determined. Analysis of the asteroid light curves showed a significant change in brightness — from 11.5 to 13.1 absolute magnitudes during the observation period. Detected outburst of asteroid is due to its activity typical for comets. Estimates of the effective diameter of the asteroid as 18–19 km were obtained that are in good agreement with the available data. It was shown that object very likely is an extinct cometary nucleus. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.006

1. Введение

За последние десятилетия выяснилось, что общепринятое разделение комет и астероидов и по внешним признакам, и по динамическим особенностям не столь однозначно, как подразумевалось ранее. В общепринятую классическую дефиницию не укладываются несколько групп объектов. Среди них — небольшая фракция т.н. «уснувших» или «угасших» комет, имеющаяся среди астероидов, сближающихся с Землей [1, 2, 3]. Это ядра короткопериодических комет, которые в ходе эволюции потеряли все свои летучести или покрылись толстой тугоплавкой корой, полностью или временно предотвращающей сублимацию газов, и в период прохождения перигелия такие ядра уже не проявляют кометной активности [1, 2]. Угасшие кометы могут вновь проявить активность, если в покрывающей их мантии образуются трещины или отверстия вследствие столкновения с другими телом или ударов метеоритов [2]. Другая группа малых тел, выходящих за рамки классического определения, — это объекты переходного класса, расположенные в Главном поясе (ГП) астероидов и названные «кометами Главного пояса» (КГП) [4] или «активными астероидами» (АА) [5]. К настоящему моменту у 20 малых тел Солнечной системы до этого известных как астероиды наблюдалась кометная активность. Астероид, сближающийся с Землей (АСЗ), (3552) Дон Кихот также внесен в список активных астероидов благодаря кометной активности, время от времени проявляемой им в течение последних нескольких лет.

2. Астероид Дон Кихот

Астероид (3552) Дон Кихот, далее 3552, был открыт в 1983 г. Период обращения составляет 8.8 лет, и объект наблюдался в трех появлениях во время прохождения перигелия. Объект классифицируется как астероид группы Амура. Однако, хотя его орбита расположена за орбитой Земли, астероид в перигелии достаточно близко подходит к орбите Земли — до расстояния 0.2 а.е., что позволяет отнести его к астероидам, сближающимся с Землей. Основные орбитальные характеристики астероида¹ приведены в табл. 1, где a — большая полуось, q, Q — перигелийное и афелийное расстояния, e — эксцентриситет, i — наклонение, ω — аргумент перигелия, Ω — долгота восходящего узла, T_j — параметр Тиссерана.

¹https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi, 2019

Таблица 1: Основные параметры астероида (3552) Дон Ки

Объект	a,	e	q,	Q,	$i,^{\circ}$	$\omega,^{\circ}$	$\Omega,^{\circ}$	T_{j}
	a.e.		a.e.	a.e.				
3552	4.249	0.709	1.240	7.278	31.081	316.448	350.003	2.31

Параметр Тиссерана для астероида 3552 имеет значение 2.31 (табл. 1), следовательно, его орбита классифицируется как типичная орбита короткопериодических комет и уже на этой основе можно предположить кометное происхождение объекта. В [6] показано, что диаметр астероида составляет 18.4 км и геометрическое альбедо 0.03. В 2009 г. у объекта в инфракрасном диапазоне впервые была зафиксирована кометная активность в виде небольшой комы и хвоста [6]. В 2017 г. вновь наблюдалась активность астероида 3552, подтвердившая ранее полученные результаты [7]. Только в 2018 г. впервые выявили эпизодическую пылевую активность этого объекта и в оптическом диапазоне². Анализируя результаты наблюдений, сделано заключение, что астероид 3552, действительно, является ядром угасшей кометы, которое вновь проявило активность [6]. Объект 3552 представляет несомненный научный интерес, существует необходимость его дальнейшего изучения для получения неопровержимых доказательств его происхождения. В этой связи целью новых наблюдений астероида 3552 является продолжение анализа его фотометрических характеристик блеска, оценки диаметра, показателей цвета.

3. Наблюдения, обработка, результаты

Для поиска признаков активности 14, 23 и 24 июля 2018 г. нами проведены наблюдения астероида 3552 на телескопе Zeiss-1000, снабженного ПЗС камерой FLI Proline PL16803, в Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики АН РТ. Характеристики телескопа и ПЗС камеры, а также методика первичной обработки кадров приведены в [8]. В наблюдениях использовались стандартные широкополосные фильтры системы Джонсона-Козинса. Дата и время наблюдений астероида в долях суток мирового времени, количество полученных изображений N, время экспозиции t, а также гео- и гелиоцентрические расстояния r, Δ и фазовый угол ph астероида приведены в табл. 2. Фотометрическая обработка наблюдательных данных проводилась с помощью набора программ, написанных под IDL³. Для определения видимого блеска астероида были использованы звезды поля, которые предварительно исследовались на переменность. Звездные величины звезд сравнения в фильтрах VRI брались из каталога UCAC4 и NOMAD⁴. Для измерений использовалась апертура от 5″ до 7″ (от 1919 до 2686 км, соответственно). Таким методом были получены кривые видимого блеска астероида 3552 в VRI фильтрах за каждую ночь наблюдений, представленные на рис. 1, где по оси ординат отложены видимых звездных величины ти по оси абсцисс — время наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, даны в табл. 3.

Видимый блеск m астероида 3552 конвертировался в абсолютный H с использованием эмпирической модели и по соотношению, позволяющему более точно описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от 0° до 120°, приведенных в [9, 10]. Средние значения за ночь найденного таким путем абсолютного блеска астероида в фильтре R приведены в табл. 4.

Фотометрические данные (табл. 3, 4, рис. 1) показывают, что 14 июля 2018 г. нами зарегистрирована вспышечная активность астероида. Об этом свидетельствует блеск, измеренный 14 июля, значительно отличающийся и от эфемеридного значения, и от яркости, измеренной 23 и 24 июля. Наиболее близкое

²https://www.cbat.eps.harvard.edu/index.html, 2018

 $^{3} https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL$

⁴https://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html

Таблица 2: Сводка наблюдений астероида (3552) Дон Кихот в обсерватории Санглох

Июль, 2018	r,	Δ ,	$ph,^{\circ}$	$N \times фильтр$	t,
UT	a.e.	a.e.			с
14.92	1.506	1.478	39.8	$30 \times V \ 30 \times R$	60
23.86	1.569	1.465	38.9	$30 \times V \ 30 \times R$	60
				$30 \times I$	
24.86	1.577	1.463	38.8	$30 \times V \ 30 \times R$	60
				$30 \times I$	



Рис. 1: Кривые видимого блеска астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох 14, 23 и 24 июля 2018 г.

к эфемеридной величине значение яркости получено по наблюдениям 24 июля. На основании этого можно сказать, что после вспышки 14 июля яркость астероида падала и в конце наблюдений уже соответство-

Таблица 3: Видимый блеск астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох в июле 2018 г.

Фильтр	14.92	23.86	24.86
V	$15.06 {\pm} 0.12$	$16.52 {\pm} 0.17$	$16.64{\pm}0.18$
R	$14.63 {\pm} 0.10$	$16.19 {\pm} 0.17$	$16.32 {\pm} 0.18$
Ι	_	$15.93 {\pm} 0.16$	$16.21 {\pm} 0.16$

Таблица 4: Абсолютный блеск и диаметр астероида (3552) Дон Кихот

Июль, 2018	$H_R,$	D,	D,
UT	зв.вел.	$\mathbf{K}\mathbf{M}$	KM
14.92	$11.50 {\pm} 0.10$	38 ± 1	
23.86	$13.02 {\pm} 0.18$	19 ± 2	19.0^{*}
24.86	$13.10{\pm}0.18$	18 ± 2	18.4[7]

*https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi

вала эфемеридному блеску. Иными словами, к этому моменту вспышка завершилась. Анализ суммарных изображений астероида 3552 также показал наличие слабой пылевой комы.

Для определения диаметра D астероида 3552 использованы измерения его блеска в фильтре R и следующее соотношение, принятое для оценки размеров астероидов [11]:

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_v} \cdot 10^{0.2H}},\tag{1}$$

где $p_v = 0.03$ — геометрическое альбедо астероида [6]. Найденные таким методом оценки диаметра астероида приведены в табл. 4, где, наряду с нашими данными, приведены уже имеющиеся оценки размера. Как видно, эффективный диаметр, найденный по нашим измерениям 14 июля также указывает на то, что в этот момент астероид находился в состоянии вспышки, и об этой величине можно говорить лишь как об оценке фотометрического диаметра. Яркость объекта значительно возросла за счет вклада излучения комы, образовавшейся в результате вспышки, и отделить этот вклад в процессе измерений не удалось. Оценки диаметра 18 – 19 ± 2.5 км, полученные по фотометрическим данным 23 и 24 июля, оказались более близки к оценкам, имеющимся в базе опубликованных данных. С учетом кривых блеска, можно заключить, что к этому времени кома уже рассеялась, и измеренный блеск астероида приблизился к эфемеридной величине, в результате нами получены более достоверные оценки эффективного диаметра объекта.

4. Заключение

По оптическим наблюдениям астероида (3552) Дон Кихот 14 июля 2018 г. зарегистрирована вспышка яркости, повлекшая за собой образование пылевой комы у объекта. 24 июля 2018 г. блеск астероида приблизился к эфемеридной величине. Столь быстрое падение блеска предполагает, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости явились результатом бомбардировки астероида 3552 другим небольшим объектом. Оценки эффективного диаметра, полученные по наблюдениям 23 и 24 июля 2018 г., соответствуют имеющимся данным, можно предположить, что удар не был катастрофичным для астероида. С учетом кометоподобной орбиты, низкого значения альбедо и зарегистрированной реактивации объекта в июле 2018 г. можно сделать вывод, что, с очень высокой вероятностью, объект 3552 действительно может быть ядром угасшей кометы. Для большей убедительности необходимы новые наблюдения.

Список литературы

- 1. E. J. Öpik, Advances in Astronomy and Astrophysics, 2, 219, 1963.
- 2. P. R. Weissman, J. Bottke, W. F., and H. F. Levison, Evolution of Comets into Asteroids, 669–686 (2002).
- 3. P. B. Babadzhanov and G. I. Kokhirova, Meteor streams of asteroids crossing the Earth's orbit. Dushanbe, Donish (2009).
- H. H. Hsieh and D. Jewitt, in AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38, 08.02, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts (2006).
- 5. D. Jewitt, AJ, **143**, 66, 2012.
- 6. M. Mommert, J. L. Hora, A. W. Harris, W. T. Reach, et al., ApJ, 781, 25, 2014.

- S. Navarro, M. Mommert, D. Trilling, N. Butler, M. Reyes-Ruiz, and B. Pichardo, in AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #50, 508.03, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts (2018).
- G. I. Kokhirova, O. V. Ivanova, F. D. Rakhmatullaeva, U. K. Khamroev, A. M. Buriev, and S. K. Abdulloev, Solar System Research, 52, 495, 2018.
- 9. V. G. Shevchenko, I. N. Belskaya, K. Muinonen, A. Penttilä, et al., P&SS, 123, 101, 2016.
- E. Bowell, B. Hapke, D. Domingue, K. Lumme, J. Peltoniemi, and A. W. Harris, in R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, eds., Asteroids II, 524–556 (1989).
- 11. A. W. Harris, *Icarus*, **156**, 184, 2002.

К вопросу о влиянии солнечной активности на открытие комет

Гулиев А.С.¹, Гасымов Г.А.²

¹ Шамахинская астрофизическая Обсерватория НАНА, Баку, Азербайджан

²Бакинский инженерный университет, Баку, Азербайджан

Анализируется отличие периодических комет (ПК) семейства Юпитера от долгопериодических по признаку зависимости дат открытия от фазы 11-летней активности Солнца. Показано, что оно не связано с их орбитальными характеристиками ПК, в частности параметрами перигелийных расстояний, наклонов и широт перигелиев орбит. Параметры q_{mean} , q_{min} и i_{max} комет семейства Юпитера хорошо коррелируют с фазами 11-летней активности Солнца. Путем сравнения распределений N(F) периодических комет семейства Юпитера и семейства Сатурна по фазам циклов установлено отсутствие сходства между ними. Это дает еще один косвенный аргумент реальности семейства Сатурна. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

To the question on influence of solar activity on discovery of comets

Guliyev A.S.¹, Gasimov H.A.²

¹Shamakhy Astrophysical Observatory of ANAS, Baku, Azerbaijan ²Baku Engineering University, Baku, Azerbaijan

The analysis of the difference between periodic comets (PCs) of the Jupiter family and long-period comets is based on the dependence of the opening dates on the phase of the 11-year Solar activity. It is shown that it is not related to their orbital characteristics of the PC, in particular the parameters of perihelion distances, inclinations and perihelion latitudes of orbits. The parameters q_{mean} , q_{min} and i_{max} of the comets of the Jupiter family correlated well with the phases of the 11-year Solar activity. By comparing the distributions N(F) of short-period comets of the Jupiter and Saturn family over the phases of the SA, there was no similarity between them. It provides us another indirect argument for the reality of the Saturn family. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.007

1. Введение

Вопрос о влиянии солнечной активности (СА) на изменении параметров широко обсуждался и изучался в работах Гулиева [1, 2, 3], Добровольского [4], Секанины [5], Сворена [6] и др. Секанина установил, что некоторые параметры комет (годовое число, пороговая величина, абсолютный блеск, фотометрические параметры и др.) коррелируют с фазами 11-летнего солнечного цикла. При этом максимумы таких распределений соответствуют к серединам эпох подъема и спада СА. Анализ, проведенный Добровольским, подтвердил эти выводы. Гулиев показал, что параметры короткопериодических комет в этом смысле обособлены и характеризуются лишь одним максимумом, соответствующем эпохе после максимума СА. В недавней работе Гулиева и Гасымова [3] последний вывод проверялся на базе большего статистического материала и подтвердился.

Напомним, что в работе Гулиева и Гасымова для определения фазы максимума CA использовалась следующая рабочая формула, предложенная Гулиевым [3]:

$$F_{\text{eff}} = \begin{cases} \frac{t - T_1}{2 \left(T_{\text{max}} - T_1 \right)}; & \text{if } t - T_{\text{max}} < 0\\ \frac{t - T_{\text{max}}}{2 \left(T_2 - T_{\text{max}} \right)} + 0.5; & \text{if } t - T_{\text{max}} > 0, \end{cases}$$
(1)

где t — момент открытия кометы, T_1 и T_2 даты последовательных минимумов СА, T_{max} — дата максимума между ними. Необходимо отметить, что при таком определении фазы СА максимум всегда соответствует фазе 0.5. На конкретном примере двух периодических комет (190Р и 191Р, открытых в 23-м цикле СА) покажем, как вычисляется величина F. Границы этого цикла и его максимум соответствуют датам 1996.67, 2009.0 и 2001.75, соответственно. Открытия комет приходятся на даты 1998.80 и 2007.53, соответственно. Применение вышеприведенной формулы показывает, что значения F составляют 0.21 и 0.89, соответственно.

Кроме того, при анализе массива значений F после применения формулы приходится использовать некий коэффициент, на который умножается их частоты, соответствующие эпохе подъема. Этот коэффициент (1.62) в какой-то степени учитывает асимметричность солнечной кривой относительно даты максимума. Однако в отличие от [3] в данной работе основной акцент будет сделан не на структуре конкретных кривых N(F), а на их сравнении.

Поскольку в дальнейшем анализе семейство Юпитера будет играть роль базиса сравнения, то на рис. 1 приведено распределение N(F) для данного класса комет. В этом распределении существует лишь один



Рис. 1: Распределение N(F) для периодических комет семейства Юпитера.



Рис. 2: Распределение N(F) долгопериодических комет с q > 1 а.е.

максимум, который соответствует интервалу F от 0.5 до 0.6. Напомним, что аналогичное распределение для ДПК обладает двумя максимумами в интервалах 0.2 - 0.3 и 0.7 - 0.8.

2. Цель исследования и использованный материал

Настоящая работа является продолжением анализа данного вопроса для периодических комет (ПК) Юпитера и Сатурна. Мы постараемся показать, что фактор отличительной особенности ПК не обусловлен внешними факторами, в частности характеристикой зоны их движения. Также постараемся ответить на вопрос, существует ли аналогия между семействами этих двух планет в плане реакции на изменение СА. В ней использованы данные периодических комет с 1755 по 2008 гг. включительно. Другими словами, использованы кометные данные, соответствующие эпохе до конца 23-го цикла СА. При этом использованые кометные¹ и солнечные данные² заимствованы с официальных сайтов NASA. В анализе использованы данные по 403 ПК семейства Юпитера и 125 ПК из семейства Сатурна. Данные по последнему семейству могут показаться недостаточными для твердых выводов. Для частичной компенсации этого недостатка Секанина [5] обычно

 $^{^{1} \}rm https://www.jpl.nasa.gov$

 $^{^{2}} https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt$



Рис. 3: Распределение of N(F) долгопериодических комет, имеющих i до 25° и от 155° до 180°.



Рис. 4: Распределение N(F) долгопериодических комет с $|B| < 5^{\circ}$.

пользовался переплетенными интервалами или же менял границы таких интервалов. По мере необходимости в статистике мы также можем прибегнуть к этой методике.

В качестве сравнения использованы данные той части ДПК, имеющие соответствующие характеристики. Например, будем отделять те объекты, которые по своим характеристикам похожи на ПК, и по ним строить распределения N(F) для дальнейшего сравнения.

3. Результаты анализа

Известно, что системы ДПК и ПК отличаются соотношением комет с q > 1 а.е. и q < 1 а.е.. Оно во второй системе выделяется гораздо заметнее. Можно ли считать, что различие N(F) связано с этим фактором? Чтобы ответить на этот вопрос, мы построили распределение N(F) для ДПК, имеющих q > 1 а.е. Оно приводится на рис. 2. Видно, что это распределение не является аналогом для N(F) ПК семейства Юпитера. Поэтому рассматриваемое предположение нельзя считать состоятельным.

Еще одно возможное объяснение обсуждаемого феномена связано с наклонами орбит ПК семейства Юпитера. Известно, что подавляющее большинство таких тел имеют наклон меньше 25° . Другими словами, они все время находятся вблизи плоскости экватора Солнца. При построении распределения N(F) анало-



Рис. 5: Распределение $q_{\min}(F)$ для периодических комет семейства Юпитера.



Рис. 6: Распределение $i_{\max}(F)$ периодических комет семейства Юпитера.

гичных ДПК к ним также нужно добавить и кометы с наклонами от 155° до 180° Таких комет в нашем списке оказалось 125. Распределение N(F), построение для таких комет, приводится на рис. 3.

В этом распределении из двух максимумов, присущих ДПК, присутствует лишь один. Причина отсутствия второго максимума не ясна, тем не менее можно утверждать, что ожидаемое сходство с ПК отсутствует.

Аналогичный анализ сделан и относительно признака широт (B) перигелиев ДПК. Значения этого параметра для ПК варьируются в весьма узком интервале вблизи 0°. Как известно, кометы даже при наклонах орбит около 90° могут иметь небольшие абсолютные значения B и двигаться вблизи плоскости эклиптики. Поэтому ДПК с минимальными |B| представляют определенный интерес в контексте рассматриваемой задачи. Построенное на базе собранных данных распределение N(F) для ДПК, имеющих $|B| < 5^{\circ}$, приводится на рис. 4. Как видно из рисунка, и в данном случае ожидаемое сходство с ПК отсутствует.

Анализ показывает, что некоторые пороговые величины ПК, например q_{\min} и i_{\max} , также хорошо коррелируют с параметром СА (см. рис. 5 и 6, соответственно). Ясно, что минимумы распределения q_{\min} (F) обусловлены присутствием в рассматриваемой системе комет SOHO, имеющих афелийные расстояния вблизи орбиты Юпитера. Аналогичная и ожидаемая картина наблюдается и в распределении среднего расстояния q_{mean} (F). Оно приводится на рис. 7.



Рис. 7: Распределение $q_{\text{mean}}(F)$ для комет семейства Юпитера.



Рис. 8: Распределение N(F) для периодических комет семейства Сатурна.

Наконец, рассмотрим еще один принципиальный вопрос, имеющий отношение к классификации периодических комет. Их разделение на отдельные семейства гигантских планет принимается не всеми специалистами. В частности, многими авторами оспаривается возможность существования семейства Сатурна. Анализ распределения N(F) может дать косвенный ответ на этот вопрос. Если семейство планеты на самом деле отсутствует, и соответствующая группа является лишь «хвостом» семейства Юпитера, то оно должно иметь аналогичное распределение N(F). Это распределение, построенное по 125 кометам, имеющим афелийные расстояния от 8 до 12 а.е., приводится на рис. 8. Видно, что оно резко отличается от N(F) семейства Юпитера. Здесь наблюдается лишь один значимый максимум, соответствующий интервалу 0.7-0.8 (N = 19), а насыщенности вблизи F = 0.6 нет. Меняя слегка длину принимаемого интервала для статистики и перемепивая в ту или другую сторону, мы нашли, что в интервале 0.701 - 0.808 количество открытий таких комет составляет 23. Это отклонение от кривой для ПК семейства Юпитера может рассматриваться как косвенное доказательство реальности семейства Сатурна. Оно подкрепляется еще и тем, что для этой выборки комет зависимости таких величин как q_{min} , q_{mean} (F) и i_{max} от F явно отсутствует. Как показали наши расчеты, эти зависимости для «семейства Сатурна» носят случайный характер, поэтому в статье не приводятся. По мере увеличения данных перечисленные аргументы в пользу предположения о существовании семейства Сатурна могут быть проверены для его надежности. Известно, что количество таких комет заметно (почти на 50%) увеличилось в ходе 24-го цикла СА. В дополнительном анализе авторы планируют рассматривать данное предположение с учетом новых комет.

4. Выводы

- 1. Отличие периодических комет семейства Юпитера от долгопериодических по характеру распределения N(F) не связано с их орбитальными характеристиками, в частности параметрами q, i, B.
- 2. Параметры q_{\min} , q_{mean} и i_{max} комет семейства Юпитера хорошо коррелируют с фазами 11-летней активности Солнца и показывают одновершинные распределения.
- 3. Сравнение распределений N(F) периодических комет семейства Юпитера и семейства Сатурна и отсутствие сходств другого характера между ними дает еще один косвенный аргумент реальности последнего.

Список литературы

- 1. A. S. Guliyev, Problemy kosm. fiziki, 20, 39, 1985.
- 2. A. S. Guliyev, Kinematika i fizika nebesnykh tel, 6, 68, 1990.
- 3. A. S. Guliyev and H. A. Gasimov, Kinematika i fizika nebesnykh tel, 36, 35, 2020.
- 4. O. V. Dobrovol'skiy, Komety (Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit.) (1966).
- 5. Z. Sekanina, An Analysis of Some Problems of Cometary Physics Based on photometrical Data (Prague) (1962).
- 6. J. Svoreň, Planetary and Space Science, 118, 176, 2015.

Аммиак в плотных сгустках волокна WB 673

Рябухина О.Л.¹, Кирсанова М.С.¹, Винен М.², Хенкель К.³

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Эксетерский университет, Эксетер, Великобритания

³ Радиоастрономический институт Общества им. Макса Планка, Бонн, Германия

Исследована область массивного звездообразования WB 673 в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Были проведены наблюдения этой области в линиях излучения аммиака NH₃ (1,1), (2,2) и (3,3) на 100-м телескопе Эффельсберг. Определены кинетическая температура и лучевая концентрация аммиака в направлении на пики излучения пыли плотных сгустков WB 668, WB 673, S233-IR, G173.57+2.43.

Ammonia in dense clumps of filament WB 673

Ryabukhina O.L.¹, Kirsanova M.S.¹, Wienen M.², Henkel C.³

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

² University of Exeter, Stocker Road, Exeter, EX4 4QL, UK

³Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn, Germany

The aim of the study is to derive physical properties of the dense clumps in the region of massive star formation WB 673, which is situated in the giant molecular cloud G174+2.5. We used observations of the ammonia lines $NH_3(1,1)$, (2,2) and (3,3) that were made with the 100-m Effelsberg telescope. We determine the kinetic temperature and column density of ammonia towards the dust emission peaks of dense clumps WB 668, WB 673, S233-IR, G173.57+2.43.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.008

1. Введение

Согласно современной теории, звездные скопления образуются в межзвездных молекулярных облаках, которые имеют форму волокон [1]. Отправной точкой процесса звездообразования является формирование сгустков плотного газа в молекулярных облаках. Волокно WB 673 находится в области звездообразования S231 – S235, которая расположена в гигантском молекулярном облаке G174+2.5 на расстоянии 1.8 кпк [2]. Сгустки WB 673 и S233-IR расположены в центральной части волокна, а WB 668 и G173.57+2.43 на его периферии [3]. Все сгустки содержат IRAS- и MSX-источники, в центральных сгустках WB 673 и S233-IR соотношение между ИК-потоками источников IRAS соответствует областям ионизованного водорода (H II). На основании этого можно предположить, что центральные сгустки являются более проэволюционировавшими, чем сгустки на периферии. Цель этой работы — определение физических параметров газа, таких как кинетическая температура и лучевая концентрация аммиака в направлении на пики излучения плотных сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. В дальнейших работах будет применен метод «химических часов» для точного определения эволюционного статуса сгустков, для которого будут использованы значения обилий различных молекул из работы [4], а также распределение температуры газа из этой работы.

2. Наблюдательные данные

В январе 2019 г. были проведены наблюдения на 100-м телескопе Эффельсберг (Германия). Наблюдения проходили в режиме непрерывного картирования (On-the-Fly) с использованием приемника 1.3 см SFK с полосой пропускания 500 МГц. Общее наблюдательное время составило 60 часов. Диаграмма направленности (бим) полученных карт составляет 40".

Таблица 1: Значение параметров гауссова приближения (интенсивность главного компонента, ширина линии, интегральная интенсивность) линии $NH_3(1,1)$, а также оптической толщины линии в пиках плотных сгустков

Сгусток	$\begin{array}{c} T_{\mathrm{B}(1,1)}, \\ \mathrm{K} \end{array}$	$\Delta V_{(1,1)}, \ { m Km/c}$	$W, \ { m K} \cdot { m Km/c}$	$ au_{(1,1)m}$
WB668	2.6 ± 0.14	2.0 ± 0.1	8.5 ± 0.21	1.1 ± 0.3
$\operatorname{WB}673$	2.7 ± 0.17	2.5 ± 0.2	13.1 ± 0.13	0.3 ± 0.28
S233–IR	3.2 ± 0.16	2.3 ± 0.1	15.0 ± 0.14	0.9 ± 0.2
$G173.57{+}2.43$	2.0 ± 0.14	1.7 ± 0.1	5.4 ± 0.16	1.0 ± 0.3



Рис. 1: Интегральная интенсивность излучения аммиака в линии $NH_3(1,1)$ в плотных сгустках волокна WB 673. Контурами показана яркость излучния пыли на 1.1 мм (Bolocam), где внешний контур соответствует уровню 3σ , а внутренние показывают 35% и 65% от уровня максимальной интенсивности в каждом из сгустков отдельно [4]. Величина σ соответствует потоку 0.045 Ян/бим. Красные эллипсы — IRAS-источники (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки — MSX-источники.

3. Анализ наблюдательных данных и результаты

Получены карты излучения сгустков в волокне в линиях аммиака NH₃ (1,1), (2,2) и (3,3) на частоте 23.6 ГГц. Для определения кинетической температуры и плотности аммиака были использованы инверсионные переходы (1,1) и (2,2). Карты перехода (1,1) показаны на рис. 1. Эти линии имеют сверхтонкое расщепление, выделяются 5 компонентов, разнесенных на расстояние нескольких МГц. Спектры в пиках излучения пыли в WB 668, WB 673, S233-IR, G173.57+2.43 показаны на рис. 2. Красным цветом показано приближение сверхтонкой структуры, выполненное с помощью программы CLASS¹ пакета GILDAS [5]. В результате вписывания сверхтонкой структуры мы получаем значения температуры $T_{\rm B(1,1)}$, ширину линии $\Delta V_{(1,1)}$ и оптической толщины главного компонента $\tau_{(1,1)m}$. Эти параметры показаны в табл. 1, где W — интегральная интенсивность линии. Аналогичная процедура проводилась для линии (2,2), рис. 3. При анализе использовалось предположение о локальном термодинамическом равновесии, которое надежно выполняется для аммиака [6].

Дальнейшие вычисления производились с помощью следующих формул:

$$T_{\rm ex} = \frac{T_{\rm B(1,1)}}{1 - \exp(-\tau_{(1,1)\rm m})} + T_{\rm bg}(\rm K), \tag{1}$$

где $T_{\rm ex}$ — температура возбуждения, которая принимается равной для всех компонент; $T_{\rm bg}$ — яркостная температура фона;

$$N_{1,1} = 6.6 \times 10^{14} \frac{T_{\rm ex}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)\rm m} \triangle V_{(1,1)} (\rm cm^{-2}), \qquad (2)$$

где $N_{1,1}$ — лучевая концентрация аммиака в переходе (1,1), $\nu_{(1,1)}$ — частота перехода в ГГц [7];

$$T_{\rm rot} = -41.5 \ln\left(\frac{-0.282}{\tau_{(1,1)\rm m}} \ln\left(1 - \frac{T_{\rm B(2,2)}}{T_{\rm B(1,1)}} (1 - \exp(-\tau_{(1,1)\rm m}))\right)\right)^{-1} (\rm K), \tag{3}$$

¹http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS



Рис. 2: Спектры NH₃ (1,1) в пиках излучения пыли сгустков волокна. Красной линией показано гауссово приближение линий.

где $T_{\rm rot}$ — т. н. вращательная температура, $T_{{\rm B}(2,2)}$ — яркостная температура линии перехода (2,2) [6].

Полная лучевая концентрация $N_{\rm NH_3}$ и кинетическая температура $T_{\rm kin}$ [8] рассчитывались следующим образом:

$$N_{\rm NH_3} = N_{1,1} \left(\frac{e^{21.3/T_{\rm rot}}}{3} + 1 + \frac{5e^{-41.2/T_{\rm rot}}}{3} + \frac{14e^{-99.4/T_{\rm rot}}}{3} \right) (\rm cm^{-2}), \tag{4}$$

в этой формуле учтен вклад 4-х нижних уровней с энергией верхнего уровня до 99 К. Кинетическая температура газа:

$$T_{\rm kin} = \frac{T_{\rm rot}}{1 - \frac{T_{\rm rot}}{42} \ln(1 + 1.1 \exp(\frac{-16}{T_{\rm rot}}))} ({\rm K}).$$
(5)

Полученные значения параметров представлены в табл. 2. Во всех сгустках, кроме WB 673, излучение аммиака в линии (1,1) обладает умеренной оптической толщиной. Линия NH₃ (1,1) в сгустке WB 673 оптически тонкая, однако ошибка определения достаточно высока относительно самого значения, что ведет к большим неопределенностям в дальнейших вычислениях. Кинетическая температура центральных сгустков выше, чем на периферии. Температура возбуждения компонентов сверхтонкой структуры линии NH₃ (1,1) во всех сгустках в 2–3 раза ниже кинетической температуры. Наибольшая лучевая концентрация достигается

Таблица 2: Значение физических параметров NH₃ в пиках плотных сгутсков

Сгусток	$T_{ m rot}, \ { m K}$	$T_{\rm kin}, \\ { m K}$	$N_{\rm NH_3}, \ 10^{14} \ {\rm cm}^{-2}$	$N_{ m NH_3}/ m N_{ m H_2}$
$\operatorname{WB}668$	14.5 ± 1.9	16.3 ± 2.6	10.3 ± 4.5	$3.6 \cdot 10^{-8}$
$\operatorname{WB}673$	21.4 ± 10.3	27.3 ± 18.9	6.2 ± 6.4	$1.5 \cdot 10^{-8}$
S233-IR	20.9 ± 3.0	26.4 ± 5.5	10.2 ± 3.7	$8.3 \cdot 10^{-9}$
$G173.57{+}2.43$	17.0 ± 2.7	19.9 ± 4.1	6.6 ± 2.2	$2.5\cdot 10^{-8}$



Рис. 3: Спектры NH₃ (2,2) в пиках излучения пыли сгустков волокна. Красной линией показано гауссово приближение линий.

в сгустках WB 668 и S233–IR. Лучевая концентрация аммиака в WB 673 ниже, чем в WB 668, однако за счет значительной ошибки определения оптической толщины линии $NH_3(1,1)$ в WB 673 лучевая концентрация в этом направлении может быть выше. Также в таблице представлены обилия аммиака по отношению к молекулярному водороду H_2 , лучевая концентрация которого посчитана по данным Bolocam, см. [4]. Обилие аммиака в периферийных сгустках выше, чем центальных. Самое низкое обилие наблюдается в направлении на пик излучения пыли в S233-IR.

В дальнейшей работе будут получены карты распределения температуры и лучевой концентрации по сгусткам, что позволит нам использовать метод «химических часов» для оценки эволюционного статуса облака.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00917.

Список литературы

- P. André, J. Di Francesco, D. Ward-Thompson, S.-I. Inutsuka, R. E. Pudritz, and J. E. Pineda, Protostars and Planets VI, 27–51, 2014.
- M. S. Kirsanova, S. V. Salii, A. M. Sobolev, A. O. H. Olofsson, D. A. Ladeyschikov, and M. Thomasson, *Open Astronomy*, 26, 99, 2017.
- 3. D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsivilev, and A. M. Sobolev, Astrophysical Bulletin, 71, 208, 2016.
- 4. O. L. Ryabukhina and M. S. Kirsanova, Astronomy Reports, 64, 394, 2020.
- 5. S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, S. Bardeau, and E. Reynier, A&A, 526, A47, 2011.
- 6. P. T. P. Ho and C. H. Townes, ARA&A, 21, 239, 1983.
- 7. J. G. Mangum, A. Wootten, and L. G. Mundy, ApJ, 388, 467, 1992.
- M. Wienen, F. Wyrowski, F. Schuller, K. M. Menten, C. M. Walmsley, L. Bronfman, and F. Motte, A&A, 544, A146, 2012.

О нетепловой потере атмосферы за счет фотодиссоциации H_2 для экзопланеты GJ 436b

Автаева А.А.^{1,2}, Шематович В.И.¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

В работе оценивается вклад процессов диссоциации молекулярного водорода жестким ультрафиолетовым (УФ) излучением в образование фракции надтеплового атомарного водорода в переходной $H_2 \rightarrow H$ области и формирование соответствующего потока убегания из протяженной верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b. Рассчитаны скорость образования и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии при диссоциации H_2 . При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере и рассчитан нетепловой поток убегания. Поток убегания оценен величиной 4.0×10^{11} см⁻²с⁻¹ для умеренного уровня звездной активности в УФ излучении, что приводит к скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации H_2 , равной 2.5×10^8 г с⁻¹. Данные оценки ближе к верхней границе полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы экзопланеты GJ 436b в диапазоне $\sim (3.7 \times 10^6 - 1.1 \times 10^9)$ г с⁻¹. Возможные уточнения расчетных оценок скорости потери атмосферы ожидаются по мере поступления новых наблюдательных данных как о спектре потока УФ излучения родительской звезды GJ 436, так и новых наблюдений протяженной атмосферы планеты-транзита GJ 436b.

On non-thermal atmospheric loss for exoplanet GJ 436b caused by the $\ensuremath{\text{H}}_2$ photodissociation input

Avtaeva A.A.^{1,2}, Shematovich V.I.¹

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

This work estimates the effect of the extreme ultraviolet (UV) radiation of the parent star on the production of the suprathermal fraction of atomic hydrogen in the $H_2 \rightarrow H$ transition region in the upper atmosphere of GJ 436b. We also consider the formation of the escaping flux of H atoms created by this effect. We calculate the production rate and energy spectrum of the hydrogen atoms with excess kinetic energy during the dissociation of H_2 . Using the numerical stochastic model for a hot planetary corona, we investigate the kinetics and transfer of suprathermal hydrogen atoms in the upper atmosphere and the emergent flux of atoms evaporating from the atmosphere. The latter is estimated as 4.0×10^{11} cm⁻² s⁻¹ for a moderate stellar activity level of UV radiation, which leads to a planetary atmosphere evaporation rate of 2.5×10^8 g s⁻¹ due to the process of the dissociation of H₂. This estimate is close to the upper boundary of observational estimates in the range $(3.7 \times 10^6 - 1.1 \times 10^9)$ g s⁻¹ for the rate of atmospheric loss of GJ 436b.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.009

1. Введение

Сегодня известно более 4000 экзопланет¹. Открытие горячих, т.е. богатых водородом и летучими веществами экзопланет, расположенных на орбитальных расстояниях < 0.1 а.е., ставит важные вопросы, касающиеся структуры верхних слоев атмосферы и их устойчивости к убеганию в открытое пространство (потере) атмосферных газов. Так как более 40% процентов всех обнаруженных экзопланет вращаются вокруг своих родительских звезд на расстояниях более близких, чем орбита Меркурия, атмосферы этих небесных тел развиваются в гораздо более экстремальных условиях, чем условия, известные для планет нашей Солнечной системы. Более интенсивные потоки звездного излучения в диапазонах мягкгого рентгена (soft X-rays, 1-10 нм) и жесткого ультрафиолета (Extreme UltraViolet — EUV, 10-100 нм), так называемого жесткого излучения звезды (XUV) в диапазоне длин волн 1–100 нм, на таких близких орбитальных расстояниях будут в значительной степени изменять структуру и состав верхних слоев атмосфер этих объектов [1, 2] и, в частности, приводить к образованию протяженных газовых оболочек у горячих экзопланет (см., например, [3]). Наблюдения на космическом телескопе им. Хаббла (HST) [4] показали образование у теплого нептуна Gliese 436b протяженной газовой оболочки, сопоставимой с диском родительской звезды. Две независимые серии транзитных наблюдений с помощью COS/HST показали ~ 50% поглощения в линии Ly- α в диапазоне доплеровского смещения скорости (-120, -40) км/с [5, 6]. Помимо протяженного хвоста, поглощение водородом показывает также ранний ингресс, т.е. наличие плотного облака, простирающегося перед планетой на расстоянии, сопоставимом с размером диска звезды.

Теоретическое изучение верхних атмосфер горячих экзопланет развивалось на основе гидродинамического описания. В одной из первых работ [7] было показано, что жесткое звездное XUV излучение, проникающее в обогащенную водородом термосферу должно приводить к газодинамическому истечению. Соответственно, в первых газодинамических моделях Gliese 436b [8, 9] было установлено, что термосфера этой

¹http://exoplanets.eu

экзопланеты относительно холодная (< 5000 K), а истечение сверхзвуковое и не превышает скорости 10 км/с. Было обнаружено, что молекулярный водород не диссоциирует полностью в верхней атмосфере Gliese 436b и уносится с течением далеко от планеты. Численное моделирование газодинамическими моделями показывает, что экзопланета Gliese 436b должна быть окружена обширной, относительно холодной, плотной, частично ионизованной газовой оболочкой с присутствием молекулярного водорода, охватывающей весь диск звезды. Интерпретация, предложенная на основе моделирования траекторий частиц в работах [10, 11], основывается на предположении о том, что планетное истечение Gliese 436b должно быть очень разреженным, но при этом очень быстрым, со скоростью примерно 70 км/с. Этот вывод противоречит результатам газодинамического моделирования и требует дальнейшего сравнения скоростей как тепловой, так и нетепловой потери атмосферы [1, 2].

Фотолиз богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты жестким излучением родительской звезды приводит к образованию надтепловых частиц (т.е. частиц с избытком кинетической энергии) — первичных фотоэлектронов при фотоионизации основных компонентов $H_2/H/He$ и надтепловых атомов водорода в фотопроцессах диссоциации и диссоциативной ионизации H_2 [12]. Эти частицы с избыточной кинетической энергией являются важным источником тепловой энергии в верхней атмосфере богатой водородом экзопланеты. Исследование роли надтепловых частиц в современных аэрономических моделях планетных атмосфере является сложной вычислительной задачей, так как требует решения уравнения Больцмана для популяции надтепловых частиц [13, 14]. В статье оценивается влияние XUV излучения родительской звезды на образование надтепловых атомов водорода в переходной области $H_2 \rightarrow H$ в верхних слоях богатой водородом атмосферы GJ 436b. Для этого в модели рассчитываются скорость производства и энергетический спектр атомов водорода, которые образуются с избытком кинетической энергии при диссоциации H_2 . Затем используется стохастическая модель горячей планетарной короны [15, 16] для изучения кинетики и переноса надтепловых атомов водорода в протяженных верхних слоях атмосферы и расчета скорости потери массы в атмосфере.

2. Фракция надтепловых атомов водорода

Диссоциация молекулярного водорода в верхней атмосфере GJ 436b

Тепловой режим и скорость теплового убегания из атмосферы горячей экзопланеты существенно зависят от состава атмосферы. Однако, в отличие от атмосфер планет Солнечной системы, состав которых стабилен на геологических масштабах времени, атмосферный состав горячей экзопланеты может изменяться вследствие воздействия интенсивного поля излучения родительской звезды. Более того, тепловой режим и состав атмосферы тесно связаны через скорости нагрева и выхолаживания, как показывают аэрономические модели верхней атмосферы GJ 436b [8, 9, 10, 11]. Процессы диссоциации, такие как фотодиссоциация, диссоциация электронным ударом, диссоциативная ионизация и др., являются основными источниками тепловых и надтепловых фрагментов молекул в состояниях электронного возбуждения в верхних атмосферах планет [13, 14]. Молекула водорода является, с одной стороны, простейшей молекулой, однако ее диссоциация при поглощении звездного УФ излучения и/или электронном ударе происходит посредством нескольких механизмов диссоциации:

$$H_2 + h\nu(e_p) \to H_2^* \to H(1s) + H(1s, 2s, 2p, ...) + (e_p) + \Delta E_{dis},$$
(1)

$$H_2 + h\nu(e_p) \to H^+ + e + H(1s, 2s, 2p, ...) + (e_p) + \Delta E_{disi}.$$
 (2)

Если в результате поглощения излучения связанные электроны возбуждаются на несвязанные или антисвязанные орбитали и их энергия превышает энергию связи молекулы, то возможна диссоциация данной молекулы. Посредством данного важного механизма возможна фотодиссоциация молекул, когда происходит возбуждение молекулы либо в континуум связанного состояния, либо непосредственно в несвязанное (отталкивающее) состояние. Сечения фотодиссоциации для этих механизмов диссоциации обычно являются достаточно гладкими функциями в зависимости от длины волны излучения, и для расчета скорости фотодиссоциации обычно достаточно знать сечения поглощения и поток излучения с относительно низким разрешением порядка 0.05 - 0.1 нм [17]. Другим возможным механизмом является предиссоциация, когда поглощение фотона приводит к возбуждению связанного состояния электронного возбуждения, из которого возможен переход без излучения в близкое несвязанное возбужденное состояние. Скорость процесса зависит от поглощения излучения на отдельных длинах волн и от вероятностей предиссоциации [17].

Порог диссоциации H₂ равен 4.48 эВ (276.9 нм), однако сечения фотопоглощения на длинах волн больше 111.6 нм исчезающе малы. В планетных атмосферах диссоциация H₂ при поглощении УФ излучения в диапазоне длин волн 84.5 – 111.6 нм протекает в основном посредством дипольно-разрешенных переходов из основного состояния $X^1 \sum_g^+(\nu)$ в возбужденные связанные электронные состояния $B^1 \sum_u^+(\nu')$, $C^1 \Pi_u(\nu')$, $B'^1 \sum_u^+(\nu')$ и $D^1 \Pi_u(\nu')$. Молекулы H₂ в этих возбужденных состояниях могут либо переходить на дискретные уровни основного состояния, высвечивая избыточную энергию, либо в континуум основного состояния с последующей диссоциацией на два атома водорода в основном состоянии, причем вероятности предиссоциации для этих уровней изменяются в пределах 0.1 - 0.15 [18]. На длинах волн короче 84.5 нм прямое поглощение в континуумы состояний и электронного возбуждения является доминантным механизмом фотодиссоциации. Значения сечений для этих процессов достаточно высоки, и в результате диссоциации образуются атом водорода, в основном H(1s) и атом в возбужденном H(2s,2p) состояниях [19]. Избыточные кинетические энергии $\Delta E_{\rm dis}$ и $\Delta E_{\rm disi}$ атомов водорода, образующихся при фотодиссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода (1), рассчитывались как разница между энергией поглощенного УФ фотона, энергией возбужденного электронного состояния и энергией диссоциации или диссоциативной ионизации.

Надтепловые атомы водорода, образующиеся в процессах диссоциации (1) теряют свою избыточную энергию в упругих столкновениях с основными нейтральными компонентами окружающего атмосферного газа

$$\mathbf{H}_{h}(E) + \mathbf{H}_{th}, \mathbf{H}_{eth}, \mathbf{H}_{2th} \to \mathbf{H}_{h}(E' < E) + \mathbf{H}_{th}, \mathbf{H}_{eth}, \mathbf{H}_{2th}.$$
(3)

Следует отметить, что при надтепловых энергиях атомов водорода эффективность переноса энергии от горячих атомов к тепловым атомам и молекулам водорода в упругих столкновениях в существенной степени определяется фазовыми функциями — распределениями угла рассеяния. Как следует из экспериментальных и расчетных данных [20, 21, 22], эти распределения характеризуются пиками в области малых углов рассеяния при относительно высоких значениях сечений упругого рассеяния. Соответственно, эффективность переноса энергии сильно зависит от энергии столкновения. Данные особенности упругого рассеяния надтепловых атомов водорода на тепловых компонентах H₂, He и H в существенной степени определяют параметры фракции надтеплового водорода в верхней атмосфере GJ 436b.

Кинетика надтепловых атомов водорода

Так как атомы водорода образуются в процессах диссоциации с избытком кинетической энергии, то их распределение в переходной $H_2 \rightarrow H$ области верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b определяется из решения кинетического уравнения Больцмана с фотохимическим источником

$$\frac{\partial F_{\rm H}}{\partial t} + \mathbf{c} \frac{\partial F_{\rm H}}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{Y}}{m_{\rm H}} \frac{\partial F_{\rm H}}{\partial \mathbf{c}} = \sum_{\rm s} Q_{\rm s}^{\rm H} + \sum_{m} J_m^{\rm H}(F_{\rm H}, F_m),\tag{4}$$

совместно с начальными и граничными условиями для атмосферного газа в объеме V, подверженного действию внешних силовых полей Y планеты, и при физических допущениях, таких как разреженность газа и конечные или быстро убывающие радиусы взаимодействия частиц при столкновениях [15, 14]. Здесь использовано микроскопическое описание надтепловых атомов водорода посредством функции распределения по скоростям и состояниям внутреннего возбуждения $F_{\rm H}(t, \mathbf{r}, \mathbf{c}) = n_{\rm H}(t, \mathbf{r}, \mathbf{c})$, где $n_{\rm H}(t, \mathbf{r})$ — числовая плотность надтепловых частиц, а $f_{\rm H}(t, \mathbf{r}, \mathbf{c})$ — одночастичная функция распределения по скоростям, нормированная на единицу. Функции источников $Q_{\rm s}^{\rm H}(t, \mathbf{r}, \mathbf{c})$ задают скорости образования надтепловых атомов водорода в фотохимических реакциях (1) и (2) и обычно записываются как

$$Q_{\mathbf{s}}^{\mathrm{H}}(t,\mathbf{r},\mathbf{c}) = q_{\mathbf{s}}^{\mathrm{H}}(E)f_{\mathbf{s}}^{\mathrm{H}}(t,\mathbf{r},\mathbf{c}).$$
(5)

Здесь $q_s^{\rm H}(E) = \langle |c_i - c_j|\sigma_s(E) \rangle$ — дифференциальная скорость образования надтепловых атомов водорода в фотохимическом источнике s при энергии сталкивающихся частиц E, а функция $f_{\rm H}(t, \mathbf{r}, \mathbf{c})$ задает нормированное распределение по скорости образующихся в данном источнике частиц с избытком тепловой энергии. Интегралы столкновений в правой части кинетических уравнений описывают изменения состояния газа вследствие химических реакций и равны

$$J_m^{\rm H}(F_{\rm H}, F_m) = \int g_{ij} d\sigma_m dc_j [F_{\rm H}(c_i') F_m(c_l') - F_H(c_i) F_m(c_j)], \tag{6}$$

где g_{ij} — относительная скорость, а $d\sigma_m$ — дифференциальное сечение упругого рассеяния надтепловых атомов водорода, упруго сталкивающихся с водородом и гелием. Дифференциальные сечения упругого рассеяния выбирались в соответствии с данными работ [20, 21, 22]. Функции распределения F_m для атмосферных компонентов брались локально равновесными распределениями Максвелла со значениями плотности и температуры в соответствии с данными аэрономической модели (см. рис. 2). Чтобы определить функции источника (5) надтепловых атомов водорода необходимо рассчитать скорости диссоциации и ионизации атмосферного газа УФ излучением звезды, скорости образования сопутствующего потока фотоэлектронов и, наконец, скорости диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода при переносе потока электронов в атмосфере. Жесткое XUV излучение звезды поглощается атмосферным газом экзопланеты GJ 436b и сопровождается возбуждением, диссоциацией и ионизацией атмосферных компонентов, а также



Рис. 1: Спектры потока излучения Gliese 436 (красный цвет) и Солнца (зеленый цвет) в диапазонах мягкого рентгена и жесткого ультрафиолета (левая панель). Сравнение спектров, усредненных в 10 интервалах длин волн (правая панель).

образованием потока фотоэлектронов с энергиями, достаточными для последующего возбуждения и ионизации атомарного и молекулярного водорода. Энергия вызывающих диссоциацию фотонов обычно превышает потенциал диссоциации и ее избыток идет в кинетическую энергию образующихся атомов водорода. Следовательно, скорость образования надтепловых атомов водорода на заданной высоте *z* в верхней атмосфере определяется стандартным выражением

$$Q_{\rm H}(E,z) = \sum_{l} n_{\rm H_2}(z) \int_0^\lambda d\lambda I_\infty(\lambda) \exp -\tau(\lambda,z) \sigma_{\rm H_2}^d p_{H_2}(\lambda, E_{\rm H_2,l}),\tag{7}$$

где оптическая толща τ равна

$$\tau(\lambda, z) = \sum_{k} \sigma_{k}^{a}(\lambda) \int_{z}^{\infty} n_{k}(z') dz$$

и $n_k(z)$ — числовая плотность нейтрального компонента $k, \sigma^d_{
m H_2}$ и σ^a_k — зависящие от длины волны λ сечения диссоциации H₂ и поглощения для нейтральных компонентов, соответственно. В выражении (7) использованы вероятности предиссоциации $p_{H_2}(\lambda, E_{H_2,1})$ и потенциалы диссоциативного возбуждения $E_{H_2,1}$ электронных состояний молекулярного водорода. Энергия образующихся атомов водорода равна $E = 0.5 \times (E_{\lambda} - E_{\text{H}_2,1})$, где E_{λ} — энергия фотона, а λ_k это длина волны для потенциала диссоциативного возбуждения H₂. Наконец, $I_{\infty}(\lambda)$ — это внеатмосферный поток звездного излучения на длине волны λ . Планета Gliese 436b с массой $M_{\rm p}=0.07 M_{
m Jupiter}$ и радиусом $R_{\rm p}=0.38 R_{
m Jupiter}$ вращается вокруг красного карлика Gliese 436 на орбите с большой полуосью 0.028 a.e. Для Gliese 436 использовался аппроксимированный спектр в диапазоне длин волн 1 – 91.2 нм, разбитом на 10 интервалов (см., красная линия на верхней панели рис. 1). Данный спектр был получен по результатам наблюдений MUSCLES [23]. В приведенных ниже расчетах использовалась более детальная спектральная модель потока солнечного излучения в интервале длин волн 1 – 115 нм для условий умеренной солнечной активности из работы [24] (см., зеленая линия на левой панели рис. 1). Из этой же работы выбраны относительные выходы возбужденных электронных состояний нейтральных и ионизованных продуктов фотолиза, сечения ионизации и полного поглощения для основных атмосферных компонентов — H₂, Не и Н. Детальный спектральный поток солнечного излучения был масштабирован для орбиты с большой полуосью 0.028 a.e. экзопланеты GJ 436b и ее аппроксимационного XUV спектра в соответствии с соотношениями, показанными на правой панели рис. 1. Следует отметить, что скорости образования надтепловых атомов водорода в фотоисточниках — диссоциации и диссоциативной ионизации Н₂ жестким УФ излучением звезды — вычислялись при помощи выражения (7), в котором использовались соответственно сечения фотодиссоциации и диссоциативной фотоионизации.

3. Результаты расчетов

Расчеты проводились в переходной $H_2 \rightarrow H$ области протяженной верхней атмосферы GJ 436b в интервале высот $(1.3 - 2.0) \times R_p$, где наблюдается максимальное поглощение звездного XUV излучения. На нижней границе выбранной области длина свободного пробега атомов водорода значительно меньше высоты однородной атмосферы по плотности и, соответственно, происходит локальная термализация надтепловых атомов



Рис. 2: Состав (верхняя панель) и температура (средняя панель) в переходной H₂ → H области верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b согласно аэрономической модели [9]. На верхней панели штрих-пунктирной линией красного цвета показан расчетный профиль числовой плотности надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше 1 эВ. Расчетные температура и массовая скорость фракции надтепловых атомов водорода показаны красными линиями на средней и нижней панели, соответственно.



Рис. 3: Представлены скорости образования надтепловых атомов водорода в двух каналах диссоциации (черная и красная линии) и диссоциативной ионизации (малиновая линия) молекулярного водорода XUV излучением звезды.

водорода в упругих столкновениях с окружающим атмосферным газом. Распределение основных нейтральных компонентов взято из модели [9] в соответствии с данными, приведенными на верхней панели рис. 2. На верхней границе выбранной области значения длины свободного пробега приближаются к значениям высоты однородной атмосферы по плотности и, соответственно, возможно убегание надтепловых атомов водорода с энергиями выше локального порога энергии убегания. Весь расчетный интервал высот разбит на ячейки, размер которых порядка локальной длины свободного пробега для надтепловых атомов водорода. Результаты расчетов скорости образования надтепловых атомов водорода, образующихся в процессах (1) и (2) за счет воздействия XUV излучения звезды, показаны на рис. 3. На рисунке представлены скорость образования надтепловых атомов водорода в двух каналах (линии красного и черного цвета) фотодиссоциации и диссоциативной фотоионизации молекулярного водорода. Пик образования надтепловых атомов водорода наблюдается на высоте $1.4R_p$ км и основным источником является фотодиссоциация H₂.

Данные расчетные скорости образования надтепловых атомов водорода за счет фотодиссоциации H₂ использованы как функции источника (5) в кинетическом уравнении Больцмана (4). Решением данного кинетического уравнения при помощи численной стохастической модели [15, 16], в которой рассматриваются кинетика и транспорт надтепловых атомов водорода на молекулярном уровне, являются функции распределения надтепловых атомов водорода в переходной области верхней атмосферы. Расчеты выполнены для стационарных условий в дневной верхней атмосфере в направлении планета-звезда. На рис. 4 представлены расчетные функции распределения (ФР) движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах 1.36 R_p (верхняя панель), 1.40 R_p (средняя панель) и 1.92 R_p (нижняя панель). Линиями синего цвета показаны локально равновесные распределения атомарного водорода, рассчитанные по профилю температуры из модели [9]. Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах. Так как целью данной работы является получение оценки скорости убегания атомов водорода за счет процесса фотодиссоциации Н₂, то на рис. 4 расчетные ФР представлены лишь в области надтепловых энергий выше 1 эВ. Из расчетов следует, что ФР надтепловых атомов водорода существенно неравновесны по сравнению с локально равновесными распределениями. На высотах около 1.40R_p, где производство атомов водорода в процессе фотодиссоциации H₂ близко к максимальным значениям, уже формируется значительная фракция атомов водорода с энергиями выше энергии убегания. На высоте 1.92R_p, близкой к верхней границе переходной H₂ → H области, значения расчетной ΦР выше значений локально равновесного распределения для кинетических энергий больше ~ 3 эВ, т.е. заселенность надтепловыми атомами водорода за счет диссоциации H₂ протяженной верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b в области энергий больше 3 эВ на порядок выше заселенности, рассчитанной по локально равновесному распределению.

Используя расчетные функции распределения, представленные на рис. 4, можно оценить числовую плотность фракции надтепловых атомов водорода, образующихся за счет диссоциации H_2 , и сравнить с высотным распределением тепловых компонентов нейтральной атмосферы. Высотный профиль числовой плотности надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше 1 эВ показан на верхней панели рис. 2 штрих-пунктирной линией красного цвета, где также приведены распределения по высоте теплового атомного и молекулярного водорода. Расчеты показывают, что стационарная фракция надтепловых атомов водорода. Расчеты показывают, что стационарная фракция надтепловых атомов водорода с энергиями выше 1 эВ формируется лишь в самых верхних слоях переходной области, где упругие столкновения надтепловых атомов происходят преимущественно с атомами атмосферного водорода, причем температура атмосферы здесь достаточно высока (см. среднюю панель рис. 2). Расчеты показывают, что температура и массовая скорость фракции надтепловых атомов водорода (линии красного цвета на средней и нижней панелях рис. 2) на порядок величины выше значений, характеризующих тепловую фракцию. Как следует из анализа функций распределения, представленных на рис. 4, концентрация надтепловых атомов водорода за счет процессов диссоциации H_2 в несколько раз выше концентрации атомов атмосферного водорода в области кинетических энергий больше 3 эВ.

Расчеты функций распределения, представленные на рис. 3, показывают, что процессы диссоциации $H_2 \rightarrow H$ молекулярного водорода сопровождаются образованием и переносом в самые верхние слои переходной $H_2 \rightarrow H$ области верхней атмосферы экзопланеты GJ 436b движущихся вверх надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше локальной энергии убегания. На рис. 5 показан энергетический спектр потока убегающих из атмосферы GJ 436b через верхнюю границу переходной области на высоте ~ $1.92R_p$ атомов водорода за счет процесса фотодиссоциации. Поток убегания оценивается величной 4.0×10^{11} см⁻² с⁻¹ для умеренного уровня звездной активности в рассматриваемом диапазоне ультрафиолетового излучения. Если усреднить данный поток по освещенной полусфере верхней атмосферы да счет процессов диссоциации H_2 равна 2.5×10^8 г с⁻¹, что ближе к верхней границе полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы в диапазоне ($3.7 \times 10^6 - 1.1 \times 10^9$) г с⁻¹ [4, 5]. Полученная в приведенных выше расчетах оценка скорости потери атмосферы в дисодения в приведенных выше расчетах оценка скорости потери атмосферы в условия в возможной скорости потери атмосферы для условий умеренной GJ 436b может рассматриваться как нижнее значение, так как расчеты проведены для условий умеренной звездной активности в УФ излучении, и для вероятностей предиссоциации возбужденных электронных уровней использовались минимальные значения 0.1. Естественно, в условиях высокого



Рис. 4: Расчетные функции распределения движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах $1.36R_{\rm p}$ (верхняя панель), $1.40R_{\rm p}$ (средняя панель) и $1.92R_{\rm p}$ (нижняя панель). Линиями синего цвета показаны локально равновесные распределения атомарного водорода, рассчитанные по профилю температуры из модели [9]. Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах.

уровня звездного УФ излучения вклад процессов диссоциации H₂ жестким УФ излучением звезды и сопутствующим потоком фотоэлектронов в образование потока убегающих из атмосферы атомов водорода станет еще более существенным.

4. Заключение

Процессы диссоциации Н₂ жестким ультрафиолетовым излучением родительской звезды и сопутствующим потоком фотоэлектронов являются важным источником надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере экзопланеты GJ 436b, что приводит к формированию устойчивой фракции надтепловых атомов водорода. Одним из важных следствий данных процессов является образование нетеплового потока убегающих из атмосферы атомов водорода. Поток убегания оценен величиной 4.0×10^{11} см $^{-2}$ с $^{-1}$ для умеренного уровня звездной активности в УФ излучении, что приводит к скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации H_2 равной 2.5×10^8 г с⁻¹. Данные оценки ближе к верхней границе полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы экзопланеты GJ 436b в диапазоне $(3.7 \times 10^6 - 1.1 \times 10^9)$ г с⁻¹ [4, 5]. Возможные уточнения расчетных оценок скорости потери атмосферы ожидаются по мере поступления новых наблюдательных данных как о спектре потока УФ излучения родительской звезды, так и новых наблюдений протяженной атмосферы планеты-транзита GJ 436b. Следовательно, данный источник надтепловых атомов водорода необходимо включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет. Представленная численная стохастическая модель кинетики переноса надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере GJ 436b в последующих работах будут расширена за счет учета вклада в процессы диссоциации сопутствующего потока фотоэлектронов и включения в рассмотрение процессов воздействия плазмы звездного ветра на корону планеты.



Рис. 5: Энергетический спектр потока убегающих из верхней атмосферы GJ 436b атомов водорода за счет процессов диссоциации. Вертикальной красной линией показана энергия убегания атомов водорода на верхней границе модельной атмосферы.

Исследование выполнено в рамках проекта «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение N 075-15-2019-1875).

Список литературы

- 1. H. Massol, K. Hamano, F. Tian, M. Ikoma, et al., Space Sci. Rev., 205, 153, 2016.
- 2. J. E. Owen, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47, 67, 2019.
- 3. D. V. Bisikalo, P. V. Kaygorodov, and V. I. Shematovich, Exoplanets: Atmospheres of Hot Jupiters, 103 (2017).
- 4. J. R. Kulow, K. France, J. Linsky, and R. O. P. Loyd, ApJ, 786, 132, 2014.
- 5. D. Ehrenreich, V. Bourrier, P. J. Wheatley, A. Lecavelier des Etangs, et al., Nature, 522, 459, 2015.
- 6. B. Lavie, D. Ehrenreich, V. Bourrier, A. Lecavelier des Etangs, et al., A&A, 605, L7, 2017.
- 7. H. Lammer, F. Selsis, I. Ribas, E. F. Guinan, S. J. Bauer, and W. W. Weiss, *ApJL*, **598**, L121, 2003.
- 8. R. O. P. Loyd, T. T. Koskinen, K. France, C. Schneider, and S. Redfield, ApJL, 834, L17, 2017.
- 9. A. G. Berezutsky, I. F. Shaikhislamov, I. B. Miroshnichenko, M. S. Rumenskikh, and M. L. Khodachenko, *Solar System Research*, **53**, 138, 2019.
- 10. V. Bourrier, A. Lecavelier des Etangs, D. Ehrenreich, Y. A. Tanaka, and A. A. Vidotto, A&A, 591, A121, 2016.
- 11. A. A. Vidotto and V. Bourrier, MNRAS, 470, 4026, 2017.
- 12. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and D. E. Ionov, in H. Lammer and M. Khodachenko, eds., *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments, Astrophysics and Space Science Library*, volume 411, 105 (2015).
- 13. V. I. Shematovich and M. Y. Marov, Physics Uspekhi, 61, 217, 2018.
- 14. V. I. Shematovich, Russian Chemical Reviews, 88, 1013, 2019.
- 15. V. I. Shematovich, Solar System Research, 38, 28, 2004.
- 16. V. I. Shematovich, Solar System Research, 44, 96, 2010.
- 17. J. L. Fox, M. I. Galand, and R. E. Johnson, Space Sci. Rev., 139, 3, 2008.
- 18. H. Abgrall, E. Roueff, X. Liu, and D. E. Shemansky, ApJ, 481, 557, 1997.
- 19. M. Glass-Maujean, J. Chem. Phys., 85, 4830, 1986.
- 20. J. Hodges, R. R. and E. L. Breig, JGR, 96, 7697, 1991.
- 21. P. S. Krstić and D. R. Schultz, Journal of Physics B Atomic Molecular Physics, 32, 2415, 1999.
- 22. P. S. Krstić and D. R. Schultz, Phys. Rev. A, 60, 2118, 1999.
- 23. A. Youngblood, K. France, R. O. P. Loyd, J. L. Linsky, et al., ApJ, 824, 101, 2016.
- 24. W. F. Huebner, J. J. Keady, and S. P. Lyon, Ap&SS, 195, 1, 1992.

Фундаментальные параметры Ар-звезды HD 108662

Романовская А.М.¹, Рябчикова Т.А.¹, Шуляк Д.В.²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Институт исследований Солнечной системы Общества им. М. Планка, Геттинген, Германия

Проведено исследование атмосферы Ар-звезды HD 108662, основанное на самосогласованном анализе спектра высокого разрешения и спектрофотометрических наблюдений в широком диапазоне длин волн с учетом магнитного поля. Определено содержание для 24 химических элементов и стратификация в атмосфере для Fe, линии которого дают основной вклад в линейчатое поглощение. Другой элемент группы железа — хром — не показывает значительного отклонения от однородного распределения в атмосфере звезды. В результате определены фундаментальные параметры HD 108662: $T_{\rm eff} = 10200$ K, lg g = 4.0, $R/R_{\odot} = 2.09$ и log $(L/L_{\odot}) = 1.63$, а также оценены скорость вращения $v \sin i = 20.4$ км/с и усредненное по поверхности магнитное поле $B_{\rm s} = 3300$ Гс.

Fundamental parameters of Ap-star HD 108662

Romanovskaya A.M.¹, Ryabchikova T.A.¹, Shulyak D.V.²

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia ²Max Planck Institute for Solar System Research, Gottingen, Germany

We present the results of self-consistent spectroscopic analysis of the atmosphere of Ap-star HD 108662 based on high resolution spectrum and spectrophotometric observations in a wide wavelength range. Magnetic field effects were taking into account. Abundances of 24 chemical elements were derived, and stratification of Fe which lines make the main contribution to the line absorption, was obtained. Another iron group element, Cr, does not show significant deviations from homogeneous distribution in the star atmosphere. As a result, we determined the following fundamental parameters of HD 108662: $T_{\rm eff} = 10200$ K, lg g = 4.0, $R/R_{\odot} = 2.09$ and log $(L/L_{\odot}) = 1.63$. The rotational velocity $v \sin i = 20.4$ km/c and magnetic field modulus $B_{\rm s} = 3300$ Gauss were estimated as well.

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.4.010

1. Введение

Определение фундаментальных параметров звезд ($T_{\rm eff}$, lg g, R/R_{\odot} и log(L/L_{\odot})) является одной из основных задач астрофизики. Для магнитных химически-пекулярных (Ap) звезд эта задача усложняется аномальным химическим составом их атмосфер, требующим специальных методов анализа наблюдаемых спектров. Точные значения фундаментальных параметров необходимы для определения эволюционного статуса звезды и ее положения на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, а также для проверки теоретических моделей пульсирующих магнитных звезд, поскольку модели пульсаций предсказывают сильную зависимость от радиуса звезды [1].

Механизм, объясняющий возникновение аномалий химического состава, был предложен в работе Мишо [2], согласно которому происходит разделение химических элементов в атмосфере звезды в результате диффузии атомов и ионов химического элемента под совокупным действием нескольких сил, главными из которых являются сила тяжести, направленная к центру звезды, и сила лучевого давления, выталкивающая частицы во внешние слои атмосферы. Поскольку скорости диффузионного разделения элементов очень малы, механизм диффузии требует стабильности атмосферы звезды, т.е. в первую очередь отсутствия турбуленции. Наличие глобальных магнитных полей у Ар-звезд, которые стабилизируют атмосферу, создает условия для диффузии химических элементов и создания вертикальных градиентов химического состава (стратификации).

2. Определение параметров атмосферы HD 108662

Звезда HD 108662 (17 Com) — магнитная химически пекулярная звезда спектрального класса A0p. Определение фундаментальных параметров атмосфер звезд проводится путем сравнения наблюдаемого распределения энергии в спектре с теоретическим. Поскольку выходящий поток зависит от поглощения в линейчатом спектре, необходимо правильно учитывать как общие аномалии химического состава атмосферы Ар-звезды, так и стратификацию элементов, вносящих наибольший вклад в линейчатое поглощение. В данном исследовании был использован итерационный метод определения фундаментальных параметров и химического состава, включая стратификацию, успешно применяемый при исследовании атмосфер Ар-звезд [5, 6, 7].

Для спектроскопического анализа взяты наблюдения из архива ESPaDOnS¹. Разрешающая сила $R = \lambda/\Delta\lambda = 65000$, спектральная область 3700–10000 Å. Спектрофотометрические данные в ближнем УФ и оптическом диапазонах взяты из каталога Адельмана [8] и в ближнем ИК диапазоне из каталога 2MASS (2Micron All-Sky Survey [9]).

¹http://www.cadc-ccda.hia-iha.nrc-cnrc.gc.ca/en/cfht/

Научные труды ИНАСАН, 2020, том 5, выпуск 4



Рис. 1: Содержание элементов (левая панель) и стратификация Fe (правая панель) в атмосфере звезды HD 108662. Средние по всем линиям значения содержания химических элементов представлены как log(N_{el}/N_{tot}). Красная и черная линии показывают теоретические распределения Fe для моделей 9000g40 и 10000g40 [3, 4]. Содержание железа в атмосфере Солнца показано пунктирной линией.

В первом приближении химический состав и стратификация определялись с использованием параметров атмосферы, взятых из литературы. Первоначальный расчет модели атмосферы проводился по данным из работы [10] ($T_{\rm eff} = 10300$ K, lg g = 4.3) по программе ATLAS9 [11]. Затем модель пересчитывалась с новыми параметрами по программе LLmodels [12], которая более детально учитывает аномалии содержания отдельных химических элементов при расчете линейчатого поглощения. Синтетический спектр с учетом магнитного поля рассчитывался с помощью кода Synmast [13], а атомные параметры для расчета синтетического спектра были взяты из Венской базы данных VALD3 [14]. Кроме того, для ряда наименее блендированных линий применялся метод анализа по эквивалентным ширинам, который также учитывает магнитное поле в формировании спектральных линий. Этот метод реализован в программе WidSyn [6]. Магнитное поле было оценено из дифференциального магнитного уширения магниточувствительных линий Fe II 6149 Å и 8352 Å с факторами Ланде 1.35 и 1.28, соответственно. Эти две линии при любой конфигурации магнитного поля разделяются на два компонента, поэтому наиболее часто применяются для оценки усредненного



Рис. 2: Сравнение наблюдаемого распределения энергии (заполненные квадраты и ромбы) с теоретическим, рассчитанным по программе LLmodels (красная сплошная линия) для модели атмосферы HD 108662 с параметрами 10212g40. Открытыми ромбами показаны теоретические потоки после свертки с соответствующими фильтрами, применяемыми в наблюдениях.

по поверхности звезды модуля вектора магнитного поля $B_{\rm s}$. Проекция скорости вращения на луч зрения, $v \sin i = 20.4(4)$ км/с, оценивалась одновременно с магнитным полем. В итоге получено значение магнитного поля $B_{\rm s} = 3300(150)$ Гс. В скобках указаны ошибки в последних знаках.

В каждой итерации теоретическое распределение энергии рассчитывалось для небольшой сетки моделей атмосферы с индивидуальным химическим составом и стратификацией элементов, полученных с учетом магнитного поля звезды. При известном параллаксе, варьируя $T_{\rm eff}$, lg g и радиус, получаем наилучшее согласие с наблюдениями. Если в сравнении с наблюдаемыми потоками остается расхождение между наблюдениями и модельными расчетами, то данные этапы исследования проводятся заново, уточняя модель атмосферы до тех пор, пока итерации не сойдутся. Для HD 108662 было проведено 4 итерации.

На рис. 1 (левая панель) приведено содержание химических элементов в атмосфере HD 108662 по отношению к содержанию в атмосфере Солнца. Солнечный химический состав взят из работ [15, 16, 17]. Химический состав атмосферы типичен для Ар-звезд и характеризуется, в основном, избытками до порядка величины содержания элементов железного пика и очень значительными избытками редкоземельных элементов по сравнению с солнечными значениями. Также в звезде наблюдается значительный дефицит Не. Линии Не практически не наблюдаются, поэтому для расчета модели атмосферы мы взяли предельное значение –4.05 dex, предсказываемое теорией диффузии. Определено содержание 24-х элементов, для 10-ти из них по линиям в двух стадиях ионизации.

Стратификация зависит от T_{eff} , $\lg g$ и B_s звезды [4]. Профиль стратификации можно описать ступенчатой функцией с 4-мя параметрами: содержание элемента в верхних и нижних слоях атмосферы, положение скачка содержания и ширина этого скачка [18, 19]. Стратификация рассчитывалась по программе DDaFit [18]. Для этого было отобрано 15 линий Fe I/II с разными эквивалентными ширинами и энергиями возбуждения E_i , чтобы отразить образование линий на разных оптических глубинах. Распределение Fe в атмосфере HD 108662 приведено на рис. 1 (правая панель). Теоретические расчеты диффузии [3] показывают, что с увеличением температуры звезды скачок содержания сдвигается в более верхние слои атмосферы и уменьшается разность содержания в нижних и верхних слоях, что, в целом, не противоречит наблюдаемому распределению Fe. Стратификацию другого, самого обильного элемента группы железа — Cr — оценить не удалось, поскольку в спектре нет подходящих неблендированных линий в 2-х стадиях ионизации в широком диапазоне энергий возбуждения.



Рис. 3: Сравнение наблюдаемого профиля линии Н β с синтетическими спектрами для моделей с $T_{\text{eff}} = 10200$ К и с lg g = 3.8 (синяя штриховая линия), 4.0 (красная сплошная линия), 4.2 (коричневая штрих-пунктирная линия).



Рис. 4: Сравнение наблюдаемого распределения энергии с теоретическим, рассчитанным по программе LLmodels (красная сплошная линия) для модели атмосферы HD 108662 с параметрами 10212g40. Обозначения такие же, как и на рис. 2. Наблюдения с IUE показаны штрих-пунктирной фиолетовой линией. Спектральный диапазон между УФ и оптическими наблюдениями отмечен зеленым цветом. Слева показаны оригинальные IUE данные, справа — УФ-потоки с учетом масштабирующего фактора 1.32.

Как было сказано выше, потребовалось 4 итерации для HD 108662, чтобы получить окончательные фундаментальные параметры, с пересчетом химического состава и стратификации на каждой итерации. Теоретический поток для соответствующей модели атмосферы подгонялся к наблюдаемому распределению с использованием параллакса $\pi = 13.5382(2245)$ mas, взятого из каталога GAIA DR2 [20], и варьируя радиус звезды. Поскольку HD 108662 – яркая звезда на близком расстоянии от Солнца, то межзвездное покраснение не учитывалось, что согласуется с предельной величиной E(B - V) = 0.002(14), полученной по картам межзвездного поглощения в работе [21]. В результате для HD 108662 наилучшее согласие с наблюдениями было получено для модели с параметрами $T_{\rm eff} = 10200(100)$ K, lg g = 4.00 и радиусом звезды (3.80, 4.00, 4.20) как наиболее подходящее для описания профилей водородных линий (рис. 3). Сравнение теоретического распределения энергии с наблюдаемым показано на рис. 2. Полученные эффективная температура и радиус звезды позволяют оценить светимость звезды по формуле Стефана-Больцмана: $\log(L/L_{\odot}) = 1.63(06)$.

Необходимо отметить, что для HD 108662 имеются наблюдения в ультрафиолетовой области 1900– 3000 Å, полученные на телескопе International Ultraviolet Explorer (IUE)². Однако, при построении спектрального распределения энергии в широком диапазоне длин волн оказалось, что существует заметный скачок в узком спектральном диапазоне между УФ и оптическими наблюдениями (см. рис. 4, левые панели). Если ввести масштабирующий коэффициент 1.32 для IUE потоков, то мы получаем хорошее согласие между наблюдаемым и теоретическим распределением энергии, рассчитанным с параметрами HD 108662, которые также описывают наблюдаемые профили водородных линий (рис. 4, правые панели). Не исключено, что неточности в калибровке УФ потоков обусловлены яркостью HD 108662 (17 Com).

3. Заключение

Проведен детальный анализ атмосферы звезды HD 108662 методом спектроскопии. Получены значения скорости вращения $v \sin i$ и величины модуля вектора магнитного поля $B_{\rm s}$. Определены средние значения содержания химических элементов в атмосфере звезды. Проведен анализ стратификации Fe, который показал неплохое соответствие предсказаниям теории диффузии.

 $^{^{2}}$ http://archive.stsci.edu/iue/

С учетом аномалий химического состава и стратификации элементов путем последовательных итераций определены фундаментальные параметры атмосферы HD 108662: эффективная температура, ускорение свободного падения, радиус и светимость.

В данной работе использовались базы данных VizieR и VALD3. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-32-90147.

Список литературы

- 1. M. S. Cunha, D. Alentiev, I. M. Brandão, and K. Perraut, MNRAS, 436, 1639, 2013.
- 2. G. Michaud, ApJ, **160**, 641, 1970.
- 3. F. Leblanc and D. Monin, J. Astron. Soc. Canada, 99, 139, 2005.
- 4. F. LeBlanc, D. Monin, A. Hui-Bon-Hoa, and P. H. Hauschildt, A&A, 495, 937, 2009.
- 5. O. Kochukhov, D. Shulyak, and T. Ryabchikova, *A&A*, **499**, 851, 2009.
- 6. D. Shulyak, T. Ryabchikova, and O. Kochukhov, A&A, 551, A14, 2013.
- A. Romanovskaya, T. Ryabchikova, D. Shulyak, K. Perraut, G. Valyavin, T. Burlakova, and G. Galazutdinov, MNRAS, 488, 2343, 2019.
- 8. S. J. Adelman, D. M. Pyper, S. N. Shore, R. E. White, and W. H. Warren, Jr., A&A Sup., 81, 221, 1989.
- 9. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, C. A. Beichman, et al., VizieR Online Data Catalog, 2246, 2003.
- 10. I. S. Savanov, T. A. Ryabchikova, and E. S. Davydova, Astronomy Letters, 22, 815, 1996.
- 11. R. Kurucz, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid. Kurucz CD-ROM No. 13. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993., 13, 1993.
- 12. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, C. Stütz, and W. W. Weiss, A&A, 428, 993, 2004.
- O. P. Kochukhov, in I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, O. M. Neizvestnaya, and V. M. Shapoval, eds., *Physics of Magnetic Stars*, 109–118 (2007).
- T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, H. C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P. S. Barklem, *Physica Scripta*, 90, 054005, 2015.
- 15. P. Scott, N. Grevesse, M. Asplund, A. J. Sauval, et al., A&A, 573, A25, 2015.
- 16. P. Scott, M. Asplund, N. Grevesse, M. Bergemann, and A. J. Sauval, A&A, 573, A26, 2015.
- 17. N. Grevesse, P. Scott, M. Asplund, and A. J. Sauval, A&A, 573, A27, 2015.
- 18. T. Ryabchikova, F. Leone, and O. Kochukhov, A&A, 438, 973, 2005.
- 19. D. Shulyak, T. Ryabchikova, L. Mashonkina, and O. Kochukhov, A&A, 499, 879, 2009.
- 20. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., A&A, 616, A1, 2018.
- 21. R. Lallement, J. L. Vergely, B. Valette, L. Puspitarini, L. Eyer, and L. Casagrande, A&A, 561, A91, 2014.

Содержание

Самусь Н.Н., Малков О.Ю., Поляченко Е.В. Современные проблемы астрономии: звездообразова-	
ние и скопления	169
Малков О.Ю., Поляченко Е.В., Самусь Н.Н. Современные проблемы астрономии: исследования	
звезд	174
Поляченко Е.В., Самусь Н.Н., Малков О.Ю. Современные проблемы астрономии: Галактика и га-	
лактики	183
Кузин С.П. Предложения по выбору структуры и состава системы контроля геодезических пара-	
метров Земли	188
Кузин С.П. Наземные средства измерений системы контроля геодезических параметров Земли и	
направления их развития	192
Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Д. Результаты наблюдений астероида Дон Кихот	
в обсерватории Санглох	196
Гулиев А.С., Гасымов Г.А. К вопросу о влиянии солнечной активности на открытие комет	201
Рябухина О.Л., Кирсанова М.С. Аммиак в плотных сгустках волокна WB 673	207
$A \epsilon mae \epsilon a A.A., Шематович В.И. О нетепловой потере атмосферы за счет фотодиссоциации m H_2$	
для экзопланеты GJ 436b	211
Романовская А.М., Рябчикова Т.А., Шуляк Д.В. Фундаментальные параметры Ар-звезды	
HD 108662	219

Contents

<u>;</u> 9
74
33
38
<i>)</i> 2
<i>)</i> 6
)1
)7
11
19