

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**Сборник трудов конференции
«Звезды и спутники»,
посвященной 100-летию со дня рождения
А.Г. Масевич**

Под редакцией Б.М. Шустова и Д.З. Вибе

Москва
Янус-К
2018

УДК 52
ББК 22.6г
С 23

С23 Сборник трудов конференции «Звезды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения А.Г. Масевич, проведенной в Москве 15–16 октября 2018 г. / Сборник научных трудов ИНАСАН. Под редакцией Б.М. Шустова и Д.З. Вибера – М.: Изд-во Янус-К, 2018, 440 с., илл.

ISBN 978-5-8037-0740-0

Редколлегия

Д.В. Бисикало, Б.М. Шустов, С.И. Барабанов, Д.З. Вибера, О.Ю. Малков, Л.И. Машонкина, М.Е. Сачков, В.И. Шематович

Второй выпуск сборника научных трудов ИНАСАН посвящен 100-летию со дня рождения Аллы Генриховны Масевич. Благодаря ее научному и научно-организационному таланту астрономическая наука в нашей стране получила чрезвычайно важные новые направления развития: исследования с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) и физика и эволюция звезд. Две эти научные страсти — звезды и спутники — заполнили всю научную жизнь А.Г. Масевич. Помимо них она уделяла большое внимание работе с астрономическими данными, организации международных научных исследований и многому другому. Книга написана учениками Аллы Генриховны, а также специалистами, которые продолжают развитие заданных ею научных направлений. Книга будет полезна специалистам и аспирантам, занимающимся геодинамическими, астрономическими и астрофизическими исследованиями, а также позволит получить представление о текущем положении дел по этим исследованиям в Институте астрономии РАН.

© ИНАСАН, 2018
© Коллектив авторов, 2018

ISBN 978-5-8037-0740-0

Лидеры отечественной астрономии: проф. А.Г. Масевич

Шустов Б.М., Длужневская О.Б., Рыхлова Л.В.,
Тутуков А.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Статья посвящена памяти большого ученого и талантливого организатора отечественной астрономии профессора Аллы Генриховны Масевич. В статье приводится краткий обзор главных событий жизни и наиболее крупных научных и научно-организационных достижений А.Г. Масевич.

Leaders of Russian astronomy: Prof. A.G. Masevich

Shustov B.M., Dluzhnevskaya O.B., Rykhlova L.V., Tutukov A.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

This paper is dedicated to the memory of the great scientist and talented organizer of national astronomy, Professor Alla Genrykhovna Masevich. It gives a brief overview of the main life events and the largest scientific and organizational achievements of A.G. Masevich.

1. Введение

Историки и философы уже не первое тысячелетие спорят о роли личности в истории. Однозначного мнения по этому вопросу нет. Много зависит от исторической ситуации, исторических закономерностей и случайностей и от самой личности. И все же некоторые личности в истории человечества были настолько яркими и мощными, что действительно определили ход истории. Это относится ко всем сферам жизни человечества и прежде всего к науке. В истории науки таких имен было немало. В современном мире крупные научные достижения (чиновники называют их «прорывными») в значительной степени определяются финансированием. Например, расхожая (в научных кругах) оценка стоимости экспериментального открытия гравитационных волн составляет около миллиарда долларов, бозона Хиггса — десятки миллиардов долларов и т.д. И все-таки научный прогресс все еще в очень существенной степени зависит от выдающихся личностей. Именно такой личностью была Алла Генриховна Масевич.

Ее жизнь в науке была очень насыщенной и яркой. По общим меркам ее научный ранг не был уж очень впечатляющим: она не

была членом академии наук ни в СССР, ни в России, не занимала директорских постов, но именно благодаря ее научному и, конечно, научно-организационному таланту в нашей стране астрономическая наука получила новые, чрезвычайно важные направления развития. Главные их этих направлений — исследования с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ) и физика и эволюция звезд. Эти две научные страсти — звезды и спутники — проходят через всю жизнь А.Г. Масевич. Благодаря глубокой научной интуиции А.Г. Масевич живо воспринимала новые тенденции в астрономии и всячески поддерживала их развитие в России. Так, например, произошло с развитием научного направления «астрономические данные».

Эта статья и вся книга посвящены памяти большого ученого и талантливого организатора отечественной астрономии — профессора Аллы Генриховны Масевич, со дня рождения которой в этом году исполняется 100 лет. А лучшая память — это успешное продолжение и развитие научных направлений, которым она посвятила свою жизнь.

2. Факты из жизни

А.Г. Масевич родилась 9 октября 1918 г. в Тбилиси. В 1937 г. после окончания средней школы в городе Ханлар (Азербайджанская ССР) она поступила на физико-математический факультет ГПИ им. К. Либкнехта в Москве и в 1941 г. с отличием его окончила. В 1942–1943 гг. находилась в эвакуации в городе Куйбышеве. В 1943 г. поступила в аспирантуру на кафедру астрофизики МГУ им. М.В. Ломоносова и в 1946 г. успешно защитила кандидатскую диссертацию на тему «Строение и источники энергии звезд — красных гигантов». С 1945 по 1957 гг. работала в МГУ им. М.В. Ломоносова старшим научным сотрудником Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга. В 1956 г. защитила докторскую диссертацию на тему «Эволюция звезд главной последовательности». С 1952 по 1987 гг. А.Г. Масевич была заместителем председателя Астрономического совета АН СССР (Астросовета). В 1970–1976 гг. она профессор МИИГАиК. В 1981–1982 гг. работала в Нью-Йорке заместителем Генерального секретаря Оргкомитета ООН по подготовке 2-ой конференции ООН по исследованию и использованию космического пространства в мирных целях. С 1987 по 2002 гг. занимала должность главного научного сотрудника Астросовета (с 1991 г. Института астрономии РАН). До конца своей жизни (она скончалась 6 мая 2008 г. в Москве) Алла Генриховна поддерживала связь с коллегами и друзьями-астрономами.

3. Исследования на основе наблюдений ИСЗ

В 2017 г. исполнилось 60 лет со дня запуска первого искусственного спутника Земли. Запуск «Спутника» ознаменовал начало космической эры в истории человеческого общества, дал импульс быстрому развитию космонавтики, новых технических средств, необходимых для исследований и освоения космического пространства и, естественно, привел к появлению мощного направления науки — космических исследований. Процесс этот был быстрым, но не простым. В первые годы запусков особое значение имели наземные оптические наблюдения ИСЗ, поскольку они были единственным надежным средством, позволяющим определять орбиты ИСЗ. Для наблюдений низкоорбитальных объектов было необходимо иметь сеть станций, которую нужно было срочно создавать.

Судьба распорядилась таким образом, что запуск первого ИСЗ пришелся на тот период, когда Астрономический совет АН СССР координировал работы в области наземной оптической астрономии всех астрономических учреждений АН СССР. Логично, что организация сети станций наблюдений ИСЗ была поручена Астросовету и персонально энергичному и волевому заместителю председателя Астросовета А.Г. Масевич, поскольку она успешно руководила многими крупными проектами, осуществляемыми по эгидой Астросовета. Это в полной мере относится и к поручению Президиума АН СССР — организовать работу по созданию сети станций оптических наблюдений ИСЗ и подготовиться к наблюдению первого Спутника. Задача была блестяще выполнена. К новому поручению А.Г. Масевич отнеслась со свойственным ей энтузиазмом и активностью, и к моменту запуска первого Спутника было подготовлено к наблюдениям более 60 станций на территории нашей страны. Сразу же начала создаваться и зарубежная сеть станций наблюдений. Первые наблюдения, в том числе и с зарубежных станций, поступили в Астросовет уже в октябре 1957 г. Об этом и о дальнейших работах в области наблюдений спутников Алла Генриховна более подробно пишет в своей автобиографической книге «Звезды и спутники в моей жизни» (2007).

Одной из важных задач подготовки к наблюдениям ИСЗ было создание специальных инструментов. Первые приборы, называвшиеся АТ-1 (Астрономическая трубка — 1), были очень простыми. По сути это была небольшая зрительная труба апертурой 50 мм с плоским зеркалом для удобства наблюдений. Понятно, что это было решение «на первое время». А.Г. Масевич понимала, что здесь нужны другие технологии, и инициировала создание вполне современных (по

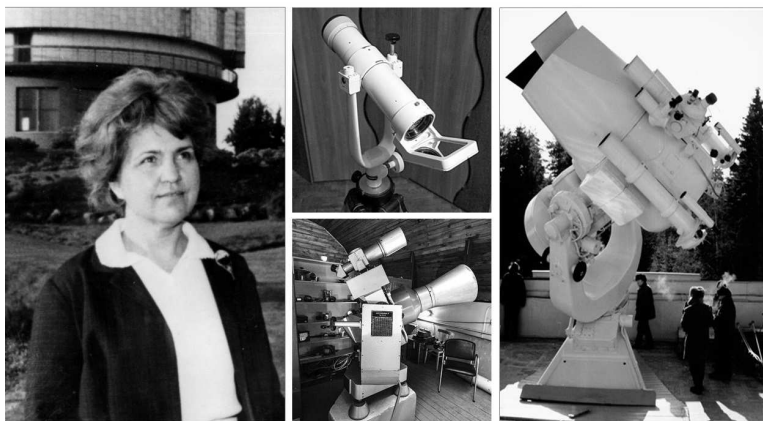


Рис. 1. А.Г. Масевич и созданные по ее инициативе инструменты для наблюдений ИСЗ. В центре сверху — трубка АТ-1; в центре внизу — камера АФУ-75, справа — уникальная камера ВАУ.

тому времени) фотографических камер [1]. Камера АФУ-75 апертурой 210 мм, сконструированная в астрономической обсерватории Латвийского государственного университета им. П. Стучки, стала основным экспедиционным инструментом для наблюдений ИСЗ на многие годы [2].

По инициативе А.Г. Масевич в 1959 г. под Москвой было начато строительство Звенигородской обсерватории, предназначенной для разработки методик фотографических наблюдений ИСЗ, проведения новых конструкторских работ, испытаний новой аппаратуры. В 1971 г. на обсерватории вошла в строй уникальная мощная фотографическая камера ВАУ (Высокоточная астрономическая установка) апертурой 50 см. Камера была самым передовым словом техники [3]. Эта установка используется до сих пор для наблюдений ИСЗ на высокоэллиптических и геосинхронных орбитах, но уже с другими, современными приемниками.

В январе 1961 г. в Москве по инициативе А.Г. Масевич состоялось первое международное Собрание наблюдателей ИСЗ из социалистических стран. Была заложена основа для многостороннего сотрудничества в области наблюдений ИСЗ. В 1967 г. это сотрудничество стало частью комплексной программы по мирному исследованию

и использованию космоса «Интеркосмос» [4, 5]. В 1970-х гг. общими усилиями стран сотрудничества был создан лазерный дальномер [6]. Начали развиваться доплеровские методы [7]. В рамках программы было выполнено несколько крупных научных проектов: программа «Атмосфера» по уточнению моделей верхней атмосферы из анализа возмущений орбит ИСЗ; проект «Большая хорда» (построение меридиональной дуги Арктика-Антарктика) и др. Подробнее об этом периоде см. в [8].

А.Г. Масевич прекрасно чувствовала новые направления исследований, особенно те, которые имели значительный практический интерес. В 1990-х гг. она инициировала проведение научных конференций по проблеме космического мусора. Начиная с 1993 г., ИНАСАН каждые два года проводит такие всероссийские конференции под названием «Околоземная астрономия».

4. Физика и эволюция звезд

Второе (по счету, не по значимости) научное направление — физика и эволюция звезд. Хотя в СССР были ученые, занимавшиеся исследованиями в этом направлении, но именно А.Г. Масевич создала отечественную школу в области численного моделирования структуры звезд и эволюционных процессов в одиночных и двойных звездах. Среди добрых трех десятков ее учеников, получивших ученые степени кандидатов и докторов наук, почти две трети специализировались по этому направлению (к ним имеют честь отнести себя и два автора этой статьи — А.В. Тутуков и Б.М. Шустов).

А.Г. Масевич умела находить среди студенческой поросли молодых людей, искренне увлеченных наукой, и затем воспитывать из них настоящих ученых. В частности, Б.М. Шустов прошел хорошую школу по физике звезд, работая с А.Г. Масевич над книгой «Физика и эволюция звезд» (ВИНИТИ, 1972) [9]. А.Г. Масевич сразу устанавливала высокий уровень требований. В то же время, невозможно не отметить заслугу Аллы Генриховны в создании в нашем учреждении теплой, дружеской, творческой атмосферы взаимодействия и взаимопомощи, удивлявшей и привлекавшей многих наших зарубежных коллег и друзей того времени.

В начале своей карьеры А.Г. Масевич совместно с П.П. Паренаго выполнила детальное исследование зависимостей масса-светимость и масса-радиус для каждой из последовательностей звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рассела [10]. Написанная ею в середине пятидесятых годов популярная книга «История Солнца» (Молодая гвардия, 1955)



Рис. 2. На симпозиуме МАС №93 (Fundamental Problems in the Theory of Stellar Evolution), Киото, Япония, 1980 г. Справа налево: А.Г. Масевич, А.В. Тутуков, К. Норман, Е. ван ден Хойвел.

привлекла внимание многих молодых людей к занятию астрономией. А.Г. Масевич ставила задачи по изучению влияния потери вещества звездами разных типов на их эволюцию. Эта тема стала со временем одной из ведущих в изучении эволюции одиночных и двойных звезд. Выяснилось, в частности, что мощный звездный ветер массивных звезд, поддерживаемый радиативным давлением, препятствует образованию звезд с массами, заметно превышающими сто солнечных масс [11]. Это «закрыло» гипотезу образования сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактик (в квазарах) путем коллапса сверхмассивных звезд. С другой стороны, именно потеря вещества компонентами тесных двойных звезд оказалась во многом определяю-

щим фактором их эволюции. Изучение эволюции двойных звезд стало «визитной карточкой» группы астрофизиков, возглавляемой А.Г. Масевич.

Помимо методов расчета звездной эволюции, большое внимание уделялось статистическому изучению наблюдаемых свойств двойных звезд на основе доступных каталогов. В частности, были изучены распределения спектрально-двойных и визуально-двойных звезд различных типов и получены исходные распределения двойных звезд нашей Галактики по их основным параметрам: по массам и отношению масс компонентов, по начальному расстоянию между компонентами и т.д. Со временем эти распределения стали базой для развития сценарного подхода — мощного инструмента для оценки эволюции ансамбля двойных звезд в Галактике. Эта программа была использована в Астросовете для первых оценок числа тесных двойных звезд различных классов в Галактике, частоты вспышек сверхновых звезд, частоты слияния релятивистских компонентов под влиянием излучения гравитационных волн [12, 13]. В рамках этого подхода А.В. Тутуковым и Л.Р. Юнгельсоном было показано, что компоненты наиболее тесных систем могут сливаться под влиянием излучения гравитационных волн этими системами. Это были одни из первых шагов по созданию теории влияния гравитационных волн на эволюцию двойных звезд. Теория блестяще подтвердилась при регистрации слияния черных дыр в эксперименте LIGO, широко известного достижения, отмеченного Нобелевской премией по физике 2017 г.

Изучение картины протекания процессов слияния компонентов двойных систем в последние годы стало одним из наиболее популярных направлений в астрофизике. Слияние вырожденных карликов предложено как модель сверхновых звезд типа Ia, слияние нейтронных звезд с нейтронными звездами и черными дырами — как модель вспышек гамма излучения для т.н. коротких гамма-всплесков.

Начатое А.Г. Масевич изучение физики двойных звезд стало со временем одним из основных направлений исследовательской активности сотрудников Института астрономии АН СССР, преемника Астросовета. Базовые результаты по изучению физики и эволюции звезд были изложены А.Г. Масевич и А.В. Тутуковым в 1988 г. в книге «Эволюция звезд: теория и наблюдения» [14]. В этой книге были представлены также основы и примеры уже упоминавшегося сценарного подхода к изучению эволюции одиночных и тесных двойных звезд.

А.Г. Масевич организовала сотрудничество ученых социалистических стран по проблеме «Физика и эволюция звезд» (1974–1990 гг.).

Это был очень удачный пример эффективного проекта международного научного сотрудничества [15].

5. Астрономические данные

1970-е гг. прошлого столетия ознаменовались лавинообразным ростом наблюдательных данных. Это было результатом введения в строй новых мощных наземных телескопов и успешного осуществления космических миссий. Проблема накопления, хранения и использования огромных массивов данных стала весьма острой. К счастью, начавшийся в это же время расцвет информационных технологий создал условия для появления специализированных центров данных. Крупнейшие европейские обсерватории объединили усилия и учредили единый центр астрономических данных в Страсбурге (CDS, Centre de données astronomiques de Strasbourg). Алла Генриховна была хорошо знакома с директором CDS профессором Карлосом Яшеком. Его пригласили в Москву как гостя АН СССР для обсуждения вопросов сотрудничества. В результате визита было подписано соглашение о создании в Астросовете Центра астрономических данных (ЦАД) для Советского союза и социалистических стран на правах филиала CDS, а директор ЦАД О.Б. Лужневская вошла в Международный совет CDS. Таким образом, была решена проблема безвозмездного использования в наших странах всей накопленной в мире информации в виде астрономических каталогов. Развитие этой тематики привело к созданию виртуальных обсерваторий. Россия была одной из первых стран, где начало развиваться это направление в астрономии.

6. Всемирное признание

Незаурядные научные способности, сильный характер, трудолюбие и живой интерес ко всему новому выделяли А.Г. Масевич из среды коллег по учебе и работе. В ней удачно сочетались приятная внешность, женственность, общительность и умение находить правильный стиль общения и с подчиненными и высоким начальством. Все это способствовало ее успехам в организации и проведении проектов. За комплекс работ по развитию методов космической геодезии и их реализации в 1975 г. А.Г. Масевич присуждена Государственная премия СССР. Она также была награждена орденом «Знак почета» и орденом «Трудового красного знамени».

Ее имя широко известно за рубежом. Она была членом многих международных комиссий и рабочих групп по космическим иссле-



Рис. 3. Награждение А.Г. Масевич польским орденом в 1998 г. А.Г.Масевич стоит в окружении (слева направо): посла Польши в России А. Залуцкого и известных польских астрофизиков Ю. Смака и Я. Зюлковского.

дованиям, в том числе Международного комитета по космическим исследованиям (COSPAR), программы «Интеркосмос» социалистических стран, Международного астрономического союза (IAU) и др. Признание ее заслуг в исследованиях космоса выразилось в том, что она была избрана одним из первых действительных членов Международной академии космонавтики (1964), иностранным членом Королевского астрономического общества Великобритании (1963) и Индийской национальной академии наук (1980). В 1963 г. ей присуждена премия Галабера Международной космонавтической федерации. Алла Генриховна награждена памятными медалями Болгарии, Монголии, Чехословакии, Франции и «Командорским крестом со звездой Ордена заслуг перед Республикой Польша» (1998). Биография А.Г. Масевич как выдающегося ученого современности включена во многие зарубежные биографические справочники. Ее именем названа малая планета (1904) Масевич.

Активную научно-организационную деятельность А.Г. Масевич всегда совмещала с общественной деятельностью и с 1979 по 1991 г. являлась заместителем председателя Советского комитета защиты ми-

ра. К сожалению, объем этой статьи невелик и не смог вместить многих важных моментов из жизни и научной деятельности Аллы Генриховны Масевич, но вся эта книга посвящена развитию работ и идей, у истоков которых она стояла.

Список литературы

1. A. G. Masevich and A. M. Lozinskii, *PASP*, **70**, 79, 1958.
2. M. K. Abele, I. Almar, K. Hamal, W. W. Dobaczewska, et al., *Use of optical observations of satellites in geophysics and geodesy*, 174–200 (1976).
3. A. G. Masevich, A. M. Lozinskii, and V. E. Chertoprud, *Soviet Physics Uspekhi*, **13**, 303, 1970.
4. A. G. Masevich and S. K. Tatevyan, *Byull. Stantsij Optichesk. Nablyud. Iskusstv. Sputnikov Zemli, No. 57, p. 7 - 13*, **57**, 7, 1971.
5. A. G. Masevich, in H. Kautzleben, A. Massevitsch, E. Tengström, and E. Buschmann, eds., *Geodesy and Physics of the Earth*, 31–41 (1977).
6. A. G. Masevich, *Bulletin Geodesique*, **50**, 271, 1976.
7. A. G. Massevitch, V. D. Kraichev, V. V. Nesterov, and L. V. Rykhlova, *Nauchnye Informatsii*, **66**, 86, 1990.
8. N. Georgiev, IV and A. G. Masevich, *Ispol'zovanie opticheskikh nabliudenii iskusstvennykh sputnikov zemli dlia geodezii : [monogr.]* (1979).
9. A. G. Masevich and B. M. Shustov, *Fizika i evoliutsiia zvezd* (1972).
10. P. P. Parenago and A. G. Masevich, *Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta*, **20**, 81, 1951.
11. A. G. Masevich, A. V. Tutukov, O. B. Dluzhnevskaya, V. I. Varshavsky, U. H. Uus, E. V. Ergma, E. I. Popova, and G. G. Rodionova, *Nauchnye Informatsii*, **19**, 45, 1971.
12. A. G. Masevich, A. V. Tutukov, and L. R. Iungelson, *Priroda*, 68–76, 1981.
13. L. R. Yungelson and A. G. Masevich, *Astrophysics and Space Physics Reviews*, **2**, 29, 1983.
14. A. G. Masevich and A. V. Tutukov, *Stellar evolution: Theory and observations* (1988).
15. A. G. Masevich, in O. B. Dluzhnevskaya, ed., *First school of Young Astronomers of Multilateral Cooperation of the Academies of Sciences of the Socialist Countries on the Problem of Physics and Evolution of Stars*, 1–11 (1977).

Космические
астрометрия, геодезия,
геодинамика

О верхней атмосфере Земли

Шематович В.И.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследования верхней атмосферы Земли проводятся в Институте астрономии РАН на протяжении последних 30 лет. Одним из важнейших результатов этих исследований является создание модели образования горячей кислородной геокороны на основе кинетического метода Монте-Карло, позволившей теоретически предсказать распределение надтепловых атомов кислорода в верхней атмосфере Земли. Разработанная модель используется для интерпретации наблюдений образования и заселения верхних слоев атмосферы Земли атомами кислорода с надтепловыми энергиями, а также применяется для оценки негравитационного влияния надтепловых атомов кислорода на движение ИСЗ.

Earth's upper atmosphere

Shematovich V.I.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Investigations of the Earth's upper atmosphere have been conducted at the Institute of Astronomy of the RAS for the last 30 years. One of the most important results of these studies is the creation of a model of the hot oxygen geocorona formation on the basis of kinetic Monte Carlo method, which allows predicting theoretically the distribution of hot oxygen atoms in the upper atmosphere of the Earth. The developed model is used to interpret observations of the formation and population of the upper layers of the Earth's atmosphere by oxygen atoms with superthermal energies, and is also used to assess the non-gravitational effect of superthermal oxygen atoms on the satellite dynamics.

1. Введение

С началом космической эры были проведены наблюдения планетных атмосфер из космоса, что позволило открыть гораздо более сложную структуру внешних слоев планетных атмосфер. Из анализа полученных наблюдательных данных следовало, что верхние слои планетных атмосфер населены как фракцией тепловых атомов со средней кинетической энергией, отвечающей температуре атмосферы, так и фракцией горячих атомов со средней кинетической энергией много больше температуры экзосферы [1, 2]. Соответственно, новые наблюдательные данные указали на необходимость кинетического описания самых верхних слоев планетных атмосфер, в отличие от обычно используе-

мого классического представления о бесстолкновительных планетных экзосферах. Другими словами, наблюдательные проявления горячих атомов явились подтверждением теоретически предсказанной важной роли нетепловых и неравновесных процессов в планетных атмосферах, инициированных надтепловыми частицами [1].

2. Надтепловые атомы кислорода в верхней атмосфере Земли

При исследовании течения разреженного газа в верхней атмосфере Земли необходимо учитывать возможные потери и образование атомов и молекул за счет нетепловых процессов, в которых образуются надтепловые частицы [1, 2]. Надтепловыми (или горячими) обычно принято считать частицы с кинетическими энергиями выше $5-10 kT$, где T — температура окружающего атмосферного газа, k — постоянная Больцмана. Они образуются в различных физико-химических процессах, продукты которых имеют избыточную кинетическую энергию. Если скорость образования таких частиц, заселяющих область надтепловых энергий, достаточно высока по сравнению со скоростью их термализации в упругих столкновениях, то формируется их устойчивая фракция, которая может существенно возмущать локально-равновесное (максвелловское) распределение тепловой энергии окружающего атмосферного газа. Основными источниками надтепловых частиц в разреженном газе планетных атмосфер являются: 1) перезарядка высокоэнергетических ионов магнитосферного происхождения с нейтральными компонентами атмосферного газа; 2) диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов с ионосферными электронами; 3) диссоциация и диссоциативная ионизация ультрафиолетовым (УФ) солнечным излучением и магнитосферной плазмой; 4) экзотермические ион-молекулярные и нейтральные химические реакции; 5) реакции перезарядки и разбрызгивание (sputtering) атмосферного газа магнитосферной плазмой.

Фотохимические источники, такие как диссоциативная рекомбинация, диссоциация солнечными фотонами в диапазонах мягкого рентгена (от 1 до 10 нм) и жесткого ультрафиолета (от 10 до 100 нм), электронами с высокими энергиями, а также экзотермические химические реакции, сопровождаются выделением энергии порядка нескольких электронвольт (эВ), причем часть этой энергии может быть запасена в виде внутреннего возбуждения продуктов реакции [1]. *Плазменные источники* включают процессы перезарядки ионов с высокими энергиями и разбрызгивания атмосферного газа

магнитосферной плазмой. Они характеризуются высокой эффективностью передачи энергии и сопровождаются образованием горячих частиц с энергиями вплоть до нескольких сотен эВ [2].

Основной трудностью исследования процессов образования, кинетики и переноса надтепловых атомов и молекул в возбужденных состояниях в верхней атмосфере Земли является необходимость рассмотрения этих процессов на молекулярном уровне описания. Действительно, надтепловые частицы образуются в термодинамически открытой системе — разреженном газе верхней атмосферы, — подверженной воздействию солнечного УФ излучения и плазмы солнечного ветра. Соответственно, их дальнейшая судьба определяется с использованием кинетических уравнений Больцмана для химически реагирующего разреженного атмосферного газа. Одним из перспективных подходов к исследованию кинетики и переноса надтепловых частиц является разработка объектно-ориентированных дискретных математических моделей, использующих вероятностную интерпретацию столкновений в ансамбле модельных частиц. К этому классу подходов относится кинетический метод Монте-Карло и его модификации для исследования неравновесных процессов в химически активных газах, в частности, в разреженном газе планетных атмосфер [1]. Соответственно, разработка и развитие теории горячей кислородной геокороны и были выполнены при помощи созданной в Институте астрономии РАН модификации кинетического метода Монте-Карло [3, 4, 5]. Предложенная модель позволила рассчитать функции распределения тепловых и надтепловых атомов кислорода по кинетической энергии в переходной от термосферы к экзосфере области верхней атмосферы Земли. На их основе определяются высотные профили тепловых и надтепловых атомов кислорода и другие характеристики состояния атмосферного газа в геокороне.

В качестве примера на рис. 1 показана функция распределения атомов кислорода в верхней атмосфере Земли, нормированная на единицу, рассчитанная при помощи кинетической модели горячей геокороны на высоте 500 км, т.е. на уровне экзобазы. Видно, что область надтепловых энергий $10^{-1} - 10^1$ эВ заселена атомами кислорода, образующимися в фотохимических реакциях [3, 4, 5], а область сверхтепловых энергий $10^1 - 10^4$ эВ образована за счет процесса высыпания ионов кислорода O^+ с высокими кинетическими энергиями [6]. При этом концентрации горячих атомов кислорода значительно выше концентраций тепловых атомов кислорода согласно распределению Максвелла при температуре 1170 К в переходной области верх-

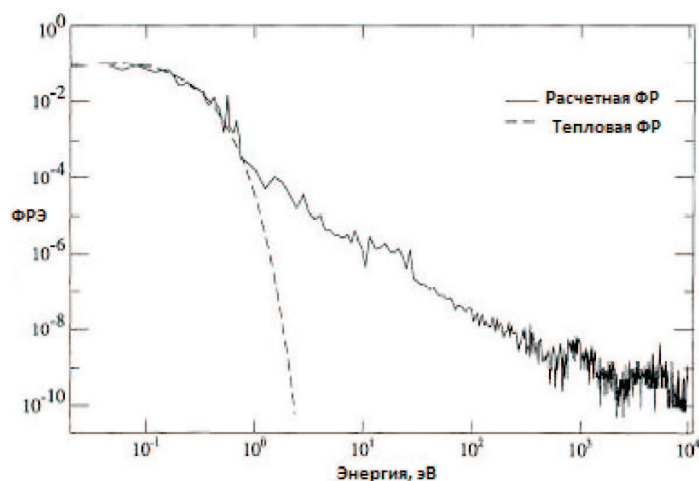


Рис. 1. Расчетная функция распределения по кинетической энергии (ФРЭ) атомов кислорода на высоте 500 км в верхней атмосфере Земли. Тепловая фракция соответствует температуре 1170 К и показана прерывистой кривой. Область надтепловых энергий $10^{-1} - 10^1$ эВ заселена атомами кислорода, образующимися в фотохимических реакциях [3, 4], а область сверхтепловых энергий $10^1 - 10^4$ эВ образована за счет процесса высыпания ионов кислорода O^+ с высокими кинетическими энергиями [6].

ней атмосферы Земли. Именно эти атомы кислорода с энергиями до ~ 10 эВ и населяют горячую кислородную геокорону [3, 4, 5].

3. Горячая кислородная геокорона

Горячая кислородная геокорона составляет важное звено в солнечно-земных связях, так как является источником нейтральных энергетических атомов и вносит существенный вклад в аэронию верхней атмосферы Земли [1, 2]. Данная область околоземного пространства чрезвычайно важна для анализа физических свойств атмосферы, в частности, уточнения параметров эмпирических моделей верхней атмосферы, и ее исследование является одной из важнейших задач геофизики, в том числе, и в рамках таких программ как «Космическая погода».

В наших исследованиях были установлены следующие основные источники горячих (надтепловых) атомов кислорода в верхней атмосфере Земли:

- Экзотермическая фотохимия: диссоциация O_2 жестким УФ излучением Солнца и сопутствующими потоками фото- и авроральных электронов, диссоциативная рекомбинация молекулярного иона O_2^+ и целый ряд экзотермических ион-молекулярных реакций [3, 4];
- Перезарядка и перенос момента при высыпании ионов кислорода O^+ в условиях высокой геомагнитной активности [6];
- Механизм формирования потока горячих атомов кислорода за счет переноса момента от высыпающихся в полярных областях потоков протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями [7, 8].

Проведенные исследования роли горячих атомов кислорода в верхней атмосфере Земли показывают, что наличие фракции надтепловых частиц:

- приводит к локальным изменениям химического состава, так как неравновесные коэффициенты скорости химических реакций (особенно с высокими энергиями активации) между надтепловыми частицами и окружающим атмосферным газом намного выше, чем для химических реакций при тепловых энергиях [5];
- вызывают нетепловые атмосферные эмиссии [9, 10];
- населяют горячие планетные короны [2, 3] и усиливают нетепловые атмосферные потери [2], определяя эволюцию атмосферы на астрономических масштабах времени.

4. Заключение

Одним из важных прикладных результатов исследований является полученная в работе [11] оценка вклада горячей геокороны в торможение ИСЗ при движении в верхней атмосфере Земли. Известно, что важным фактором в этом негравитационном процессе торможения является перенос момента при столкновениях атмосферных атомов и молекул с поверхностью ИСЗ. Эффективность данного процесса определяется локальным атмосферным давлением и так называемым

аэродинамическим коэффициентом сопротивления космического аппарата. В том случае, когда в газе есть фракция надтепловых частиц и функция распределения газа отличается от локально-равновесной (максвелловской) функции, то эффективность торможения ИСЗ будет возрастать, так как при неизменной плотности газа температура, а соответственно, и суммарное давление газа будет выше. В наших исследованиях [11] установлено, что для спутников с орбитами выше 500 км вклад горячего кислорода в торможение ИСЗ заметно превышает десятки процентов и обязательно должен учитываться при интерпретации данных измерений. Для спутников с низкими орбитами вклад короны важен в том случае, если наблюдаются активные высыпания заряженных частиц с высокими энергиями [7, 8]. В частности, для спутников, пересекающих авроральный овал, регистрируемые расхождения между измерениями и данными моделей могут объясняться наличием высыпающихся в этих зонах электронов.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-02-00721.

Список литературы

1. M. Y. Marov, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo, *Space Sci. Rev.*, **76**, 1, 1996.
2. R. E. Johnson, M. R. Combi, J. L. Fox, W. H. Ip, et al., *Space Sci. Rev.*, **139**, 355, 2008.
3. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J. C. Gérard, *JGR*, **99**, 23217, 1994.
4. J. C. Gérard, P. G. Richards, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 279, 1995.
5. V. Shematovich, J.-C. Gérard, D. V. Bisikalo, and B. Hubert, *JGR*, **104**, 4287, 1999.
6. D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, and J. C. Gérard, *JGR*, **100**, 3715, 1995.
7. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J. C. Gérard, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L02105, 2005.
8. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J. C. Gérard, *JGR (Space Physics)*, **111**, A10301, 2006.
9. B. Hubert, J. C. Gérard, T. L. Killeen, Q. Wu, D. V. Bisikalo, and V. I. Shematovich, *JGR*, **106**, 12753, 2001.
10. B. Hubert, J. C. Gérard, V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, S. Chakrabarti, and G. R. Gladstone, *JGR (Space Physics)*, **120**, 10,772, 2015.
11. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, S. Krauss, W. Hausleitner, and H. Lammer, *Sol. Syst. Res.*, **45**, 231, 2011.

Новая эра в изучении гравитационного поля Земли

Клюйков А.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследования гравитационного поля Земли (ГПЗ) имеют большое значение для геодезии, геофизики, геологии, метеорологии, океанографии и других наук. До 2000 г. параметры гравитационного поля Земли получали из математической обработки наблюдений космических аппаратов различного назначения с наземных пунктов. Спутниковые методы определения параметров ГПЗ позволяют определять параметры гравитационного поля в глобальном масштабе и получать данные в течение продолжительности жизни космического аппарата. Дальнейшее повышение точности моделей ГПЗ связано с учетом временных вариаций параметров гравитационного поля. Поэтому актуальной стала задача получения высокостепенных моделей гравитационного поля Земли высокой точности по наблюдениям из космоса. Практическая реализация спутниковых гравитационных миссий открыла новую эру в изучении статического гравитационного поля Земли и его временных вариаций.

New era in studies of gravity field of Earth

Kluykov A.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Earth gravity field investigations are important for geophysics, geology, meteorology, oceanology and other geosciences. Before 2000 the gravity field parameters have been obtained from the mathematical processing of the satellite observations from ground stations. The satellite approaches to the gravity field analysis allow us to determine the gravity field models on the global scale during the whole space missions. The further improvements of these parameters are connected to the time variations of the gravitational field. Therefore, the task of obtaining high-degree models of the Earth's gravitational field of high accuracy from observations from space has become urgent. The practical implementation of satellite gravitational missions has opened a new era in the study of the static gravitational field of the Earth and its temporal variations.

1. Введение

Исследования гравитационного поля Земли (ГПЗ) имеют большое значение для геодезии, геофизики, геологии, метеорологии, океанографии и других наук, поскольку его параметры содержат информацию о внутреннем строении Земли и процессах, происходящих внутри нее.

До 2000 г. параметры моделей гравитационного поля Земли получали из математической обработки наблюдений космических аппаратов различного назначения. Спутниковые методы определения параметров ГПЗ позволяют определять параметры гравитационного поля в глобальном масштабе и получать данные в течение продолжительности жизни космического аппарата, что позволило спутниковым методам изучения гравитационного поля Земли занять в этой области ведущее место. Дальнейшее повышение точности моделей ГПЗ связано с учетом временных вариаций параметров гравитационного поля, обусловленных, главным образом, геодинамическими процессами, происходящими внутри Земли. Использование для этой цели наблюдений ИСЗ, выполненных с наземных пунктов, затруднено по следующим причинам: во-первых, при обработке информации низкоорбитальных спутников возникают сложности учета влияния атмосферного торможения при расчете их орбит; во-вторых, неравномерное распределение наземных пунктов наблюдения влияет на точность определения параметров гравитационного поля Земли; в-третьих, коэффициенты сферическим гармоник быстро убывают с увеличением высоты полета спутника, что влияет на пространственное разрешение спутниковой модели ГПЗ. Поэтому актуальной стала задача получения высокостепенных моделей гравитационного поля Земли высокой точности по наблюдениям из космоса.

2. Новые концепции наблюдений

Для решения этой задачи с конца 1960-х гг. началась разработка новых типов наблюдений, чувствительных к иррегулярностям высокочастотной части спектра гравитационного поля Земли. Традиционные методы определения гравитационного поля Земли основаны на наблюдениях движения полностью свободной тест-массы в гравитационном поле. Альтернативная идея состоит в том, чтобы наблюдать движение тест-массы не с пунктов земной системы координат, а в системе координат, которая сама находится в свободном падении. Это может быть реализовано следующим образом: внутри КА размещается одна тест-масса или группа тест-масс, которая наблюдается относительно свободно падающего центра масс КА. В соответствии с этой идеей были разработаны две концепции наблюдений:

- концепция межспутникового слежения (Satellite-Satellite Tracking, SST);

- концепция спутниковой гравитационной градиентометрии (Satellite Gravity Gradiometry, SGG).

В первой концепции параметры движения тест-масс получают в виде расстояний и скоростей, которые измеряются по линии между двумя (или более) спутниками. Концепция имеет два варианта: «низкий-низкий» и «высокий-низкий». В второй концепции измеряются относительные ускорения тест-масс, находящихся на некотором расстоянии друг от друга. В результате получают компоненты тензора гравитационного потенциала. Современные подходы изучения гравитационного поля Земли из космоса основаны на комбинации методов наблюдений, рассмотренных выше: SST в варианте «высокий-низкий» и SGG; SST в варианте «высокий-низкий»; SST в варианте «низкий-низкий». В первом случае на низкоорбитальной платформе расположен градиентометр, а высокоорбитальная навигационная система GPS (ГЛОНАСС) наблюдает низкоорбитальный КА. В последнем случае конфигурация «низкий-низкий» предполагает, что высокоорбитальная навигационная система наблюдает низкоорбитальные КА, находящиеся на одной орбите на некотором расстоянии друг от друга и связанные между собой измерениями радиодальности с микронной точностью. Практическая реализация данных концепций наблюдений была осуществлена в трех проектах: германский CHAMP; американо-германский GRACE; европейский GOCE. Это открыло новую эру в изучении гравитационного поля Земли и его временных вариаций.

3. Спутниковые гравитационные миссии

3.1. CHAMP

Германская гравитационная миссия CHAMP функционировала с 2000 по 2010 гг. Объектами исследований миссии были [1] гравитационное поле Земли, магнитное поле Земли и влияние атмосферы на прохождение радиосигналов, излучаемых ГНСС GPS. На борту КА CHAMP располагалась следующая аппаратура: приемник навигационных сигналов ГНСС GPS; акселерометр; звездная камера. Из математической обработки измерений, выполняемых навигационным приемником, определяют орбиту КА CHAMP в прямоугольной пространственной системе координат. Акселерометр предназначен для измерения негравитационных ускорений, влияющих на орбитальное движение КА CHAMP. Измерения звездной камеры используются для определения ориентации КА в инерциальном пространстве.

Впервые глобальная модель гравитационного поля Земли была определена по наблюдениям одного спутника. Однако пространственное разрешение модели ГПЗ, полученной только по наблюдениям спутниковой гравитационной миссии CHAMP, ограничено максимальной степенью разложения 80, что обусловлено свойством концепции межспутникового слежения в варианте «высокий-низкий». Анализ результатов миссии CHAMP позволил выявить временные вариации в сферических гармониках низкой степени (6–10) [2].

3.2. GRACE

В 2002 г. началась практическая реализация американо-германской спутниковой гравитационной миссии GRACE. Главными целями миссии GRACE были изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций, а также мониторинг изменений климата. На околополярную орбиту были запущены два КА, высота полета которых составляла 500 км, а расстояние между ними — 220 км. На высоте полета спутников в 410 км стали выполняться измерения. Состав бортовой аппаратуры КА GRACE был такой же, как и в миссии CHAMP.

Ключевым элементом миссии GRACE, на основе которых осуществлялось определение параметров гравитационного поля Земли, являлись межспутниковые измерения в варианте «низкий-низкий». Они выполнялись посредством дальномерной системы в К-диапазоне радиоволн с микронной точностью. По данным спутниковой гравитационной миссии GRACE были получены модели гравитационного поля Земли, учитывающие его временные вариации с пространственным разрешением 200–500 км. Анализ результатов спутниковой гравитационной миссии GRACE показал, что большие ледовые шапки Гренландии и Антарктики теряют массу и способствуют повышению уровня океана: уменьшение ледовых масс оценивается величиной 270 Гт/год для Гренландии и 60 Гт/год для Антарктиды [3].

Результаты, полученные по данным спутниковой гравитационной миссии GRACE, впервые позволили:

- осуществить глобальное наблюдение сезонных, межгодовых и долгопериодических вариаций водных масс в больших и среднемасштабных водохранилищах;
- исследовать пространственную эволюцию и осуществлять мониторинг экстремальных гидрологических явлений, таких как засуха и наводнения;

- оценить смещение масс в связи с крупными землетрясениями, такими как на Суматре (2004), в Чили (2010) и Японии (2011), что способствовало разработке моделей механизмов землетрясений [4].

3.3. GOCE

Спутниковая гравитационная миссия GOCE является первой миссией для исследования Земли в рамках программы «Живая планета», разработанной Европейским космическим агентством (ESA). Главными целями миссии GOCE были картографирование статического гравитационного поля Земли с высокой точностью и пространственным разрешением, а также изучение циркуляции Мирового океана. Начало спутниковой гравитационной миссии GOCE было положено 17 марта 2009 г. успешным запуском КА GOCE на солнечносинхронную орбиту с высотой 255 км. Работа миссии закончилась 11 ноября 2013 г. Для определения параметров гравитационного поля Земли использовались измерения, полученные с помощью бортового гравитационного градиентометра. Поддержание постоянной высоты полета КА осуществлялось посредством ионной двигательной установки, работа которой компенсировала действие на КА негравитационных сил.

Точность моделей ГПЗ, полученных по измерительной информации миссии GOCE, в пересчете на точность высот геоида и гравитационных аномалий составляет 1–2 см и 1.0 мГал, соответственно, с пространственным разрешением 100 км (степень разложения 200), что соответствует требованиям к миссии GOCE. Модели статического гравитационного поля Земли, полученные по данным миссии GOCE, были использованы для унификации высотных систем [5] и передачи высот между континентами.

4. Заключение

Спутниковые гравитационные миссии CHAMP, GRACE и GOCE были разработаны с целью осуществления прорыва в области картографирования статического гравитационного поля Земли и его временных изменений. Одним из главных достоинств моделей гравитационного поля Земли, полученных по спутниковым данным, является их однородность по точности и пространственному разрешению. Однако следует подчеркнуть, что эти спутниковые гравитационные данные спектрально ограничены: даже данные миссии GOCE нечувствительны к гравитационным сигналам с длиной волны короче 70 км. Этот факт

свидетельствует о необходимости комбинирования наземной, аэрогравиметрической и спутниковой информации для получения модели для всего спектра гравитационного поля Земли. Ограничения гравитационных миссий первого поколения, касающиеся инструментальной точности и пространственного и временного разрешения, являются поводом для разработки и исследований концепций будущих гравитационных миссий.

Список литературы

1. J. Wickert, C. Reigber, G. Beyerle, R. König, et al., *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3263, 2001.
2. M. Weigelt, T. van Dam, A. Jaggi, L. Prange, M. J. Tourian, W. Keller, and N. Sneeuw, *JGR (Solid Earth)*, **118**, 3848, 2013.
3. A. Shepherd, E. R. Ivins, G. A. V. R. Barletta, et al., *Science*, **338**, 1183, 2012.
4. S.-C. Han, J. Sauber, and R. Riva, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, 24312, 2011.
5. R. Rummel, *Journal of Geodetic Science*, **2**, 355, 2012.

Определение параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям

Клюйков А.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье рассмотрены цели и задачи проекта GOCE, используемая измерительная информация и стратегия обработки данных при определении параметров гравитационного поля Земли, а также продукты, получаемые в результате математической обработки данных различного уровня. Кроме этого, рассмотрены системы координат, используемые при обработке измерительной информации, выполнен анализ уравнения поправок градиентометрических измерений, и разработан алгоритм вычисления коэффициентов и свободных членов уравнения поправок в случае использования прямого подхода при определении параметров гравитационного поля Земли.

The determination of gravity field Earth parameters by gradiometry observations

Kluykov A.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The paper presents the goals and objectives of the GOCE mission, the used measurement information and data processing strategy in determining the parameters of the gravitational field of the Earth, as well as products obtained as a result of mathematical processing of data at various levels. In addition, the coordinate systems used in the processing of measuring information are considered, the equation of observables of gradiometric measurements is analyzed and an algorithm for calculating the coefficients and free terms of the equation of observable is developed in the case of using the direct approach in determining the parameters of the gravitational field of the Earth.

1. Введение

Глубокое понимание процессов, происходящих в системе Земли, не может быть достигнуто без достаточно большого количества наблюдений параметров, характеризующих эти процессы. В последнее время значительный прогресс в этих исследованиях был достигнут благодаря комплексному подходу к изучению процессов в системе Земли с привлечением разнообразных данных, в том числе и данных о

гравитационном поле Земли (ГПЗ), полученных спутниковыми бортовыми сенсорными системами. С началом космической эры определение параметров модели глобального ГПЗ стало одной из главных задач фундаментальной науки. Первый период определения параметров глобального ГПЗ, охватывающий около 40 лет, характеризуется комбинированием спутниковых наблюдений (оптических, лазерных, доплеровских) и наземных гравиметрических наблюдений.

С 2000 г. началась новая эра в области изучения ГПЗ. Началом этой эры можно считать практическую реализацию проектов CHAMP, GRACE и GOCE. В результате пользователи получили глобальные высокоточные модели ГПЗ с высоким пространственным разрешением. Отличительными особенностями этого периода изучения ГПЗ являются:

- использование для определения параметров ГПЗ специализированных космических систем;
- использование данных только бортовых сенсорных систем для определения параметров ГПЗ;
- использование новых концепций наблюдений (спутниковая градиентометрия, межспутниковое слежение в вариантах «высокий-низкий» и «низкий-низкий»);
- определение высокоточных орбит низкоорбитальных КА по наблюдениям навигационных КА ГНСС;
- использование новых методов и подходов при математической обработке измерений с целью определения параметров ГПЗ (метод баланса энергии, полуаналитический метод, time-wise и space-wise).

2. Цели проекта GOCE

Проект GOCE — первый спутниковый проект, направленный на изучения геодинамики Земли. Научными целями проекта в геодезической части являются [1]:

- создание высокоточной модели ГПЗ (1 см по высотам геоида и 1 мГал по гравитационным аномалиям) с высоким пространственным разрешением (100 км).
- установление глобальной высокоточной системы высот, которая служит основой при исследовании эволюции ледяных полярных шапок и морской топографической поверхности.

Достижение этих целей поможет решению следующих междисциплинарных проблем:

- новому пониманию физики внешних процессов, связанных с геодинамикой литосферы, мантии, реологии и процессов субдукции;
- точной оценке формы морского геоида, необходимого для количественного определения в комбинации со спутниковой альтиметрией абсолютной циркуляции океана и перемещения океанических масс;
- оценкам толщины полярных шапок посредством комбинирования данных о толщине слоя полярных льдов, определенных посредством методов космической гравиметрии, и данных, полученных из математической обработки спутниковых альтиметрических измерений.

Решение целевых задач проекта GOCE осуществляется на основе математической обработки измерительной информации следующих сенсорных систем, установленных на борту космического аппарата (КА):

- градиентометра, измеряющего разности ускорений в трех пространственных направлениях между тест-массами ансамбля акселерометров;
- аппаратуры спутниковой навигации, при помощи которой определяется высокоточная орбита спутника GOCE;
- звездной камеры, по измерениям которой определяется ориентация системы координат градиентометра относительно инерциальной системы координат.

Негравитационное ускорение КА, вызванное атмосферным торможением и световым давлением, одинаковым образом воздействует на все акселерометры и становится пренебрежимо малым при образовании разностей ускорений. Определение параметров модели ГПЗ в проекте GOCE осуществляется на основе измерений разностей ускорений в трех пространственных направлениях между тест-массами ансамбля акселерометров.

3. Данные проекта GOCE

Информационной основой решения целевых задач проекта GOCE служат три уровня данных [1]: данные уровня 0; данные уровня 1b; данные уровня 2. Данные уровня 0 (Level 0) представляет собой «сырые» данные, полученные сенсорными системами. Данные уровня 1b (Level

1b) получают из данных уровня 0 путем конвертирования временных рядов данных уровня 0 в технические единицы данных уровня 1b. Данные уровня 2 (Level 2) генерируются с использованием данных уровня 1b. Доступными для пользователей являются данные уровня 1b и данные уровня 2.

4. Подходы, используемые при математической обработке градиентометрических измерений

При определении параметров ГПЗ по градиентометрическим измерениям использовались три подхода: direct (прямой), «time-wise» и «space-wise» [1]. В основе прямого (direct) подхода определения параметров ГПЗ лежит использование орбитального динамического метода космической геодезии. Математическая обработка измерений по линии «спутник-спутник» и градиентометрических измерений выполняется отдельно; матрицы нормальных уравнений, составленные на их основе, комбинируются. Комбинированная система нормальных уравнений решается по методу наименьших квадратов относительно уточняемых коэффициентов сферических гармоник.

При использовании time-wise подхода градиенты и наблюдения по линии «спутник-спутник» в варианте «высокий-низкий» представляются в виде временных рядов Фурье вдоль орбитальной дуги. Определение параметров ГПЗ выполняется на основе использования двумерного преобразования Фурье и метода наименьших квадратов. При использовании «space-wise»-подхода коэффициенты сферических гармоник определяются по измерениям, которые трансформируются в регулярную сетку на отсчетной поверхности или в пространственную сетку. При этом коэффициенты сферических гармоник определяются на основе применения метода быстрой коллокации.

5. Системы координат, используемые в проекте GOCE

При математической обработке градиентометрических измерений используются следующие основные системы координат [2, 3]:

- инерциальная геоцентрическая система координат (CRF), в которой осуществляется определение орбиты спутника;
- земная геоцентрическая система координат (TRF), с которой связаны определяемые параметры модели гравитационного поля;

- локальная североориентированная система координат (LNOF), в которой вычисляются компоненты тензора геопотенциала;
- система координат градиентометра (GRF), в которой выполняются измерения.

Определение параметров ГПЗ осуществляется с использованием данных уровня 2. При этом измеренные компоненты тензора градиента гравитационного потенциала относятся к системе координат градиентометра (GRF), а искомые параметры относятся к земной системе координат (TRF). Поэтому для решения задачи определения искомых параметров необходимо выполнить преобразование тензора градиента гравитационного потенциала из одной системы в другую. Имеется два варианта преобразования: из GRF в TRF и из TRF в GRF.

При реализации первого варианта потребуются выполнять преобразование тензора градиента геопотенциала из GRF в TRF. Однако в этом случае возникает проблема, связанная с тем, что акселерометры имеют две сверхчувствительные и одну менее чувствительную, поэтому четыре компонента тензора гравитационного потенциала имеют высокую точность, а два компонента — меньшую точность. В этом случае прямое вращение тензора гравитационного градиента приведет к тому, что проектирование наименее точных компонентов тензора градиента геопотенциала приведет к погрешностям в тензоре градиента геопотенциала в Земной системе координат. Поэтому более целесообразно осуществлять преобразование тензора гравитационного потенциала из TRF в GRF.

6. Алгоритм определения параметров ГПЗ при использовании прямого подхода

Уравнение поправок для градиентометрических измерений при определении параметров ГПЗ на основе использования прямого подхода может представлено следующим образом [4]:

$$\bar{\nu} = \frac{\partial \bar{V}'_{\text{GRF}}}{\partial (\bar{C}_{\text{nm}}, \bar{S}_{\text{nm}})} \cdot \left(\frac{\Delta \bar{C}_{\text{nm}}}{\Delta \bar{S}_{\text{nm}}} \right) - (\bar{V}'_{\text{GRF}} - \bar{V}'_{\text{GRF}}{}^0), \quad (1)$$

где $\bar{\nu}$ — вектор поправок к измеренным величинам; $(\bar{C}\bar{S})_{\text{nm}}$ — коэффициенты сферических гармоник; $\Delta(\bar{C}\bar{S})_{\text{nm}}$ — поправки к коэффициентам сферических гармоник; $\bar{l} = (\bar{V}'_{\text{GRF}} - \bar{V}'_{\text{GRF}}{}^0)$ — свободный член уравнений поправок.

Коэффициенты системы уравнений (1) и тензор гравитационного потенциала, вычисленный по априорной модели ГПЗ, необходимо преобразовать в систему координат GRF. Это преобразование осуществляется с использованием трехшаговой процедуры:

1. Коэффициенты системы уравнений (1) и тензор гравитационного потенциала, вычисленный по априорной модели ГПЗ, вычисляются в геоцентрической земной системе координат.
2. Полученные на первом шаге параметры преобразуются в инерциальную систему координат.
3. Полученные на втором шаге параметры преобразуются в систему координат градиентометра.

Далее систему уравнений поправок (1), преобразованную в систему координат градиентометра, преобразуем в систему нормальных уравнений, из решения которой по методу наименьших квадратов определяют поправки к коэффициентам сферических гармоник априорной модели ГПЗ.

7. Заключение

Однако следует заметить, что практическая реализация определения параметров модели гравитационного поля с использованием прямого подхода сопряжена с большими вычислительными трудностями, обусловленными большой размерностью вектора определяемых параметров (так, при учете разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям до 300 порядка число уточняемых параметров составит более 90000). Для решения задачи такой размерности используют стратегию параллельных вычислений.

Список литературы

1. R. Rummel, W. Yi, and C. Stummer, *Journal of Geodesy*, **85**, 777, 2011.
2. M. J. Fuchs and J. Bouman, *Geophysical Journal International*, **187**, 743, 2011.
3. J. Müller and M. Wermut, *Adv. Geosci.*, **1**, 33, 2003.
4. W. Yi, *Adv. Sp. Res.*, **50**, 371, 2012.

Изучение вариаций положения центра масс Земли с применением данных лазерной локации ИСЗ и данных межспутниковых измерений проекта GRACE

Эбауэр К.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье представлены результаты определения движения центра масс Земли (геоцентра), полученные из обработки лазерных наблюдений геодезических ИСЗ Lageos-1, Lageos-2, Stella, Starlette, AJISAI на интервале времени 1993.0–2016.0 и из обработки результатов проекта GRACE на интервале времени 2003.0–2016.0. Обработка выполнялась с применением разработанного в ИНАСАН программного комплекса ГеоИС. При обработке лазерных наблюдений использовался динамический метод, т.е. определение координат геоцентра через уточнение соответствующих коэффициентов разложения гравитационного поля Земли в ряд по сферическим функциям, при обработке результатов проекта GRACE — метод анализа поверхностных нагрузок. Полученные временные ряды были проанализированы с применением программы FAMOUS (CNES, France) для выявления периодических изменений. Выполнено сравнение с результатами, полученными научными коллективами за рубежом.

Studying of Earth's center of mass variations with Satellite Laser Ranging and GRACE project data

Ebauer K.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

This paper presents results of determination of Earth's center of mass motions (geocenter) obtained from processing Satellite Laser Ranging data using Lageos-1, Lageos-2, Stella, Starlette, AJISAI satellites (on the time span 1993.0–2016.0) and from processing GRACE project results (on the time span 2003.0–2016.0). GeoIS software developed at INASAN was used for data processing. Dynamic method was used for geocenter motion determination while processing SLR data. For GRACE data we used analyses of surface load data. FAMOUS software (CNES, France) was applied to the obtained results to determine periodical effects in geocenter motion. Results were compared with results of foreign scientific teams.

1. Введение

Система координат реализуется набором пунктов на поверхности Земли, с которых выполняются измерения, и характеризуется, помимо всего прочего, началом системы координат. Для глобальных систем координат (таких как Международная земная система отсчета, ITRF) начало системы совпадает с центром твердой фигуры Земли (CF). В силу того, что порядка 70% земной поверхности покрыты водой, любая глобальная сеть является неоднородной. Кроме того, земная система включает в себя не только материки, но еще и Мировой океан, атмосферу и др. Все эти составные части находятся в сложном взаимодействии друг с другом. Начало этой сложной структуры находится в центре масс Земли (CM). На современном уровне точности, который обеспечивается средствами космической геодезии, нельзя утверждать, что центр масс Земли совпадает с началом системы координат, т.е. с центром твердой фигуры Земли. Изменение положения CM относительно CF получило название движения геоцентра. Определение величины этого смещения и его изучение возможно благодаря измерительным средствам космической геодезии.

Движение геоцентра может быть определено непосредственно из анализа движения спутника по орбите (динамический метод), из анализа временных рядов координат пунктов (геометрический метод) или из анализа поверхностных деформаций. В данной работе представлены результаты определения движения геоцентра с применением метода лазерной локации ИСЗ и из анализа поверхностных нагрузок, полученных по результатам реализации проекта GRACE.

2. Анализ лазерных измерений ИСЗ и результатов проекта GRACE

2.1. Анализ лазерных наблюдений ИСЗ

Для анализа были выбраны 5 геодезических ИСЗ, имеющих правильную сферическую форму, что существенно упрощает учет неконсервативных сил при интегрировании орбит: Lageos-1, Lageos-2, Stella, Starlette, AJISAI. Интервал обработки составил с 1993 по 2015 г. (эпохи 1993.0–2016.0). Обработка выполнялась с использованием измерений, полученных на станциях Международной службы лазерной локации [1] в соответствии со стандартами Международной службы вращения Земли IERS Conventions 2010 [2]. Для обработки применялся программный комплекс ГеоИС, разработанный в ИНАСАН [3].

Определение положение центра масс Земли при наблюдении ИСЗ с наземных станций возможно двумя методами: геометрическим и динамическим. Геометрический метод заключается в определении положений станций глобальной сети на продолжительном интервале времени и последующем анализе этих временных рядов для отыскания систематических смещений. Второй метод заключается в уточнении коэффициентов гравитационного поля Земли (ГПЗ) первой степени и порядка, которые связаны с координатами геоцентра следующими соотношениями:

$$X_G = \sqrt{3}R_{\oplus}\bar{C}_{11}; \quad Y_G = \sqrt{3}R_{\oplus}\bar{S}_{11}; \quad Z_G = \sqrt{3}R_{\oplus}\bar{C}_{10}, \quad (1)$$

где X_G, Y_G, Z_G — координаты геоцентра; $R_{\oplus} = 6378136.3$ м — средний радиус Земли; $\bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}, \bar{C}_{10}$ — коэффициенты гравитационного поля Земли первой степени и порядка. Одновременно с коэффициентами первой степени и порядка определялись также коэффициенты второй степени, которые связаны с тензором инерции Земли [4]. Обработка выполнялась на недельных интервалах. На следующем шаге выполнялось комбинирование (на уровне нормальных уравнений) на 4-недельных интервалах.

2.2. Анализ результатов проекта GRACE

Проект GRACE представляет из себя два спутника на околоземной орбите высотой 485 км. Орбита спутников определяется из обработки наблюдений бортовых GPS-приемников, расстояние между спутниками измеряется бортовыми средствами. В результате соответствующей обработки наблюдений получают коэффициенты разложения ГПЗ до некоторой степени и порядка (до 40, 60) с месячным (как правило) разрешением. Проект реализовывался с 2002 по 2016 гг. Новая пара спутников (проект GRACE-Follow-on) запущена 22 мая 2018 г. Определение положения геоцентра из наблюдений GRACE невозможно, так как вращение спутников происходит вокруг центра масс Земли. Однако соответствующий математический аппарат позволяет определить если не абсолютные значения координат геоцентра, то их периодические изменения. Такой подход получил название «inverse approach» или обратного подхода [10]. Для его реализации помимо серии разложений ГПЗ в ряд по сферическим функциям необходимо иметь еще и такие данные, как давление океанического дна. В данной работе использовались результаты проекта GRACE, полученные в Центре космических исследований (CSR, USA).

Таблица 1. Годовые компоненты рядов геоцентра, полученные по SLR измерениям и данным проекта GRACE, в сравнении с результатами других центров анализа.

Решение	Интервал	X (год)		Y (год)		Z (год)	
		A, мм	$\varphi_0, ^\circ$	A, мм	$\varphi_0, ^\circ$	A, мм	$\varphi_0, ^\circ$
SLR, недельные (ИНАСА)	1993.0	2.6	330	2.5	47	7.8	324
	-2016.0	± 0.5	± 4	± 0.1	± 11	± 1.3	± 2
SLR, месячные (ИНАСА)	1993.0	2.5	321	2.1	50	8.2	312
	-2016.0	± 0.5	± 2	± 0.1	± 19	± 1.2	± 1
GRACE, месячные (ИНАСА)	2002.3	1.0	298	2.4	32	1.3	285
	-2016.0	± 0.02	± 2	± 0.04	± 4	± 0.2	± 6
GPS (Rebischung et al. [5])	1997.0	2.9	2	3.2	46	3.0	194
-2009.0							
Геофизич. модель (Collilieux et al. [6])	1993.0	2.1	332	2.1	23	2.7	312
	-2006.0	± 0.1	± 2	± 0.1	± 2	± 0.1	± 2
Лазерные измерения (Cheng et al. [7])	2002.0	3.2	329	2.6	59	4.3	329
	-2010.6	± 0.4	± 5	± 0.4	± 5	± 0.3	± 5
Геофизич. модель (Dong et al. [8])	1992.0	4.2	314	3.2	69	3.5	325
	-1995.0						
ITRF2014, ILRS (Altamimi et al. [9])	1993.0	2.6	314	2.9	40	5.7	332
	-2015.0	± 0.1	± 3	± 0.1	± 2	± 0.2	± 52
GRACE, месячные, CSR (Swenson et al. [10])	2002.7	1.3	11	1.4	185	1.8	18
	-2016.7	± 0.04	± 3	± 0.05	± 3	± 0.04	± 3

2.3. Результаты спектрального анализа временных рядов координат геоцентра

По полученным результатам был выполнен спектральный анализ с применением программы FAMOUS. При анализе временные ряды аппроксимируются полиномом

$$y(t) = A_i \cos(\omega_i(t - t_0) + \varphi_{0i}), \quad (2)$$

где A_i — амплитуда i -го компонента; ω_i — частота i -го компонента; t — время; t_0 — произвольно выбранный начальный момент времени (мы определяем его как 1 января выбранного года); φ_{0i} — начальная фаза

i -го компонента. Годовые компоненты вносят наиболее существенный вклад в суммарную величину. В табл. 1 приводятся результаты спектрального анализа для полученных в рамках данной статьи рядов координат геоцентра в сравнении с результатами зарубежных центров.

3. Заключение

Результаты, полученные в ИНАСАН из обработки лазерных наблюдений, хорошо согласуются с решениями других центров для компонентов X и Y как по амплитуде, так и по фазе. Однако для компонента Z имеют место значительные отличия по амплитуде годового сигнала. Вероятная причина такого эффекта — одинаковый вес как для низкоорбитальных ИСЗ, так и для спутников LAGEOS. Уменьшение веса низкоорбитальных ИСЗ для снижения влияния определенных источников ошибок (значительное влияние атмосферы) должно способствовать устранению такого эффекта. Результаты, полученные по данным проекта GRACE, характеризуются вдвое меньшими амплитудами и отличающимися приблизительно на 1 месяц по фазам для компонентов X и Z . При этом результаты по компоненту Y хорошо согласуются. Таким образом, результаты анализа поверхностных нагрузок первой степени на текущий момент нельзя считать надежным источником данных о вариациях положения центра масс Земли.

Список литературы

1. M. R. Pearlman, J. J. Degnan, and J. M. Bosworth, *Adv. Sp. Res.*, **30**, 135, 2002.
2. G. Petit and B. Luzum, *IERS Technical Note*, **36**, 2010.
3. K. V. Ebauer, *Geodesy and Geodynamics*, **8**, 213, 2017.
4. W. A. Heiskanen and H. Moritz, *Bulletin Geodesique*, **41**, 491, 1967.
5. P. Reischung and B. Garayt, *Internat. Assoc. Geodesy Symp.*, **138**, 69, 2013.
6. X. Collilieux, Z. Altamimi, J. Ray, and X. van Dam, T. and. Wu, *JGR (Solid Earth)*, **114**, B04402, 2009.
7. M. Cheng, J. Ries, and B. Tapley, *Internat. Assoc. Geodesy Symp.*, **138**, 19, 2013.
8. D. Dong, T. Yunck, and M. Heflin, *JGR (Solid Earth)*, **108**, 2200, 2003.
9. Z. Altamimi, P. Reischung, L. Métivier, and X. Collilieux, *JGR (Solid Earth)*, **121**, 6109, 2016.
10. S. Swenson, D. Chambers, and J. Wahr, *JGR (Solid Earth)*, **113**, B08410, 2008.

Методика определения низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли из комбинированного анализа низкоорбитальных ИСЗ и спутников LAGEOS

Эбауэр К.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Традиционно для решения задач космической геодезии (в том числе для уточнения коэффициентов гравитационного поля, например, C_{20}) использовались спутники LAGEOS. В то же время, за последние 30 лет было реализовано несколько проектов по запуску низкоорбитальных сферических ИСЗ для лазерной локации. Учитывая этот факт, а также принимая во внимание высокую точность современных моделей учета различных эффектов, действующих на орбиты спутников, задача уточнения некоторых коэффициентов низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли на продолжительном интервале времени является чрезвычайно актуальной. Для достижения поставленной цели были выбраны девять сферических ИСЗ, периоды наблюдения которых полностью или частично покрывают временной отрезок с 1993 по 2016 гг. В работе представлены некоторые результаты разработки методики анализа лазерных измерений с целью определения низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли.

Method for determination of the low-frequency component of the Earth's gravitational field from the combined analysis of the low-orbit and LAGEOS satellites

Ebauer K.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Traditionally, LAGEOS satellites were used to solve space geodesy problems (including more precise determination of some gravitational field coefficients, for example, C_{20}). At the same time, over the past 30 years, several projects have been implemented to launch low-orbit spherical satellites for laser ranging. Taking into account this fact, as well as the high accuracy of modern models of accounting for various effects acting on the orbit of satellites, the task of determination some coefficients of the low-frequency component of the Earth's gravitational field over a long period of time is extremely relevant. In order to achieve this goal, nine spherical satellites were selected from the entire variety of satellites, the observation periods of which fully or partially cover the studied

time period from 1993 to 2016. The paper presents some results of the development of a method for the analysis of laser measurements to determine the low-frequency component of the Earth's gravitational field.

1. Введение

Планета Земля подвержена глобальным изменениям: движение литосферных плит, приливные эффекты в твердом теле Земли, перераспределение масс в атмосфере и океанах, таяние ледников и др., что отражается на гравитационном поле нашей планеты как в глобальном, так и в региональном масштабах. Это можно отслеживать методами космической геодезии. Для высокоточных геодезических определений с использованием лазерной локации используются спутники правильной сферической формы. Первыми спутниками такой конструкции являются ИСЗ Starlette и Lageos-1, запуск которых на орбиту состоялся в 1975 и 1976 гг., соответственно. В течение последующих 35 лет на разные орбиты были выведены порядка 12 сферических геодезических ИСЗ. При этом точность измерения дальностей в настоящее время достигает единиц мм [1]. По высоте орбиты представленную орбитальную группировку можно разделить на 4 класса: ~ 6000 км, ~ 1500 км, $\sim 700 - 800$ км и один спутник на орбите ~ 400 км (рис. 1).

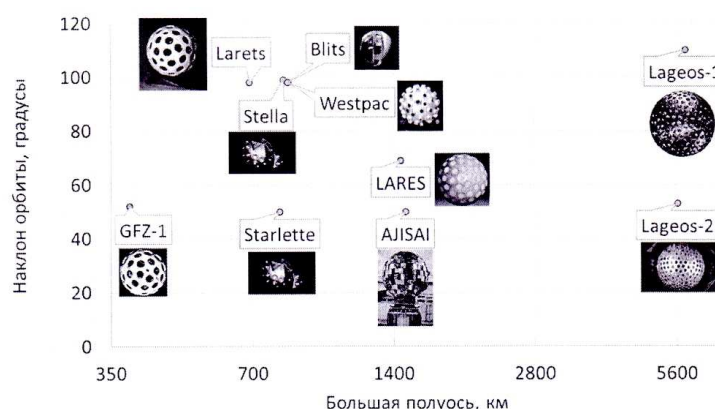


Рис. 1. Распределение спутников по орбитам.

2. Методика определения низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли

Для решения различных геодезических задач, в том числе и определения гравитационного поля Земли (ГПЗ) используются наблюдения спутников Lageos-1,2 [2, 3, 4, 5, 6]. В то же время для определения параметров гравитационного поля Земли более приоритетными в настоящее время являются методы межспутниковых измерений (CHAMP, GRACE, GRACE-Follow-on) и спутниковой градиентометрии (GOCE) благодаря высокой чувствительности к изменению высокочастотной составляющей гравитационного поля.

Несмотря на это, анализ данных лазерной локации для уточнения коэффициентов гравитационного поля (низкочастотной части) до сих пор является актуальным по ряду причин:

- 1) наличие непрерывного ряда измерительной информации в свободном доступе;
- 2) чувствительность лазерных измерений к изменению положения геоцентра и коэффициентов низкочастотной составляющей ГПЗ;
- 3) разнообразие орбит используемых спутников;
- 4) использование современных моделей учета возмущающих факторов на орбиты ИСЗ.

Целью данной статьи является разработка методики определения низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли из комбинированного анализа низкоорбитальных ИСЗ и спутников LAGEOS.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) анализ доступности измерительной информации на выбранном временном интервале по каждому ИСЗ;
- 2) разработка соответствующего программного обеспечения;
- 3) математическая обработка измерительной информации с целью определения искомым параметров;
- 4) анализ полученных результатов;
- 5) уточнение разработанной методики по результатам анализа.

Для исследований был выбран интервал времени с 1993 по 2016 гг., на котором основу орбитальной группировки составляют пять спутников (Lageos-1, Lageos-2, Stella, Starlette, AJISAI), дополняемые наблюдениями других ИСЗ. Все спутники условно были разделены на три группы: геодинамические спутники Lageos, низкоорбитальные ИСЗ с количеством наблюдений, сопоставимым с первой группой (Starlette и AJISAI), все остальные низкоорбитальные космические аппараты.

Для спутников Lageos среднее количество доступных для обработки наблюдений составляет порядка 1000–1500 на недельном интервале (по каждому ИСЗ). Для второй группы эта величина колеблется от 2000–2500 (Starlette) до 2500–3500 (AJISAI). Для спутников третьей группы VLITS и Westpac количество наблюдений на недельном интервале составляет в среднем порядка 300–400. При решении полной системы нормальных уравнений данным третьей группы спутников необходимо назначить соответствующие веса (с занижением веса таких спутников). Таким образом, обрабатывая наблюдения на всем временном интервале, можно ожидать наличия на каждом недельном отрезке не менее 7000–8000 нормальных точек.

Математическая обработка спутниковых лазерных измерений требует соответствующего программного обеспечения. Поэтому автором статьи был разработан программный комплекс «ГеоИС» («Геодинамические Исследования»), предназначенный для обработки лазерных наблюдений искусственных спутников Земли с целью определения орбиты ИСЗ, уточнения координаты станций, параметров вращения Земли и коэффициентов гравитационного поля Земли, а также координат геоцентра. При этом модель движения ИСЗ позволяет учитывать влияние следующих возмущающих факторов: гравитационного поля Земли, твердых земных, океанических и полюсных приливов, притяжения тел Солнечной системы, светового давления, атмосферного торможения, переотражения и переизлучения Землей солнечной радиации, перемещения неприливных масс в атмосфере и океанах, атмосферных приливов, а также учитывать смещения станций под влиянием эффектов твердой приливной и океанической нагрузки, атмосферной нагрузки, деформаций, вызванных вращением Земли.

В качестве исходных данных для математической обработки используются нормальные точки, полученные по измерениям, выполненным на станциях Международной службы лазерной локации [7]. В представленном программном комплексе реализована поддержка всех существующих форматов данных, которые когда-либо использовались в международной кооперации в области лазерной локации.

Первоначально схема математической обработки включала в себя совместное уточнение параметров орбит ИСЗ и коэффициентов гравитационного поля Земли. Как показал анализ результатов экспериментальных вычисления, подобная схема математической обработки измерений приводит к отбраковке большого числа наблюдений и нескольким итерациям. Вызвано это большими погрешностями при уточнении орбиты на первых итерациях, что сказывается и на опре-

деляемых коэффициентах ГПЗ. В связи с этим схема математической обработки спутниковых лазерных измерений была изменена: сначала выполняется предварительное уточнение орбит спутников (до 6 итераций), только после этого в число определяемых параметров включаются коэффициенты ГПЗ.

При уточнении орбит спутников особое внимание следует обратить на уточнение аэродинамического коэффициента, используемого при вычислении возмущающих ускорений, вызванных атмосферным торможением: можно ли использовать только один коэффициент на каждом интервале обработки (AJISAI и LARES) или необходимо послойное уточнение этих величин (Stella, Starlette и др.), или уточнение коэффициента для нескольких оборотов спутника (GFZ-1). Разработанная методика определения низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли с учетом рассмотренных выше особенностей позволила определить гармонические коэффициенты модели гравитационного поля Земли до четвертой степени и порядка со среднеквадратической погрешностью 10^{-11} .

3. Заключение

Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам:

- 1) для повышения точности определения коэффициентов ГПЗ из комбинированной обработки ИСЗ Lageos и НКА необходимо предварительно уточнять орбиты спутников (примерно 6 итераций);
- 2) для повышения точности определения коэффициентов гравитационного поля Земли по лазерным измерениям необходимо:
 - разработать процедуру уточнения аэродинамических коэффициентов на интервалах времени, кратных периоду обращения ИСЗ; необходимо также определить оптимальный шаг оценивания аэродинамических коэффициентов, т.к. возможны значительные корреляционные связи с некоторыми коэффициентами ГПЗ [8];
 - определить предельную степень разложения уточняемых коэффициентов с точки зрения чувствительности и надежности;
 - определить вклад каждого из дополнительных низкоорбитальных спутников на определяемые параметры;

- использовать весовую схему на основе метода оценки дисперсий каждого из спутников (т.н. variance-component estimation) для получения оптимального решения.

Список литературы

1. J. J. Degnan, ed., *Millimeter accuracy satellites for two color ranging* (1993).
2. B. E. Schutz, M. K. Cheng, C. K. Shum, R. J. Eanes, and B. D. Tapley, *JGR*, **94**, 10167, 1989.
3. J. M. Dow, P. Duque, and M. R. Merino, *Adv. Sp. Res.*, **11**, 119, 1991.
4. M. K. Cheng, R. L. Eanes, C. K. Shum, B. E. Schutz, and B. D. Tapley, in O. L. Colombo, ed., *From Mars to Greenland : Charting Gravity with Space*, 83–91 (1992).
5. R. S. Nerem, B. F. Chao, A. Y. Au, J. C. Chan, S. M. Klosko, N. K. Pavlis, and R. G. Williamson, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 595, 1993.
6. M. K. Cheng, C. K. Shum, and B. D. Tapley, *JGR*, **102**, 27, 1997.
7. M. R. Pearlman, J. J. Degnan, and J. M. Bosworth, *Adv. Sp. Res.*, **30**, 135, 2002.
8. D. P. Drob, J. T. Emmert, G. Crowley, J. M. Picone, et al., *JGR (Space Physics)*, **113**, A12304, 2008.

Обработка измерений спутниковой системы ДОРИС в ИНАСАН

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье дается описание современного состояния спутниковой доплеровской радиотехнической системы DORIS. Приведены основные результаты обработки измерений глобальной сети станций системы ДОРИС, полученные в центре анализа ДОРИС данных Института астрономии РАН. Измерения ДОРИС были обработаны на временном интервале 1993.0–2017.8 (около 26 лет). В результате обработки были получены временные ряды координат всех станций, оборудованных радиопередатчиками системы ДОРИС (серии inawd10), временные ряды движения полюса Земли (inawd17eop) и ряды движения геоцентра (inawd17geoc). Все указанные временные ряды используются международной службой системы ДОРИС (IDS) для получения общего IDS решения, которое учитывается для определения общепринятой земной системы координат ITRF. Для вычислений использовалась программа GIPSY-OASIS II (версия 6.4), разработанная JPL (США). Данные большинства спутников, оборудованных ДОРИС приемниками, были использованы в обработке, за исключением данных спутников JASON1 и JASON3. Приведены параметры преобразования полученных в ИНАСАН решений в действующую систему координат ITRF2014.

DORIS data processing in the INASAN Analysis Center

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The current status of the DORIS Doppler radio satellite system is given. We present the main results of the DORIS global network data processing carried out at the Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, for the time period 1993.0–2017.8 (about 26 years). The results of the processing include time series of all stations coordinates (inawd10), time series of the Earth Orientation Parameters (inawd17eop) and geocenter time series (inawd17geoc). The International DORIS Service (IDS) uses all the above mentioned series for obtaining IDS combine solutions which are taken into account for the construction of the conventional international terrestrial reference coordinate system (ITRF). The GIPSY/OASIS II software package (version 6.4) developed by JPL was used for computation. Data from all DORIS satellites equipped by DORIS receivers were used in the processing (except JASON1 and JASON3 satellites). The Helmert transformation parameters of the INA DORIS solutions to ITRF2014 coordinate system are given.

1. Введение

Спутниковая доплеровская радиотехническая система DORIS (Doppler Orbit Determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) была разработана и реализована Космическим агентством Франции (CNES) в тесном сотрудничестве с научно-исследовательской группой космической геодезии (GRGS, France) и Национальным институтом географии Франции (IGN) для высокоточного контроля орбит океанографических спутников, имеющих на борту прецизионные альтиметры. Первый спутник системы (SPOT2) был выведен на орбиту в феврале 1990 г. В результате развития ДОРИС-технологии круг решаемых задач и приложений постепенно расширился от орбитальных определений до геофизических и геодинамических исследований [1]. Принцип работы системы основан на измерении спутниковыми приемниками доплеровского сдвига радиосигналов, излучаемых наземными передатчиками. Система ДОРИС состоит из трех частей: спутниковой группировки, сети наземных станций и центра управления системы, находящегося в г. Тулуза (Франция). С момента начала миссии ДОРИС приемники 14 спутников выполняли доплеровские измерения. В настоящее время на орбите функционируют 6 спутников системы ДОРИС: JASON-2, JASON-3, CRYOSAT-2, HY-2A, SARAL и SENTINEL-3A. Начиная с запуска спутника JASON-2, все последующие миссии оборудованы приемниками нового поколения DGXX-S [2], позволяющими одновременно принимать сигналы от семи наземных маяков.

Земная сеть системы состоит из 58 действующих станций, равномерно распределенных по поверхности нашей планеты и работающих в автономном режиме. Большинство наземных станций системы оборудованы или находятся в процессе обновления передатчиками последнего поколения (типа ДОРИС 3.2). Расположение радиопередатчиков-маяков системы DORIS приведено на рис. 1.

В соответствии с Соглашением о сотрудничестве между Российской академией наук (Институт астрономии РАН), CNES и IGN на территории России в начале 1990-х гг. установлены два радиопередатчика-маяка системы ДОРИС — один в Красноярске, второй — в населенном пункте Бадары (республика Бурятия). В середине 2003 г. Международная геодезическая ассоциация (IAG) учредила Международную службу ДОРИС (IDS) [3] как одну из технических служб IGS в составе создаваемой Глобальной геодезической наблюдательной системы (GGOS) [4, 5]. В настоящее время более 50 исследовательских групп из 35 стран участвуют в деятельности IDS на различных уровнях ее активности. Шесть центров анализа DORIS измерений в



Рис. 1. Схема расположения наземных маяков системы DORIS.

настоящее время вычисляют и посылают свои результаты в международные базы данных на постоянной основе. Один из таких центров — Центр анализа DORIS данных — функционирует при Институте астрономии РАН (ИНАСАН).

2. Обработка ДОРИС измерений

Практически с самого начала ДОРИС миссии (с 1992 г.) ИНАСАН принимает активное участие в данном проекте, с первых лет и до настоящего времени как координатор наземной ДОРИС сети на территории России, а с 1997 г. после получения лицензионного программного пакета GIPSY/OASIS II, разработанного Jet Propulsion Laboratory (JPL), как один из центров анализа ДОРИС данных. ИНАСАН на регулярной основе, с установленной IDS периодичностью, посылает свои решения в IDS. В табл. 1 приведены продукты, поставляемые в IDS аналитическим центром ИНАСАН.

Решение ИНАСАН inawd10 было включено в комбинированное решение IDS (idswd09), которое было послано для выработки решения ITRF2014. В табл. 2 показаны результаты сравнения параметров трансформации решений inawd10 и последнего комбинированного решения idswd12 в систему координат ITRF2014. Параметры трансформации характеризуются семью величинами: тремя линейными параметрами переноса начала координат, тремя углами вращения между сравниваемыми системами координат и параметром масштаба. При

Таблица 1. Продукты Аналитического центра ИНАСАН, поставляемые в IDS.

Продукт	Решение	Формат	Частота доставки	Интервал измерений
Файл координат станций и ПВЗ	inawd10	SINEX	1 раз в 3 месяца	1993.0–2017.8
Файл геоцентра	ina17wd01.geoc	IDS	1 раз в год	1993.0–2017.8
Файл ПВЗ	ina17wd01.eop	IDS	1 раз в год	1993.0–2017.8

определении системы координат параметры вращения не являются значимыми параметрами, поэтому они не приводятся в табл. 2.

В данной таблице WRMS — весовые среднеквадратические погрешности преобразования, Scale — параметр масштаба преобразования, Tx, Ty, Tz — параметры переноса начала координат преобразования, Scale rate — тренд параметра масштаба. Указанные значения приведены на среднюю эпоху интервала сравнения. Как видно из табл. 2, ошибки комбинированного решения idswd12 меньше ошибок решения inawd10, что представляется вполне закономерным, так как idswd12 является взвешенным решением 6 центров анализа ДОРИС данных, которое априори должно быть лучше решения одного любого отдельного центра анализа.

Небольшие значения скорости измерения параметра масштаба решений idswd12 и inawd10 (0.43 мм/год и 0.44 мм/год, соответственно) являются индикатором стабильности этих решений.

В табл. 3 приводятся сравнительные характеристики остаточных погрешностей параметров вращения Земли (ПВЗ) решений ИНАСАН (inawd10) и IDS (idswd12) относительно решения IERS C04. В таблице Xpole, Ypole — средние значения отклонений координат земного полюса X и Y от решения IERS C04, LOD — среднее значение отклонений длительности суток на указанном интервале времени, std — ошибка отклонений. Средние значения отклонений решений idswd12 и inawd10 от решения IERS C04 очень близки друг к другу: 0.02 mas и –0.02 mas для X компонента полюса и 0.00 mas и –0.01 mas для Y ком-

Таблица 2. Сравнительные статистические характеристики преобразований Гельмерта решений ИНАСАН (inawd10) и IDS (idswd12) в систему ITRF2014.

Серия (интервал)	Ср.кв. ошибка (мм)	Масштаб (мм)	Сдвиг по оси X (мм)	Сдвиг по оси Y (мм)	Сдвиг по оси Z (мм)	Тренд масштаба (мм/год)
idswd12 (1993.0 – 2017.8)	13.97 ±3.75	10.33 ±4.64	-1.73 ±4.51	-0.93 ±4.87	-10.54 ±18.18	0.43
inawd10 (1993.0 – 2017.8)	19.03 ±4.68	12.95 ±5.50	-1.96 ±6.58	-5.38 ±7.88	-10.49 ±24.56	0.44

Таблица 3. Сравнительные характеристики остаточных погрешностей параметров вращения Земли (ПВЗ) решений ИНАСАН (inawd10) и IDS (idswd12) по сравнению с решением IERS C04. СКО – средняя квадратическая ошибка.

Серия	Интервал	Координата полюса X (мсек дуги)		Координата полюса Y (мсек дуги)		Длительность суток (мсек дуги)	
		среднее значение	СКО	среднее значение	СКО	среднее значение	СКО
idswd12	1993.0-2017.8	0.02	0.42	0.00	0.40	—	—
inawd10	1993.0-2017.8	-0.02	0.54	-0.01	0.51	-0.02	0.34

понента полюса, соответственно. Ошибки комбинированного решения idswd12 меньше ошибок решения ИНАСАН inawd10 по той же самой причине, что для ошибок параметров трансформации: усреднение по всем 6 решениям дает заведомо лучшие результаты по сравнению с любым индивидуальным решением.

3. Заключение

В работе рассмотрено современное состояние спутниковой доплеровской системы ДОРИС. Показана роль ИНАСАН как координатора российского сегмента системы и как одного из 6 центров анализа ДОРИС измерений. Приведены основные результаты обработки ДОРИС данных, относящиеся к построению международной системы координат ITRF2014 и контролю движения полюса Земли.

Список литературы

1. P. Willis, C. Jayles, and Y. Bar-Sever, *Comptes Rendus Geoscience*, **338**, 968, 2006.
2. A. Auriol and C. Tourain, *Adv. Sp. Res.*, **46**, 1484, 2010.
3. P. Willis, H. Fagard, P. Ferrage, F. G. Lemoine, et al., *Adv. Sp. Res.*, **45**, 1408, 2010.
4. R. Rummel, M. Rothacher, and G. Beutler, **40**, 357, 2005.
5. S. P. Kuzin, S. P. Oraevskaya, and N. A. Sorokin, *Geodezia i kartographia*, **5**, 17, 2009.

Анализ движения геоцентра по измерениям спутниковых радиотехнических систем ГНСС и ДОРИС

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье представлены результаты определения движения геоцентра, полученные в ИНАСАН в результате обработки измерений спутниковых радиотехнических систем — глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и системы ДОРИС. ГНСС и ДОРИС измерения были обработаны с помощью программного пакета GIPSY-OASIS II (JPL, USA). Наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем с 54 станций Международной сети ГНСС (IGS), оснащенных двухсистемными (GPS + ГЛОНАСС) приемниками, обработаны на временном интервале 2008.0–2016.0 гг. при помощи метода PPP (Precise Point Positioning). ДОРИС наблюдения охватывают интервал 1993.0–2017.0 гг. со всех работающих станций Международной службы ДОРИС (IDS). Временные ряды движения геоцентра для ГНСС и ДОРИС измерений получены с помощью геометрического метода. Амплитуды и фазы годовых периодичностей рядов движения геоцентра оценивались с помощью программы FAMOUS (CNES, France). Полученные спутниковые результаты вариаций геоцентра сравнивались с оценками движения геоцентра, полученными с помощью геофизических моделей и результатами других центров анализа.

Geocenter motion analysis using GNSS and DORIS radio satellite system measurements

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Results are presented of the geocenter motion determination obtained at the Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences (INASAN) as a result of the processing of the radio space geodesy techniques measurements, namely Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and DORIS system. GNSS data were processed for the time period 2008.0–2016.0 using measurements from 54 stations of the International GNSS Service (IGS) network equipped by dual-system GPS+GLONASS receivers. PPP (Precise Point Positioning) method is used for the GNSS data processing. DORIS data were processed for the time interval 1993.0–2017.0 for all working International Doris Service (IDS) stations. Time series of the geocenter motion for GNSS and DORIS data were derived using geometrical method so-called “network shift approach”. In order to estimate amplitudes, periods and phases of geocenter variation the FAMOUS (CNES,

France) software package was applied. The INASAN evaluated amplitudes and phases of annual geocenter variations derived from satellite method are in a good agreement with those obtained by other different space geodesy groups and geophysical models.

1. Введение

Результаты ежегодных уравниваний координат глобальной сети наземных станций, фиксирующих международную земную систему координат (ITRF), показали, что ее исходное начало, которое, по согласованию, должно совпадать с центром масс (ЦМ) планеты Земля, включая атмосферу и океаны, постоянно смещается на небольшие, порядка нескольких миллиметров, но уже значимые при современной точности космической геодезии величины [1]. Геоцентр определяется как центр масс общей земной системы, состоящей из твердой Земли и ее различных оболочек (атмосферы, криосферы, водных поверхностей, континентальной гидрологии и т.д.) [2]. В данной работе под термином «движение геоцентра» понимается движение центра масс Земли относительно центра фигуры твердой поверхности Земли [2], на которой располагается измерительная аппаратура различных спутниковых технологий. Движение геоцентра обусловлено перемещением масс различного происхождения (изменение уровня морей, таяние ледников, перемещения воздушных масс, поверхностных стоков) в приповерхностном земном пространстве, а также движением масс в недрах Земли. Вариации геоцентра также зависят от эластичных и вязко-упругих свойств твердой Земли и являются следствием прямого воздействия поверхностных деформаций первой степени ($n = 1$), вызванных поверхностными нагрузками. Движение геоцентра может быть смоделировано с применением геофизических, климатических и поверхностногидрологических подходов [3], а также непосредственно измерено как с помощью различных современных спутниковых технологий, так и с помощью измерений деформаций первой степени [4]. В данной работе исследуются вариации движения геоцентра, полученные путем обработки измерений различных спутниковых радиотехнических технологий, а именно глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS (США) и ГЛОНАС (Россия), а также французской спутниковой системы ДОРИС.

2. Обработка и анализ временных рядов движения геоцентра ГНСС и ДОРИС измерений

2.1. Анализ ГНСС (GPS и ГЛОНАСС) измерений

ГНСС измерения обрабатывались на интервале 2010.3–2016.0 гг. (ГЛОНАСС) и 2008.0–2016.0 гг. (GPS) с 54 станций сети IGS, на которых установлены совмещенные двухсистемные (GPS+ГЛОНАСС) приемники. При выборе станций мы руководствовались следующими соображениями: 1) станции должны иметь историю измерений не менее трех лет и 2) располагаться равномерно по территории Земли. Меньший интервал обработки ГЛОНАСС измерений, по сравнению с интервалом обработки GPS измерений, обусловлен тем фактом, что до 2010.0 г. отсутствовало достаточное число станций, оснащенных ГЛОНАСС аппаратурой. Обработка ГНСС измерений была выполнена с использованием программного пакета GIPSY-OASIS II. Для обработки как GPS, так и ГЛОНАСС измерений использовался метод «precise point positioning» [5] с использованием заранее оцененных орбит и часов спутников. Для получения рядов движения геоцентра использовался геометрический метод, имеющий название «network shift approach», суть которого заключается в том, что сначала определяются координаты всех выбранных станций в свободной сети (так называемые «свободные» решения («free network solutions») с априорными неопределенностями координат порядка 1 м. Затем полученные «свободные» решения преобразуются в хорошо-определенную систему координат, например, Международную земную систему координат (ITRF), с использованием параметров трансформации Гельмерта. На последнем этапе обработки «свободные» решения каждой станции объединялись в суточные комбинированные решения для всех станций и трансформировались в систему координат ITRF2008.

2.2. Анализ ДОРИС измерений

ДОРИС измерения были обработаны на временном интервале 1993.0–2017.0 гг. с использованием программного пакета GIPSY-OASIS II (JPL, USA). Для получения рядов движения геоцентра использовался тот же самый метод, который использовался и для обработки ГНСС измерений, описанный в подразделе 2.1. Единственное различие заключается в том, что ввиду значительного меньшего объема обрабатываемых ДОРИС данных, на последнем этапе обработки «свободные» суточные решения обрабатываемых станций объединялись

в недельные комбинированные решения для всех станций и трансформировались в систему координат ITRF2008. Детальное описание методов, применяемых для обработки ДОРИС данных в ИНАСАН, может быть найдено в работе [6].

2.3. Гармонический анализ временных рядов вариаций геоцентра

Для анализа периодичностей полученных временных рядов движения геоцентра использовался программный пакет FAMOUS, разработанный F. Mignard (CNES, Франция, <ftp://ftp.obs-nice.fr/pub/mignard/Famous>) Исследуемые ряды аппроксимировались следующим выражением:

$$y(t) = A_i \cos(\omega_i(t - t_0 - \varphi_{0i})), \quad (1)$$

где A_i — амплитуда i -го компонента; ω_i — частота i -го компонента; t — время; t_0 — произвольно выбранный начальный момент времени (мы определяем его как 1 января выбранного года), φ_{0i} — начальная фаза i -го компонента. Годовые компоненты временных рядов движения геоцентра являются наиболее значимыми по амплитуде по сравнению с амплитудами других гармонических составляющих, рассмотрение которых не входит в задачи данного исследования. В табл. 1 приводятся амплитуды и фазы годовых периодичностей временных рядов движения геоцентра, полученные с использованием выражения (1).

3. Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- оцененные годовые амплитуды компонентов движения геоцентра, полученные из обработки ДОРИС и ГНСС измерений, варьируются в пределах 0.4–3.2 мм, 0.9–4.4 мм и 0.7–6.3 мм для X, Y и Z компонентов, соответственно;
- наименьшие значения амплитуды имеют ГЛОНАСС годовые компоненты;
- ГЛОНАСС годовые компоненты определяются хуже по сравнению с другими космическими технологиями с использованием предложенной методики;

Таблица 1. Годовые компоненты гармонического анализа временных рядов движения геоцентра, полученные по ГНСС и ДОРИС измерениям, и их сравнение с геофизическими моделями и результатами, полученными другими группами анализа спутниковых измерений.

Решение	Интервал	X (год)		Y (год)		Z (год)	
		A, мм	$\varphi_0, ^\circ$	A, мм	$\varphi_0, ^\circ$	A, мм	$\varphi_0, ^\circ$
ДОРИС (ИНАСАН)	1993.0 –2017.0	3.2 ± 0.1	211 ± 6	4.4 ± 0.1	55 ± 5	3.0 ± 0.8	271 ± 24
GPS (ИНАСАН)	2008.0 –2016.0	1.3 ± 0.1	227 ± 3	1.9 ± 0.1	327 ± 1	6.3 ± 0.1	151 ± 1
ГЛОНАСС (ИНАСАН)	2010.3 –2016.0	0.4 ± 0.1	252 ± 11	0.9 ± 0.1	207 ± 13	0.7 ± 0.1	183 ± 18
GPS (Robishung et al., [7])	1997.0 –2009.0	2.9	2	3.2	46	3.0	194
Геофизич. модель (Collilieux et al., [8])	1993.0 –2006.0	2.1 ± 0.1	332 ± 2	2.1 ± 0.1	23 ± 2	2.7 ± 0.1	312 ± 2
Лазерные измерения (Cheng et et al., [9])	2002.0 –2010.6	3.2 ± 0.4	329 ± 5	2.6 ± 0.4	59 ± 5	4.3 ± 0.3	329 ± 5

- оцененные фазы компонентов движения геоцентра хорошо согласуются между собой (за исключением ГНСС решений);
- амплитуды и фазы оцененных годовых компонентов движения геоцентра довольно хорошо согласуются с оценками геодезических моделей и результатами анализа других центров геофизических исследований (за исключением ГНСС решений).

Одной из возможных причин отличия ГНСС определений движения геоцентра от результатов, полученных по другим технологиям и моделям, является недостаточно равномерное распределение выбранных станций ГНСС наблюдений по поверхности Земли. Кроме того, дополнительные ошибки (смещения) ГНСС определений координат движения геоцентра могут быть вызваны типом орбит ГНСС аппара-

тов, применяемых при вычислениях, и центром анализа, получившим данные орбиты.

Список литературы

1. S. K. Tatevian, *Geodezia i kartographia*, **4**, 9, 2009.
2. B. Luzum and G. Petit, *Highlights of Astronomy*, **16**, 227, 2015.
3. X. Wu, J. Ray, and T. van Dam, *Journal of Geodynamics*, **58**, 44, 2012.
4. G. Blewitt, D. Lavallée, P. Clarke, and K. Nurutdinov, *Science*, **294**, 2342, 2001.
5. J. F. Zumberge, M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, *JGR*, **102**, 5005, 1997.
6. S. P. Kuzin, S. K. Tatevian, S. G. Valeev, and V. A. Fashutdinova, *Adv. Sp. Res.*, **46**, 1292, 2010.
7. P. Rebischung and B. Garayt, *International Association of Geodesy Symposia*, **138**, 69, 2013.
8. X. Collilieux, Z. Altamimi, J. Ray, T. van Dam, and X. Wu, *JGR (Solid Earth)*, **114**, B04402, 2009.
9. M. Cheng, J. Ries, and B. Tapley, *International Association of Geodesy Symposia*, **138**, 19, 2013.

Космический мусор

Исследования движения ИСЗ и космического мусора в ИНАСАН

Левкина П.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Дан обзор научных работ, проводимых в Институте астрономии РАН по тематике исследований ИСЗ и космического мусора, начиная с запуска Первого искусственного спутника Земли и по настоящее время.

Research of the motion of artificial satellites and space debris at the INASAN

Levkina P.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

An overview of scientific works carried out at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences on the subject of research on artificial satellites and space debris is given.

1. Введение

История исследований движения искусственных объектов на околоземных орбитах в Институте астрономии РАН (ИНАСАН, до 1991 г. Астрономический совет АН СССР) началась за год до запуска Первого спутника Земли с организации сети наблюдательных пунктов и обучения первых наблюдателей ИСЗ. Уже в 1957 г. 66 станций на территории СССР начали проводить оптические наблюдения искусственных небесных тел. В 1958 г. в Астрономическом совете была организована Звенигородская станция наблюдений ИСЗ (ныне Звенигородская обсерватория ИНАСАН), задачей которой была массовая подготовка наблюдателей ИСЗ. В 1966 г. была организована сеть зарубежных станций, число которых доходило до 28. Результаты наблюдений спутников регулярно поступали в Астросовет [1]. Наблюдения проводились по эфемеридам, вычисляемым в Астросовете. В первые же пять лет после запуска первого спутника был накоплен огромный массив оптических наблюдений низкоорбитальных спутников Земли. В 1975 г. Астросоветом была создана Симеизская станция лазерных наблюдений ИСЗ.

Под руководством А.Г. Масевич в Астросовете был образован Сектор оптических наблюдений ИСЗ, выпускавший два периодических издания: «Бюллетень станций оптического наблюдения ИСЗ» (позднее «Наблюдения ИСЗ») и бюллетень «Результаты наблюдений ИСЗ». Публиковались исходные данные визуальных и фотографических наблюдений спутников, а также научно-исследовательские статьи наблюдателей. Эти материалы служили первым источником данных для научных исследований с использованием оптических наблюдений ИСЗ. Они легли в основу работ по повышению точности наблюдений и созданию новых наблюдательных инструментов.

2. Развитие исследований по проблеме космического мусора

Проблема засорения околоземных орбит была обретаена человечеством вместе с освоением космических пространств. Вопрос о перенасыщении орбит Земли искусственными космическими аппаратами стал подниматься на высшем международном уровне, начиная уже с первых запусков геостационарных спутников в середине 1960-х гг.

Термин «космический мусор» (КМ) появился в 1980-х гг. для обозначения всех нефункционирующих искусственных объектов и их фрагментов в околоземном космосе. С 1986 г. в Астросовете-ИНАСАН ведутся систематические позиционные и фотометрические наблюдения объектов видимой области геостационарной орбиты (ГСО) [2], в том числе с целью каталогизации неуправляемых космических объектов [3].

В российской научной литературе вопрос засорения околоземного космического пространства (ОКП) искусственными объектами впервые был комплексно рассмотрен в сборнике «Проблема загрязнения космоса (Космический мусор)», вышедшем в 1993 г. под редакцией А.Г. Масевич. Коллективами авторов из ИНАСАН опубликовано много работ по проблеме КМ, в частности, о возможностях каталогизации новых фрагментов [3, 4], об особенностях некоординатных наблюдений ИСЗ [5], а также об эволюции высокоорбитальных объектов под действием светового давления [6].

В последующем сборнике научных трудов «Столкновения в околоземном пространстве (Космический мусор)» 1995 г., опубликованном также под редакцией А.Г. Масевич, эффект светового давления в астрономии был рассмотрен более подробно. В работе [7] выполнен анализ вековых возмущений под влиянием светового давления. Было показано, что вековые возмущения, вызванные эффектом Пойнтинга-

Робертсона, более чем на порядок превосходят возмущения от остальных факторов. Тогда же по фотометрическим наблюдениям на 1-м телескопе в Симеизе была определена форма взорвавшейся в 1965 г. верхней ступени ракеты-носителя Титан-Транстейдж [8].

3. Новые интересы

На рубеже двух столетий в международной научной среде окончательно оформился исследовательский интерес к изучению влияния негравитационных эффектов на объекты в околоземном космическом пространстве. В Институте астрономии РАН вышел цикл работ об орбитальной эволюции частицы на ГСО, определяемой скоростью изменения ее большой полуоси и вызванной асимметричностью поля рассеяния светового давления [9, 10].

Объединение накопленного опыта оптических наблюдений искусственных небесных тел в ИНАСАН и результатов моделирования движения ИСЗ и космического мусора в Астрономическом институте им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ) привело к развитию плодотворного сотрудничества астрометристов и небесных механиков двух научных коллективов.

С развитием вычислительной техники появилась возможность прогнозирования и визуализации положений естественных и искусственных небесных тел в реальном масштабе времени для планирования сеансов оптических наблюдений ИСЗ с учетом помех от Солнца, Луны, больших планет, Млечного Пути, входа ИСЗ в тень Земли, и тем самым повысить эффективность проводимых измерений [11].

Реализация теории движения искусственных спутников Земли в численно-аналитической форме [12] привела к созданию эффективного программного приложения для информационной поддержки космических экспериментов. На современном уровне была решена задача вычисления положений и скоростей ИСЗ с высотой полета от 800 до 40000 км, а также положений наблюдательных пунктов, Солнца, Луны и других небесных тел в геоцентрической небесной системе отсчета [13].

4. Работы последних лет

С середины первого десятилетия XXI в. на Терскольской обсерватории (в Терскольском филиале ИНАСАН) на телескопе Zeiss-2000 ($D = 2$ м, $F = 16$ м) проводятся наблюдения объектов КМ и последствий разрушений и взрывов на высоких орбитах. В 2009 г. в

Терскольской обсерватории была завершена модернизация оборудования и программного обеспечения наблюдательных комплексов, которая позволила повысить проникающую силу телескопа Zeiss-2000. В том же году в Звенигородской обсерватории ИНАСАН введен в эксплуатацию новый широкоугольный телескоп Сантел-500 ($D = 0.5$ м, $F = 1.25$ м) с ПЗС-приемником [14]. Только за первый год суммарно на двух инструментах было получено около 14 тысяч точных положений и оценок блеска более ста высокоорбитальных космических объектов.

Регулярный мониторинг геостационарной области с целью обнаружения новых объектов космического мусора и уточнения характеристик движения каталогизированных фрагментов проводится в Институте астрономии РАН до настоящего времени.

Активное развитие оптических наблюдений геостационарной области в начале XX в. повлекло за собой открытие объектов с большой парусностью. Факт существования в ОКП особого класса НАMR-объектов (high area-to-mass ratio) породил целую волну российских и зарубежных работ, посвященных исследованию орбитальной эволюции космического мусора. Сделаны важные выводы о зависимости характера движения объектов КМ от начальных условий и от величины отношения площади миделева сечения к массе объекта A/m .

Получение регулярных данных о движении объектов с большим A/m позволяет выявить особенности эволюции орбитальных параметров, обусловленных исключительно действием светового давления. Количественная оценка отношения A/m является ключевым параметром для точного моделирования движения искусственных небесных тел в различных областях ОКП, в том числе и для высокоэллиптических объектов типа «Молнии».

Особый интерес представляют высокоорбитальные малоразмерные объекты с большим отношением площади к массе, обладающие сложным характером вращения. На телескопе Zeiss-2000 Терскольского филиала ИНАСАН получены длинные ряды однородных высокоточных наблюдений таких объектов, анализ которых позволяет уточнить действующую модель движения ИСЗ и космического мусора [15, 16].

По данным шестилетнего ряда наблюдений построена эмпирическая модель движения для одного из объектов космического мусора, движущегося вблизи устойчивой точки 75° в.д. Предложена модель изменения величины отношения площади к массе, показано, что учет

эволюции этого параметра позволяет заметно повысить точность прогноза положения объекта [17].

5. Заключение

Научные исследования движения ИСЗ и космического мусора начались на заре космической эры с запуском Первого ИСЗ и стали разделом астрономической науки о ближнем космосе — «околоземной астрономии». Космические аппараты на околоземных орбитах и после окончания срока эксплуатации служат задачам астрономии вне зависимости от их назначения при запуске. Необходимость постоянного мониторинга околоземного пространства ставит новые задачи, как для научной работы, так и для прикладных исследований.

В настоящее время ИНАСАН продолжает наблюдения космических объектов на своих обсерваториях и проводит плодотворные научные исследования с использованием результатов этих наблюдений.

Список литературы

1. A. G. Massevitch and S. K. Tatevian, *Nauchnye Informatsii*, **60**, 50, 1986.
2. L. V. Rykhlova, A. M. Mikisha, M. A. Smirnov, A. V. Bagrov, and N. S. Bakhtigaraev, in F. A. Allahdadi, ed., *Space Debris Detection and Mitigation, Proc. SPIE*, volume 1951, 2–10 (1993).
3. N. S. Bakhtigaraev, in *Problema zagryazneniya kosmosa (Kosmicheskij musor)*, 47, Kosmosinform (1993).
4. A. V. Bagrov, in *Problema zagryazneniya kosmosa (Kosmicheskij musor)*, 70, Kosmosinform (1993).
5. A. V. Bagrov and M. A. Smirnov, in *Problema zagryazneniya kosmosa (Kosmicheskij musor)*, 58, Kosmosinform (1993).
6. M. A. Smirnov and A. M. Mikisha, in *Problema zagryazneniya kosmosa (Kosmicheskij musor)*, 126, Kosmosinform (1993).
7. M. A. Smirnov and A. M. Mikisha, in *Stolknoveniya v okolozemnom prostranstve (Kosmicheskij musor)*, 252, Kosmosinform (1995).
8. T. V. Kasimenko, A. M. Mikisha, L. V. Rykhlova, and M. A. Smirnov, in *Stolknoveniya v okolozemnom prostranstve (Kosmicheskij musor)*, 159, Kosmosinform (1995).
9. A. Mikisha and M. A. Smirnov, in B. Kaldeich-Schuermann, ed., *Second European Conference on Space Debris, ESA Special Publication*, volume 393, 323 (1997).
10. A. M. Mikisha, E. S. Novikova, L. V. Rykhlova, and M. A. Smirnov, in *Okolozemnaya astronomiya XXI veka*, 145, GEOS (2001).
11. N. Bakhtigaraev and V. Chazov, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel Supplement*, **4**, 105, 2003.
12. V. V. Chazov, *Trudy SAI MSU*, **68**, 5, 2000.

13. N. S. Bakhtigaraev and V. V. Chazov, *Cosmic Res.*, **43**, 369, 2005.
14. N. Bakhtigaraev and A. Sergeev, in *Fifth European Conference on Space Debris, ESA Special Publication*, volume 672, 132 (2009).
15. N. S. Bakhtigaraev, P. A. Levkina, L. V. Rykhlova, A. V. Sergeev, V. K. Taradiy, N. V. Karpov, and V. V. Chazov, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **32**, 237, 2016.
16. N. S. Bakhtigaraev, P. A. Levkina, L. V. Rykhlova, V. V. Chazov, A. V. Sergeev, and N. V. Karpov, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **32**, 233, 2016.
17. N. S. Bakhtigaraev, P. A. Levkina, and V. V. Chazov, *Sol. Syst. Res.*, **50**, 130, 2016.

Наблюдения неизвестных фрагментов космического мусора в Терскольской обсерватории

Бахтигараев Н.С.¹, Левкина П.А.¹, Карпов Н.В.^{2,3}, Чазов В.В.⁴

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Международный центр астрономических и медико-экологических исследований, Киев, Украина*

³*Терскольский филиал Института астрономии РАН, Кабардино-Балкария, Россия*

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

В работе приводятся параметры орбит и физические характеристики некоторых малоразмерных фрагментов КМ, обнаруженных по наблюдениям на Терскольской обсерватории в 2016–2018 гг. Сделана попытка определения родительских тел этих фрагментов.

Observations of unknown space debris objects at the Terskol observatory

Bakhtigaraev N.S.¹, Levkina P.A.¹, Karpov N.V.^{2,3}, Chazov V.V.⁴

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*International Center for Astronomical, Medical and Ecological Research, Kiev, Ukraine*

³*Terskol branch of the Institute of Astronomy of the RAS, Kabardino-Balkaria, Russia*

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

In this paper, orbital parameters and physical characteristics of some small-sized fragments of space debris detected at the Terskol observatory in 2016–2018 are presented.

1. Введение

В рамках исследования околоземного космического пространства по международной программе «Астрономия в Приэльбрусье» на комплексе телескопа Zeiss-2000 нами решаются следующие задачи: обнаружение и определение характеристик малоразмерных фрагмен-

тов космического мусора; исследование орбитальных и физических свойств; уточнение моделей движения ИСЗ и космического мусора.

Позиционные наблюдения осуществляются короткими сериями по 2–3 мин. с частотой один кадр в 10 с. Длительность экспозиции выбирается исходя из блеска объекта и условий наблюдений (фона неба). Измерения блеска осуществляются долгими непрерывными сериями по 30–60 мин. и дольше, в зависимости от особенностей объекта. Частота кадров при измерениях блеска выбирается максимальная возможная для используемой приемной аппаратуры — в нашем случае при хороших условиях наблюдений один кадр в 5–6 с. Экспозиция выбирается минимальная, позволяющая уверенно детектировать объект на фоне неба. Для анализа неравномерных рядов измерений блеска вычислялась периодограмма процесса $D(P)$. Этим термином обозначено математическое ожидание квадрата D отклика данных измерений на гармоническую функцию с периодом P .

В хорошую наблюдательную ночь на телескопе Zeiss-2000 обнаруживаются 3–4 новых, ранее не наблюдавшихся объекта. Новые объекты наблюдаются с момента обнаружения на непрерывной дуге от 40 мин. и более. Высокоточные наблюдения на дуге в 40 минут позволяют уверенно определять предварительные элементы орбиты и вычислить эфемериды на следующую ночь точнее 20'.

2. Характеристики обнаруженных объектов

Объект 91133 был открыт 5 апреля 2016 г. и наблюдался нами в течение 10 ночей. Всего получено 1319 положений. На рис. 1 приведена оценка блеска 7 апреля. Такие изменения блеска свидетельствуют о сложной форме объекта, а также о сложном характере осевого вращения: блеск объекта меняется на 4 зв. величины за время меньше минуты. По данным, представленным на рис. 1, на часовом интервале времени построена периодограмма объекта. Выделяются несколько периодов, наиболее выраженный из которых 7.5 мин. Эта периодограмма приведена на рис. 2.

По результатам измерений другого объекта, обнаруженного из наблюдений на Zeiss-2000 в марте 2017 г., ему был присвоен постоянный номер 91689 в динамическом каталоге ИПМ им. М.В. Келдыша, а также сделан расчет эволюции орбитальных параметров. На рис. 3 приведены оценки блеска и изменение фазы освещенности объекта Солнцем по 352 измерениям 8 марта 2017 г. Интервал измерений 1 час. Амплитуда изменения блеска этого объекта составляет около 7^m.

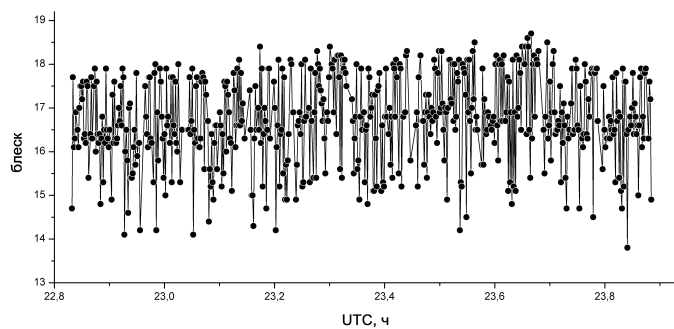


Рис. 1. Изменение блеска объекта 91133, 7 апреля 2017.

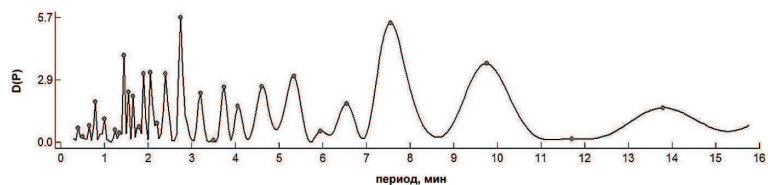


Рис. 2. Периодограмма объекта 91133.

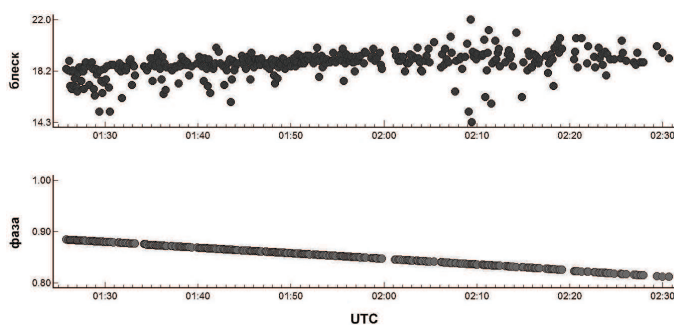


Рис. 3. Оценки блеска и изменение фазы освещенности объекта 91689, 8 марта 2017.

Прогноз эволюции элементов орбиты объекта 91689 (см. рис. 4) с момента обнаружения на апрель 2018 г. показал уменьшение большой

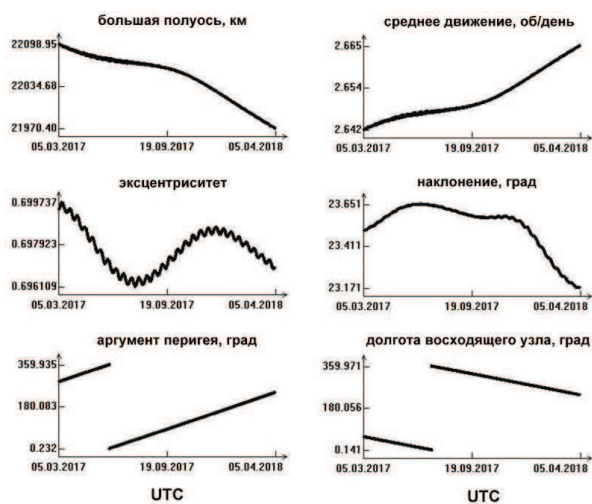


Рис. 4. Эволюция элементов орбиты объекта 91689.

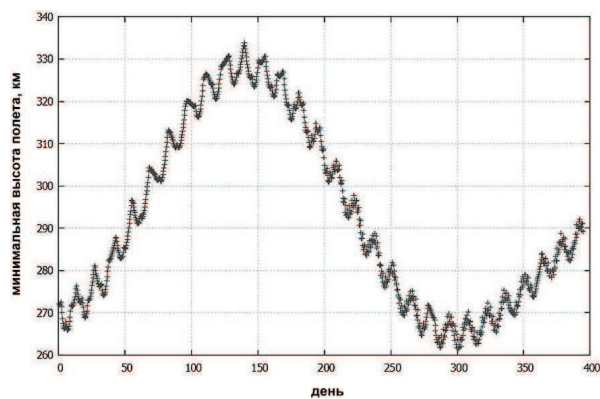


Рис. 5. Диаграмма изменения минимальной высоты полета объекта 91689.

полуоси и наклона орбиты, а также возрастание величины среднего движения. Объект ускоряется в своем движении и может быть отнесен к объектам на высокоэллиптической орбите. Баллистический коэффициент для этого объекта был оценен в $0.005 \text{ м}^2/\text{кг}$. Период из-

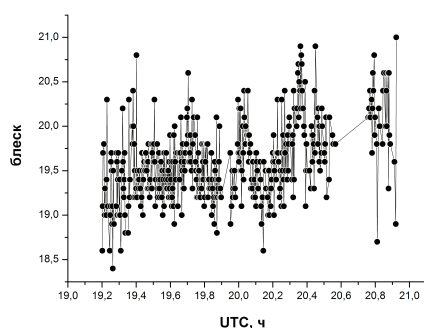


Рис. 6. Изменение блеска объекта 99995, 12 августа 2017.

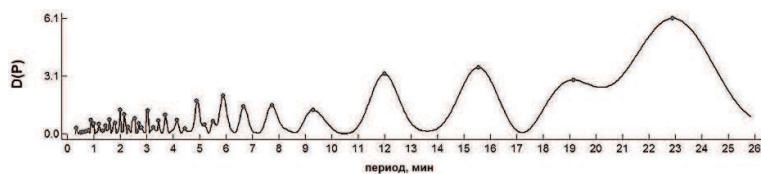


Рис. 7. Периодограмма объекта 99995, 12 августа 2017.

менения эксцентриситета равен 14 суток и обусловлен влиянием Луны. Вращение перигея орбиты происходит с периодом в 300 суток, что обусловлено сжатием Земли.

На рис. 5 показана диаграмма изменения минимальной высоты полета объекта 91689. Первый день на диаграмме — 6 марта 2017 г. Период колебания минимальной высоты полета, равный 14 суткам с амплитудой 2.5 км, обусловлен влиянием Луны на эксцентриситет. Период колебания высоты в 300 суток с амплитудой 30 км обусловлен вращением перигея орбиты.

В 2017 г. на комплексе телескопа Zeiss-2000 были обнаружены объекты космического мусора, являющиеся фрагментами разгонного блока (РБ) «Фрегат». На рис. 6 приведена кривая изменения блеска нового, прежде не наблюдавшегося объекта 99995 в ночь 12 августа 2017 г.

На рис. 7 приведена периодограмма изменения блеска объекта 99995 в эту ночь. Величина основного периода оценена в 22.9 мин. Полученные орбитальные данные позволили выделить в области дви-

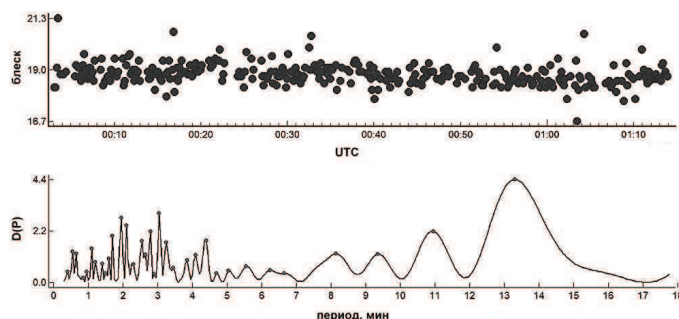


Рис. 8. Оценки блеска и периодограмма объекта 64002, 13 марта 2018 г.

жения объекта 99995 в качестве родительского тела только один подходящий крупный объект (с соответствующими большой полуосью, наклоном и эксцентриситетом) — разгонный блок «Фрегат», номер 41106 в каталоге NORAD (2015-074B «Fregat R/B»).

Объект с временным номером 64002 был обнаружен 13 марта 2018 г. По наблюдениям была вычислена орбита: большая полуось 39741 км, эксцентриситет 0.1273, наклонение 7.32° , отношение $A/m = 5 \text{ м}^2/\text{кг}$. Это элементы стандартной орбиты для разгонных блоков, остающихся после доставки основных изделий на геостационарную орбиту.

В области наблюдений объект появился недавно, 1–2 года назад. Интервал фотометрических измерений составил больше часа, получены очень быстрые изменения блеска с амплитудой 4.5^m . На рис. 8 приведены изменения блеска и периодограмма объекта 64002.

3. Заключение

Объекты, обнаруженные в ходе наблюдений в 2016–2018 гг., имеют большие амплитуды изменения блеска. Практически для всех новых объектов характерно большое значение отношения площади мишени сечения к массе (больше $0.05 \text{ м}^2/\text{кг}$). В числе обнаруженных как минимум один объект является последствием запуска разгонного блока «Фрегат»: впервые объект 20-й звездной величины наблюдался на двух витках после обнаружения.

Возможности метеорной астрономии для исследования темпов очистки ОКП от космического мусора

Леонов В.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Степень засоренности околоземного космического пространства в настоящее время описывается компьютерными моделями, которые подтверждаются только для частиц крупных размеров. Миллиметровая и более мелкие фракции элементов космического мусора остаются пока неисследованными, т.к. практически не обнаруживаются с Земли обычными методами наблюдения. Однако при вторжении в атмосферу они сгорают так же, как и метеорные частицы естественного происхождения. В работе описывается методика, позволяющая обнаруживать такие частицы, а также представлены результаты детектирования этих частиц, полученные во время сеансов телевизионных наблюдений на патрульной камере FAVOR (Северный Кавказ).

Possibilities of meteor astronomy for study of the rate of cleaning of the near-earth space from space debris

Leonov V.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The degree of pollution of the near-earth space is well described now by computer models, which are confirmed only for particles of large sizes. Millimeter and smaller fractions of elements of space debris remain still unexplored, since particles of such sizes are practically not detected from Earth by usual methods of observation. However, at the entry into the atmosphere they burn down as do natural meteor particles. In the work the technique allowing to find particles of space debris is described and also the results of detecting of such particles obtained during the sessions of TV-observations on the wide-angle patrol FAVOR camera (North Caucasus) are presented.

1. Введение

Каждый новый выведенный на орбиту космический аппарат является потенциальным источником загрязнения околоземного космического пространства (ОКП), снижающим безопасность работы на околоземных орбитах других аппаратов, особенно пилотируемых. При этом далеко не все КА подлежат утилизации после срока активного суще-

ствования, превращаясь в космический мусор (КМ). Столкновения его элементов между собой или с телами естественного происхождения, имеющими космические скорости, приводят к появлению большого количества осколков разных размеров, число которых, равно как и их траектории сложно прогнозируемы.

Получить некоторое представление о распределении фрагментов КМ можно на основе компьютерных моделей [1]. Но верификация этих моделей может происходить только в области большегабаритных элементов КМ, наблюдаемых службами контроля ОКП. Малоразмерная (менее 1 см) фракция КМ ни оптическими, ни радиолокационными методами практически не регистрируется. В то же время наши исследования метеорных явлений [2] позволяют утверждать, что более мелкие элементы КМ можно наблюдать как и обычные метеоры во время их вторжения в атмосферу Земли, а критерием их выделения на фоне обычных метеорных событий является их скорость.

2. Методика селекции элементов КМ с помощью телевизионных камер

Как известно, элементы КМ, при взаимодействии с термосферой Земли испытывают замедление, опускаясь на более низкие орбиты, в итоге они входят в плотные слои атмосферы и в ней сгорают. При этом процесс их сгорания идентичен сгоранию естественных метеоров. Однако последние имеют доатмосферные скорости, превышающие 11.2 км/с, а элементы КМ обладают скоростью не выше 11.2 км/с. Именно селекция по скоростям позволяет нам выделять события, вызванные сгоранием элементов КМ.

Данные о скоростях метеоров можно получить из их орбитальных характеристик, для чего требуются базисные наблюдения. Односторонние наблюдения позволяют получать координаты радиантов метеорных потоков («роев»), но не дают информации о самих частицах КМ, которые не образуют «роев» в привычном понимании. Но в некоторых случаях для оценки линейной скорости метеора можно использовать измерения его угловой скорости, если известен угол между направлением полета метеора и направлением на радиант, а также расстояние до места пролета метеора. Поскольку сгорание метеоров происходит обычно на высотах 80–120 км, то расстояние до метеора можно оценить из измерений его зенитного расстояния и данного диапазона высот, а его угловая скорость получается из наблюдений.

Сложности возникают при определении индивидуальной элонгации метеора — угла между направлением на радиант и метеором. Для

этого нами был предложен специальный так называемый «геометрический метод», позволяющий получать элонгацию метеора, зафиксированного на пяти и более кадрах [3]. В случае, если элонгация метеора лежит в диапазоне $85 - 90^\circ$, это означает, что метеор движется практически перпендикулярно лучу зрения. Этот способ не учитывает торможения метеорной частицы и применим для метеоров, следы которых начинаются в поле зрения телевизионной камеры. Метод оформлен в виде программы для ЭВМ и зарегистрирован в Роспатенте.

3. Анализ массива наблюдений, полученных на камере FAVOR

Проведенные нами исследования торможения метеоров дают основания полагать, что первые признаки торможения проявляются не ранее, чем через 700 мсек после появления метеора [3]. При этом различные телевизионные камеры имеют свою специфику, которая зависит от поля зрения, проникающей силы и кадровой частоты каждой камеры. Например, телевизионные регистрации на камере FAVOR дают материал преимущественно по слабым метеорам, которые движутся в более разреженной среде и с меньшим торможением. Хотя совместить в одной телевизионной камере широкую апертуру, высокую проникающую силу и тактовую частоту практически невозможно, для использования геометрического анализа метеорных регистраций подходят данные, полученные на этой камере. Для проверки вышеуказанных положений был проанализирован массив, состоящий из 4500 метеоров, полученных на камере FAVOR в 2006–2007 гг. на ст. Архыз.

Изначально были выделены все события, для которых имелась возможность определения индивидуальной элонгации, далее исключались метеоры, отождествленные с потокам. Полученная выборка проходила отбор по элонгации, и из оставшегося количества метеорных треков были отобраны события с самой низкой угловой скоростью. В итоге было обнаружено 7 метеоров искусственного происхождения (менее 0.2% от общего числа метеоров), после чего была оценена их линейная скорость, которая составляла 3.0–4.7 км/с.

Ошибка в определении линейной скорости по измерению угловой скорости и оценке элонгации не превышает 0.6 км/с, т.е. выделенные частицы имели скорость, заведомо меньшую, чем 2-я космическая. Важно отметить, что в работе рассмотрены метеоры, имеющие направление движения, близкое к горизонтальному, т.е. те частицы КМ, которые двигались на самых низких орбитах, близких к круговым.

4. Заключение

Методика выделения частиц на основе селекции по скоростям при односторонних метеорных наблюдениях является одним из новых способов детектирования малоразмерной фракции элементов КМ. Использование базисных наблюдений позволит получать значения вектора скорости, следовательно, расширить данный подход на элементы КМ, находящиеся на более высоких эллиптических орбитах. В перспективе это даст возможность оценивать темп самоочистки ОКП и проводить уточнение моделей малоразмерного вещества искусственного происхождения.

Список литературы

1. A. I. Nazarenko, *Sol. Syst. Res.*, **36**, 513, 2002.
2. V. A. Leonov and A. V. Bagrov, *Astron. Bull.*, **66**, 87, 2011.
3. A. V. Bagrov and V. A. Leonov, *Sol. Syst. Res.*, **44**, 327, 2010.

Исследования космического мусора в международной астрономической обсерватории Санглох

Кохирова Г.И.¹, Бахтигараев Н.С.², Хамроев У.Х.¹,
Мулло-Абдоллов А.Ш.¹, Чазов В.В.³

¹*Институт астрофизики АН Республики Таджикистан, Душанбе,
Таджикистан*

²*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

³*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ, Москва, Россия*

В 2016 г. после 26-летнего перерыва был восстановлен и модернизирован телескоп Zeiss-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики АН Республики Таджикистан. Комплекс восстановительных работ на МАОС был выполнен при поддержке Президента РТ усилиями сотрудников ИА АН РТ при активном участии специалистов ИНАСАН и КраО РАН. В сентябре 2016 г. и ноябре 2017 г. на МАОС были проведены наблюдения фрагментов космического мусора по научным программам ИНАСАН. Анализ результатов наблюдений показал, что местоположение и астроклимат МАОС являются практически идеальными для исследований движения космического мусора на геостационарной орбите, в том числе и вблизи точки либрации 75° в.д., где расположено множество функционирующих российских геостационарных ИСЗ. Положения и блеск наблюдавшихся на телескопе Zeiss-1000 объектов космического мусора хорошо согласуются с наблюдениями в Звенигородской и Терскольской обсерваториях ИНАСАН.

Investigations of space debris at the International Astronomical Observatory Sanglokh

Kokhirova G.I.¹, Bakhtigaraev N.S.², Khamroev U.Kh.¹,
Mullo-Abdolov A.Sh.², Chazov V.V.³

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

²*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

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

In 2016 the telescope Zeiss-1000 of the International astronomical observatory Sanglokh (IAOS) of the Institute of Astrophysics of the Academy of Sciences of the Republic Tajikistan was reconstructed. INASAN employees took an active part in restoration works and trial observations of celestial objects. In Septem-

ber 2016 and November 2017 observations of space debris were carried out on IAOS. The measured positions and star magnitudes of space debris objects observed on the Zeiss-1000 telescope are in a good agreement with observations made at Zvenigorod and Terskol observatories of INASAN.

1. Введение

Искусственные спутники Земли (ИСЗ), запущенные на геостационарную орбиту, удерживаются над заданной точкой земного экватора. Без коррекции орбиты аппарат начинает медленно смещаться от подспутниковой точки стояния под влиянием неоднородного гравитационного поля Земли и лунно-солнечных возмущений. После прекращения эксплуатации ИСЗ, если он не был выведен на орбиту захоронения, начинает движение относительно устойчивых точек либрации 75° в.д. или 255° в.д. Наибольшую опасность для функционирующих ИСЗ представляют столкновения с фрагментами космического мусора, совершающими либрационные движения [1]. Местоположение и астроклимат Международной астрономической обсерватории Санглюх Института астрофизики АН РТ практически идеальны для наблюдений высокоорбитальных космических объектов вблизи точки либрации 75° в.д. и выявления особенностей их движения.

21-26 сентября 2016 г. и в ноябре 2017 г. на телескопе Zeiss-1000 МАОС проведены позиционные и фотометрические наблюдения избранных объектов геостационарной области. Для предварительной редукции изображений и синхронизации со службой времени использовались программный модуль CameraControl и комплекс Apex II, разработанные в Главной (Пулковской) обсерватории РАН [2]. Для вычисления параметров движения объектов использовалась численно-аналитическая теория движения искусственных спутников Земли [3]. Для фрагментов получены оценки отношения средней площади поверхности A , освещаемой Солнцем, к массе m . Этот параметр важен для разработки моделей поступательно-вращательного движения космического мусора.

2. Результаты наблюдений объектов Fengyun 2D Deb и SIRIO-1

Фрагмент космического мусора Fengyun 2D Deb (№2006-053D) наблюдается в обсерваториях ИНАСАН с 2007 г. Он образовался в результате запуска ИСЗ Fengyun 2D, выведенного КНР на геостационарную орбиту в точку стояния около 86.5° в.д. в декабре 2006 г. Объект движется в режиме либрации около 75° в.д. с периодом 748 суток [4].

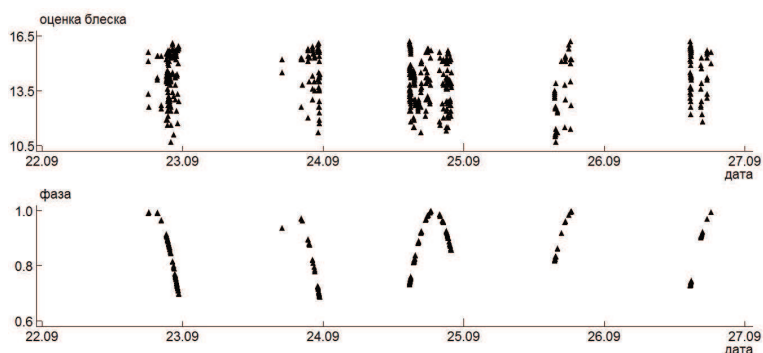


Рис. 1. Фазовые кривые и изменение блеска объекта SIRIO-1 в интегральных звездных величинах по наблюдениям на МАОС в сентябре 2016 г.

Итальянский научный спутник SIRIO-1 (№77080A) был запущен на геостационарную орбиту в 1977 г. SIRIO-1 находится в пассивном режиме вблизи точки либрации 75° в.д. с 2002 г. Сеансы наблюдений Fengyun 2D Deb и SIRIO-1 на МАОС выполнены в сентябре 2016 г. и в ноябре 2017 г. В табл. 1 приведены среднеквадратические ошибки измерений.

Изменение блеска в интегральных звездных величинах, а также фазы объекта SIRIO-1 показаны на рис. 1, где по оси абсцисс приведены даты наблюдений, ось ординат верхнего графика соответствует оценкам блеска, ось ординат нижнего графика — фазе видимости объекта. Блеск объекта испытывает резкие колебания приблизительно от 10.5 до 16.5 звездной величины.

На рис. 2 подробно показаны изменения блеска объекта SIRIO-1 на МАОС в две отдельно взятые ночи 22 и 24 сентября 2016 г. Измерения блеска проводились длинными непрерывными сериями в течение двух часов 22 сентября и почти полную ночь 24 сентября.

Таблица 1. Среднеквадратические ошибки измерений объектов 77080A и 2006-053D.

Номер объекта	Блеск в зв. вел.	Количество измерений	СКО по α в сек. дуги	СКО по δ в сек. дуги
77080A	10.5 – 16.5	219	0.23	0.17
2006-053D	16.7 – 17.7	76	0.34	0.41

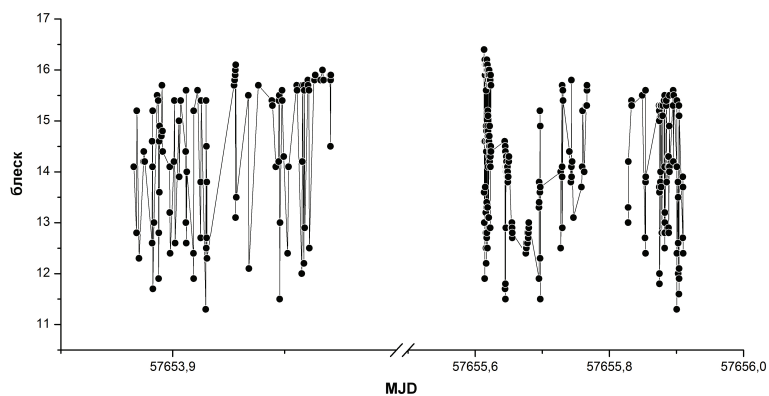


Рис. 2. Изменение блеска объекта SIRIO-1 в интегральных звездных величинах по наблюдениям на МАОС 22 и 24 сентября 2016 г.

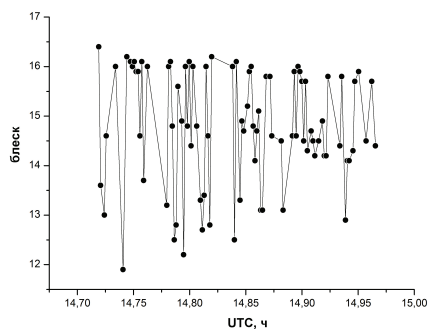


Рис. 3. Изменение блеска объекта SIRIO-1 в интегральных звездных величинах по наблюдениям на МАОС 24 сентября 2016 г. (фрагмент)

Рис. 3 иллюстрирует собой фрагмент кривой блеска, полученной на МАОС вечером 24 сентября 2016 г. Видны три ступени изменения блеска — 13^m , 14.5^m и 16^m , обусловленные формой объекта.

Результаты сравнивались с данными, полученными в течение длительного интервала наблюдений в Звенигородской и Терскольской обсерваториях ИНАСАН. Анализ показал хорошую совместимость всех наблюдательных сеансов. На рис. 4 приведен блеск объекта SIRIO-1

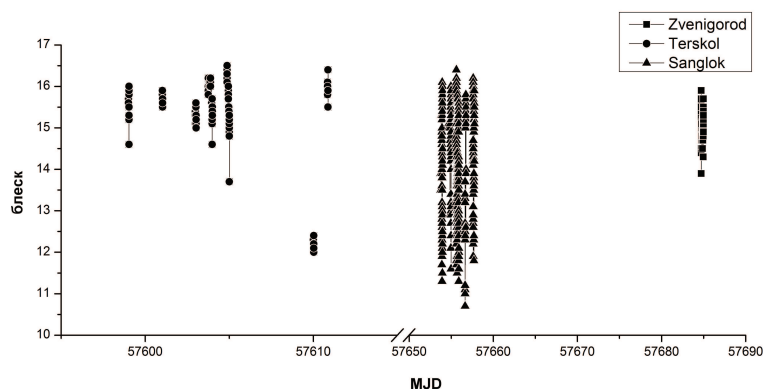


Рис. 4. Изменение блеска объекта SIRIO-1 по наблюдениям на Терскольской (круги) и Звенигородской (квадраты) обсерваториях ИНАСАН и на МАОС (треугольники).

с августа по октябрь 2016 г. по наблюдениям на Терскольской и Звенигородской обсерваториях ИНАСАН и на МАОС.

3. Заключение

На основании международного меморандума о научном сотрудничестве между ИНАСАН и ИА АН РТ начаты совместные исследования космического мусора. Местоположение и астроклимат МАОС являются практически идеальными для наблюдений высокоорбитальных космических объектов вблизи точки либрации 75° в.д.

В 2016–2017 гг. выполнены позиционные и фотометрические наблюдения избранных фрагментов КМ в геостационарной области на телескопе Zeiss-1000 МАОС. Показана эффективность использования телескопа Zeiss-1000 для позиционных и фотометрических наблюдений фрагментов КМ в геостационарной области. Результаты наблюдений на МАОС хорошо согласуются с наблюдениями в Звенигородской и Терскольской обсерваториях ИНАСАН, систематические ошибки не выявлены.

Список литературы

1. A. P. Klishin, N. S. Chazov, V. V. Bakhtigaraev, and N. D. Kostyuk, *Voprosy Radioelektroniki*, **2**, 40, 2007.
2. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, *Sol. Syst. Res.*, **44**, 68, 2010.
3. N. S. Bakhtigaraev and V. V. Chazov, *Cosmic Res.*, **43**, 369, 2005.
4. N. S. Bakhtigaraev, P. A. Levkina, and V. V. Chazov, *Sol. Syst. Res.*, **50**, 130, 2016.

Метеорная астрономия

Крупные тела в метеороидных потоках: обзор работ по их поиску

Барабанов С.И.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Представлены результаты исследований возможности существования тел метрового-декаметрового размеров в известных метеороидных потоках и наблюдений таких тел с использованием оптических телескопов.

Large bodies in meteoroid streams: review of activity for their searching

Barabanov S.I.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The paper presents result of study of existence of meter-decameter size bodies in known meteoroid streams and search for them with optical telescopes

1. Введение

Доказательства существования в метеорных потоках тел метрового-декаметрового размеров важны для понимания процессов дезинтеграции комет. Прямое обнаружение (или необнаружение) тел метрового и декаметрового размеров в метеорных потоках позволит лучше понять особенности и эволюцию распределения по размерам и массам малых тел Солнечной системы размером менее 50 м, сближающихся с орбитой Земли.

Основываясь на данных о метеорных потоках [1], мы проанализировали распределения наблюдаемых объектов по звездными величинам, которые дают возможность получить оценки распределений по размерам и массам. Эта работа позволила отобрать для наблюдений несколько метеорных потоков, в которых вероятность обнаружения тел метрового размера и выше является максимальной и значимой на периоде возможных наблюдений (период активности потока).

Расчеты показывают [2] возможность регистрации объектов метрового и декаметрового размеров на расстояниях до нескольких миллионов и десятков миллионов километров от Земли.

Нами также проанализированы данные болидных сетей и связь зарегистрированных болидов с уже известными метеорными потоками.

Таблица 1. Метеороидные потоки, породившие болиды

Наименование по созвездию	Период активности	Число найденных болидов	Диапазон масс
Апрельские Кома Беренециды Coma Berenecids	02.04-20.04	4	160 г — 21 т
Тауриды	03.12-29.12	12	51 г — 100 т

Если наблюдения позволяют определить орбиту болида, то его связь с тем или иным потоком устанавливается по критерию близости орбит. В табл. 1 представлены два наиболее мощных метеороидных потока с значительной болидной составляющей и оценками масс болидных тел. Можно предположить, что Тауриды и апрельские Кома Беренециды являются теми потоками, где существует возможность обнаружить тела метрового и декаметрового размеров в периоды их активности.

Перечисленные доводы позволили поставить в 1994–1995 гг. оригинальную наблюдательную задачу по обнаружению тел метрового-декаметрового размеров в отдельных метеороидных потоках при локализации поискового пространства вблизи радиантов потоков в периоды их активности на расстояниях до нескольких миллионов километров [3]. Начиная с 1995 г., нами проводятся регулярные сеансы поисковых наблюдений в избранных метеорных потоках, в основном, на двух телескопах — на 1-метровом телескопе в Симеизе и на 60-сантиметровом телескопе в Звенигороде.

2. Прямые наблюдения

2.1. Обзор наших результатов

С 1995 г. по настоящее время мы проводим поисковые наблюдения вблизи радиантов метеорных и болидных потоков с целью обнаружения тел метрового и декаметрового размеров в этих потоках. С 1995 по 2000 гг. такие наблюдения были регулярными и интенсивными. С 2001 г. наши исследования по ряду причин перешли в стадию эпизодических. За период наблюдений 1995–2000 гг. было обнаружено 15 объектов [2] с хорошо определенными орбитами и столько же, для которых слишком короткая дуга наблюдений не позволила получить сколько-нибудь надежную орбиту. Поскольку данные объекты не наблюдались в последующие ночи, говорить об их принадлежности к

исследуемым метеороидным потокам можно только с определенной долей вероятности.

Приведем статистику наших наблюдений. Всего обнаружено объектов с орбитами, близкими к номинальным орбитам четырех метеороидных потоков: альфа-Каприкорниды — 8 объектов; Комиды или Кома Береницыды — 2 объекта; Персеиды — 5 объектов; Леониды — 2 объекта. Нужно отметить, что обнаружения в метеорных потоках Персеиды и Леониды происходили в периоды их максимальной активности. Для Персеид это были 1995–1996 гг., для Леонид — 1998 г. (период метеорного шторма, в который регистрировалось необычно большое число болидов).

2.2. Результаты других наблюдателей

Основываясь на наших идеях и проработках, Мичели и Толен [4] в 2010–2013 гг. осуществили попытку обнаружения тел метрового и дециметрового размеров в отобранных ими метеороидных потоках. В качестве объектов наблюдения выбраны:

- метеороидный поток астероидного происхождения, порождающий метеорный поток Геминиды (GEM),
- метеороидный поток кометного происхождения, не привязанный ни к одной из действующих комет, порождающий метеорный поток Квадрантиды (QUA),
- метеороидный поток, для которого уже было найдено значительное количество родственных астероидов, порождающий комплекс метеорных потоков Тауриды (STA и NTA — южные и северные Тауриды),
- метеороидный поток предположительно астероидного происхождения, породивший два метеорита и метеорный поток апрельские Кома Береницыды (ACO).

Наблюдения проводились на телескопе PS1 и 3.6 м Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) на Мауна Кеа. В табл. 2 приведены результаты наблюдений, которые дали в целом отрицательный результат (предпоследний столбец).

Таблица 2. Результаты поиска метеороидов метрового размера в 2010–2013 гг.

Stream	Year	Tel.	Nights	L.M.	CP	Int.	Other	NEO	Met	Follow-up
STA	2010	CFHT 3		21.9	0	8	606	0	0	CFHT (partial)
STA	2012	PS1 1		21.4	2	2	—	0	2	UH 2.2 m + Others
STA	2012	CFHT 1		22.6	0	2	121	0	0	CFHT
GEM	2010	CFHT 1		22.2	0	1	132	0	0	Spacewatch
QUA	2011	CFHT 1		22.0	0	0	0	0	0	—
NTA	2012	CFHT 1		22.6	0	2	145	0	0	CFHT
ACO	2011	CFHT 1		21.8	0	3	87	0	0	FTN (partial)
ACO	2013	PS1 1		21.6	4	1	—	0	0	Other (partial)

Примечание: CP — вновь обнаруженные объекты, попавшие в Confirmation Page; Int — вновь обнаруженные объекты, не попавшие в CP из-за каких-то причин (ненадежные измерения); Other — известные и неинтересные объекты; NEO — объекты, подтвержденные как объекты, сближающиеся с Землей; Met — искомые метеороиды; Follow-up — инструменты, на которых выполнялись наблюдения подхвата.

3. Поиск метеорных потоков, у которых есть ассоциации с астероидами

Пожалуй, самые многочисленные публикации по малым телам, сближающимся с орбитой Земли, посвящены поиску возможных родственных связей между ними, метеорными и болидными потоками. Мы насчитали не менее сотни астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), которым приписывается связь с тем или иным метеорным потоком. Самые многочисленные ассоциации [5] выявлены с комплексом Таурид, в который входят несколько метеорных потоков и несколько десятков астероидов. Среди других метеорных потоков с такими связями упомянем Геминиды, пси-Дракониды, ноябрьские Дракониды, майские йота-Дракониды, дневные каппа-Аквариды, северные хи-Ориониды, Ариетиды, дельта-Аквариды северные омега-Скорпиониды, тета-Акуилиды (болидный поток), альфа и дельта Каприкорниды, Скорпиониды, Либриды, Писцыды и др. Среди астероидов, которые ассоциируются с теми или иными метеорными потоками есть тела, имеющие метровые размеры. Например, три астероида 1993 КА2, 1995 FF, 1991 ВА идентифицированы Бабаджановым и др. [6] с комплексом Таурид имеют $H = 29.0, 26.5$ и 28.5 , соответственно. Еще ряд метеор-

ных потоков имеют подтвержденную близость орбит с астероидами с размерами менее 100 м.

Нас интересовали ассоциации потоков с астероидами декаметрового размера. Воспользовавшись сервисом Minor Planet Center (MPC) мы произвели выборку всех АСЗ, зарегистрированных на дату 10 мая 2018 г. с абсолютными звездными величинами от 25.3 и выше. Их оказалось 3530. Затем для этих АСЗ мы произвели поиск объектов по критерию близости орбит Саутворда-Хоккинса $DSH < 0.2$ для всех метеорных потоков и получили следующие результаты, которые являются значимыми по конкретным потокам, перечисленным по убыванию числа ассоциированных астероидов:

Камелопардалиды — 104 объекта с H от 29.9 до 25.3. Минимальное значение D-критерия 0.7. Активность 14 марта – 7 апреля. Максимум не определен.

Дельта Ариетиды — 84 объекта с H от 31.8 до 25.4. Минимальное значение D-критерия 0.07. Активность 8–14 декабря. Максимум не определен.

Корвиды — 45 объектов с H от 29.1 до 25.3. Минимальное значение D-критерия 0.05. Активность 25–30 июня с максимумом 26 июня.

Сигма Леониды — 42 объекта с H от 30.7 до 25.4. Минимальное значение D-критерия 0.06. Активность 21 марта – 13 мая, максимум 17 апреля.

Либриды — 31 объект с H от 29.0 до 25.3. Минимальное значение D-критерия 0.07. Активность 8-9 июня, максимум 8 июня.

Комиды — 23 объекта с H от 29.0 до 25.3. Минимальное значение D-критерия 0.05. Активность 12 декабря – 23 января, максимум не определен.

Каппа Акварида — 22 объекта с H от 29.5 до 25.3. Минимальное значение D-критерия 0.1. Активность 11–28 сентября, максимум 21 сентября.

Пегасиды — 12 объекта с H от 27.0 до 25.5. Минимальное значение D-критерия 0.16. Активность 29 октября – 12 ноября, максимум 12 ноября.

Альфа Каприкорниды — 10 объектов с H от 29.8 до 25.5. Минимальное значение D-критерия 0.05. Активность 15 июля – 10 августа, максимум 30 июля.

Фи Боотиды — 10 объектов с H от 28.9 до 25.5. Минимальное значение D-критерия 0.11. Активность 16 апреля – 12 мая, максимум 1 мая.

Андромедиды — 9 объектов с H от 26.4 до 25.4. Минимальное значение D-критерия 0.15. Активность 27 ноября, максимум 27 ноября.

Дельта Леониды — 8 объектов с H от 29.1 до 25.7. Минимальное значение D-критерия 0.08. Активность 5 февраля – 19 марта, максимум 17 апреля.

Ежегодные Андромедиды — 7 объектов с H от 26.8 до 25.4. Минимальное значение D-критерия 0.07. Активность 25 сентября – 12 ноября, максимум 3 октября.

Хи Скорпиониды — 7 объектов с H от 29.6 до 25.6. Минимальное значение D-критерия 0.14. Активность 27 мая – 19 июня, максимум 7 июня.

Мю Виргиниды — 3 объекта с H от 27.7 до 25.4. Минимальное значение D-критерия 0.17. Активность 1 апреля – 12 мая, максимум 25 апреля.

Южные Писцыды — 3 объекта с H от 26.8 до 25.4. Минимальное значение D-критерия 0.09. Активность 31 августа – 2 ноября, максимум 20 сентября.

Декабрьские Фоенициды — 3 объекта с H от 26.3 до 25.3. Минимальное значение D-критерия 0.17. Активность 5 декабря, максимум 5 декабря.

Тета Офиучиды — 2 объекта с H от 27.6 до 25.8. Минимальное значение D-критерия 0.14. Активность 8–16 июня, максимум 13 июня.

Дневные Дзета Персеиды — 2 объекта с H от 29.0 до 26.3. Минимальное значение D-критерия 0.18. Активность 1–17 января, максимум 7 июля.

Дельта Канкриды — 1 объект с H 29.6. Значение D-критерия 0.12. Активность 13–21 января, максимум 16 января.

Гамма Геркулиды — 1 объект с H 26.1. Значение D-критерия 0.19. Активность 19 мая – 14 июня, максимум 3 июня.

Южные Йота Аквариды — 1 объект с H 28.8. Значение D-критерия 0.14. Активность 15 июля – 25 августа, максимум 5 августа.

4. Выводы

Несмотря на многочисленные косвенные доказательства, пока не получено уверенных прямых наблюдений тел метрового и дециметрового размеров в метеороидных потоках. По-видимому, с учетом новых данных постановку наблюдательной задачи нужно уточнить. Например, можно выбрать в качестве новых кандидатов на поиск те метеороидные потоки, для которых найдено максимальное число ассоциированных небольших астероидов. Очевидно, будет полезным исследовать статистическими методами самые многочисленные ассоциации для уточнения регионов поиска.

По-видимому, метеороидные потоки Персеиды и Леониды можно исключить из рассмотрения, так как в них после периодов высокой активности не было обнаружено ни одного объекта и не найдено ассоциаций с астероидами. Конечно, наши наблюдательные возможности не так хороши, как у наших коллег в Европе и США, однако при некоторой модернизации наших телескопов их производительность для описанной наблюдательной задачи может вырасти пропорционально увеличению поля зрения. При этом использование малых телескопов, кластеров малых телескопов с большими полями зрения, наряду с немногочисленными крупными может значительно увеличить эффективность решения данной наблюдательной задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. P. Jenniskens, *A&A*, **287**, 990, 1994.
2. S. I. Barabanov and M. A. Smirnov, *Sol. Syst. Res.*, **39**, 231, 2005.
3. S. I. Barabanov, G. T. Bolgova, A. M. Mikisha, and M. A. Smirnov, *Astron. Lett.*, **22**, 847, 1996.
4. M. Micheli and D. J. Tholen, *Icarus*, **253**, 142, 2015.
5. D. J. Asher, S. V. M. Clube, and D. I. Steel, *MNRAS*, **264**, 93, 1993.
6. P. B. Babadzhanov, I. P. Williams, and G. I. Kokhirova, *MNRAS*, **386**, 1436, 2008.

Телевизионные наблюдения метеоров в Институте астрономии РАН

Карташова А.П., Болгова Г.Т.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Информацию о метеороидах (космических телах размером от 10 микрон до 1 метра) мы получаем, в основном, из наблюдений метеорных явлений и по метеоритам. Для изучения свойств малоразмерных малых тел Солнечной системы и их взаимодействия с атмосферой Земли, а также для оценки рисков для функционирования космических миссий от таких тел сотрудниками Института астрономии РАН (ИНАСАН) был организован мониторинг метеорных событий с помощью широкоугольных установок.

Television meteor observations at the Institute of Astronomy of the RAS

Kartashova A.P., Bolgova G.T.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We mostly obtain information about meteoroids (space bodies with sizes from 10 micron to 1 meter) from observations of meteor phenomena and meteorites. To study the properties of small bodies of the Solar system and their interaction with Earth's atmosphere, as well as to assess the risks for the space mission work from such bodies, the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences (INASAN) organized monitoring of meteors using wide-field systems.

1. Введение

Метеорные исследования позволяют ответить на актуальные вопросы о происхождении и эволюции малых тел в околоземном пространстве и являются важнейшей возможностью изучения с Земли малых тел Солнечной системы в диапазоне размеров частиц от нескольких метров до микрона. Изучение распределения метеорного вещества в пространстве дает важную информацию для исследования эволюции Солнечной системы, а также для прогноза метеорной опасности при проведении космических экспериментов. Для изучения спорадического фона (который вносит большую часть притока метеорного вещества) и метеорных потоков (в том числе для выявления новых) необходимы данные наблюдений с различных географических пунктов. Институт астрономии РАН (ИНАСАН) проводит мониторинг метеорных событий с помощью телевизионной широкоугольной аппаратуры.

Таблица 1. Расположение пунктов, где проводятся метеорные наблюдения ИНАСАН.

Пункты наблюдений	Координаты пунктов		
	Долгота (°)	Широта (°)	Высота (м)
ЗО ИНАСАН	36.7584	55.6993	194
НП «Истра»	36.8329	55.8682	207
ГФО «Михнево»	37.7630	54.9616	191

Непрерывные метеорные телевизионные наблюдения на территории России дополняют данные, собираемые в других странах, и позволяют оценить приток метеорного вещества, его источники и его временную и географическую неравномерность. Результаты наших наблюдений могут использоваться для построения (и обновления) моделей распределения метеорного вещества в околоземном пространстве.

2. Метеорные наблюдения ИНАСАН

Первые телевизионные метеорные наблюдения, с использованием метеорных установок PatrolCa были начаты в 2006 г. Вначале наблюдения проводились в ручном режиме, запись велась на видеоленту. Процесс был трудоемким и малоэффективным, так как огромный наблюдательный материал приходилось обрабатывать вручную. Появление современных программных продуктов позволило автоматизировать процесс регистрации метеоров в режиме реального времени, и наши наблюдения были продолжены на новом уровне. Начиная с 2011 г., метеорные камеры были установлены на двух пунктах: на Звенигородской обсерватории Института астрономии Российской академии наук (ЗО ИНАСАН) и на пункте «Истра», расстояние между которыми 20 км. Первые наблюдения (2011 г.) были проведены в период действия сильного метеорного потока Персеид. С 2012 г. метеорные наблюдения ведутся в режиме постоянного мониторинга. В 2014 г. Институтом астрономии РАН (ИНАСАН) и Институтом динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) были организованы многосторонние (в том числе и комбинированные (оптические и акустические) наблюдения с трех пунктов: ЗО ИНАСАН, пункта «Истра» и геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН (ГФО «Михнево»). Они были продолжены в августе 2016 г. ГФО «Михнево» расположено на расстоянии 103 км от ЗО ИНАСАН и в 116 км от пункта «Истра». В табл. 1 указаны местоположения пунктов наблюдения.

Камера, установленная на ЗО ИНАСАН, направлена в зенит; камера на пункте «Истра» является камерой «базисной поддержки» и направлена таким образом, чтобы ее поле зрения перекрывало поле зрения первой камеры (на ЗО ИНАСАН) на высоте метеорных событий (в нашем случае поля зрения перекрываются на 90% на высоте 100 км). Камера, установленная на ГФО «Михнево», также является камерой поддержки первой камеры.

Все камеры адаптированы к российскому климату: они помещены в специальный кожух со встроенным подогревом для всепогодного использования и имеют электромеханическое управление защитной крышкой. Работа камер автоматизирована, управление камерой происходит автоматически с помощью программы «Meteor», разработанной сотрудником ИНАСАН С.В. Крючковым.

Метеорные установки, используемые в ИНАСАН для метеорных наблюдений, состоят из телевизионной камеры Watec LCL-902HS и объектива Computar 6/0.8. Поле зрения данной системы составляет $50^\circ \times 40^\circ$, а ее проникающая сила по звездам $+5.5^m$.

Во время наблюдений метеоры автоматически регистрируются, и данные сохраняются в компьютере с помощью широко используемой метеорными наблюдателями программы UFOCapture [1].

Для всех зарегистрированных метеоров, с помощью программы UFOAnalyzer, вычисляются: экваториальные координаты (α , δ) начала и конца метеорного трека, звездная величина метеора, его угловая скорость, длина и определяется условная принадлежность к одному из известных метеорных потоков.

За период наблюдений с 2012 по 2017 гг. было зафиксировано более 8000 метеоров. Часть метеоров была отождествлена с одним из известных потоков (на сегодняшний день официально Метеорным центром данных подтверждено 112 метеорных потоков). Распределение количества метеоров, зарегистрированных на ЗО ИНАСАН в период 2012–2017 гг., показано на рис. 1, в пункте «Истра» — на рис. 2. Метеоры, для которых не была определена принадлежность ни к одному из потоков, считаются спорадическими (на рис. 1–2 они показаны штриховой колонкой).

В 2014 г. были проведены комбинированные (акустические и оптические) метеорные наблюдения. В результате на камере, установленной на ГФО «Михнево», за период с августа по ноябрь 2014 г. было зафиксировано 464 метеора (299 из них были отождествлены с потоками, большая часть, 110 метеоров, принадлежало к потоку Персеид).

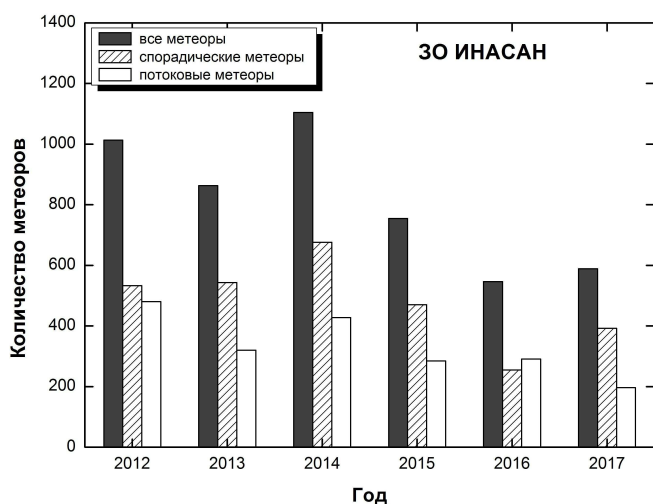


Рис. 1. Количество метеоров, зафиксированных на ЗО ИНАСАН в 2012–2017 гг.

В результате базисных наблюдений (одновременные наблюдения одного метеора с двух и более пунктов) в период с 2012 по 2017 гг. было получено 830 базисных метеоров. Для них были определены индивидуальные параметры (радиант, скорость, высоты загорания и потухания, абсолютная звездная величина, орбита). По этим данным были проведены исследования метеорного потока Персеиды и получены его индивидуальные характеристики, оценен его вклад в приток метеорного вещества на Землю [2].

3. Заключение

Проводимый в Институте астрономии РАН мониторинг метеорных событий телевизионным методом позволяет получать наблюдательный материал для решения различных задач метеорной астрономии. Многолетние непрерывные наблюдения, проводимые в ИНАСАН, уже позволили получить оценки притока метеорного вещества из отдельных потоков, и выявить вклад слабых потоков в их величину [3]. Дальнейшие наблюдения повысят достоверность полученных результатов.

Получаемые нами наблюдательные данные сопоставимы с данными наблюдений в Европе и Америке и позволяют при кооперативном

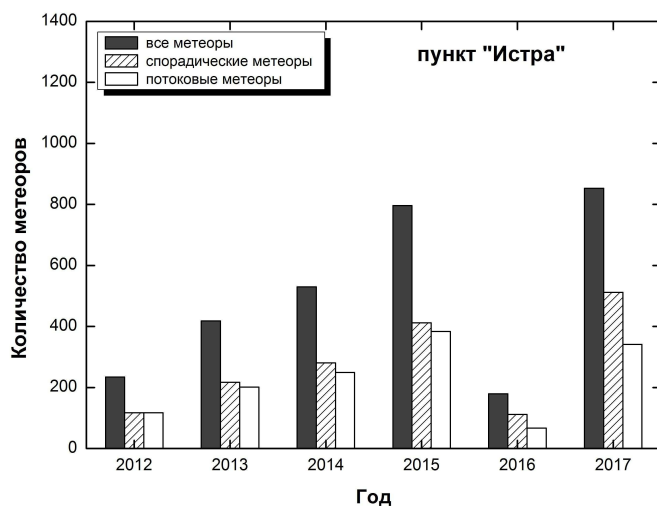


Рис. 2. Количество метеоров, зафиксированных в пункте «Истра» в 2012–2017 гг.

подходе оценить временную и географическую неравномерность притока метеорного вещества. Наши наблюдения позволяют проводить оценки распределений метеорных частиц в околоземном пространстве, что является необходимым для исследования рисков для космических аппаратов.

Одновременно с оптическими наблюдениями начаты акустические метеорные наблюдения с нескольких пунктов (ЗО ИНАСАН, ГФО «Михнево» и ИДГ РАН) [4]. Накопленные данные позволят рассмотреть вопрос о генерации акустических возмущений метеорами (оценить характер источника, определить связь между параметрами метеороида и характеристиками акустического сигнала), сопоставить полученные зависимости с существующими оценками и теориями.

Астрономическая обсерватория Рязанского государственного университета (АО РГУ), где установлена одна из метеорных камер, расположена примерно в 130 км от Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН. Такое расстояние между пунктами позволяет проводить базисные наблюдения. Поэтому в летний период времени (когда работает камера в РГУ) проводятся одновременные наблюдения с АО

РГУ и пунктом «Сажнево» [5], таким образом, образуя локальную метеорную сеть.

Авторы выражают благодарности сотрудникам ИНАСАН А.В. Багрову, С.В. Крючкову и В.А. Мазурову за активное участие в организации и проведении наблюдений.

Список литературы

1. SonotaCo, *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **37**, 55, 2009.
2. А. П. Карташова и Г. Т. Болгова, *P&SS*, **118**, 120, 2015.
3. А. П. Карташова и Г. Т. Болгова, *Sol. Syst. Res.*, **47**, 213, 2013.
4. А. Карташова, Г. Болгова, Y. Rybnov, O. Popova, and D. Glazachev, in A. Roggemans and P. Roggemans, eds., *International Meteor Conference Egmond, the Netherlands, 2–5 June 2016*, 120–122 (2016).
5. А. Муртазов, А. Ефимов, and П. Титов, in M. Gyssens and P. Roggemans, eds., *Proceedings of the International Meteor Conference, 31st IMC, La Palma, Canary Islands, Spain, 2012*, 192–195 (2013).

Фотометрический каталог для обработки метеорных наблюдений

Леонов В.А., Багров А.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассмотрены проблемы фотометрической калибровки наблюдений, выполненных с оптоэлектронными светоприемниками в «белом свете». Показано, что выходной сигнал от исследуемого источника может быть прокалиброван по звездам, зарегистрированным непосредственно в измеряемом кадре. Поскольку яркости звезд обычно приводятся для стандартных фотометрических систем, они не могут быть использованы при калибровке снимков в белом свете, и необходимо использовать специальный каталог яркостей звезд для всей полосы чувствительности приемника. В статье описана процедура составления таких каталогов и приведен пример каталога, составленного для распространенной ПЗС-матрицы ICX-429ALL. Проведенная проверка результатов измерений энергетической яркости получаемых изображений показала приемлемую точность.

Photometric catalogue for processing of meteor observations

Leonov V.A., Bagrov A.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The problems of photometric calibration of observations made with optoelectronic light detectors in “whitelight” are considered. It is shown that the output signal from the source under investigation can be calibrated for the stars recorded directly in the measured frame. Since the brightness of the stars is usually given for standard photometric systems, they cannot be used in the calibration of images in white light. It is necessary to use a special catalogue of the brightness of the stars for the entire sensitivity band of the receiver. The article describes the procedure for compiling such directories and gives an example of a catalogue compiled for the common ICX-429ALL CCD matrix. The performed verification of the results of measurements of the energy brightness of the obtained images showed an acceptable accuracy.

1. Введение

Главная особенность метеорных наблюдений, отличающая их от обычных астрономических наблюдений, состоит в их кратковременности. Средняя длительность метеорного явления составляет 0.7 сек [1]. Поэтому наблюдения с накоплением светового сигнала, позволяющие та-

ким образом повысить проникающую силу инструмента, например, при наблюдениях звезд и галактик, не могут привести к увеличению сигнала от метеора. Кроме того, метеор быстро перемещается по небу, а его изображение — по светоприемнику, в результате чего эффективная экспозиция метеора в элементе разрешения сильно снижается [2].

Еще одна особенность метеорных наблюдений связана с чрезвычайно малыми световыми потоками, производимыми метеорами. Поэтому для наблюдения предельно слабых метеоров их регистрация проводится без светофильтров, которые пропускают только часть проходящего через них света [3, 4].

Обе эти особенности метеорных наблюдений приводят к тому, что в получаемом изображении метеорного трека сигнал от метеора нельзя сравнивать с сигналом от фоновой звезды для оценки его яркости.

2. Особенности фотометрии в метеорной астрономии

Большинство наблюдателей-любителей метеоров детально анализирует только координатную информацию из своих регистраций, реже проводят оценки относительной яркости метеоров. Отсутствие интереса к проблемам количественной фотометрии метеоров связано со сложностями в их интерпретации — определении физических свойств метеорных частиц, характере их взаимодействия с атмосферой и в калибровке яркостей. Однако если имеется возможность измерить высвеченный метеором световой поток, то при некоторых предположениях о его доле в кинетической энергии метеорной частицы можно получить оценки ее массы [5].

Известно, что в наблюдательной астрофизике, изучающей самосветящиеся объекты с распределением энергии в спектре, близком к чернотельному, общепринятым является использование стандартных фотометрических полос [6, 7]. Фотометрическая система Джонсона-Моргана достаточно полно перекрывает весь видимый диапазон электромагнитных волн, на который приходится подавляющее большинство излучаемой звездами энергии. В метеорном излучении преобладают эмиссионные линии разных химических элементов, входящих в состав метеорных частиц и атмосферы. Это создает определенные трудности фотометрических калибровок метеоров по звездным фотометрическим стандартам. Поскольку абсолютные фотометрические измерения являются чрезвычайно трудоемкими, они выполнены толь-

ко для нескольких сотен ярких звезд, и только их можно использовать в качестве внеатмосферных фотометрических стандартов.

Стандартные спектральные полосы, в которых проводятся фотоэлектрические фотометрические наблюдения звезд, исторически были определены произвольным образом [7], но они стали общепринятыми. Эти «стандартные» полосы позволяют уверенно характеризовать излучение звезд с помощью показателей цвета, то есть разностей яркостей звезд, измеренных в разных полосах [8]. Поскольку все изучаемые астрофизикой объекты по характеру излучения близки к черному телу, то по измеренным в полосах В, V, R яркостям звезды можно вычислить полную величину светового потока от этой звезды с помощью редукиций [8].

В отношении яркостей метеоров приемы звездной фотометрии применимы только с большими оговорками. Для количественного анализа метеорных явлений необходимо измерение того светового потока, который дошел от метеора до регистрирующей камеры. Но он регистрируется не в стандартных полосах, а в некотором диапазоне спектра, индивидуальном для каждой камеры, которая будет формировать индивидуальный выходной сигнал на свет от одной и той же звезды в зависимости от ее кривой чувствительности. Для калибровки выходных сигналов необходимо знать энергетический поток от калибровочной звезды и сигнал от калибровочной звезды на конкретном приемнике. Иными словами, для каждого светоприемника, работающего не в стандартной фотометрической полосе, требуется использование специального фотометрического каталога.

Исследователи метеоров для своих целей применяют различные телевизионные камеры, подавляющее большинство из которых было разработано для охранных систем, а для улучшения их характеристик при слабом освещении для этих камер выпускались «сверхсветосильные» объективы (F/0.8). Для наблюдений в широких полях зрения многие исследователи используют черно-белые ПЗС-приемники LCL-902 компании Watec Co., Ltd. и их модификации [9]. Выбор ПЗС-камеры этой серии обусловлен тем, что в ней используется матрица типа ICX-249AL (аналог ICX-429ALL) размером 1/2" нового поколения EXVIEW фирмы SONY, имеющая повышенную чувствительность по сравнению с продукцией других производителей.

Эта камера на протяжении многих лет является бесспорным лидером в классе высокочувствительных камер, что в совокупности со светосильными объективами на кадровой частоте 25 Гц (в полях зрения до 50°) обеспечивает проникающую силу до +6.5^m по звездам

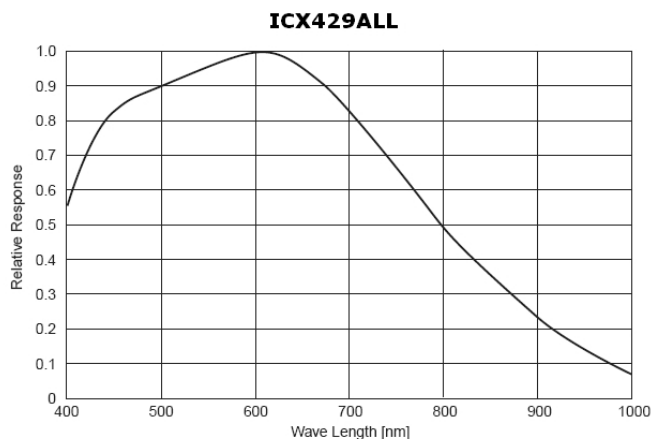


Рис. 1. Кривая чувствительности ПЗС-приемника с матрицей ICX-429ALL.

и около $+4.5^m$ по метеорам. Спектральная чувствительность ПЗС-приемника ICX-429ALL [10] на границах видимого диапазона падает настолько (рис. 1), что вклад энергетических потоков с другими длинами волн в регистрируемый сигнал пренебрежимо мал, и для калибровки выходного сигнала достаточно учесть только энергию излучения звезды в полосе чувствительности матрицы.

3. Каталог фотометрических стандартов для наблюдений в «белом свете»

Несмотря на наличие разных каталогов, содержащих данные о светимости звезд в виде абсолютных энергетических величин [8], не все они могут быть использованы для построения метеорного спектрофотометрического каталога. Во-первых, исходный звездный каталог должен содержать данные о светимости звезд не в графическом (например, «спектрофотометрические градиенты»), а в табличном виде. Во-вторых, некоторые метеорные камеры, например, FAVOR, обладают достаточно высокой чувствительностью и способны регистрировать метеоры яркостью до $+10^m$, а звезды — до $+11^m$. Это означает, что при большом времени накопления кадр будет содержать более ста изображений звезд ярче $+10^m$. Следовательно, исходный каталог должен содержать как можно большее количество звезд.

При подготовке фотометрического каталога стандартов для метеорных наблюдений в качестве исходного каталога был выбран Алма-Атинский спектрофотометрический каталог [11], в котором приведены внеатмосферные монохроматические освещенности в энергетических единицах для 1159 звезд в полосах шириной 50 Å на интервале 3225–7575 Å. Средняя точность приведенных яркостей 3.5%.

Вклад излучения звезды в измеряемый светоприемником сигнал для каждой полосы можно определить умножением входного светового потока на чувствительность приемника в этой полосе. Тогда суммарный выходной сигнал во всей полосе чувствительности будет пропорционален вызвавшему его световому потоку от звезды. Поэтому при составлении фотометрического каталога для калибровки наблюдений с приемником ICX-429ALL для каждой звезды учитывались яркости во всех полосах (в интервале 3100–7600 Å), соответствующих известным значениям чувствительности ПЗС-приемника. Далее были исключены звезды малых яркостей (слабее +4^m.0) и звезды с отрицательными склонениями; проведена выборка по незаходящими для широты Москвы звездам (около 56° с.ш.); произведен учет квантовой эффективности приемника в каждой субполосе (для данного типа камер в максимуме величина около 70%); осуществлено суммирование энергетических распределений по всем диапазонам энергий для каждой звезды; произведен пересчет видимых звездных величин с учетом квантовой эффективности приемника и распределения энергий в полосах диапазона его чувствительности.

В результате был получен специальный фотометрический каталог, включающий 218 звезд северного полушария без заметной переменности, которые гарантированно попадают в поле зрения метеорных камер на широте Москвы. Фрагмент этого каталога, который планируется разместить для открытого доступа на сайте ИНАСАН, представлен на рис. 2. В нем приведены имена звезд, их координаты, номера в каталогах HR, HD, отдельно звездные величины в полосе V и в полосе чувствительности приемника, а также спектральные классы. Кроме того, приведены значения световых потоков в энергетических единицах в диапазоне чувствительности ПЗС-приемника ICX-429ALL.

Для практического тестирования составленного каталога были измерены энергетические яркости звезд посредством взаимного сравнения сигналов от них в серии кадров, которые позволяют судить о точности измерений яркости в каждом кадре. В проверке были использованы записи патрульной метеорной камеры MobilCa (ПЗС-

III202/catalog.dat Energy distribution (W/(m ² m)) (1147 records)																
Energy flux for wavelengths 3225 Å to 7575 Å, step 50 Å, expressed in 10 ⁻⁹ erg/(cm ² s)																
№	RA			DE			Star Name		№III202	№HR	№HD	m	m _{Watec}	Sp	E	№
	h	m	s	d	m	s	Letter	Const								
1	0	8	22.7	29	5	34	α	And	3	15	358	2.06	1.95	B8IVp	446769	1
2	0	9	07.2	59	9	8	β	Cas	5	21	432	2.27	2.35	F2III-IV	307626	2
3	0	13	14.1	15	11	1	γ	Peg	7	39	886	2.83	2.55	B2IV	253234	3
4	0	36	58.1	53	49	49	ζ	Cas	22	153	3360	3.66	3.43	B2IV	113329	4
5	0	39	19.1	30	51	44	δ	And	25	165	3627	3.27	3.55	K3III	101032	5
6	0	40	30.1	56	32	16	α	Cas	26	168	3712	2.23	2.48	K0IIIa	276238	6
7	0	46	59.1	57	49	24	η	Cas	33	219	4614	3.44	3.55	G0V+dM0	102603	7
8	0	56	42.3	60	43	0	γ	Cas	42	264	5394	2.47	1.98	B0IVe	432113	8
9	0	56	44.5	38	29	56	μ	And	45	269	5448	3.87	3.93	A5V	72685	9
10	1	9	43.1	35	37	20	β	And	61	337	6860	2.06	2.23	M0IIIa	346825	10
11	1	25	46.9	60	14	10	δ	Cas	73	403	8538	2.68	2.70	A5III-IV	221810	11
12	2	31	38.9	89	15	52	α	Umi	74	424	8890	2.02	2.15	F7-IV-II	370668	12

Рис. 2. Фрагмент фотометрического каталога для метеорных камер типа WATEC LCL-902.

матрица SONY ICX-429ALL) в ясную ночь 13.08.14 г. Среднее число звезд в каждом кадре не превышало 20, из них были отобраны 12 наиболее ярких. На каждом кадре с помощью программы Meteors Magnitude 2.0 [12] вычислялась яркость тестируемой звезды по набору калибровочных звезд. По полученным результатам можно сделать вывод, что ошибки измерений у звезд средней яркости не превышают 0^m.2, т.е. точность фотометрических измерений вполне удовлетворительна для ПЗС-фотометрии метеоров.

4. Заключение

Разработан подход к проведению фотометрической обработки астрономических снимков, полученных в «белом свете» и содержащих изображения калибровочных звезд. Для измерения световых потоков от метеоров составлен каталог яркостей калибровочных звезд в энергетических единицах, позволяющий получать заатмосферные яркости наблюдаемых метеорных явлений при наблюдениях с использованием популярных камер серии WATEC LCL-902. Результаты исследования могут быть применены для фотометрической обработки наблюдений различных астрономических объектов, регистрируемых с малыми экспозициями. Яркости измеряемых световых потоков в кадрах определяется с точностью, характерной для фотометрии с ПЗС-матрицами.

Список литературы

1. A. V. Bagrov and V. A. Leonov, *Sol. Syst. Res.*, **44**, 327, 2010.
2. A. V. Bagrov and V. A. Leonov, *Ecological Bull. of Res. Centers of the Black Sea Econ. Coop.*, **2**, 26, 2013, in Russian.
3. S. Molau, M. Nitschke, M. de Lignie, R. L. Hawkes, and J. Rendtel, *WGN, Journal of the IMO*, **25**, 15, 1997.
4. R. Lunsford, *Meteors and How to Observe Them* (2009).
5. P. Pecina and P. Koten, *A&A*, **499**, 313, 2009.
6. G. Walker, *Astronomical Observations* (1990).
7. H. L. Johnson and W. W. Morgan, *ApJ*, **117**, 313, 1953.
8. A. V. Mironov, *Pretsizionnaia Fotometriia [Precision Photometry]* (1997), in Russian.
9. Watec Co., Ltd. Official Website of the Manufacturer. URL: <https://www.wateccameras.com/>.
10. Astronomical Web Site / ICX-429ALL Relative Response. URL: <http://www.hristopavlov.net/Articles/img/ICX429ALL.png/>.
11. A. V. Kharitonov, V. M. Tereshchenko, and L. N. Knyazeva, *The Spectrophotometric Catalogue of Stars. Book of Reference* (1988).
12. A. V. Bagrov, M. A. Bondarenko, and V. A. Leonov, *Ecological Bull. of Res. Centers of the Black Sea Econ. Coop.*, **2**, 21, 2013, in Russian.

Яркий болид над Чехией и его метеорные потоки

Терентьева А.К., Барабанов С.И.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Найден метеороидный поток β -Каприкорнид, порождающий в основном болиды, который связан с болидом над Чехией 27 июля 1996 г., хотя Спурни и Боровичка (1997) предположили, что этот болид принадлежит к метеороидному рою α -Каприкорнид. Приводятся данные по наблюдениям в ИНАСАН крупных тел метрового и декаметрового размеров в рою α -Каприкорнид. Масса наибольшего фрагмента диаметром 22 м составляет около одной тысячи тонн. Встреча Земли с подобными массивными телами может быть небезопасной при определенных условиях космического движения этих тел.

Bright fireball over Czech Republic and its meteor showers

Terentjeva A.K., Barabanov S.I.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We report a new meteoroid stream β -Capricornids which is related to a fireball over Czech Republic in July 27, 1996. The stream is responsible for number of fireballs. It differs from a paper by Spurny and Borovicka (1997) who suggested that the fireball belongs to the α -Capricornid meteoroid stream. Data of INASAN observations for large bodies of meter and decameter size in the α -Capricornid stream are presented. Mass of the largest fragment with a diameter of 22 meter is about one thousand ton. Rendezvous of the Earth and such massive bodies may be hazardous under certain condition of space motion of these bodies.

1. Введение

27 июля 1996 г. в $0^{\text{h}}16^{\text{m}}02^{\text{s}} \pm 7^{\text{s}}$ УТ четырьмя чешскими станциями Европейской болидной сети был сфотографирован яркий болид с абсолютной звездной величиной -14^{m} [1]. Светящаяся траектория болида протяженностью в 49.1 км наблюдалась в течение 1.69 секунд. Болид закончил свое существование на большой высоте 69.38 км. Болид принадлежал к типу ШВ, для которого характерна очень большая конечная высота, высокий коэффициент абляции и малая плотность метеороидного тела порядка 0.2 г/см^3 . Тела группы ШВ являются представителями наиболее рыхлого кометного материала. Как отме-

Таблица 1. Наблюдаемые параметры болида и его метеороидных роев.

Объект	Дата	Геоцентрический радиант		V_∞ (V_g) км/сек	Источники
		α	δ		
Болид	1996 VII 27	304.63	-11.61	29.27 (27.16)	[1]
α -Capds	VII 15-VIII 10	307	-10	(22.8)	[3]
β -Capds	VII 7-23	302	-16	25.1	№39 [2]

Таблица 2. Орбитальные элементы болида и его метеороидных роев.

Объект	a , а.е.	e ,	q , а.е.	ω	Ω	i	π
Болид	6.49	0.9182	0.5310	269°.82	124°.2953	7°.16	34°.12
α -Capds	2.53	0.77	0.59	269	127	7	36
β -Capds	1.726	0.708	0.491	284.5	112.2	3.9	36.7

Примечание: орбитальные элементы болида даны на эпоху 2000.0, элементы метеороидного роя α -Capds и болидного роя β -Capds — на эпоху 1950.0.

чается в вышеупомянутой работе, в основном все динамические данные этого болида были получены с очень хорошей точностью.

2. Результаты исследования

Рассмотрим вопрос о том, какое отношение данный болид имеет к метеорным потокам Каприкорнид, имея в виду, что Спурни и Боровичка [1] предположили, что болид, вероятно, принадлежит метеороидному рою α -Каприкорнид. С этой целью были проанализированы опубликованные каталоги метеороидных роев. В результате был найден метеороидный рой β -Каприкорнид, порождающий в основном болиды (№39 [2]). Параметры этих двух роев и болида приведены в табл. 1, а орбитальные элементы — в табл. 2. Оба роя имеют более короткий период обращения по орбите, чем метеороид, вызвавший обсуждаемый болид (рис. 1).

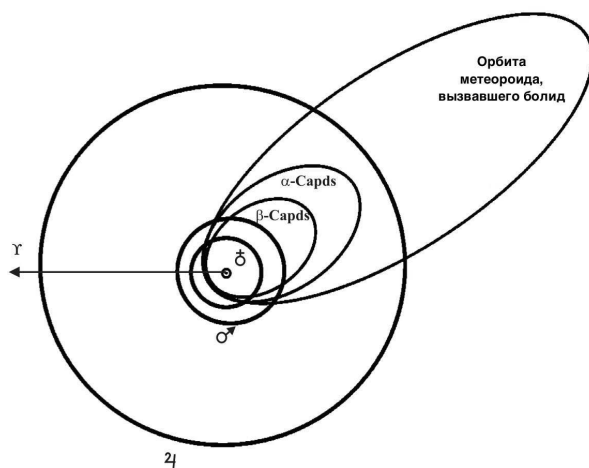


Рис. 1. Орбиты метеороидных роев Каприкорнид и тела, вызвавшего болид.

Вся система Каприкорнид имеет, по-видимому, сложную структуру, состоящую из отдельных подсистем и ветвей, отличающихся между собой или по периоду обращения, или по наклонению. Также выявлен метеороидный рой γ -Дельфинид (№103, [4], [5]), элементы орбиты которого прекрасно согласуются с орбитальными элементами болидного тела, но отличаются от него только большим наклонением орбиты $i = 40^\circ$. Может быть, γ -Дельфиниды можно рассматривать как отдельную ветвь в системе Каприкорнид. В связи с этим стоит напомнить, что в метеорной астрономии известно такое интересное явление, как «радианты-антиподы» и «потoki-антиподы» [6]. Взаимное удаление таких радиантов, расположенных симметрично относительно эклиптики, может достигать до 100° (!) и при этом все элементы соответствующих орбит идеально совпадают (кроме, естественно, ω и Ω , которые отличаются на 180°). Терентьева [7], детально исследуя метеороидный рой δ -Акварид, отметила, что одновременно с δ -Акваридами в смежной области действуют две группы радиантов: известные α -Каприкорниды, старый рой XIX в., и другая группа эклиптикальных Каприкорнид. Возможно, что последние имеют две ветви, аналогично δ -Акваридам, и α -Каприкорниды представляют собой «северную» ветвь. Поэтому исследователям, занимающимся изучением метеорных потоков δ -Акварид, ι -Акварид, α -Каприкорнид и смежных с ними по-

токов, необходимо помнить, что поле их радиантов очень сложное, так как в области эклиптики существует непрерывная последовательность малых потоков, целая связка орбит метеороидных тел короткого периода, последовательно сменяющих друг друга [8].

Рассмотрим вопрос о существовании тел метрового и декаметрового размеров в метеороидных роях. Используя статистику активности метеорных потоков и оценки функций распределения по звездной величине и массе, а также статистику регистрации болидов болидными сетями и другими методами регистрации, мы оценили [9] вероятность обнаружения тел метрового и декаметрового размеров в пятидесяти наиболее активных метеорных потоках, описанных Дженнискенсом в [10]. Оказалось, что наиболее перспективными для обнаружения тел размером более 1 м являются метеороидный рой α -Каприкорнид и болидный рой Комид. Эти рои по функциям распределения массы и звездной величины наиболее перспективны для обнаружения крупных тел. Кроме того, болидными сетями были обнаружены болиды, соответствующие телам с доатмосферными массами более 1 тонны и орбитами, достаточно близкими к номинальным орбитам этих роев.

Последовавшие за этими оценками поисковые наблюдения, проведенные в ИНАСАН с 1995 по 2002 гг. на 1-метровом телескопе в Симеизе, показали, что тела метрового и декаметрового размеров есть в метеороидном рое α -Каприкорнид. Причем, этот рой оказался наиболее обильным по обнаружению тел с орбитами, близкими к номинальной орбите роя. В табл. 3 приведены дата обнаружения, элементы орбиты, полученные модифицированным методом Лапласа и методом перебора геоцентрических расстояний ρ для определения наиболее вероятной орбиты [9], величины D-критерия Саутворта-Хокинса, а также вычисленные диаметры d обнаруженных тел. В качестве оценочной плотности вещества обнаруженных тел принималась плотность, соответствующая плотности метеороидов класса ПВ, к которому относятся тела, порождающие метеоры α -Каприкорнид. Эта плотность равна 0.2 г/см^3 — «рыхлый снег». Для вычисления размеров тел на основании определения блеска и оценки расстояния принималось альbedo 0.1.

Оценки D-критерия имеют значения не более 0.2, поэтому все обнаруженные объекты вполне вероятно принадлежат одному метеороидному рою α -Каприкорнид. К сожалению, для всех этих объектов не были получены повторные наблюдения в последующие ночи, так как алгоритм вычисления орбиты по сверхкороткой дуге, на основании которой могли быть вычислены эфемериды, еще не был разработан.

Таблица 3. Размеры, элементы орбит и другие параметры крупных тел α -Каприкорнид.

Обозначение объекта	Дата в UT	ρ (км)	a (а.е.)	e	ω	Ω	i	D	d (м)
Сар1	1996 08 9.00489	589767	2.38	0.72	260° 7	137° 1	7° 6	0.1	1
Сар2	1997 08 1.84942	1017507	2.57	0.72	253.4	130.3	5.7	0.2	1
Сар5	1998 08 10.95641	17977360	2.69	0.70	238.4	150.2	3.7	0.2	22
Сар7	1999 08 5.97654	4385897	2.29	0.73	266.5	135.3	5.1	0.1	11.2
Сар8	1999 08 8.94598	10388941	2.46	0.73	259.6	141.4	4.8	0.12	13.3
Сар9	2000 08 6.95793	159112	2.57	0.77	266.8	135.6	5.4	0.09	2.5
Сар10	2000 08 8.89203	3869899	2.75	0.78	264.4	138.5	5.3	0.10	6.2

Простая интерполяция движения объектов по небу и последующий их поиск не позволили найти эти объекты в последующую ночь. К тому же, поисковые работы выполнялись на камере ST-6 и даже с изготовленными трансфокаторами, поле зрения не превышало 5'.

Связью роя α -Каприкорнид с кометой занимался ряд авторов. Рой связывали с различными кометами: 1881 V Деннинга, 1457 II Тосканелли, 1948 XII Хонда-Мркоса-Пайдусаковой. В результате достаточно подробного обсуждения этого вопроса представляется возможным, что слабая телескопическая комета 1948XII и метеороидный рой α -Каприкорнид были порождены кометой 1770 I Лексея, либо имели с ней общее происхождение[7]. Как бы то ни было, кометная природа роя α -Каприкорнид не подвергалась сомнению.

3. Выводы и заключение

Итак, болид над Чехией, вероятно, связан с телом, принадлежащим к системе метеороидных роев Каприкорнид, имеющих кометное происхождение. Таким образом, в данном случае мы имеем дело как бы с рыхлым кометным материалом. Как показали исследования [11], в 15 метеороидных роях (по-видимому кометного происхождения), проявляющихся в частых болидных явлениях, обнаружены тела с массами от 47 кг до 5 тонн. В рое α -Каприкорнид также наблюдался крупный фрагмент диаметром 22 м (табл. 3) и с массой около одной тысячи тонн. Встреча с такими массивными телами, конечно, не безопасна для Земли, и совсем не важно, какого они происхождения, кометного или какого-либо другого.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. P. Spurny and J. Borovicka, *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **25**, 94, 1997.
2. A. K. Terentjeva, in C.-I. Lagerkvist, H. Rickman, B. A. Lindblad, and M. Lindgren, eds., *Asteroids, Comets, Meteors III, Sweden*, 579 (1990).
3. A. F. Cook, *NASA Special Publication*, **319**, 183, 1973.
4. A. K. Terentjeva, *Astron. Circulyar AN SSSR*, **264**, 1, 1963.
5. A. K. Terentjeva, *Rezultaty issledovaniy po Mezdunar. Geofiz. Proyektam. Moskva. Issledonaniya meteorov*, **1**, 62, 1966.
6. A. Terentjeva, in J. Rendtel and R. Arlt, eds., *Proceedings of the International Meteor Conference, 10th IMC, Potsdam, Germany, 1991*, 60 (1992).
7. A. K. Terentjeva, *Bulleten komissii po kometam i meteoram Astrosoveta AN SSSR. Dushanbe*, **11**, 17, 1965.
8. I. S. Astapovich, *Izvestiya Akademii Nauk Turkmenskoi SSR*, **1**, 95, 1950.
9. S. I. Barabanov and M. A. Smirnov, *Sol. Syst. Res.*, **39**, 231, 2005.
10. P. Jenniskens, *A&A*, **287**, 990, 1994.
11. A. K. Terentjeva and S. I. Barabanov, *Ekologicheskii vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva. Kubanskiy universitet. Krasnodar*, **3**, 123, 2017.

Исследования метеорных потоков по наблюдениям в ИНАСАН. Метеорный поток Персеид

Карташова А.П., Болгова Г.Т.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Представлены результаты телевизионных наблюдений метеорного потока Персеид в период 2012–2017 гг. Для метеоров из данного потока были вычислены индивидуальные параметры (радиант, геоцентрическая скорость, высоты загорания и потухания, абсолютная звездная величина, орбитальные параметры). Для Персеид приведена оценка распределения по датам Индекса метеорной активности (ИМА).

Investigation of the meteor showers by INASAN observations. Perseids

Kartashova A.P., Bolgova G.T.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The results of television observations of the Perseid meteor shower in 2012–2017 are presented. The individual parameters (radiant, geocentric velocity, the height of beginning and ending, the absolute magnitude and orbital parameters) were calculated for this shower. The estimation of the distribution by dates of the index of meteor activity (IMA) for Perseid meteor shower is presented.

1. Введение

Результаты многолетних метеорных наблюдений показали нестабильность активности метеорных потоков. Иногда мощность потоков возрастает настолько, что мы наблюдаем «звездный ливень», когда часовое число метеоров превышает сотни и тысячи. С началом освоения космического пространства интерес к изучению метеоров резко повысился, поскольку метеороиды могут представлять реальную угрозу безопасности космических аппаратов. Поэтому для получения картины направлений и скоростей прихода на Землю метеорных частиц необходимы исследования метеоров в режиме мониторинга.

Метеорные наблюдения в ИНАСАН проводятся из нескольких пунктов с помощью широкоугольных установок в автоматическом режиме (см. статью Карташовой и Болговой «Телевизионные наблюдения метеоров в Институте астрономии РАН» в данном сборнике).

В результате наблюдений в период 2012–2017 гг. было зафиксировано более 8000 метеоров. Практически половина из этих метеоров была отождествлена с одним из известных потоков. Ввиду климатических особенностей в местах, где установлены камеры, основная часть метеоров была зарегистрирована в период наблюдений летних метеорных потоков (в основном, во время действия сильного метеорного потока Персеиды). Для всех базисных метеоров были вычислены индивидуальные параметры (радиант, геоцентрическая скорость, высоты загорания и потухания, абсолютная звездная величина, орбитальные параметры).

С помощью многолетних базисных метеорных наблюдений можно получить картину направлений и скоростей прихода на Землю метеорных частиц, т.е. оценить характер метеорной обстановки в околоземном пространстве. Для базисных метеоров вычисляются их основные параметры (радиант, геоцентрическая скорость, высоты загорания и потухания, орбитальные параметры), а также приток метеорного вещества на Землю.

Одним из сильных метеорных потоков является метеорный поток Персеиды. Далее рассмотрим параметры, которые можно получить из базисных наблюдений, на примере этого потока.

2. Результаты наблюдений Персеид

Метеорный поток Персеиды действует ежегодно в период с 17 июля по 24 августа. Максимум активности данного потока приходится на 12 августа.

2.1. Распределение метеоров по яркости

Распределение Персеид по яркости показано на рис. 1. Видно, что основное число метеоров из данного потока составляют яркие метеоры (до $+3^m$). Если взять для примера угол входа метеороида в атмосферу Земли, равный 45° , скорость входа Персеид 59 км/с и использовать формулу Верниани для расчета массы метеорной частицы [1], то метеорная частица из данного потока с абсолютной звездной величиной $+3^m$ будет иметь массу 2×10^{-3} г, а метеорной частице с абсолютной звездной величиной -4^m соответствует масса 1.4 г.

Персеиды считаются довольно стабильным потоком. На рис. 1 отражена различная (по годам) регистрация метеорных событий, связанная, в основном, с климатическими условиями во время действия потока.

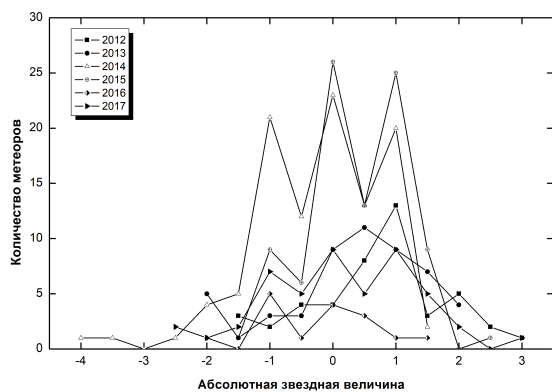


Рис. 1. Распределение Персеид по яркости по данным ИНАСАН за 2012–2017 гг.

Таблица 1. Средние значения радиантов (прямое восхождение и склонение) и геоцентрической скорости Персеид в максимуме активности, по данным 2012–2017 гг.

Год	$\lambda_{\odot} (^{\circ})$	$\alpha_R (^{\circ})$	$\delta_R (^{\circ})$	V_g (км/с)
2012	140.3 – 140.5	47.52	+58.13	59.14
2013	140.0 – 140.3	48.31	+58.05	63.4
2014	139.8 – 140.0	47.92	+57.87	59.0
2015	139.5 – 139.8	47.60	+57.22	58.63
2016	—	—	—	—
2017	140.0–140.3	49.38	+58.76	61.39

2.2. Определение радианта и геоцентрической скорости потока

В табл. 1 представлены средние значения радианта и геоцентрической скорости Персеид в период максимума активности 12–13 августа в 2012–2017 гг.

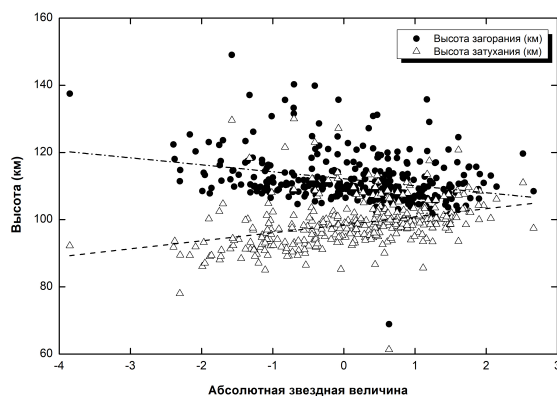


Рис. 2. Зависимость начальных (черные точки) и конечных (белые треугольники) высот метеоров из потока Персеиды от абсолютной звездной величины в 2012–2017 гг.

2.3. Определение высот загорания и затухания метеоров

По результатам базисных наблюдений 2012–2017 гг. были определены высоты (загорания и затухания) для Персеид. На рис. 2 показаны распределения начальных и конечных высот метеоров в зависимости от абсолютной звездной величины.

Такая зависимость характерна для метеорных потоков кометного происхождения. Предполагается, что абляция вещества метеорных тел в таких потоках начинается еще до момента обнаружения метеора [2].

2.4. Определение параметров орбит метеоров

В результате обработки наблюдений было получено 360 индивидуальных орбит Персеид за 2012–2017 гг. В табл. 2 представлены средние значения параметров полученных орбит Персеид и родительского тела — кометы 109P/Swift-Tuttle.

2.5. Вычисление Индекса метеорной активности

Для оценки притока метеорного вещества на Землю для потока Персеиды был вычислен Индекс метеорной активности (ИМА) (количество

Таблица 2. Средние значения орбитальных параметров Персеид 2012–2017 гг.

Год	a(a.e.)	q (a.e.)	e	$\omega(^{\circ})$	$\Omega(^{\circ})$	$i(^{\circ})$
2012	37.17	0.927	0.972	153.82	140.41	115.73
2013	24.04	0.949	0.972	150.95	140.21	113.68
2014	9.99	0.945	0.944	149.63	139.93	113.14
2015	8.19	0.942	0.943	155.24	139.68	113.65
2016	9.03	0.952	0.979	150.65	139.40	113.70
2017	21.99	0.941	0.952	150.74	140.14	113.39
109P/ Swift-Tuttle	26.47	0.958	0.963	—	139.61	113.41

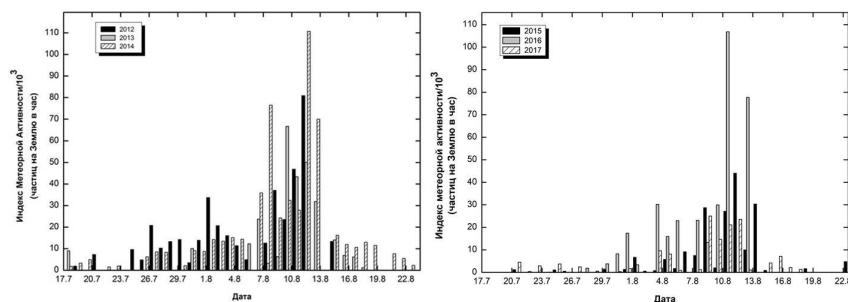


Рис. 3. Индекс метеорной активности Персеид в 2012–2014 гг. (слева) и в 2015–2017 (справа) по данным ИНАСАН.

частиц, приходящих на Землю в час) [3, 4]. На рис. 3 (слева) показано распределение ИМА Персеид по датам в период 2012–2014 гг., на рис. 3 (справа) — за период 2015–2017 гг.

На рис. 3 мы видим, как изменялся характер активности потока Персеид. В 2016 г. ожидался всплеск активности Персеид. К сожалению, климатические условия не позволили нам пронаблюдать Персеиды в их максимуме (12 августа). Но, как видно на рис. 3 (справа), наблюдалась повышенная активность потока в ночь до (11 августа) и в ночь после (13 августа) максимума, по сравнению с предыдущими годами и 2017 г. Всплеск активности Персеид в 2016 г. был подтвержден и другими наблюдателями [5, 6, 7].

3. Заключение

В Институте астрономии РАН проводятся телевизионные метеорные наблюдения в режиме мониторинга пока в основном из двух пунктов. В результате, за последние несколько лет (2012–2017 гг.) было получено несколько тысяч метеорных регистраций на нескольких станциях. В частности, были получены детальные характеристики метеорного потока Персеид в 2012–2017 гг. Подобно исследованию данного потока был проведен анализ еще нескольких метеорных потоков (Каприкорнид, Геминид и др.), эти данные будут представлены позже.

Дальнейший мониторинг метеорных событий поможет не только продолжить исследования свойства известных метеорных потоков, выявлять и изучать новые потоки, но и совершенствовать методы (модели) взаимодействия частиц с атмосферой, определения масс и других параметров метеороидов.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. А.В. Багрову за активное участие в наблюдениях.

Список литературы

1. F. Verniani, *JGR*, **78**, 8429, 1973.
2. P. Koten, J. Borovička, P. Spurný, H. Betlem, and S. Evans, *A&A*, **428**, 683, 2004.
3. A. V. Bagrov, V. A. Leonov, and E. S. Maslennikova, *Sol. Syst. Res.*, **41**, 498, 2007.
4. A. P. Kartashova, in *Proceedings of the International Meteor Conference, 29th IMC, Armagh, Northern Ireland, 2010*, 32–36 (2011).
5. P. Roggemans, *eMeteorNews*, **1**, 107, 2016.
6. J. M. Madiedo, *eMeteorNews*, **1**, 82, 2016.
7. K. Miskotte and M. Vandeputte, *eMeteorNews*, **2**, 61, 2017.

Астероиды и кометы

Проблема астероидно-кометной опасности: российские подходы

Шустов Б.М., Нароенков С.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В мире интенсивно развиваются исследования по проблеме астероидно-кометной опасности, имеющие как глубокий фундаментальный характер так и выраженный практический аспект. В статье выполнен «крупноблочный» сравнительный анализ общего состояния дел по проблеме в России и сформулированы предложения по активизации работ в этом важном направлении.

The NEO problem: Russian approaches

Shustov B.M., Naroenkov S.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Research on the problem of asteroid-comet hazard (NEO problem), which has both a deep fundamental character and a practical aspect, is intensively developing in the world. The article provides a “large-block” comparative analysis of the general state of art on the problem in Russia and proposals to intensify research in this important area .

1. Введение

В последние годы важность проблемы астероидно-кометной опасности (АКО), в иностранной литературе называемой NEO problem, где NEO означает «объекты, сближающиеся с Землей», стала общепризнанной и ей посвящено много научных публикаций (см., например, [1, 2, 3, 4, 5]) и специальных документов. Для решения проблемы в ряде стран приняты очень серьезные организационные шаги. Например, в США в NASA создано специальное подразделение по этой проблеме (Planetary Defense Coordination Office, PDCO), а в Европе в ESA ведется долгосрочная программа SSA (Space Situation Awareness), в рамках которой присутствует тематика АКО и создан специальный центр.

Кратко напомним суть проблемы. На Землю время от времени падают довольно крупные небесные тела (астероиды и кометы), способные принести серьезный ущерб на масштабах от локального до глобального. Еще недавно нижняя граница размеров опасного небесного

тела (ОНТ), была определена в 50 м (примерные размеры Тунгусского тела). Челябинское событие — вход 15 февраля 2013 г. в атмосферу Земли метеороида размером около 17 м [6] — сдвинуло нижнюю границу размера небесного тела для классификации его как опасного до ~ 10 м.

Особенность проблемы АКО состоит в том, что усредненный на большом интервале времени (тысячелетия и более) уровень угрозы невелик, так как падения крупных тел случаются редко. Но любое конкретное событие (столкновение) или даже значимый риск такого события становится важнейшим фактом для всего человечества. Так, вполне рядовое с астрономической точки зрения Челябинское событие привлекло всеобщее внимание.

По своей структуре проблема АКО — комплексная. Выделяют ее следующие основные составляющие [7]:

- 1) проблема обнаружения (выявления) опасных тел и определения их свойств;
- 2) проблема оценки риска;
- 3) проблема противодействия и уменьшения ущерба;
- 4) проблема организации эффективной кооперации.

Далее в этой работе мы кратко обсудим состояние исследований в России по тематике АКО по всем этим направлениям с выделением основных проблем и внесением рекомендаций.

2. Проблема обнаружения

Первоочередной задачей является решение проблемы обнаружения опасных небесных тел. В современной трактовке проблемы АКО задача обнаружения должна рассматриваться как задача оперативного и исчерпывающего (т.е. не ниже некоторого порога полноты, обычно 90%) выявления опасных тел. Последующие регулярные наблюдения (мониторинг, подхват, в англоязычной литературе используют термин *follow up*) как найденных в программах обнаружения, так и известных ранее опасных объектов должны обеспечить уточнение орбит и максимально полное исследование их физических свойств. Это дает возможность надежно оценить вероятность и последствия столкновения и дать необходимую информацию для того, чтобы заблаговременно принять соответствующие меры.

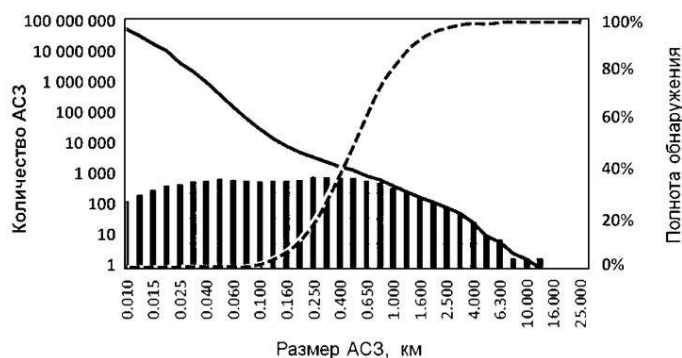


Рис. 1. Полнота обнаружения АСЗ (штриховая линия) и прогнозируемое распределение популяции АСЗ по размерам (сплошная линия). Темными столбцами показано количество известных АСЗ в интервале размеров.

Очевидно, что главными вопросами с практической точки зрения являются именно полнота и своевременность обнаружения опасных тел. Современное состояние аспекта полноты обнаружения проиллюстрировано на рис. 1, основа которого была любезно предоставлена R. Landis (NASA). На рис. 1 приведены сведения об известных астероидах, сближающихся с Землей (АСЗ). На основе данных из общедоступного банка данных наблюдений астероидов в Minor Planet Center (<http://www.minorplanetcenter.net/>) на начало 7 июня 2018 г. количество объектов, сближающихся с Землей, составило 18219 (из них 104 кометы и 18115 АСЗ). Каждый день открывается несколько новых АСЗ и темп открытий нарастает.

Пока полнота обнаружения, как видно из рис. 1, низка: около 10% для АСЗ размером 200 м и чрезвычайно мала для тел размером менее 50 м. Почему же мы так мало информированы? Главной проблемой является отсутствие достаточного количества специализированных средств наблюдений, и эффективной организации (кооперации) работ по обнаружению.

В России наблюдения с целью обнаружения опасных астероидов и комет проводятся, главным образом, по программам исследований в академических и ВУЗовских обсерваториях на инициативной основе. Наиболее регулярно такие наблюдения проводятся в КраО РАН, САО РАН, на части телескопов сети ISON (ИПМ РАН), телескопах сети МАСТЕР (МГУ им. М.В. Ломоносова) и т.д. Телескопы сети МА-



Рис. 2. Телескоп АЗТ-33ВМ и первые полученные на нем изображения астрономических объектов.

СТЕР, согласно статистике Minor Planet Center, поставляют наибольшее (и вполне солидное) количество наблюдений астероидов в этот международный центр. Однако, что касается открытий АСЗ, то подавляющая доля таких открытий ($> 98\%$) делается на обсерваториях США. К сожалению, российская доля открытий АСЗ не превышает 0.1% . В период 1968–1990 гг. в КраО АН СССР было открыто 13 АСЗ (при общем числе известных на 1990 г. АСЗ не более 200). С 1991 по 2008 г. не было открыто ни одного АСЗ. С 2009 по 2017 г. российские наблюдатели открыли 14 АСЗ.

Возможно, эта невеселая статистика скоро изменится. В 2016 г. в Институте солнечно-земной физики СО РАН введен в строй современный телескоп АЗТ-33ВМ. Его параметры лишь немного уступают параметрам знаменитых обзорных телескопов Pan-STARRS. АЗТ-33ВМ имеет относительное отверстие 1:3.5. При поле зрения около 2.8° (280 мм) и диаметре главного зеркала 1.6 м этот телескоп будет способен обнаруживать объекты 23-й звездной величины за минутную экспозицию. Общий вид телескопа и первые полученные на нем изображения астрономических объектов показаны на рис. 2, любезно предоставленном М. Еселевичем (ИСЗФ СО РАН). Пока что телескоп работает лишь в ограниченном режиме, поскольку большая фокальная камера не завершена из-за недостаточного финансирования. Здесь очевидно требуется поддержка «сверху».

Такая поддержка нужна и для реализации систем космического базирования, предложенных российскими учеными и техническими экспертами. Одна из таких систем (Система обнаружения дневных астероидов, СОДА) описана в статье Шугарова и др. в этом сборнике.

3. Проблема оценки рисков

Напомним, что риск — это конкретная количественная оценка, определяемая как сочетание (произведение) вероятности реализации некоторой угрозы (столкновения) и тяжести последствий такой реализации. Эта количественная оценка лежит в основе механизма принятия решения. Если риск неприемлем (превышает некоторый пороговое значение), принимается решение, направленное на реализацию мер по уменьшению риска. Что касается проблемы АКО, то за оценку вероятности столкновения «отвечают» астрономы, за расчет последствий — специалисты по физике атмосферных входов крупных тел, физике взрывов, геофизики и специалисты МЧС, поскольку они имеют наиболее полную информацию о населенности места падения, наличии там опасных производств, инфраструктуры с высокой стоимостью и т.д.

Падение крупного космического объекта на Землю приводит к возникновению целого ряда опасных эффектов (см., например, [8]), масштаб которых в первую очередь определяется кинетической энергией тела, углом наклона траектории к поверхности, характеристиками места удара. Несмотря на доступность различного рода калькуляторов последствий, точный расчет последствий столкновения довольно сложен.

В качестве примера рассмотрим интересную работу российских коллег. В статье [9] приведены результаты численного моделирования полета через атмосферу и удара о поверхность Земли каменного астероида диаметром 300 м с кинетической энергией порядка 1000 Мт, что примерно соответствует параметрам астероида Апофис. Моделирование проводилось путем решения трехмерных уравнений гидродинамики и уравнений переноса излучения в приближениях лучистой теплопроводности и объемного высвечивания. В качестве опасных факторов рассматривались воздушная ударная волна, выбросы из кратера, тепловое излучение и ионосферные возмущения. Поскольку основные характеристики объекта (размер, масса, скорость входа в атмосферу) были фиксированы, главным параметром являлся угол входа в атмосферу: 90° (вертикальный удар), 45 и 30 градусов.

На рис. 3 показано распределение максимального избыточного давления при ударе астероида диаметром 300 м под разными углами к поверхности Земли. Нормирующее значение давления P_0 взято равным 100 кПа. Напомним, что при перепаде давления ~ 4 кПа разрушается остекление, при ~ 20 кПа падают кирпичные стены. Из рисунка видно, что при уменьшении угла наклона траектории от 90° до 30° размер зоны избыточного давления увеличивается весь-

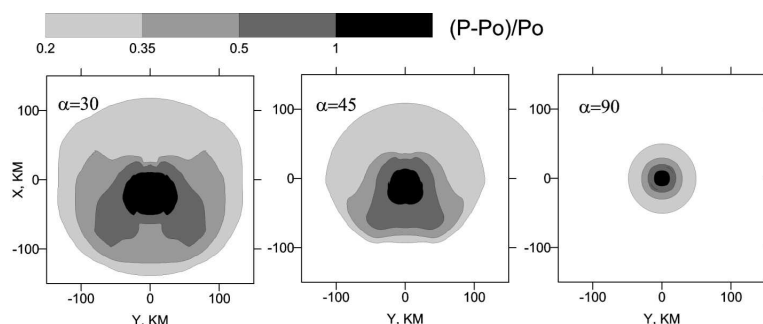


Рис. 3. Распределение максимального избыточного давления на поверхности Земли при входах астероида диаметром 300 м в атмосферу Земли под разными углами к поверхности. В случае косоугольного удара астероид движется сверху (из области $Y > 0$) вниз и в точке $X = 0, Y = 0$ он касается поверхности.

ма существенно. Этот пример иллюстрирует, как важно при расчетах варьировать параметры.

Специалисты Института динамики геосфер РАН и Института астрономии РАН предложили создать Всемирный банк данных последствий столкновений. Не только предложили, но и работают над реализацией этой идеи. Идея очень проста. Поскольку последствия столкновения сильно зависят от большого числа параметров, требуется много процессорного времени на самых мощных суперкомпьютерах для расчета последствий с достаточной точностью. Но можно заранее просчитать варианты столкновений и их последствия для всех наиболее «чувствительных» регионов на Земле (например, отмеченных в [10]) в «период затишья» до следующего серьезного столкновения. Это ускорит и облегчит процесс принятия решений в случае реальной опасности. Инициатива была выдвинута на совещании группы ООН по проблеме АКО в Вене в феврале 2012 г. и представлена более подробно в [11]. Банк данных может быть аналогичен тем, которые были разработаны в связи с цунами и климатическими опасностями в некоторых развитых странах.

4. Проблема противодействия

Разработка методов и средств активного противодействия падению космических тел на Землю ведется в нескольких российских центрах. Выбор метода существенным образом зависит от размеров опасного тела и времени упреждения (времени, остающегося до столкновения).

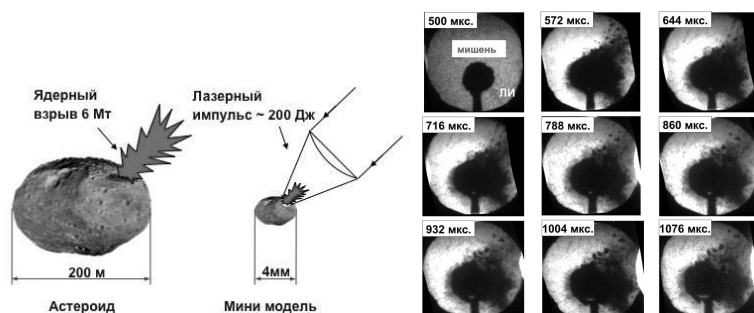


Рис. 4. Слева — схема эксперимента. Справа — регистрограмма процесса разрушения макета астероида. Отсчет времени ведется от момента воздействия лазерного импульса (ЛИ) на макет астероида.

Методы можно разделить на две группы: уничтожение (дисперсия) угрожающего тела или отклонение (увод) его с угрожающей орбиты.

До недавнего времени проблема противодействия опасным телам исследовалась в нашей стране, в основном, «на бумаге» и с помощью компьютерных моделей. Однако совсем недавно опубликованы весьма интересные результаты работы по лабораторной отработке методов противодействия. В [12] приведены результаты предварительных экспериментов на лазерных установках, в которых на основе принципа физического подобия моделируются процессы разрушения каменных астероидов (хондритов) в космосе с помощью ядерных взрывов на поверхности астероидов. Приведены результаты сравнительных газодинамических расчетов модельного ядерного взрыва на поверхности крупного астероида и результатов воздействия импульса лазерного излучения (энергия импульса до 500 Дж) на миниатюрный имитатор астероида (размер 4–10 мм). Подтверждено подобие ключевых процессов в натурном и модельном случаях. Полученные результаты подтверждают возможность экспериментального определения в лазерных экспериментах критериев разрушения ядерным взрывом астероидов различных типов. На рис. 4 показаны схема эксперимента и регистрограмма процесса разрушения макета астероида.

5. Проблема координации и кооперации

На международных конференциях по планетарной защите PDC-2013 и PDC-2015 российская делегация заявляла (см. [11]), что создание национальной (федеральной) программы по проблеме АКО представ-

ляется наиболее практичным путем к реальному международному сотрудничеству. Для проведения такой программы нужна системная поддержка государства. Хорошие примеры национальных программ приведены во Введении. Аргументы за национальную (федеральную) программу просты:

- проблема АКО является многозадачной. В ее решении должны участвовать различные организации. Нужна координация высокого уровня;
- возможности научно-исследовательских центров недостаточны для реализации и поддержки современных задач по обнаружению и мониторингу ОСЗ, предотвращения столкновений и смягчения последствий на системном уровне;
- сотрудничество стран по проблеме ОСЗ подразумевает участие Правительства России (или уполномоченного органа);
- необходимо регулярное финансирование, которое более гарантировано на федеральном уровне.

Основные элементы концепции долгосрочной программы по проблеме АКО, подготовлены Экспертной рабочей группой по космическим угрозам при Совете РАН по космосу уже давно (см. [7]). За последние несколько лет в государственных органах России появились новые представления о проблеме АКО. Так одной из основных целей специальной программы Роскосмоса «Дозор» является построение эффективной системы обнаружения опасных тел. Однако реализация программы пока не началась.

На международном уровне российские ученые в последнее время активизировали сотрудничество. Например, ИНАСАН, КрАО РАН, САО РАН, ИСЗФ СО РАН и Коуровская обсерватория УрФУ вступили в международную сеть предупреждения об опасных астероидах (IAWN). Результаты первого реального участия в программах IAWN представлены в работе Сергеева и др. в этом сборнике.

Список литературы

1. В. М. Shustov, A. S. Shugarov, S. A. Naroenkov, and M. E. Prokhorov, *Astron. Rep.*, **59**, 983, 2015.
2. В. М. Shustov, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **32**, 218, 2016.
3. M. Micheli, D. Koschny, G. Drolshagen, E. Perozzi, and B. Borgia, in S. R. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, and D. Farnocchia, eds., *Asteroids: New Observations, New Models, IAU Symposium*, volume 318, 274–281 (2016).

4. R. J. Weryk and R. J. Wainscoat, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #48, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 48, 405.03 (2016).
5. M. A. Barucci, D. Perna, M. Popescu, S. Fornasier, et al., *MNRAS*, **476**, 4481, 2018.
6. V. V. Emel'yanenko, O. P. Popova, N. N. Chugai, M. A. Shelyakov, et al., *Sol. Syst. Res.*, **47**, 240, 2013.
7. B. Shustov, L. Rykhlova, Y. Kuleshov, Y. Dubov, et al., *Sol. Syst. Res.*, **47**, 327, 2013.
8. I. Nemchinov, V. Shuvalov, and V. Svetsov, in V. V. Adushkin and I. V. Nemchinov, eds., *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*, 1 (2008).
9. V. Shuvalov, V. Svetsov, N. Arteméva, I. Trubetskaya, O. Popova, and D. Glazachev, *Sol. Syst. Res.*, **51**, 44, 2017.
10. C. Rumpf, L. H.G., and P. Atkinson, *Acta Astronaut.*, **123**, 165, 2016.
11. B. Shustov and Y. Makarov, *Proceedings of the 2013 IAA Planetary Defense Conference, electronic issue only*, 2013.
12. E. Y. Aristova, A. A. Aushev, V. K. Baranov, I. A. Belov, et al., *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **126**, 132, 2018.

Наблюдения астероида 2012 TC4 в Терскольской обсерватории в рамках международной кампании, организованной IAWN

Сергеев А.В.^{1,2}, Шустов Б.М.¹, Тарадий В.К.^{1,2},
Андреев М.В.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, Киев, Украина*

Институт астрономии РАН участвует в международной сети предупреждения об опасных астероидах IAWN. В работе представлены некоторые результаты наблюдений астероида 2012 TC4 на телескопе Zeiss-2000 Терскольской обсерватории в рамках организованной IAWN в 2017 международной кампании по наблюдениям этого астероида.

Observations of the asteroid 2012 TC4 at the Terskol Observatory in the framework of the international campaign organized by IAWN

Sergeev A.V.^{1,2}, Shustov B.M.¹, Taradii V.K.^{1,2}, Andreev M.V.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*International center for astronomical and medical-ecological research of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine*

Institute of Astronomy RAS is involved in the International Asteroid Warning Network (IAWN). The paper presents some results of observations of asteroid 2012 TC4, made with the telescope Zeiss-2000 at Terskol Observatory as a part of the international campaign for the observations of this asteroid, which was organized by the IAWN in 2017.

1. Введение: о сети IAWN

В течение последнего десятилетия научное сообщество пришло к пониманию того, что эффективное решение проблемы астероидно-кометной опасности для Земли возможно только в широкой международной кооперации. В связи с этим в конце 2013 г. под эгидой ООН была организована кооперация астрономических институтов и других организаций — Международная сеть предупреждения об опасных астероидах

(International Asteroid Warning Network, IAWN). Полную информацию об IAWN можно найти по адресу <http://iawn.net/index.shtml>.

IAWN включает организации из разных стран, занимающиеся обнаружением, отслеживанием и характеризацией объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ). ООН поручила IAWN разработать стратегию международного взаимодействия по данной проблеме с использованием четких коммуникационных планов и протоколов для оказания помощи правительствам в анализе последствий столкновения с астероидами и в планировании мер по смягчению последствий. В настоящее время в IAWN входят члены из Европы, Азии, Южной и Северной Америки. Сеть IAWN является открытой и строится на инициативных началах. Членами IAWN являются как крупные организации (NASA, ESA, CNSA, ESO и т.д.) так и обсерватории, работающие по этой тематике. ИНАСАН вступил в IAWN первым от России в 2016 г. В 2018 г. в IAWN вступили еще несколько обсерваторий: CAO РАН, КРАО РАН, ИСЗФ СО РАН, Коуровская обсерватория УрФУ.

Функции IAWN состоят в следующем:

- Обнаружение, мониторинг и выявление физических характеристик потенциально опасной популяции ОСЗ с использованием оптических и радиолокационных средств и других средств, базирующихся как в Северном, так и в Южном полушариях, а также в космосе;
- Обеспечение и поддержание международно признанной функции информационного центра для получения, подтверждения и обработки всех наблюдений ОСЗ;
- Работа в качестве глобального портала, выступающего в качестве международного Координационного центра для получения точной и достоверной информации о популяции ОСЗ;
- Координация кампаний по наблюдению за потенциально опасными объектами;
- Разработка критериев и пороговых значений для уведомления о возникающей угрозе;
- Разработка базы данных о потенциальных последствиях воздействия в зависимости от географии, геологии, распределения населения и других сопутствующих факторов;

- Оценка результатов анализа рисков и доведение их до сведения организаций, которые должны быть определены государствами-членами как ответственные за получение уведомления об угрозе воздействия.
- Оказание правительствам помощи в анализе последствий воздействия и планировании мер по смягчению последствий.

В 2017 г. в рамках IAWN был проведен наблюдательный эксперимент с научной целью повторного обнаружения и мониторинга потенциально опасного для Земли астероида 2012 TC4 и с целью проверки эффективности взаимодействия участников кампании (см. [1], а также информацию о кампании The 2012 TC4 Observing Campaign по адресу <http://2012tc4.astro.umd.edu>). На протяжении четырех месяцев астрономы из Германии, Израиля, Италии, Канады, Колумбии, Нидерландов, России, США, Украины, ЮАР и Японии наблюдали астероид с помощью наземных и космических телескопов в оптическом и в радио диапазонах для изучения его орбиты, формы, особенностей вращения и состава. Впервые задачами проекта являлись также тренинг и комплексная оценка взаимодействия интернациональных средств по предотвращению глобальных космических угроз в реальном времени и на реальном космическом объекте — астероиде 2012 TC4.

Этот околоземный объект группы Аполлонов с размерами по первичной оценке 9–30 м был переоткрыт 27 июля 2017 г. на телескопе VLT (Cerro Paranal, ESO), когда его блеск составлял около 26.8 звездной величины. Далее траекторные измерения и оценка физических характеристик потенциально опасного объекта выполнялись участниками кампании IAWN при интенсивном обмене информацией вплоть до максимального сближения астероида с Землей. Астероид 2012 TC4 пролетел 12 октября 2017 г. на расстоянии от Земли всего в 0.00033524 а.е.

Российско-украинская Терскольская обсерватория единственная из обсерваторий России и Украины участвовала в этом эксперименте.

2. Наблюдения астероида 2012 TC4 в Терскольской обсерватории

Астрономические наблюдения астероида 2012 TC4 были проведены в Обсерватории на пике Терскол (Приэльбрусье, Кабардино-Балкарская республика, РФ) на телескопе Zeiss-2000 астрономами России и Украины. Один из полученных кадров с изображением астероида показан



Рис. 1. Снимок астероида 2012 TC4, полученный на телескопе Zeiss-2000 8 октября 2017 г.

на рис. 1. Было получено более 300 позиционных и фотометрических измерений с погрешностями 0.3–0.4 угловой секунды и 0.3–0.5 звездной величины, соответственно. Наблюдения на телескопе Zeiss-2000 выполнялись в периоды с 20 по 25 сентября 2017 г. (блеск астероида 2012 TC4 был около 22.5 звездной величины) и 8 октября 2017 г. (астероид был ярче 19 звездной величины). Полученные данные оперативно обрабатывались и пересылались координаторам кампании.

Эти данные позволили осуществлять мониторинг движения и вариации блеска астероида. На рис. 2 показаны вариации блеска астероида 2012 TC4 по результатам наблюдений на телескопе Zeiss-2000, выполненных 08 октября 2017 г. Размах колебаний блеска указывает на вытянутую форму астероида. В работе [2] отношение осей эллипсоида с такими вариациями блеска оценено как $a/b > 2.3$. К сожалению, нам не удалось хорошо прописать кривую блеска с тем, чтобы точно определить период вращения астероида. Для этого нужны еще более точные наблюдения с высокой скважностью (малым интервалом между кадрами).

Следует отметить, что результаты измерений, полученные на телескопе Zeiss-2000, особенно в период 20–25 сентября, когда этот слабый объект был доступен для наблюдений всего лишь несколькими телескопами на Земле, имели принципиальное значение в проекте IAWN для построения траектории движения и вычисления критических па-

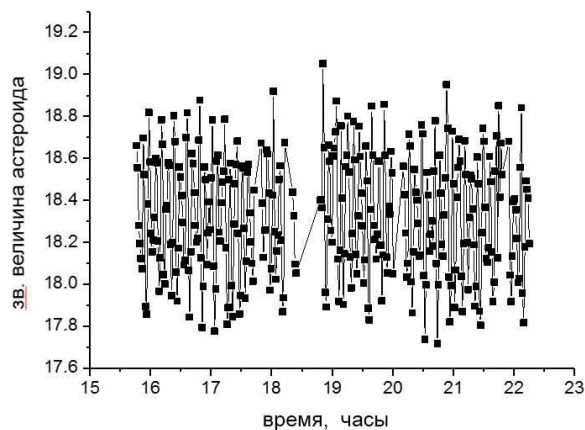


Рис. 2. Вариации блеска астероида 2012 TC4 08 октября 2017 г. по результатам наблюдений на телескопе Zeiss-2000.

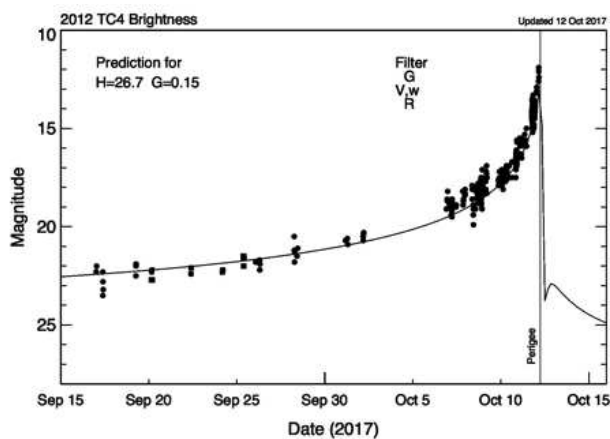


Рис. 3. Блеск астероида 2012 TC4 в сентябре-октябре 2017 г. Квадратиками отмечены данные наблюдений на телескопе Zeiss-2000. Данные ближе других ложатся на среднюю кривую блеска.

раметров сближения астероида 2012 TC4 с Землей. На кривой блеска астероида 2012 TC4, построенной по данным наблюдений в сентябре-октябре 2017 г. (рис. 3) оценки блеска, полученные в Терскольской

обсерватории, хорошо ложатся на среднюю кривую, построенную по данным всех наблюдателей.

Полученный в рамках кампании богатый наблюдательный материал позволил определить физические характеристики, измерить период вращения — 0.204 ч [2], точно рассчитать орбиту 2012 TC₄, а также показать, что возможность столкновения астероида 2012 TC₄ с Землей при последующих сближениях исключена (см. [3]).

3. Выводы

Успешная международная кампания по наблюдениям астероида 2012 TC₄ продемонстрировала готовность ученых разных стран к участию в международном сотрудничестве по предотвращению одной из существенных космических угроз — угрозы столкновения потенциально опасных объектов с Землей, и подтвердила эффективность Международной сети предупреждения об опасных астероидах.

Список литературы

1. V. Reddy, M. S. Kelley, and R. R. Landis, in *Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference*, 111 (2017).
2. W. Ryan and E. V. Ryan, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #49, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, volume 49, 204.06 (2017).
3. J. D. Dotson, L. F. Wheeler, D. L. Mathias, and D. Farnocchia, in *Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Science Conference*, volume 49, 2944 (2018).

Реверсии линии апсид в сближениях малых тел с планетами

Емельяненко Н.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследованы сближения малых тел с планетами с реверсиями линии апсид. Дано определение реверсии. Показано, что реверсии происходят в окрестностях точек пересечения орбит малого тела и планеты. В сильных высокоскоростных сближениях малое тело проходит эти точки на минимальном расстоянии от планеты. В низкоскоростных сближениях точки пересечения орбит близки к точкам низкоскоростного касания орбит. Поэтому реверсии происходят в сильных, тесных и в умеренных сближениях.

Reversion of the apsidal lines in the encounters of small bodies with the planets

Emel'yanenko N.Yu.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The encounters of small bodies with the planets with reversions of the apsidal line are investigated. The definition of the reversion is given. It is shown that the reversions occur in the vicinity of the intersection points of orbits. In strong high-velocity encounters, a small body passes these points at the minimum distance from the planet. In low-velocity encounters, the intersection points of orbits are located close to the points of low-velocity tangency of orbits. Therefore the reversions occur both in strong, and in close, and even in moderate encounters.

1. Низкоскоростные сближения малых тел с планетами

В последней четверти XX в. внимание исследователей привлекли низкоскоростные сближения короткопериодических комет с Юпитером [1, 2, 3]. Подобные сближения комет с Сатурном и астероидов с Землей были найдены в XXI в. [4, 5]. Низкоскоростные сближения испытывают малые тела с высоким значением постоянной Тиссерана относительно планеты T_p . В работе [6] определены предельные значения постоянной Тиссерана, при которых возможны низкоскоростные сближения малых тел, относительно всех планет:

$$T_p \leq T_p^{\text{lim}}. \quad (1)$$

В работе [7] предложены классификации сближений малых тел с планетами: по планетоцентрической скорости и минимальному расстоянию малого тела в области сближения; даны определения низкоскоростного и высокоскоростного сближений. Обосновано разделение сближений на сильные $\rho \leq 0.5 \cdot r_G^P$, тесные ($0.5 \cdot r_G^P < \rho \leq r_H^P$), умеренные ($r_H^P < \rho \leq 3 \cdot r_H^P$) и слабые ($3 \cdot r_H^P < \rho \leq 6r_H^P$), где r_G^P — радиус сферы тяготения, r_H^P — радиус сферы Хилла планеты.

Низкоскоростные сближения могут сопровождаться особенностями: реверсией линии апсид (@), временным спутниковым захватом (ВСЗ), временным гравитационным захватом (ВГЗ), геометрическими (ГКМ) и физическими (ФКМ) кратными минимумами функции планетоцентрического расстояния [8]. Малые тела с высоким значением постоянной Тиссерана принадлежат области ω_P — области орбит малых тел на плоскости (a, e) , у которых возможны низкоскоростные сближения с особенностями. Орбиты малых тел, у которых реверсии произошли в высокоскоростных сближениях, расположены чуть выше этой области (верхняя линия области ω_P соответствует условию $T_P = T_P^{\text{lim}}$).

2. Реверсии линии апсид

С реверсиями линии апсид в области сближения с Юпитером столкнулись уже первые исследователи эволюции орбит комет: Лексель — кометы, которая теперь носит его имя [9]; Дубяго — кометы Брукс 2 [10]; Каменский — кометы Вольф 1 [11]; Казимирчак-Полонская — многих комет семейства Юпитера, в том числе комет с низкоскоростными сближениями (Герельс 3, Отерма, Ашбрук-Джексон) [1]. Все известные к настоящему времени реверсии происходят у малых тел, у которых афелии (орбита A) или перигелии (орбита P) расположены в окрестностях орбиты планеты. В первом приближении реверсию линии апсид можно определить как отдельный $A \leftrightarrow P$ переход в ту или иную сторону.

3. Определение реверсии

Сближения с планетами, особенно низкоскоростные, характеризуются сложными и многообразными преобразованиями орбит. Каждая реверсия — это некоторый процесс, происходящий в пространстве и во времени. Пусть Q и q — афелийное и перигелийное расстояния малого тела. Пусть малое тело имеет A орбиту на промежутке времени, в течение которого выполнено неравенство $a < R_P$, и P орбиту на про-

межутке времени, в течение которого выполнено неравенство $a > R_P$, где R_P — радиус-вектор планеты на каждом шаге интегрирования. Считаем, что произошла реверсия линии апсид, если в области сближения существует такой момент времени T_{\oplus} , в который выполнено равенство

$$|Q - R_P| = |q - R_P| \Rightarrow a = R_P. \quad (2)$$

4. Реверсии линии апсид в сближениях с Юпитером

В наших исследованиях эволюций 97 наблюдаемых комет было детально обработано около двух тысяч сближений с Юпитером [12]. Из них 86 — сильных и 193 — тесных сближений. Было обнаружено 85 сближений с реверсией линии апсид: 78 реверсий имеют 36 комет в низкоскоростных сближениях и 7 реверсий происходят у 6 комет в высокоскоростных сближениях. В низкоскоростных сближениях реверсия наблюдается в сильных, тесных и умеренных сближениях; в высокоскоростных сближениях — только в сильных сближениях:

$$0.001 \leq \rho_1 \leq 0.630 \text{ а.е.}, \quad (3)$$

$$0.0015 \leq \rho_2 \leq 0.0830 \text{ а.е.} \quad (4)$$

Из приведенных данных следует важный вывод о том, что с одной стороны далеко не в каждом тесном и даже сильном сближении наблюдается реверсия линии апсид, с другой стороны явление имеет место в умеренных низкоскоростных сближениях.

Реверсии как $A \longleftrightarrow P$ переходы не наблюдаются в модельных сближениях (в модельных сближениях в момент времени $T_Q \cup T_q$ малое тело и планета находятся на одном радиус-векторе) [8]. В этих сближениях преобразования размеров и формы орбит близки к симметричным относительно глобального минимума, совпадающего с апсидальной точкой. Этот вывод согласуется с закономерностью, открытой Леверье еще в середине XIX в.: если во время тесного сближения Юпитер идет впереди кометы, он расширяет ее орбиту; если он идет позади кометы, его возмущающее действие сокращает орбиту [13].

В модельных сближениях Юпитер идет позади (впереди) кометы до апсидальной точки на орбите кометы и впереди (позади) кометы — после этой точки. Чем ближе точки минимума и афелия (перигелия), тем меньше возмущающее влияние Юпитера на элементы орбиты, характеризующие ее размеры и форму, за сближение. Поэтому реверсии линии апсид отсутствуют в сильных модельных как низкоскоростных, так и высокоскоростных сближениях многих комет: Брукс 1, Когоутек, Герельс 3, Ловел, Рассел 1, Чурюмов-Герасименко и других комет.

Большинство обнаруженных реверсий происходят тогда, когда комета и Юпитер приблизительно или точно расположены на одном радиус-векторе в окрестностях точек пересечения орбит малого тела и планеты. В сближениях с реверсией эти точки близки к точкам глобального минимума. Для сокращения описания преобразований орбит наблюдаемых малых тел в сближениях с реверсиями мы будем обозначать орбиты теми же буквами и индексами, что были использованы при описании модельных сближений [8], хотя в момент времени $T_Q \cup T_q$ малое тело и планета уже не находятся на одном радиус-векторе. Но точки X_i близки к точкам низкоскоростного касания M_i [8] для низкоэксцентрических орбит комет ($e \leq 0.4$) с орбитами из области ω_J . Кометы, орбиты которых не принадлежат области ω_J , большую часть из времени сближения провели на средне- и высокоэксцентрических орбитах ($e > 0.4$), на которых точки M_i расположены далеко от точек X_i или отсутствуют в области сближения. Высокая йовицентрическая скорость в окрестностях точек X_i приводит к тому, что в сближениях комет второй группы реверсии происходят на меньших йовицентрических расстояниях по сравнению с кометами первой группы. В процессе реверсии на орбите кометы обязательно появляется точка, в которой модули йовицентрических скоростей кометы и Юпитера равны, но в этот момент из-за близости к точке X и высокого эксцентриситета векторы йовицентрических скоростей не параллельны даже приблизительно. В известных к настоящему времени сближениях комет с Сатурном и астероидов с Землей также происходят реверсии линии апсид. Закономерности, установленные для реверсий линии апсид в сближениях комет с Юпитером, сохраняются.

5. Основные результаты

Как правило, в рассмотренных схемах реверсии на моменты времени начала и конца сближения сохраняется нижний индекс, указывающий номер модели. Это говорит об устойчивой взаимосвязи элементов, характеризующих размеры и форму орбит, в предложенных моделях. Осуществлению реверсии в окрестности точки X , близкой к точке M в низкоскоростном сближении, способствует установленный в работе [14] факт того, что на орбитах малых тел имеется одна и та же точка низкоскоростного касания для A и P орбит малого тела с одинаковыми элементами e , E .

В нескольких немодельных низкоскоростных сближениях с геометрическими кратными минимумами (ГКМ) реверсия происходит на больших планетоцентрических расстояниях r_P в окрестности точ-

ки f — максимума функции r_P , совпадающей с точкой M . В этом случае точка $O(a, e)$ орбиты кометы перемещается по плоскости (a, e) , испытывая реверсию в точке максимума f , совпадающей не только с точкой M , но и с моментом времени, когда орбита кометы практически тождественна орбите Юпитера.

В сближениях с временным спутниковым захватом в сфере Хилла (ВГЗ), сопровождающимся физическими кратными минимумами (ФКМ), имеют место множественные реверсии. Обычно первая реверсия происходит в окрестностях сильного минимума. Здесь же начинается ВГЗ. Последующие реверсии осуществляются в окрестностях точек f_i или $Q_i(q_i)$, близких к точкам низкоскоростного касания орбит M_i . Число реверсий в этих сближениях как правило не совпадает с числом минимумов функции планетоцентрического расстояния. Все реверсии в высокоскоростных немодельных сближениях происходят в окрестности точки X , практически совпадающей с точкой минимума функции планетоцентрического расстояния.

Итак, реверсии линии апсид происходят в немодельных сближениях малых тел в окрестностях точек пересечения орбит X_i . Эти точки присутствуют на орбитах малого тела из области ω_P или появляются в процессе реверсии. В низкоскоростных сближениях с кратными минимумами реверсии часто происходят на больших планетоцентрических расстояниях в окрестностях вторичных минимумов (максимумов) функции планетоцентрического расстояния или в нескольких апсидальных точках, но эти точки всегда близки к точкам низкоскоростного касания орбит M_i . В высокоскоростных сближениях реверсии происходят только в окрестности сильного минимума.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. E. Kazimirchak-Polonskya, *Astronomicheskii Zhurnal*, **44**, 439, 1967.
2. A. Carusi and G. B. Valsecchi, *Moon and Planets*, **22**, 133, 1980.
3. N. Y. Emel'yanenko, in *Sbornik nauchnykh trudov LGU*, 97–102 (1986).
4. N. Emel'yanenko and S. A. Naroenkov, *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo Ekonomicheskogo Sotrudnichestva*, **2**, 54, 2013.
5. N. Y. Emel'yanenko, in *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii "V Bredikhinskiye chteniya"*, 82–93 (2016).
6. N. Y. Emel'yanenko, *Sol. Syst. Res.*, **49**, 398, 2015.
7. N. Y. Emel'yanenko, *Sol. Syst. Res.*, **49**, 404, 2015.
8. N. Y. Emel'yanenko, *Sol. Syst. Res.*, **46**, 181, 2012.
9. A. I. Lexell, *Asta Acad. Sci. Petropol.*, **1**, 332, 1777.

10. A. D. Dubyago, *Uchenyye Zapiski Kazanskogo Universiteta*, **116**, 3, 1956.
11. M. Kamienski, *Acta Astronaut.*, **9**, 1959.
12. N. Y. Emel'yanenko, *Evolyutsiya elementov orbit korotkoperiodicheskikh komet* (2009).
13. U. J. Le Verrier, *Astron. Nachr.*, **26**, 1848.
14. N. Y. Emel'yanenko, *Sol. Syst. Res.*, **52**, 146, 2018.

Открытие, утеря и переоткрытие кометы 205P/1896 R2 Джакобини

Емельяненко Н.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Комета D/1896 R2 открыта в 1896 г., после чего была надолго утеряна. Вычисление орбиты и исследование динамической эволюции этой кометы показало, что действие планетных возмущений приводит к уменьшению неопределенности в положении кометы D/1896 R2 в ожидаемых прохождениях перигелиев в 2001 и 2008 гг. 10 сентября 2008 г. была открыта комета P/2008 R6, которая отождествлена с кометой D/1896 R2.

The discovery, loss and rediscovery of comet 205P/1896 R2 Giacobini

Emel'yanenko N.Yu.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Comet D/1896 R2 was discovered in 1896, after which it was permanently lost. The computation of the orbit and the study of the dynamic evolution of this comet showed that the effect of planetary perturbations leads to a decrease in the position uncertainty of Comet D/1896 R2 in the expected passages of perihelion in 2001 and 2008. On September 10, 2008, Comet P/2008 R6 was discovered and identified with Comet D/1896 R2.

1. Краткая история открытия и изучения кометы Джакобини

Комета D/1896 R2 (первоначально ей было присвоено обозначение D/1896 V) открыта 4 сентября 1896 г. Джакобини в Ницце. Она имела вид круглой маленькой туманности диаметром около 1' с блеском 12 – 13^m и центральным сгущением. 26–28 сентября наблюдатели в Ницце заметили в непосредственной близости к комете исключительно слабый спутник, который, однако, не отмечался другими астрономами. Первые параболические орбиты по трем наблюдениям были вычислены Кройтцем [1]. Он сам указывал на ненадежность полученных элементов и первым высказал предположение об эллиптической орбите кометы. Первую такую орбиту вычислили Перротин и Джакобини [2]. Последний раз комета наблюдалась 4 января 1897 г. В даль-

нейшем вычислении эллиптических элементов занимался Хасси [3]. В 1900 г. он получил орбиту с периодом $P = 6.52$ г. [4].

В 1903 г. необходимо было дать поисковую эфемериду. Этим занялся Эбелл [5]. Он получил систему элементов 1896 г. с периодом $P = 6.65$ г. и эфемериду для поиска кометы в 1903 г. по этой системе элементов. Возмущения от планет при экстраполяции не учитывались. Для появления кометы в 1909 г. поисковую эфемериду вычислил Джакобини. По найденной им в 1897 г. орбите с периодом $P = 6.86$ г. [6]. Джакобини [7] вычислил возмущения от Юпитера с шагом в 100 дней, получил систему элементов 1909 г. и эфемериды для трех предполагаемых моментов прохождения перигелия 9, 19, 29 декабря 1909 г. Никаких сообщений о поисках кометы в 1903 и 1909 гг. обнаружено не было.

О комете забыли на 20 лет. Но к моменту пятого предполагаемого возвращения кометы 1896 к Солнцу предпринимается еще одна попытка уточнения элементов орбиты с целью переоткрытия. На основе 50 наблюдений Криппс [8] получает лучшую на тот момент орбиту кометы. В своих вычислениях он учел возмущение от Юпитера с 1896 по 1929 гг. При экстраполяции наиболее точной из известных до Криппса орбит, орбиты Эбелла, на 1929 г. получается расхождение в моменте прохождения перигелия на 6 недель. Но и в 1929 г., несмотря на предпринятые поиски, комета не была найдена. Орбита Криппса вошла в каталоги Бальде [9], Портера [10], Марсдена [11]. Больше никаких сообщений о комете после 1929 г. и вплоть до 1974 г. найти не удалось.

2. Определение элементов орбиты кометы Джакобини 1896 V в 1974 г.

В работах [12, 13, 14] предпринимается попытка улучшить элементы орбиты, полученной Криппсом. Для улучшения используется 78 обработанных наблюдений, расположенных на дуге с 4 сентября 1896 г. по 5 января 1897 г. Первое выполненное на ЭВМ сравнение с наблюдениями с орбитой Криппса показало, что $O - C$ имеют очень большой разброс по величине и их распределение далеко от нормального. Часть наблюдений пришлось отбросить, а оставшиеся 50 наблюдений после ряда улучшений удалось достаточно хорошо представить системой элементов со среднеквадратической ошибкой $\sigma = \pm 2.35''$. По улучшенной системе элементов вычисляется поисковая эфемерида на 1975 г. Улучшенная орбита вошла в каталог Марсдена (Marsden, 1975) и во все последующие каталоги вплоть до 2008 г.

3. Эволюция орбиты кометы Джакобини за 200 лет (1800–2000 гг.)

В основу исследования эволюции кометы Джакобини была положена система элементов из каталога [11]. На интервале интегрирования комета испытала 8 сближений с Юпитером. Все сближения умеренные и слабые: $0.81 \leq \rho_J^{\min} \leq 1.66$ а.е., они приводят к небольшим прогрессивным изменениям элементов орбиты. Характерной особенностью эволюции орбиты кометы Джакобини является устойчивость элементов, описывающих размеры и форму орбиты, т. е. перигелийное расстояние и эксцентриситет. Линия апсид устойчива, линия узлов медленно вращается в прямом направлении. Наклон орбиты за 200 лет увеличился на 7° .

3.1. Сближения кометы Джакобини с Землей

Согласно полученной нами эволюции за 200 лет только 5 сближений кометы Джакобини с Землей были благоприятными для открытия. Это сближения 1817, 1883, 1916, 1929, 1962 гг. Расстояние между кометой и Землей в эти годы было меньше 0.6 а.е. Но в эти годы комета не наблюдалась. Ее открыли в 1896 г.: $\rho_E^{\min} = 1$ а.е. Посмотрим, как комета была утеряна. Для появления 1903 г. элементы и эфемериду вычислил Эбелл [5]. Эбелл не учитывал возмущения от планет, но ему удалось получить точную орбиту 1903 г. Достаточно сказать, что при определении момента прохождения перигелия Эбелл ошибся только на три дня. Неудача может быть объяснена двумя причинами: 1) комета очень слабая, в предыдущем появлении даже вблизи перигелия отмечалась диффузной туманностью 12^m ; а для появления 1903 г. между моментами прохождения перигелия и минимального расстояния от Земли прошло 123 дня. Комета не могла наблюдаться с Земли до перигелия, а спустя 4 месяца после сближения с Землей яркость ее значительно уменьшилась; 2) комету в этом появлении не искали, так как не удалось найти никаких сообщений о поиске кометы Джакобини в 1903 г.

В 1909 г. элементы и поисковую эфемериду вычислил Джакобини [7]. Он ошибся в определении момента прохождения перигелия на 43 дня. Это сближение с Землей было одно из самых неудачных $\rho_E^{\min} = 1.82$ а.е. Открыть комету было просто невозможно. Для очень хорошего сближения 1916 г. ($\rho_E^{\min} = 0.56$ а.е.) не были получены ни система элементов, ни поисковая эфемерида. В 1929 г. точные элементы и эфемериду вычислил Криппс [8]. Он учел возмущения от Юпите-

ра и, несмотря на сближение с Юпитером в 1921 г. ($\rho_J^{\min} = 1.16$ а.е.) получил точное значение момента прохождения перигелия. Сближение кометы Джакобини с Землей в 1929 г. было благоприятным: $\rho_E^{\min} = 0.58$ а.е., но поиски кометы оказались неудачными. Расположение в пространстве трех тел: кометы, Солнца и Земли, не дает возможности ответить на вопрос, почему комета не была открыта. Ее видимая яркость в 1929 г. была $12 - 13^m$. Последнее в XX в. благоприятное сближение кометы с Землей произошло в 1962 г.: $\rho_E^{\min} = 0.53$ а.е. Но элементы и эфемериды не вычислялись. После 1962 г. комета Джакобини в XX в. испытала еще четыре сближения с Землей, но все они по условиям наблюдения с Земли были неудачными.

3.2. Переоткрытие кометы D/1896 R2 (Джакобини)

Считается, что неопределенность в положении кометы с каждым оборотом увеличивается. Но в работе [15] на примере нескольких утерянных комет, наблюдавшихся в одном появлении, было показано, что дифференциальные планетные возмущения могут как увеличить, так и уменьшить ошибки эфемерид, вызываемых неточностью исходных систем элементов. Этот эффект способствовал переоткрытию в 1977 г. кометы Тейлора и, в меньшей степени, кометы Дютуа в 1974 г. Вычисления показали, что подобный эффект ожидается для кометы Джакобини в начале XXI в. (а именно, при прохождении перигелиев 2001 и 2008 гг.), спустя более столетия после утери кометы.

10 сентября 2008 г. в IAUC 8975 было опубликовано сообщение Накано [16] об открытии Koichi Itagaki и Hiroshi Kaneda новой короткопериодической кометы P/2008 R6. Комета наблюдалась другими астрономами из Японии, Италии, Испании. М. Мейер из Германии высказал предположение, что открытая комета идентична комете D/1896 R2 (Giacobini), которая не наблюдалась с января 1897 г. Накано (Nakano, 2005) опубликовал эфемериду D/1896 R2 на основе элементов орбиты [12] для ожидаемого прохождения перигелия в 2008 г. Итак, комета Джакобини не наблюдалась 112 лет и в 2008 г. семнадцатый раз после открытия приближалась к Солнцу и Земле. И она была переоткрыта в 2008 г. как P/2008 R6 (ошибка в моменте прохождения перигелия составила 0.3 дня) на основе системы элементов из каталога Марседена, вычисленных в далеком 1974 г. [12].

Список литературы

1. H. Kreutz, *Astron. Nachr.*, **141**, 301, 1896.
2. X. X. Perrotin and M. Giacobini, *Astron. Nachr.*, **141**, 1896.
3. W. Hussey, *Astron. Nachr.*, **142**, 109, 1897.
4. W. Hussey, *PASP*, **12**, 200, 1900.
5. M. Ebell, *Astron. Nachr.*, **161**, 139, 1903.
6. M. Giacobini, *Astron. Nachr.*, **182**, 333, 1897.
7. M. Giacobini, *Astron. Nachr.*, **182**, 333, 1909.
8. F. R. Cripps, *Journal of the Royal British Astronomical Association*, **39**, 261, 1929.
9. F. Baldet, *Catalogue general des orbites de Cometes* (1952).
10. J. G. Porter, *Catalogue of Cometary Orbits* (1961).
11. B. G. Marsden, *Catalogue of Cometary Orbits* (1975).
12. N. A. Belyaev, N. Y. Goryajnova, and V. V. Emel'yanenko, *IAU Circular*, **14**, 1975.
13. N. A. Belyaev, N. Y. Goryajnova, and V. V. Emel'yanenko, *IAU Circular*, **2780**, 1975.
14. N. Yu. Emel'yanenko, N. A. Belyaev, in *Trudy Kazanskoj gorodskoj astronomicheskoj observatorii*, volume 17, 122–131 (1978).
15. V. V. Emel'yanenko, N. Yu. Emel'yanenko, in *Sbornik nauchnykh trudov LGU*, 97–102 (1981).
16. S. Nakano, *IAU Circular*, **8975**, 2008.

Разложение возмущающей функции для кометных орбит во внутреннем варианте ограниченной задачи трех тел

Емельяненко В.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Движение комет происходит по орбитам с большими эксцентриситетами, что затрудняет применение классических аналитических методов к изучению их динамики. В частности, недавно обнаружены околосолнечные кометы, движущиеся по короткопериодическим орбитам с эксцентриситетами, близкими к единице. Для аналитического исследования динамики таких объектов в статье предложен метод разложения возмущающей функции в ограниченной задаче трех тел, основанный на промежуточной прямолинейной орбите. Получены формулы и рекуррентные соотношения для вычисления возмущающей функции во внутреннем варианте ограниченной задачи трех тел для орбит с эксцентриситетами, близкими к единице.

Expansion of the disturbing function for cometary orbits in the inner variant of the restricted three-body problem

Emel'yanenko V.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Comets move in orbits with large eccentricities. This makes it difficult to apply classical analytical methods in studies of cometary dynamics. In particular, near-Sun comets moving in short-period orbits with eccentricities close to unity were discovered recently. In this paper a method of the expansion of the disturbing function in the restricted three-body problem is proposed for an analytical study of the dynamics of such objects, based on the intermediate rectilinear orbit. Formulas and recursion relations are obtained for calculating the disturbing function in the inner variant of the restricted three-body problem for orbits with eccentricities close to unity.

1. Введение

Основу аналитического подхода к исследованию динамики малых тел Солнечной системы составляет разложение возмущающей функции в ограниченной задаче трех тел. Наиболее удобной формой представления возмущающей функции для аналитических и качественных исследований являются ряды Пуассона [1]. Классические методы получения рядов Пуассона разработаны для планетных орбит с малыми

значениями эксцентриситетов e и наклонов i . Для большинства комет их применение невозможно, поскольку кометные орбиты характеризуются эксцентриситетами, близкими к единице, и разнообразными значениями наклонов. В работе [2] было предложено разложение возмущающей функции по степеням величины $1 - e$ для почти параболических орбит с афелиями, удаленными от планетных орбит. Однако имеется значительное число комет на орбитах, расположенных внутри орбиты Юпитера (кометы семейства Юпитера). Для них основные возмущения сосредоточены в афелийной части орбиты. В частности, в последнее время открыто большое число короткопериодических околосолнечных комет, эксцентриситеты орбит которых близки к единице. В этом случае для разложение возмущающей функции полезно использовать промежуточную прямолинейную орбите.

2. Почти прямолинейное движение

Введем промежуточную орбиту с эксцентриситетом $0 \leq \bar{e} \leq 1$ и конечным значением большой полуоси a . В дальнейшем нас будет интересовать случай $\bar{e} = 1$. Но пока для общности рассмотрим произвольные \bar{e} , поскольку это не связано с усложнениями. Для эллиптической орбиты с эксцентриситетом e и теми же значениями большой полуоси и момента прохождения афелия, что и у промежуточной орбиты, можно записать

$$E - \bar{E} + \bar{e}(\sin E - \sin \bar{E}) = \epsilon \sin E, \quad (1)$$

где $\epsilon = \bar{e} - e$, а E и \bar{E} — эксцентрические аномалии данной орбиты и промежуточной орбиты, соответственно, отсчитываемые от афелия. Разлагая $\sin E$ в ряд по степеням $E - \bar{E}$ соотношение (1) можно преобразовать к виду

$$E - \bar{E} - \epsilon f(E, \bar{E}) = 0,$$

где

$$f(E, \bar{E}) = \frac{\sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{\sin(\kappa \frac{\pi}{2} + \bar{E})}{(1)_{\kappa}} (E - \bar{E})^{\kappa}}{1 + \bar{e} \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{\sin((\kappa+1) \frac{\pi}{2} + \bar{E})}{(1)_{\kappa+1}} (E - \bar{E})^{\kappa}}. \quad (2)$$

Выражение (2) можно рассматривать в качестве продолжения функции $f(E, \bar{E})$ в комплексную плоскость переменной E , аналитического в некоторой окрестности точки $E = \bar{E}$ (за исключением случая $\bar{e} = 1$, $\bar{E} = \pi$). Таким образом, приходим к известной задаче об обращении степенных рядов. Обратная функция $E(\epsilon)$ при фиксированном значении \bar{E} является аналитической для всех ϵ , которые удовлетворяют условию $|\epsilon| < |(E - \bar{E})/f(E, \bar{E})|$ на какой либо окружности с центром

Таблица 1. Области сходимости ряда по степеням $1 - e$

\bar{E}	M	ρ_ϵ	ϵ_{\min}
180.0	180.0	0.0000	
179.0	180.0	0.0001	0.9999
175.0	180.0	0.0024	0.9976
170.0	179.9	0.0096	0.9904
160.0	179.6	0.0380	0.9620
150.0	178.6	0.0845	0.9155
140.0	176.8	0.1477	0.8523
130.0	173.9	0.2261	0.7739
120.0	169.6	0.3176	0.6824
110.0	163.8	0.4203	0.5796
100.0	156.4	0.5322	0.4679
90.0	147.3	0.6511	0.3489
80.0	136.4	0.7755	0.2245
70.0	123.8	0.9039	0.0962
62.65	113.5	1.0000	0.0000

в точке $E = \bar{E}$, лежащей в области аналитичности функции $f(E, \bar{E})$. Соответствующее разложение функции $E(\epsilon)$ в степенной ряд дается формулой Бюрмана-Лагранжа [3]

$$E = \bar{E} + \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\epsilon^l}{(1)_l} \frac{d^{l-1}}{dE^{l-1}} f^l(E, \bar{E})|_{E=\bar{E}}. \quad (3)$$

Радиусы сходимости ρ_ϵ степенного ряда (3) при $\bar{e} = 1$ приведены в табл. 1.

Ряд (3) расходитсся при всех значения $\epsilon = 1 - e$ только в перигелии ($\bar{E} = M = 180^\circ$). Например для орбит с $e = 0.9$ разложение в ряд по степеням $1 - e$ сходится везде, за исключением дуги $\pm 2^\circ$ по средней аномалии относительно перигелия. Если возмущающая планета находится достаточно далеко от перигелия, то указанные разложения можно использовать для аналитического исследования движения по сильноэллиптическим орбитам. Такая ситуация имеет место во внутреннем варианте ограниченной задачи трех тел, определяемом соотношением $r < r_P$, где r и r_P — гелиоцентрические расстояния возмущаемого тела и планеты.

3. Внутренний вариант ограниченной задачи трех тел

Обычным подходом в аналитических методах небесной механики является представление возмущающей функции во внутреннем варианте ограниченной задачи трех тел в виде ряда по степеням r/r_P . Для нахождения разложения возмущающей функции в ряды Фурье по средней аномалии M введем величину $\bar{\epsilon} = \sqrt{(1-e)/(1+e)}$. Тогда $\epsilon = 1 - e = 2\bar{\epsilon}^2/(1 + \bar{\epsilon}^2)$. Перейдем к новой переменной \bar{E} , связанной с M соотношением $\bar{E} + \sin \bar{E} = M$. С точностью до $\bar{\epsilon}^4$ имеют место следующие соотношения:

$$\begin{aligned} r &= a(1 + \cos \bar{E} - 2\bar{\epsilon}^2 + \frac{4\bar{\epsilon}^4}{1 + \cos \bar{E}}), \\ r \sin v &= -2a\bar{\epsilon} \sin \bar{E} (1 + \bar{\epsilon}^2 \frac{\cos \bar{E} - 1}{1 + \cos \bar{E}}), \\ r \cos v &= -a(1 + \cos \bar{E} + 2\bar{\epsilon}^2(\cos \bar{E} - 2) + 2\bar{\epsilon}^4 \frac{\cos^2 \bar{E} + 1}{1 + \cos \bar{E}}), \end{aligned}$$

где v — истинная аномалия. Тогда основная проблема нахождения коэффициентов Фурье для гармоники с номером j сводится к вычислению интегралов

$$A_\nu(j) = \int_{-\pi}^{\pi} (1 + \cos \bar{E})^\nu \cos[j(\bar{E} + \sin \bar{E})] d\bar{E} \quad (4)$$

для целых ν .

Интегралы (4) при $j = 0$, порождающие вековые члены возмущающей функции, вычисляются элементарно. При $j > 0$ нетрудно найти, что

$$A_0 = 2\pi(-1)^j \mathbf{J}_j(j), A_1 = 0, A_2 = (-1)^{j-1} \frac{\pi}{j} [\mathbf{J}_{j-1}(j) - \mathbf{J}_{j+1}(j)],$$

где \mathbf{J} — функция Бесселя первого рода, а для $\nu \geq 3$ имеет место рекуррентное соотношение

$$A_\nu = \frac{\nu - 1}{j^2} [(\nu - 2)A_{\nu-2} - (2\nu - 5)A_{\nu-3}].$$

4. Заключение

Предложен метод аналитического разложения возмущающей функции в ограниченной задаче трех тел, основанный на промежуточной прямолинейной орбите. Получены формулы и рекуррентные соотношения для вычисления возмущающей функции во внутреннем варианте ограниченной задачи трех тел для орбит с эксцентриситетами,

близкими к единице, с высокой, хотя и ограниченной точностью. Данный подход представляется актуальным, в частности, для исследования недавно открытых короткопериодических околосолнечных комет.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 16-02-00805).

Список литературы

1. V. A. Brumberg, *Analiticheskiye algoritmy nebesnoj mekhaniki* (1980).
2. V. V. Emel'yanenko, *Sov. Astron. Lett.*, **17**, 363, 1991.
3. Yu. V. Sidorov, M. V. Fedoryuk, M. I. Shabunin, *Lektsii po teorii funktsij kompleksnogo peremennogo* (1989).

Определение орбит малых тел Солнечной системы по коротким дугам наблюдений методом перебора топоцентрических расстояний

Емельяненко В.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Современные системы наблюдений требуют оперативного определения орбит и анализа движения малых тел Солнечной системы по коротким дугам наблюдений. В частности, такая ситуация имеет место при выявлении опасных околоземных объектов или выяснении динамических особенностей небесных тел, наблюдающихся вблизи Солнца. В статье предложена методика определения предварительной орбиты, основанная на переборе топоцентрических расстояний. Наряду с простотой определения элементов орбиты, такой подход позволяет использовать дополнительную информацию о границах множества поисковых значений.

Determination of orbits of small Solar System bodies with short observation arcs by an exhaustive search of topocentric distances

Emel'yanenko V.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Modern observational systems require the quick determination of orbits and the analysis of the motion of small Solar System bodies observed on short arcs. In particular, this situation occurs in the case of detecting hazardous near-Earth objects or understanding the dynamical features of celestial bodies observed near the Sun. In the article a technique for determining the preliminary orbit is proposed, based on an exhaustive search of topocentric distances. In addition to the simplicity in the determination of orbital elements, this approach makes it possible to use additional information about the boundaries of the search values set.

1. Введение

Современные системы наблюдений, направленные на открытие большого числа малых тел даже за одну ночь, требуют определения орбит и анализа движения обнаруженных объектов по коротким дугам наблюдений. В частности, создание системы мониторинга околоземного

пространства подразумевает оперативное выявление новых объектов и оценку степени их опасности. Например, в кластере широкоугольных телескопов, разрабатываемом в Институте астрономии РАН, планируется, что за время около 6 часов будет получено достаточное число наблюдений (минимум три) для определения предварительной орбиты с точностью 0.01 а.е. по большой полуоси. Это должно обеспечить прогнозирование движения для дальнейшего слежения за объектом в течение трех суток и определения вероятности столкновения с Землей. Еще одна задача связана с определением орбит околосолнечных объектов по наблюдениям SOHO. В этом случае, как правило, продолжительность наблюдений не превышает нескольких часов.

Применение классических методов Гаусса или Лапласа [1], а также их модификаций [2, 3, 4] вызывает значительные трудности в случаях столь коротких дуг наблюдений. В частности, встречаются случаи, когда орбиты, полученные этими методами, в дальнейшем не улучшаются (итерации в дифференциальной процедуре поиска решения методом наименьших квадратов расходятся). Зачастую это приводит к тому, что невозможно вычислить достаточно надежную эфемериду для наблюдения объекта в следующие ночи, то есть объект теряется. В работе [5] был предложен более универсальный, чем классические, метод, позволяющий определять орбиту, имеющую наименьшее значение среднеквадратической ошибки представления всех имеющихся наблюдений. Он основан на переборе орбитальных плоскостей малого тела. В этой статье мы предлагаем другой подход, использующий ту же идею перебора для поиска орбиты с наилучшим представлением наблюдений, но для топоцентрических расстояний. Это представляется более рациональным, в том числе в силу возможности использования дополнительной информации о границах множества поисковых значений.

2. Вычисление гелиоцентрических положений

На начальном этапе определяется невозмущенная предварительная орбита. Хорошо известно [1], что элементы орбиты определяются однозначно по трем наблюдениям в случае отсутствия ошибок наблюдений. В классических методах задача разбивается на две: 1) нахождение топоцентрических расстояний в моменты наблюдений; 2) вычисление элементов орбиты на основе наблюдательных данных и известных топоцентрических расстояний (для решения этой части задачи достаточно знать топоцентрические расстояния на два момента времени). Для нахождения топоцентрических расстояний приходится

решать системы нелинейных уравнений. Как правило, решение таких уравнений находится итерациями. В реальности наблюдения обременены ошибками. В случае коротких дуг наблюдений влияние этих ошибок может приводить к тому, что итерации могут расходиться, что делает невозможным нахождение элементов орбиты малого тела. В нашем подходе мы предлагаем итерационные вычисления заменить перебором топоцентрических расстояний. При этом область изменения топоцентрических расстояний можно ограничить, исходя из физических соображений и поставленных задач.

Пусть ρ_1 и ρ_2 — топоцентрические расстояния объекта в моменты времени t_1 и t_2 . В поиске опасных околоземных объектов достаточно ограничиваться, например, расстояниями менее 1 а.е., поскольку для объектов, находящихся на более значительных расстояниях и приближающихся к Земле, будет иметься достаточно времени для наблюдений и определения орбиты. Кроме того, звездная величина m объектов, приближающихся к Земле, быстро изменяется. Если такое изменение зарегистрировано при наблюдениях, то это обстоятельство можно использовать для варьирования ρ_2 в зависимости от ρ_1 . Действительно, предполагая незначительность изменения гелиоцентрических расстояний и фазовых углов на короткой дуге наблюдений для астероидов, приближающихся к Земле, имеем $\rho_2 = \rho_1 10^{(m_2 - m_1)/5}$, где m_2 и m_1 — звездные величины в соответствующие моменты времени. Если же изменения m не определяются, то варьирование ρ_2 можно ограничить интервалом $(\rho_1 - \Delta, \rho_1)$, где $\Delta = V'(t_2 - t_1)$, $V' = 0.0415$ а.е./сутки ≈ 72 км/с — максимально возможная скорость относительно Земли в ее окрестности для тела, принадлежащего Солнечной системе. Для наблюдений околосолнечных комет можно предполагать, что топоцентрические расстояния находятся в некоторой малой окрестности значения 1 а.е. Ясно, что конкретные алгоритмы подбора топоцентрических расстояний могут различаться в зависимости от назначения наблюдательной системы.

Далее в экваториальной системе координат находятся гелиоцентрические радиусы-векторы $\mathbf{X}_j(x_j, y_j, z_j)$ объекта в моменты времени t_j , исправленные за планетную абберацию ρ_j/c , где c — скорость света: $\mathbf{X}_j = \mathbf{X}_j^E + \mathbf{G}_j + \rho_j \mathbf{L}_j$. Здесь \mathbf{X}_j^E — гелиоцентрические радиусы-векторы центра Земли, \mathbf{G}_j — геоцентрические радиусы-векторы наблюдателя, а единичные векторы $\mathbf{L}_j(\cos \alpha_j \cos \delta_j, \sin \alpha_j \cos \delta_j, \sin \delta_j)$ задаются наблюдаемыми прямыми восхождениями α_j и склонениями δ_j ($j = 1, 2$). Координаты векторов \mathbf{X}_j^E находятся на основе планетных

эфемерид, а координаты векторов \mathbf{G}_j вычисляются по известным положениям обсерваторий.

3. Нахождение наиболее вероятной орбиты

Элементы орбиты определяются методом Гаусса по найденным двум гелиоцентрическим положениям [1, 2]. Как правило, для вычисления элементов орбиты используются первое и последнее наблюдения. Если имеется $n > 2$ наблюдений, то, используя найденную орбиту, вычисляются разности между наблюдаемым и вычисленным положением тела (О-С) для всех наблюдений и определяется значение среднеквадратической ошибки представления наблюдений.

Эта процедура повторяется для каждой пары значений ρ_1 и ρ_2 . Элементы орбиты, дающие наименьшее значение среднеквадратической ошибки, рассматриваются как наиболее вероятные. На последнем этапе определения предварительной орбиты осуществляется переход от экваториальных угловых элементов к эклиптическим угловым элементам. Предварительная орбита, определенная таким способом, имеет невысокую точность как из-за большого влияния ошибок наблюдений на коротких дугах, на основе которых она вычислена, так и из-за пренебрежения возмущениями кеплеровой орбиты. Однако определение предварительной орбиты является необходимым этапом, поскольку оно позволяет вычислить эфемериду тела для продолжения наблюдений и не потерять объект. В дальнейшем, когда появятся дополнительные наблюдения, полученная наиболее вероятная система элементов будет улучшаться методом наименьших квадратов. Поскольку предварительная орбита наилучшим образом представляет все имеющиеся наблюдения, то это в значительной мере способствует сходимости последующего процесса улучшения орбиты с использованием дополнительных наблюдений.

4. Заключение

Современные системы наблюдений требуют оперативного определения орбит малых тел Солнечной системы по коротким дугам наблюдений. В работе предложена методика определения предварительной орбиты, основанная на переборе топоцентрических расстояний. Наряду с простотой определения элементов орбиты, такой подход позволяет использовать дополнительную информацию о границах множества поисковых значений.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 16-02-00805).

Список литературы

1. M. F. Subbotin, *Vvedenie v teoreticheskuyu astronomiyu* (1968).
2. P. R. Escobal, *Methods of orbit determination* (1965).
3. S. Herrick, *Astrodynamic, vol. 1* (1971).
4. V. B. Kuznetsov, *Sol. Syst. Res.*, **46**, 136, 2012.
5. Yu. S. Bondarenko, D. E. Vavilov, and Yu. D. Medvedev, *Sol. Syst. Res.*, **48**, 212, 2014.

Эволюция звезд

Вековое изменение периода цефеиды U Sgr и теория звездной эволюции

Фадеев Ю.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

При помощи согласованных расчетов звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций определены фундаментальные параметры цефеиды U Sgr. Показано, что современным наблюдательным оценкам периода и скорости изменения периода ($\Pi = 6.745$ сут, $\dot{\Pi} = 0.39$ с/год) лучше всего соответствуют гидродинамические модели эволюционных последовательностей с начальной массой $6.6M_{\odot} \leq M_{\text{ZAMS}} \leq 6.7M_{\odot}$. Полученные теоретические оценки массы, радиуса и светимости U Sgr составляют $6.54M_{\odot} \leq M \leq 6.64M_{\odot}$, $55.5R_{\odot} \leq R \leq 56.3R_{\odot}$ и $4370L_{\odot} \leq L \leq 4650L_{\odot}$. U Sgr пульсирует в фундаментальной моде и на диаграмме Герцшпрунга-Рессела находится около голубой границы полосы неустойчивости.

Secular period change in the cepheid U Sgr and the theory of stellar evolution

Fadeyev Yu.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The fundamental parameters of the cepheid U Sgr are determined from consistent stellar evolution and nonlinear stellar pulsation calculations. Hydrodynamic models of evolutionary sequences with initial masses $6.6M_{\odot} \leq M_{\text{ZAMS}} \leq 6.7M_{\odot}$ are shown to better agree with recent observational estimates of the period and the period change rate ($\Pi = 6.745$ day, $\dot{\Pi} = 0.39$ s/yr). The theoretical estimates of the mass, the radius and the luminosity of U Sgr are as follows: $6.54M_{\odot} \leq M \leq 6.64$, $55.5R_{\odot} \leq R \leq 56.3$ and $4370L_{\odot} \leq L \leq 4650L_{\odot}$. U Sgr is the fundamental mode pulsator locating on the Hertzsprung-Russel diagram at the blue edge of the instability strip.

1. Введение

Благодаря строгой повторяемости изменений блеска, у многих цефеид удается зарегистрировать монотонные изменения периода, непосредственно связанные с эволюцией звезды. У одних цефеид эти изменения происходят в сторону возрастания периода, тогда как у других — в сторону его уменьшения. К настоящему времени надежные наблюдательные оценки скорости изменения периода $\dot{\Pi}$, которые основываются на визуальных и фотографических наблюдениях за последнее

столетие, получены для более чем двух сотен цефеид [1]. Интерес к проблеме цефеид резко возрос после самых первых расчетов эволюции звезд промежуточных масс на стадии после главной последовательности [2, 3]. Из этих работ следует, что цефеиды находятся на эволюционной стадии термоядерного горения гелия в ядре и, по самым грубым теоретическим оценкам, ожидаемые изменения периода могут быть обнаружены методом анализа $O - C$ диаграмм [4].

За истекшие со времени публикации этих работ полвека точность наблюдательных оценок \dot{P} возросла благодаря увеличению протяженности рядов наблюдений. Одновременно происходили существенные улучшения в теории внутреннего строения и эволюции звезд благодаря расширению и уточнению данных о скоростях термоядерных реакций, уравнении состояния и непрозрачности звездного вещества. Современные согласованные расчеты звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций позволили установить, что в пределах точности наблюдательных оценок \dot{P} выводы теории находятся в согласии с наблюдениями цефеид Большого Магелланова Облака [5] и галактических цефеид [6]. Известное из наблюдений возрастание скорости изменения периода \dot{P} с увеличением периода пульсаций P является следствием зависимости скорости эволюции звезды от ее массы, т.е. зависимости масса-светимость.

Роль наблюдательных оценок скорости изменения периода цефеид не исчерпывается задачами, связанными с проверкой правильности расчетов звездной эволюции. Полученные из наблюдений значения P и \dot{P} позволяют определить фундаментальные параметры (т.е. массу M , радиус R и светимость L) пульсирующей звезды. Эффективность данного подхода была продемонстрирована на примерах анализа наблюдательных данных о цефеидах α UMi [7] и SZ Tau [8]. Ниже мы рассмотрим задачу об определении фундаментальных параметров цефеиды *U Sgr* с периодом изменения блеска $P = 6.745$ сут. Наблюдательная оценка скорости изменения периода $\dot{P} = 0.39$ с/год основывается на анализе $O - C$ диаграммы, построенной по наблюдениям, охватывающим интервал времени с 1866 г. по 2010 г. [9].

2. Результаты расчетов

При согласованных расчетах звездной эволюции и нелинейных звездных пульсаций решение уравнений радиационной гидродинамики и нестационарной конвекции проводится с начальными условиями, представляющими собой отдельные модели эволюционной последовательности. В данной работе рассматривались эволюционные модели, соот-

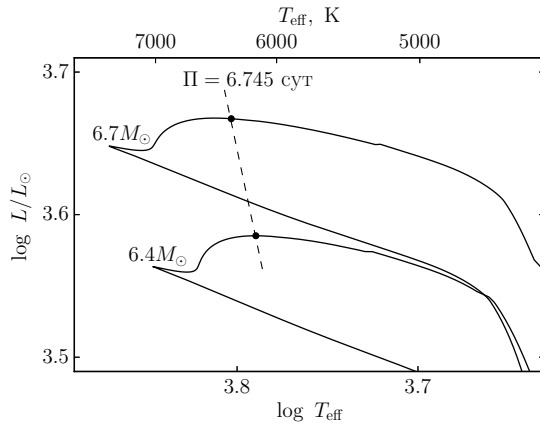


Рис. 1. Эволюционные треки звезд с начальными массами $M_{\text{ZAMS}} = 6.4 M_{\odot}$ и $M_{\text{ZAMS}} = 6.7 M_{\odot}$ на стадии термоядерного горения гелия в ядре (сплошные линии). Заполненными кружками показаны эволюционные модели, пульсирующие с периодом $\Pi = 6.745$ сут.

ветствующие стадии термоядерного горения гелия в ядре. Эволюционные расчеты проводились от главной последовательности при начальных относительных массовых содержаниях водорода $X = 0.7$ и элементов тяжелее гелия $Z = 0.02$. На рис. 1 показаны эволюционные треки звезд с начальными массами $M_{\text{ZAMS}} = 6.4 M_{\odot}$ и $M_{\text{ZAMS}} = 6.7 M_{\odot}$ на участке диаграммы Герцшпрунга-Рессела (Г-Р), в пределах которого звезда пересекает полосу неустойчивости и становится цефеидой. Эволюционные треки в этой области диаграммы Г-Р имеют петлеобразную форму, и движение вдоль трека совершается по часовой стрелке. Положительное значение скорости изменения периода U Sgr указывает, что звезда эволюционирует в сторону уменьшения эффективной температуры T_{eff} , поэтому нам следует рассматривать верхний отрезок петли.

На показанных на рис. 1 эволюционных треках заполненными кружками отмечены модели, пульсирующие в фундаментальной моде с периодом $\Pi = 6.745$ сут и для которых выполняется условие $\dot{\Pi} > 0$. Значение периода радиальных пульсаций определяет множество моделей, расположенных на диаграмме Герцшпрунга-Рессела вдоль линии постоянного периода, которая на рис. 1 отмечена штриховой линией.

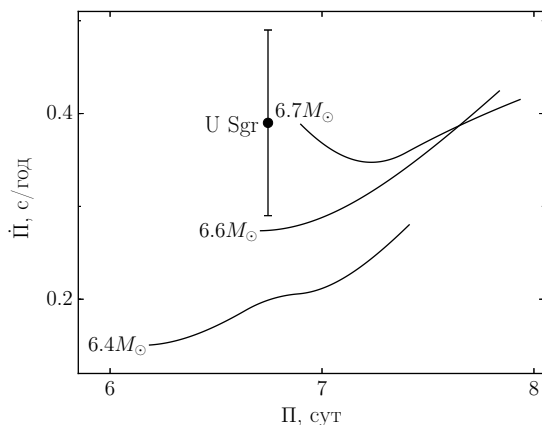


Рис. 2. Скорость изменения периода \dot{P} в функции периода P для эволюционных последовательностей с начальной массой 6.4, 6.6 и $6.7M_{\odot}$. Положение цефеиды *U Sgr* и ошибки определения \dot{P} показаны по данным работы [9].

Для уточнения положения исследуемой цефеиды на диаграмме Г-Р необходимо привлечь наблюдательные данные о скорости изменения периода \dot{P} . В данном случае для каждой эволюционной последовательности необходимо рассчитать несколько гидродинамических моделей с периодами, находящимися в окрестности искомого периода $P = 6.745$ сут, и затем методом численного дифференцирования получить теоретические оценки \dot{P} .

На рис. 2 показаны зависимости изменения скорости изменения периода \dot{P} в функции периода пульсаций P для эволюционных последовательностей с начальной массой 6.4, 6.6 и $6.7M_{\odot}$. Эволюция вдоль каждой кривой происходит в сторону увеличения периода P , причем каждая зависимость берет свое начало на голубой границе полосы неустойчивости.

Из рассмотрения зависимостей на рис. 2 можно сделать следующие выводы. Во-первых, значение начальной массы $M_{ZAMS} = 6.7M_{\odot}$ представляет собой верхний предел допустимых значений, поскольку в более массивных звездах модели с периодом свободных колебаний $P = 6.745$ находятся за пределами полосы неустойчивости. Во-вторых, гидродинамические модели эволюционных последовательно-

стей $M_{\text{ZAMS}} < 6.6M_{\odot}$ обнаруживают значительно меньшую скорость изменения периода, чем это требуется для согласия с наблюдениями.

3. Заключение

Таким образом, для модели цефеиды U Sgr наиболее подходящими представляются эволюционные последовательности для звезд с массами $6.6M_{\odot} \leq M_{\text{ZAMS}} \leq 6.7M_{\odot}$. Наилучшее согласие с наблюдательными оценками П и П может быть получено для гидродинамических моделей с массой $6.54M_{\odot} \leq M \leq 6.64M_{\odot}$, радиусом $55.5R_{\odot} \leq R \leq 56.3R_{\odot}$ и светимостью $4370L_{\odot} \leq L \leq 4650L_{\odot}$. Благодаря узким пределам возможных значений радиуса ($\approx 1.5\%$) и светимости ($\approx 6\%$), цефеида U Sgr представляется очень подходящим объектом для калибровки таких параметров теории звездной эволюции, как скорость потери массы и эффективность конвективного овершутинга.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №28, подпрограмма «Астрофизические объекты как космические лаборатории».

Список литературы

1. D. G. Turner, M. Abdel-Sabour Abdel-Latif, and L. N. Berdnikov, *PASP*, **118**, 410, 2006.
2. E. Hofmeister, R. Kippenhahn, and A. Weigert, *Zeitschrift für Astrophys.*, **60**, 57, 1964.
3. I. Iben, Jr., *ApJ*, **143**, 483, 1966.
4. E. Hofmeister, *Zeitschrift für Astrophys.*, **65**, 164, 1967.
5. Y. A. Fadeyev, *Astron. Lett.*, **39**, 746, 2013.
6. Y. A. Fadeyev, *Astron. Lett.*, **40**, 301, 2014.
7. Y. A. Fadeyev, *MNRAS*, **449**, 1011, 2015.
8. Y. A. Fadeyev, *Astron. Lett.*, **41**, 640, 2015.
9. L. N. Berdnikov and D. Majaess, *Astron. Lett.*, **40**, 193, 2014.

Ультракомпактные катаклизмические переменные, богатые водородом?

Юнгельсон Л.Р.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассмотрена эволюция катаклизмических переменных звезд в предположении, что потеря момента описывается согласно Книгге и др. (2011). Ожидаемая частота рождения звезд сокращается по сравнению со «стандартной» моделью Раппапорта и др. (1983). Должна существовать популяция объектов с $P_{\text{orb}} \lesssim 70$ мин. и детектируемым содержанием водорода на поверхности $3 \cdot 10^{-3} \lesssim X_{\text{s}} \lesssim 0.4$, отличных от звезд типа AM CVn.

Hydrogen-rich ultra-compact cataclysmic variables?

Yungelson L.R.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Evolution of cataclysmic variables obeying angular momentum loss law suggested by Knigge et al. (2011) has been studied. Expected number of cataclysmic variables reduces, compared to the “standard” (Rappaport et al. 1983) formalism. It is shown that there should exist a population of cataclysmic variables with $P_{\text{orb}} \lesssim 70$ min. and detectable surface abundances of hydrogen $3 \cdot 10^{-3} \lesssim X_{\text{s}} \lesssim 0.4$, distinct from AM CVn-type stars.

1. Введение

Эволюция катаклизмических переменных звезд (КП) определяется потерей углового момента за счет магнитного звездного ветра (МЗВ) и (или) излучения гравитационных волн (ГВ) [1]. Описание МЗВ, как правило, основывается на предложенной Фербунтом и Званом [2] экстраполяции на два порядка величины наблюдаемой зависимости скорости вращения одиночных звезд поля спектральных классов F-G от времени [3] $v = 10^{14} \lambda t^{-1/2}$ см/с, где t — время, $\lambda = 0.73 \div 1.78$ [3, 4]. В этом случае $(dJ/dt)_{\text{MSW}} = -0.5 \cdot 10^{-28} \lambda^{-2} k^2 M_2 R_2^4 \omega^3$, где M_2 и R_2 — масса и радиус звезды-донора, соответственно, k — ее радиус гирации, ω — орбитальная угловая скорость. В большинстве современных расчетов в качестве «стандарта» принимаются значения $\lambda = 1$ и $k^2 = 0.076$ [5]. Потеря момента при излучении ГВ учитываются согласно ОТО [6]: $(dJ/dt)_{\text{GWR}} = -(32/5c^5) M_1^2 M_2^2 / (M_1 + M_2)^2 a^4 \omega^5$, где M_1 — масса аккретора, a — большая полуось орбиты системы,

c — скорость света. Парадигма эволюции КП с т.н. «прерванным магнитным торможением» [5, 7] предполагает, что МЗВ выключается, когда компоненты-доноры КП становятся полностью конвективными ($M_2 \approx 0.3M_\odot$).

Однако эмпирические данные свидетельствуют, что приведенные выражения для dJ/dt не вполне адекватны. Книгге и др. [8], сравнив значения радиусов доноров у наблюдаемых КП с значениями, предсказываемыми теорией, нашли, что эволюция КП описывается более удовлетворительно, если в выражениях для $(dJ/dt)_{\text{MSW}}$ и $(dJ/dt)_{\text{GWR}}$ используются, масштабные множители $(0.66 \pm 0.05)(R_2/R_\odot)^{-1}$ и 2.47 ± 0.22 , соответственно.

В данной работе кратко сравниваются результаты эволюционных вычислений для КП со «стандартными» выражениями для (dJ/dt) и модифицированными согласно [8]. Также показано, что практически общепринятый сценарий эволюции КП подразумевает существование популяции ультракороткопериодических КП, у которых содержание водорода на поверхности доступно обнаружению. Этим они отличаются от звезд типа AM CVn, на что ранее не обращалось внимания.

2. КП с проэволюционировавшими донорами

Для расчетов использована модифицированная нами эволюционная программа Эгглтона ([9, 10] и частные сообщения 2003, 2006). Рассматривались двойные системы в следующих диапазонах параметров: $0.95 \leq M_{2,0}/M_\odot \leq 1.2$, $0.6 \leq M_{1,0}/M_\odot \leq 1.3$ и значениями $P_{\text{orb},0}$ от минимальных, соответствующих заполнению полости Роша практически однородными донорами, до периода бифуркации для каждого сочетания масс, всего около 200 систем. Ниже приведено лишь несколько характерных примеров. На НГП $X = 0.7$, $Z = 0.02$. Предполагалось, что водород полностью истощен в ядре, если $X_c \leq 10^{-12}$. Для предшественников наиболее компактных систем шаг по исходному периоду составлял 0.01 час. Хаббловское время принималось равным 13.5 млрд. лет. Предполагалось, что при взрывах Новых вещество аккрецированного слоя полностью покидает систему с удельным моментом аккретора.

На рис. 1 сравниваются результаты расчетов с стандартными и модифицированными выражениями для dJ/dt для систем с исходными $(M_{1,0} + M_{2,0}) = (0.6 + 1.0)M_\odot$ и различными исходными P_{orb} . Для моделей, заполняющих полость Роша практически однородными ($P_{\text{orb},0} = 0.4$ сут.), результаты не различаются. С увеличением $P_{\text{orb},0}$, из-за менее интенсивного МЗВ при расчетах согласно [8], компоненты

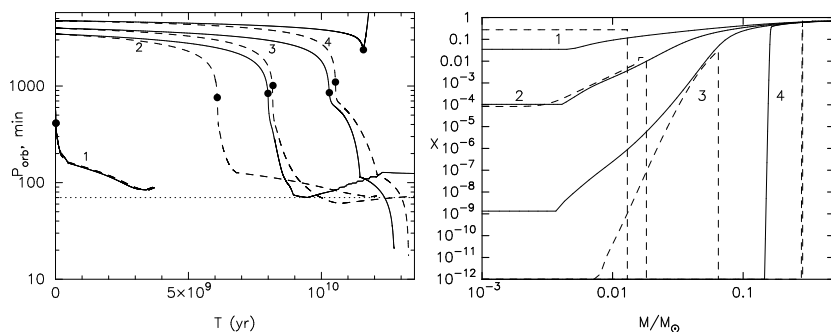


Рис. 1. Слева — эволюционные треки доноров в системах с одинаковыми $P_{orb,0} = 0.4, 2.4, 2.6, 2.76$ сут. (пары 1–4), но различным описанием потери момента. Сплошные линии — треки с учетом потери момента согласно [8], штриховые линии — согласно [5]. Кружками отмечены моменты заполнения полости Роша. Пунктирная линия — $P_{orb} = 70$ мин. Справа — распределение относительного содержания водорода по массе в начальных (сплошные линии) и конечных (штриховые линии) моделях эволюционных треков, рассчитанных согласно [8]. Во всех случаях $M_{1,0} = 0.6M_{\odot}$, $M_{2,0} = 1.0M_{\odot}$.

сближаются медленнее, заполнение полости Роша донорами происходит позднее, к этому моменту в их ядрах выгорело больше водорода и характер «модифицированных» треков становится сходным с характером «стандартных» треков в более широких системах. Наиболее важное отличие состоит в том, что они эволюционируют к меньшим P_{orb} и после отскока попадают в область периодов обычных КП, имея существенно пониженное содержание водорода в оболочках. Как показывают кривые распределения водорода на правой панели рис. 1, ультракомпактными становятся пары, у доноров которых образуется гелиевое ядро. Модификация закона потери момента посредством МЗВ приводит также к смещению периода бифуркации треков к меньшим значениям P_{orb} и, следовательно, должна уменьшиться частота формирования КП.

Тутуков и др. [11], используя «стандартный» формализм, показали, что в случае заполнения полости Роша вторичным компонентом с содержанием водорода в ядре $X_{c,0} \lesssim 0.1$ градиент химического состава препятствует проникновению конвекции вглубь, МЗВ сохраняется и минимальные значения $P_{orb} \sim (5 - 10)$ мин. Периоды меньше 70 мин. имеют КП типа AM CVn, в спектрах которых не обнаружены признаки водорода (за двумя исключениями среди примерно 50 объектов) [12]. Этот сценарий (evolved-donor channel, EDC) рассматрива-

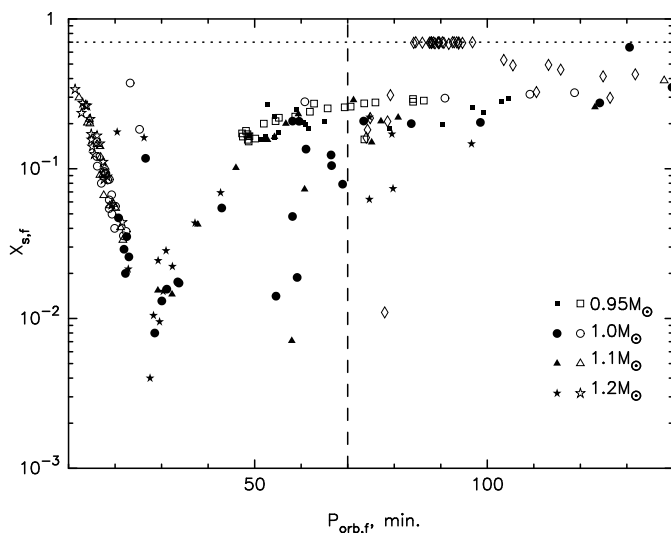


Рис. 2. Соотношение P_{orb} последних моделей эволюционных последовательностей и содержания водорода на поверхности доноров. Различные символы соответствуют различным $M_{2,0}$ ($M_{1,0}$ варьировалась от $0.6M_{\odot}$ до $1.3M_{\odot}$). Заполненными символами отмечены звезды в последовательностях, которые достигли минимума $P_{\text{orb}} < 70$ мин. и продолжили эволюцию к большим P_{orb} . Незаполненные символы — звезды в последовательностях, где время эволюции достигло 13.5 млрд. лет, донор перестал заполнять полость Роша или расчеты были прерваны (см. текст). Ромбиками отмечены звезды, не достигшие $P_{\text{orb}} = 70$ мин. за 13.5 млрд. лет. Вертикальная штриховая линия — $P_{\text{orb}} = 70$ мин., горизонтальная пунктирная линия — $X_s = 0.7$.

ется как один из вариантов формирования звезд типа AM CVn (см., напр., [11, 13, 14] и приведенные в [14] ссылки). По такому же сценарию могут формироваться ультракомпактные источники рентгеновского излучения [11].

Обстоятельство, связанное с EDC, на которое не обращалось внимания — пониженное содержание водорода в оболочках звезд, эволюционирующих по этому пути; рассматривалось, как правило, только изменение содержания C, N, O (напр., [15]). На рис. 2 приведены соотношения между массам последних моделей рассчитанных нами в приближении [8] эволюционных последовательностей для доноров и содержанием водорода на их поверхности. Периодов $\lesssim 70$ мин. достигают звезды, у которых в момент заполнения полости Роша содержа-

ние водорода в ядрах $X_{c,0} \lesssim 0.01$. Для сравнения, Подсядловски и др. [13], исследовавшие образование звезд AM CVn по сценарию EDC, используя приближение [5], нашли, что в область $P_{\text{orb}} < 70$ мин. попадают звезды с $X_{c,0} \lesssim 0.3$, т.е. *модификация закона потери момента согласно [8] существенно снижает частоту рождения предшественников ультракомпактных звезд.*

Порог обнаружения водорода в спектрах аккреционных дисков звезд AM CVn оценивается как $\lg[(\text{H}/\text{He})/(\text{H}/\text{He})_{\odot}] \gtrsim 10^{-6} - 10^{-3}$, в зависимости от параметров системы [16, 17, 18]. Следовательно, во всех рассмотренных системах он должен наблюдаться. Учитывая, что звезды проводят в области $P_{\text{orb}} < 70$ мин. до 6 млрд. лет, *возможно, существует популяция богатых водородом ультракомпактных звезд, феноменологически отличающихся от звезд типа AM CVn.* Данное заключение справедливо при любой трактовке потери момента, допускающей попадание КП в область $P_{\text{orb}} < 70$ мин.

На рис. 2 выделяются звезды с $P_{\text{orb}} \lesssim 25$ мин. и $X_s \gtrsim 10^{-2}$. Это объекты, которые проэволюционировали до $P_{\text{orb,min}}$ за 13.5 млрд. лет ($M_{2,0} \leq 1.1M_{\odot}$), звезды-доноры переставшие заполнять полость Роша после образования гелиевого ядра (случай эволюции АВ) и звезды, продолжающие эволюцию к малым P_{orb} , расчет которых был прерван из-за расходимости моделей. Массы последних $\simeq 0.1M_{\odot}$. Исходя из результатов [11, 19, 20], можно заключить, что в пределах хабловского времени они могут продолжить эволюцию до достижения $P_{\text{orb}} \simeq 5$ мин. и после потери остатков водородных оболочек начнут эволюционировать к большим P_{orb} , вплоть до ~ 1 час. *На этой стадии они будут отождествляться с звездами AM CVn.* Примечательно, что $X_s < X_{\odot}$ могут иметь и звезды с P_{orb} существенно большими 70 мин.

Для оценки численности и параметров ультракороткопериодических КП с водородом в спектрах необходима очень плотная сетка эволюционных треков с малыми $X_{c,0}$ и малым шагом по M_a , M_d , P_{orb} , которая, учитывая разнообразие треков, позволила бы при популяционном синтезе интерполяцию между соседними треками вместо использования аналитических приближений для описания зависимости эволюции звезд от времени, аналогично, например, [14, 21].

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. B. Warner, *Cataclysmic Variable Stars* (2003).
2. F. Verbunt and C. Zwaan, *A&A*, **100**, L7, 1981.
3. A. Skumanich, *ApJ*, **171**, 565, 1972.
4. M. A. Smith, *PASP*, **91**, 737, 1979.
5. S. Rappaport, F. Verbunt, and P. C. Joss, *ApJ*, **275**, 713, 1983.
6. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *The classical theory of fields*, (1971).
7. H. C. Spruit and H. Ritter, *a*, **124**, 267, 1983.
8. C. Knigge, I. Baraffe, and J. Patterson, *ApJS*, **194**, 28, 2011.
9. P. P. Eggleton, *MNRAS*, **151**, 351, 1971.
10. O. R. Pols, C. A. Tout, P. P. Eggleton, and Z. Han, *MNRAS*, **274**, 964, 1995.
11. A. V. Tutukov, A. V. Fedorova, E. V. Ergma, and L. R. Yungelson, *Sov. Astron. Lett.*, **11**, 52, 1985.
12. J. Solheim, *PASP*, **122**, 1133, 2010.
13. P. Podsiadlowski, Z. Han, and S. Rappaport, *MNRAS*, **340**, 1214, 2003.
14. J. Goliaš and L. Nelson, *ApJ*, **809**, 80, 2015.
15. A. V. Fedorova and E. V. Ergma, *Ap&SS*, **151**, 125, 1989.
16. T. R. Marsh, K. Horne, and S. Rosen, *ApJ*, **366**, 535, 1991.
17. T. Nagel, T. Rauch, and K. Werner, *A&A*, **499**, 773, 2009.
18. K. Gehron, T. Nagel, T. Rauch, and K. Werner, *A&A*, **562**, A132, 2014.
19. D. L. Kaplan, L. Bildsten, and J. D. R. Steinfadt, *ApJ*, **758**, 64, 2012.
20. R. Sengar, T. M. Tauris, N. Langer, and A. G. Istrate, *MNRAS*, **470**, L6, 2017.
21. H.-L. Chen, T. E. Woods, L. R. Yungelson, M. Gilfanov, and Z. Han, *MNRAS*, **445**, 1912, 2014.

Эруптивные явления на ранних стадиях звездной эволюции: новый класс вспышек типа IX Oph (IXor)

Ибрагимов М.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Амплитуды вспышек фуоров (FUor) и эксоров (EXor) сравнимы, но продолжительность их высокой стадии блеска отличается на 2 порядка (10^2 и 10^0 лет по порядку величины для фуоров и эксоров, соответственно). О наблюдениях эрупций с промежуточной длительностью порядка 10^1 лет у молодых звезд не сообщалось. Используя доступные банки данных, автор осуществил поиск молодых звезд с эруптивными вспышками, имеющими длительность порядка 10^1 лет. Разработаны критерии поиска, и у звезд IX Oph и V1057 Cyg обнаружены эрупции с искомой длительностью. Найденные эрупции предложено назвать вспышками типа IX Oph (IXor или айксор). Приводятся и обсуждаются результаты идентификации и основные характеристики айксорной вспышки, наблюдавшейся у V1057 Cyg.

Eruptive Phenomena in Early Stellar Evolution: New Class of IX Oph Type Eruptions (IXor)

Ibrahimov M.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Amplitudes of FUor and EXor eruptions are comparable, while duration of the high stage of their brightness differs by 2 orders of magnitude (having order of 10^2 and 10^0 years for FUors and EXors, respectively). There had been no reports on observations of eruptions with intermediate duration of order of 10^1 years in young stars so far. Using available data banks, the author carried out a search of young stars with eruptions of order of 10^1 duration. The search criteria were developed and in the stars IX Oph and V1057 Cyg eruptions of required duration were discovered. It is proposed to call found eruptions as IX Oph type eruptions (IXor). Identification results and general characteristics of IXor eruption observed in V1057 Cyg are presented and discussed.

1. Введение

К настоящему времени известны два класса эруптивных явлений на ранних стадиях звездной эволюции — вспышки типа FU Ori (FUor или фуор) и вспышки типа EX Lup (EXor или эксор). Описание астрофизических, эволюционных и статистических характеристик этих

двух классов эрупций вместе с результатами моделирования и конкурирующими интерпретациями можно найти в работах [1, 2, 3, 4, 5]. Явления фуора/эксора представляют собой новоподобные вспышки, которые, согласно устоявшимся представлениям, генерируются резким увеличением темпа аккреции в околозвездном диске у молодых звезд в стадии до главной последовательности. Увеличение темпа аккреции является временным (эпизодическим) событием и получило название «прерывистая аккреция» (intermittent accretion). Типичный темп аккреции у молодых звезд составляет $\dot{M} \sim 10^{-8} \odot/\text{год}$. Явление фуора вызывается увеличением такого темпа на 3–4 порядка, что приводит к вспышке с амплитудой 4–6 величин и длительностью высокой стадии блеска порядка 50–100 лет. Явление эксора вызывается возрастанием темпа на 1–2 порядка, что приводит к вспышкам с амплитудой 2–4 величины и с длительностью высокой стадии много короче фуорной и составляющей около 0.5–1 года. Эксорные вспышки являются повторными и уже неоднократно наблюдались у одних и тех же звезд. Повторных фуорных вспышек пока не наблюдалось.

Амплитуды вспышек фуоров и эксоров сравнимы, но времена продолжительности высокой стадии сильно отличаются. У фуоров она порядка 10^2 лет, у эксоров порядка 10^0 лет. Разница в два порядка величины является значимой. Вызывает удивление, почему у молодых звезд не наблюдается вспышек с промежуточной продолжительностью высокой стадии порядка 10^1 лет. Пока в литературе не сообщалось об обнаружении таких вспышек у молодых звезд. Не совсем понятно, что именно — селекция или некий неизвестный еще физический механизм — заставляет молодые звезды (аккрецию?) «маскироваться» и не проявлять себя в эрупциях с временами порядка 10^1 лет. Для решения этого важного вопроса автор настоящей работы, используя доступные наблюдательные данные, осуществил поиск эруптивных явлений у молодых звезд с длительностью порядка 10^1 лет. Ниже кратко излагаются результаты проведенного поиска. Полученные результаты публикуются впервые.

2. Новый класс вспышек на ранних стадиях звездной эволюции: критерии отбора и две найденные вспышки

Для обнаружения эрупций с длительностью порядка 10^1 лет автор использовал доступные ему банки фотометрических данных по молодым звездам и следующие общие критерии их идентификации:

а) поиск проводится среди объектов, включенных в третье издание каталога эмиссионных звезд Орионова населения — каталог НВС-объектов [6];

б) длительность искомым вспышек имеет порядок 10^1 лет;

в) энергетика искомым вспышек сравнима (не меньше) энергетике типичных вспышек эксоров.

В результате поисков у звезд IX Oph (НВС 272) и V1057 Cyg (НВС 300) были обнаружены две вспышки, удовлетворяющие приведенным выше критериям. Характерно, что обе обнаруженные вспышки не проявляются «в чистом виде», а как бы «спрятаны» (закамуфлированы) на относительно больших интервалах времени (десятилетие и больше) по ходу «собственных» секулярных изменений блеска. Поскольку вспышка IX Oph является более представительной по амплитудной и временной шкалам, новые вспышки по аналогии с устойчивыми названиями фуор/эксор (FUor/EXor) предлагается назвать «вспышками типа IX Oph» (IXor или айксор).

Айксорная вспышка у IX Oph является более сложной (более закамуфлированной) для ее идентификации и «извлечения» из долговременной кривой. Описание этой процедуры требует места и, к сожалению, не умещается в рамки настоящей работы. Этой вспышке будет посвящена отдельная работа. Айксорная вспышка V1057 Cyg хотя и менее представительна, но легче «извлекается» из кривой блеска. Поэтому ниже описывается процедура идентификации и определения основных характеристик айксорной вспышки у звезды V1057 Cyg.

3. Айксорная вспышка у фуора V1057 Cyg

Наиболее полное и критичное исследование фотометрических и спектральных свойств фуора V1057 Cyg проведено в работе [3]. В этой работе историческая m_{pg}/B кривая блеска V1057 Cyg строилась и анализировалась с использованием в том числе результатов высокоточных *UBVR*-фотоэлектрических данных, полученных автором настоящей работы в период 1981–2002 гг. [7, 8]. Рисунок с исторической кривой из [3] воспроизводится в настоящей работе как рис. 1.

После фуорного поярчания в 1970–1971 гг. у V1057 Cyg наблюдается непрерывное ослабление блеска. На фоне этого ослабления имеется 10-летний период 1985–1994 гг., который назван периодом «плато». Большую часть плато блеск V1057 Cyg оставался стабильным и даже немного возрастал. После плато следует очередное резкое ослабление блеска в 1995 г., в результате которого в исторической кривой образуется своеобразная «ступенька». На рис. 1 область плато и ступень-

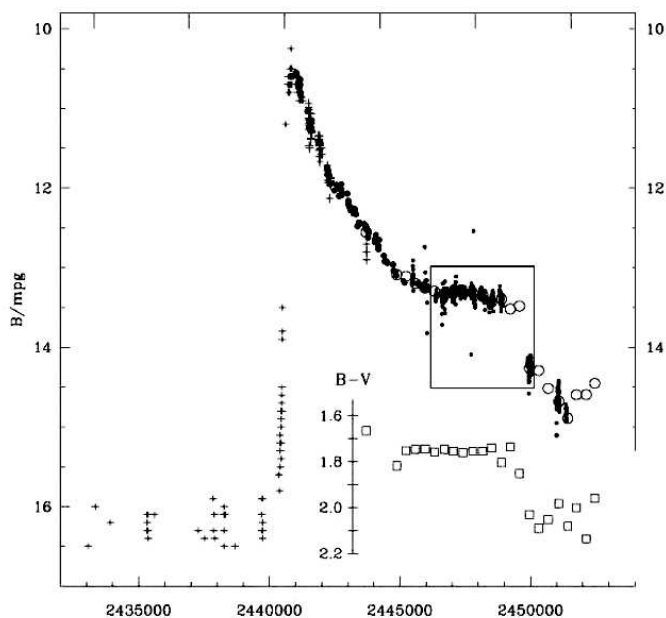


Рис. 1. Историческая кривая блеска фуора V1057 Cyg. Рамкой выделен 10-летний период 1985–1995 гг. с айксорной вспышкой. Пояснения в тексте.

ки, наблюдавшихся в 1985–1995 гг., выделена прямоугольной рамкой. Отметим также, что плато и ступенька хорошо видны и на рис. За из работы [9]. 10-летнее плато, наблюдавшееся на фоне непрерывного падения блеска V1057 Cyg, пока не имеет объяснения. Автор настоящей работы предлагает интерпретировать конфигурацию «плато+ступенька» как вспышку нового класса — айксорную вспышку у фуора V1057 Cyg, произошедшую в период 1985–1995 гг.

Для восстановления кривой блеска найденной вспышки в полосе B использовались данные [7]. 1985-й и 1995-й гг. считаются годами начала и конца айксорной вспышки — среднегодовые амплитуды вспышки в эти два года считаются равными нулю. Среднегодовые блески в низком (вневыспышечном) состоянии в 1986–1994 гг. рассчитывались путем линейной интерполяции между среднегодовыми значениями B -величин в 1985 и 1995 гг. Среднегодовая амплитуда вспышки определялась как разница между наблюдаемыми (выспышечное состо-

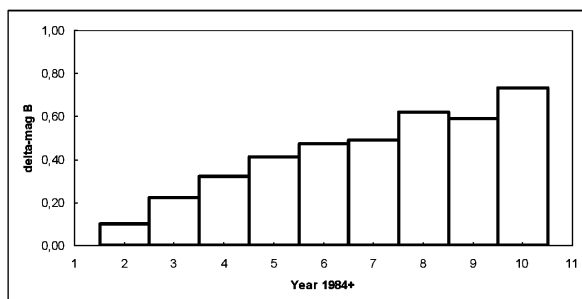


Рис. 2. Восстановленная (амплитудная) кривая блеска айксорной вспышки V1057 Cyg в 10-летний период 1985–1995 гг. Пояснения приводятся в тексте.

яние) и рассчитанными (вневысвещное состояние) среднегодовыми B -величинами. Восстановленная таким образом (амплитудная) кривая блеска айксорной вспышки V1057 Cyg в B -полосе приведена на рис. 2. Длительность вспышки равна 10 годам.

Расчет энергетики айксорной вспышки у V1057 Cyg осложняется тем, что пока не существует единого мнения, что же именно является источником излучения у этого фуора — центральная звезда (с единой температурой) или разогретый аккрецией диск (температура меняется с радиусом). Для упрощения такого расчета примем, что энергетика вспышки определяется произведением амплитуды вспышки (mag) на время вспышки (yr) или $mag \times yr$. В этих единицах энергетика айксорной вспышки V1057 Cyg есть сумма всех амплитуд, наблюдавшихся в период 1985–1995 гг. (площадь фигуры на рис. 2). Она составила $3.95 mag \times yr$. Оценка в тех же единицах энергетики типичной эксорной вспышки (амплитуда $2 mag$, продолжительность $1 yr$) составляет $2 mag \times yr$. Наиболее мощные из наблюдавшихся эксорных вспышек (EX Lup, амплитуда $4 mag$, длительность $0.7 yr$) имеют энергетика меньше $3 mag \times yr$. Упомянем также, что энергетика типичной фуорной вспышки в принятых единицах (амплитуда $5 mag$, продолжительность $50\text{--}100 yr$) составляет $250\text{--}500 mag \times yr$.

Таким образом, наблюдавшаяся у фуора V1057 Cyg в 1985–1995 гг. особенность «плато+ступень» (рис. 1) классифицируется как эруптивное поярчание (рис. 2), которое удовлетворяет выдвинутым выше критериям: оно наблюдалось у НВС-объекта, его длительность составляет 10 лет, его энергетика в 2 раза превышает энергетика типич-

ного эксорного поярчания. Из этого следует, что особенность «плато+ступень» у V1057 Cyg может представлять собой вспышку нового класса — вспышку типа IX Ori или айксорную вспышку (IXor). Здесь важно отметить, что звезда V1057 Cyg ранее уже была идентифицирована как классический фуор. Обнаружение айксорной вспышки у фуора подтверждает эволюционную родственность IXor-вспышки с уже известными FUor/EXor-вспышками.

4. Заключение

Основные заключения следующие:

1) Имеется значимый (в 2 порядка величины) «провал» в эруптивных явлениях у молодых звезд: имеются эрупции с длительностью порядка 10^2 (FUor) и 10^0 лет (EXor), нет эрупций с длительностью порядка 10^1 лет.

2) В работе разработаны критерии и проведен поиск «потерянных» эрупций с длительностью порядка 10^1 лет.

3) У звезд IX Ori и V1057 Cyg обнаружены две вспышки с искомой длительностью — вспышки типа IX Ori (IXor или айксор).

4) Основные характеристики IXor-вспышки у V1057 Cyg: вспышка периода «плато» с длительностью 10 лет и энергетикой $3.95 \text{ mag} \times \text{yr}$, которая в 2 раза превышает энергетика типичной EXor-вспышки.

Таким образом, отмеченный выше «провал» между FUor- и EXor-эрупциями заполняется найденными и обсужденными в настоящей работе IXor-эрупциями. Требуется дополнительные наблюдательные и модельные исследования для понимания эволюционных и астрофизических связей между всеми тремя типами эрупций на ранних стадиях звездной эволюции.

Список литературы

1. G. H. Herbig, *ApJ*, **217**, 693, 1977.
2. L. Hartmann and S. J. Kenyon, *ARA&A*, **34**, 207, 1996.
3. G. H. Herbig, P. P. Petrov, and R. Duemmler, *ApJ*, **595**, 384, 2003.
4. G. H. Herbig, *AJ*, **135**, 637, 2008.
5. M. Audard, P. Ábrahám, M. M. Dunham, J. D. Green, et al., *Protostars and Planets VI*, 387–410, 2014.
6. G. H. Herbig and K. R. Bell, *Third Catalog of Emission-Line Stars of the Orion Population : 3 : 1988* (1988).
7. M. A. Ibrahimov, *IBVS*, **4285**, 1996.
8. M. A. Ibrahimov, *IBVS*, **4691**, 1999.
9. E. N. Kopatskaya, E. A. Kolotilov, and A. A. Arkharov, *MNRAS*, **434**, 38, 2013.

Популяционный синтез визуальных двойных звезд

Чулков Д.А., Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Сытов А.Ю.,
Тутуков А.В., Юнгельсон Л.Р.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Построена модель распределения разности блеска компонентов визуальных двойных звезд на основе различных предположений о начальной функции масс.

Population synthesis of visual binary stars

Chulkov D.A., Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Sytov A.Yu., Tutukov
A.V., Yungelson L.R.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Apparent magnitude difference distribution of visual binary is modeled under various assumptions on initial mass function.

1. Введение: наблюдательные данные

Визуальные двойные звезды — гравитационно-связанные звездные системы, компоненты которых разрешаются при оптических наблюдениях. Число каталогизированных объектов превышает сто тысяч [1]. Наблюдаемыми параметрами являются блеск компонентов $V_{1,2}$, угловое разделение между ними ρ и позиционный угол, характеризующий ориентацию системы на небесной сфере. В отдельных случаях известны тригонометрический параллакс, позволяющий определить расстояние r . Орбитальное движение, позволяющее напрямую определить массу системы, известно лишь для 2.5 тысяч двойных [2]. Преимущественно каталогизированы объекты с удобными для наблюдений характеристиками. Мы наблюдаем лишь «вершину айсберга», но пытаемся получить представление обо всем семействе объектов. Популяционный синтез призван смоделировать наблюдательные свойства совокупности объектов в зависимости от различных начальных условий [3]. В данном исследовании мы ставим задачу воспроизвести наблюдаемое распределение по разности блеска компонентов $\Delta V = |V_2 - V_1|$ на основе различных предположений о распределении масс звезд.

Масса звезды m преимущественно определяет ее наблюдаемые характеристики и эволюцию. Статистика распределения звезд по массам служит индикатором процессов звездообразования и является важным параметром, который необходимо учитывать при рассмотрении широкого круга проблем, от образования планет до космологии [4]. Большая часть звезд образуется в составе кратных систем, в связи с чем их вклад нужно принимать во внимание при изучении статистики звездных масс [5].

Создание наблюдательной выборки производилось на основе Вашингтонского каталога двойных звезд (WDS) [1], учет эффектов селекции обсуждается в статьях [6, 7]. В рамках настоящей работы к ансамблю наблюдательных данных применены следующие фильтры: $V_{1,2} < 11.5^m$, $\Delta V < 3^m$, $2'' < \rho < 200''$. У кратных систем выбиралась единственная пара, удовлетворяющая указанным требованиям. Если таких пар несколько, в выборку попадала наиболее яркая. Дополнительно для каждой системы рассчитывается вероятность того, что она является оптической парой, а не гравитационно-связанной системой. Данная величина определяется плотностью звезд поля [8]: чем слабее блеск V_2 и больше ρ , тем выше вероятность. Системы, являющиеся оптическими парами с вероятностью более 1%, из выборки исключаются [9]. После отсева в списке осталось 6803 объектов. Все указанные ограничения применяются как к наблюдательной выборке, так и к призванной ее воспроизвести модели.

2. Моделирование ансамбля двойных звезд

Масса m изолированной одиночной звезды непрерывно убывает в ходе эволюции. Текущее распределение звезд по массам также меняется со временем: в Галактике продолжают происходить процессы звездообразования, в тесных системах происходит обмен вещества между компонентами, старые звезды эволюционируют в компактные остатки. Под начальной функцией масс понимают распределение звезд по массам в момент их попадания на Главную Последовательность [10]. В рамках данной статьи, говоря о массе или ее распределениях, мы будем иметь в виду массу в условный момент образования звезды.

Функция масс $f(m)$ характеризует число звезд dN в заданном интервале масс dm и численно определяется как плотность вероятности $f(m) = \frac{dN}{dm}$ с условием нормировки $\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} f(m) dm = 1$, где m_{\min} и m_{\max} — минимальная и максимальная масса звезд. Для двойной системы необходимо задать массы обоих компонентов, связанные между собой отношением $q = m_2/m_1$, $0 < q < 1$. Что для двойной системы

характеризует функция $f(m)$: индивидуальные массы $m_{1,2}$, или же общую массу системы $m_1 + m_2$? Какую роль играет распределение по отношению масс компонентов $f(q)$ [11]? Эти вопросы остаются открытыми, и в данной работе мы рассматриваем три сценария звездообразования, предложенных в работе [12]:

1. RP (Random pairing). Массы звезд $m_{1,2}$ определяются функцией $f(m)$, они случайным образом группируются в пары, звезда с большей массой становится главным компонентом, $m_1 \geq m_2$.
2. PCP (Primary-constrained pairing). Функции $f(m)$ и $f(q)$ определяют массу главного компонента m_1 и отношение масс звезд q , масса вторичного компонента вычисляется как $m_2 = q * m_1$.
3. SCP (Split-core pairing). Общая масса системы $m = m_1 + m_2$ и q определяются функциями $f(m)$ и $f(q)$, после чего вычисляются индивидуальные массы звезд: $m_1 = m/(1 + q)$ и $m_2 = m - m_1$.

В сценариях PCP и SCP масса звезды $m_{1,2}$ может оказаться меньше минимальной, принимавшейся $m_{\min} = 0.1M_{\odot}$. Такие системы исключаются из дальнейшего рассмотрения.

В литературе предложены различные функциональные формы $f(m)$ и $f(q)$. В рамках настоящего исследования мы рассматриваем лишь два вида $f(m)$:

- I [13, 10]: $f(m) \sim m^{\alpha}, m \geq m_{\min}$
- II [14]: $f(\lg m) \sim \begin{cases} \exp(-\frac{(\lg m - \lg 0.08)^2}{2 \cdot 0.72}), & m_{\min} \leq m < 1M_{\odot} \\ m^{\alpha+1}, & m \geq 1M_{\odot} \end{cases}$

Значения показателя функции α варьировались от -2.8 до -1.3 с шагом 0.5 . В сценариях PCP и SCP мы использовали единственное распределение $f(q)$: однородное [11]. В дальнейшем мы планируем расширить количество моделируемых распределений.

На первом этапе моделирования вычисляются пары масс $m_{1,2}$. Следующим шагом является присвоение этим парам возраста. Считается, что компоненты гравитационно-связанных двойных звезд в подавляющем числе случаев сформировались одновременно из общего протозвездного вещества, так что возраст и металличность звезд в паре одинаковы. Нашу выборку преимущественно составляют молодые звезды с $m > 1M_{\odot}$, в связи с этим мы считаем оправданным предположение о постоянной скорости звездообразования [15].

Мы исследуем невзаимодействующие двойные: предполагается, что эволюция каждого компонента протекает независимо, как у одиночной звезды, обмена масс не происходит. Для вычисления светимости звезды заданной массы, металличности и возраста используются изохроны PARSEC (версия 1.2S) [16], где дискретным значениям массы m и возраста t приведена в соответствие абсолютная звездная величина M в полосе V . В данной работе вычисления проведены для фиксированной металличности $Z = 0.0152$. Расчет изохрон проведен в диапазоне $10^{6.6} < t < 10^{10.13}$ лет с шагом $\Delta(\lg t) = 0.01$. Рассчитанные случайным образом возрасты округлялись до ближайшего значения с известными изохронами. Для расчета блеска звезды конкретной массы использовалась линейная интерполяция. Если возраст системы превышает время жизни массивного компонента, она исключается из выборки.

Результатом второго этапа моделирования становится набор пар звезд с заданными начальными массами $m_{1,2}$, возрастом t и абсолютными звездными величинами $M_{1,2}$. Далее необходимо распределить звезды в пространстве. Нами выбрана двухкомпонентная модель, состоящая из тонкого и толстого диска. Плотность звездного гало в солнечной окрестности оценивается в 0,5% [17], поэтому его вкладом решено пренебречь. Также игнорируется отличие от нуля галактической широты Солнца. Распределение плотности (концентрации) звезд определяется расстоянием проекции звезды на плоскость Галактики до центра $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, расстоянием до Галактического экватора Z и подчиняется экспоненциальному закону $\rho(R, Z) = \rho(R_\odot, Z) \cdot \exp\left(\frac{R_\odot - R}{l} - \frac{Z}{h}\right)$. Параметры тонкого и толстого диска выбраны согласно [17], вертикальная шкала $h_1 = 300$ пк, $h_2 = 900$ пк, радиальная шкала $l_1 = 2600$ пк, $l_2 = 3600$ пк, нормировка плотности в солнечной окрестности $\rho_2/\rho_1 = 0.12$, $R_\odot = 8500$ пк. Распределение по долготе в координатах с точкой отсчета в центре Галактики считается равномерным.

Зная абсолютную звездную величину компонентов $M_{1,2}$ и расстояние r , можно вычислить видимую звездную величину $V = M - 5 + 5 \lg r + A_V$. Мы выполняем грубую оценку вклада поглощения A_V согласно закону косеканса [18]: $A_V = \frac{\alpha \beta}{\sin b} (1 - \exp\left(-\frac{r \sin b}{\beta}\right))$, где $b = |z|/r$ — склонение в галактической системе координат, $\alpha = 0.0016$ пк⁻¹ — поглощение в галактической плоскости, $\beta = 100$ пк — шкала высоты. Величина A_V одинакова для обоих компонентов.

Угловое разделение звезд на небе ρ определяется проекцией линейного расстояния между компонентами на картинную плоскость a

и расстоянием до наблюдателя r , $\rho = a/r$. Мы используем равномерное распределение по логарифму проекции расстояния $f(a) \sim a^{-1}$ в пределах от a_{\min} до a_{\max} [19]. Ограничение сверху определяется произведением максимального углового разделения и расстояния $a_{\max} = \rho_{\max} r_{\max} = 200 \cdot 500 = 100000$ а.е.: более широкие системы не могут попасть в выборку. Ограничение снизу было выбрано в 5 а.е.: столь тесные пары могут преодолеть фильтр по ρ только при $r < 10$ пк, вероятность чего крайне мала.

3. Сравнение наблюдений и модели, результаты

После того, как все наблюдательные параметры определены, мы применяем к смоделированным объектам те же фильтры, обусловленные эффектами селекции, что и к наблюдательным данным. Для сравнения наблюдательной и смоделированной выборки ΔV используется критерий согласия Андерсона-Дарлингга [20].

Таблица 1. Описание в разделе 2.

$f(m)^*$	RP	PCP	SCP
I, $\alpha = -1.3$	—	\pm	+
I, $\alpha = -1.8$	—	—	+
I, $\alpha = -2.3$	+	—	—
I, $\alpha = -2.8$	+	—	—
II, $\alpha = -1.3$	—	+	+
II, $\alpha = -1.8$	—	—	+
II, $\alpha = -2.3$	\pm	—	—
II, $\alpha = -2.8$	+	—	—

Каждый сценарий симулировался 10 раз, определялся параметр p , характеризующий вероятность того, что модельная и наблюдательная выборка статистически независимы. Если p -значение хотя бы раз достигло значения 0.05, мы считаем невозможным отвергнуть гипотезу, что наблюдаемое распределение ΔV сформировано как результат указанного сценария. Эти случаи отмечены знаком «+». Ситуации, когда p -значение всегда было меньше 0.05, но хотя бы в одной симуляции превысило 0.01, мы отметили знаком « \pm ». Наконец, сценарии, при которых во всех симуляциях $p < 0.01$, отмечены знаком «—». Обращаем внимание, что знак «+» следует интерпретировать не как подтверждение сценария, но как невозможность его опровергнуть с помощью проведенных вычислений.

3. Заключение

Распределение по ΔV весьма нечувствительно к заложенным в модель предположениям о $f(m)$. Тем не менее, часть гипотез удалось признать не согласующимися с наблюдениями. Мы рассмотрели лишь

небольшую долю предложенных в литературе $f(m)$ и $f(q)$. Также, дальнейшее направление работы — построение новой выборки на основе данных спутника Gaia [21]. Мы воздержимся от физической интерпретации результатов до окончания работы над ней.

Список литературы

1. B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf, G. G. Douglass, and C. E. Worley, *AJ*, **122**, 3466, 2001.
2. W. I. Hartkopf, B. D. Mason, and C. E. Worley, *AJ*, **122**, 3472, 2001.
3. S. B. Popov and M. E. Prokhorov, *Usp. Fiz. Nauk*, **177**, 1179, 2007.
4. S. S. R. Offner, P. C. Clark, P. Hennebelle, N. Bastian, M. R. Bate, P. F. Hopkins, E. Moraux, and A. P. Whitworth, *Protostars and Planets VI*, 53–75, 2014.
5. P. Kroupa, C. Weidner, J. Pflamm-Altenburg, I. Thies, J. Dabringhausen, M. Marks, and T. Maschberger, *The Stellar and Sub-Stellar Initial Mass Function of Simple and Composite Populations*, 115 (2013).
6. D. Kovaleva, O. Malkov, L. Yungelson, D. Chulkov, and G. M. Yikdem, *Balt. Astron.*, **24**, 367, 2015.
7. D. Kovaleva, O. Malkov, L. Yungelson, and D. Chulkov, *Balt. Astron.*, **25**, 419, 2016.
8. C. W. Allen, *Astrophysical quantities* (1973).
9. A. Poveda, C. Allen, and L. Parrao, *ApJ*, **258**, 589, 1982.
10. J. M. Scalo, *Fundam. Cosmic Phys.*, **11**, 1, 1986.
11. S. P. Goodwin, *MNRAS*, **430**, L6, 2013.
12. M. B. N. Kouwenhoven, A. G. A. Brown, S. P. Goodwin, S. F. Portegies Zwart, and L. Kaper, *A&A*, **493**, 979, 2009.
13. E. E. Salpeter, *ApJ*, **121**, 161, 1955.
14. G. Chabrier, *PASP*, **115**, 763, 2003.
15. L. Chomiuk and M. S. Povich, *AJ*, **142**, 197, 2011.
16. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni, *MNRAS*, **427**, 127, 2012.
17. M. Jurić, Ž. Ivezić, A. Brooks, R. H. Lupton, et al., *ApJ*, **673**, 864, 2008.
18. P. P. Parenago, *Sov. Astron.*, **13**, 3, 1940.
19. A. Poveda and C. Allen, in C. Allen and C. Scarfe, eds., *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, volume 21, 49–57 (2004).
20. T. W. Anderson and D. A. Darling, *Ann. Math. Statist.*, **23**, 193, 1952.
21. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, and C. A. L. Bailer-Jones, *ArXiv e-prints*, 2018.

Функция звездообразования визуально-двойных систем

Юнгельсон Л.Р., Ковалева Д.А., Малков О.Ю.,
Сытов А.Ю., Тутуков А.В., Чулков Д.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассмотрены проблемы и задачи, связанные с определением параметров функции звездообразования двойных систем. Описаны результаты исследования начальных распределений двойных звезд по фундаментальным параметрам путем решения обратной задачи.

Star formation function of visual binary systems

Yungelson L.R., Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Sytov A.Yu.,
Tutukov A.V., Chulkov D.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The tasks and problems involved in determination of parameters of star formation function for binary systems are considered. Results of the study of initial distributions of binary stars over fundamental parameters by solution of an inverse problem are described.

1. Введение

Большинство звезд — компоненты двойных систем. Их взаимодействие в ходе эволюции приводит к формированию объектов, привлекающих особое внимание, например, источников рентгеновского и гамма-излучения, катаклизмических переменных, симбиотических звезд, и к таким феноменам, как взрывам сверхновых звезд типа Ia или вспышкам гравитационно-волнового излучения.

Исследование двойных звезд — неотъемлемая составляющая изучения процесса звездообразования. Одна из фундаментальных задач этих исследований — определение начальных распределений звезд по массам компонентов, большим полуосям орбит (или периодам), эксцентриситетам орбит или комбинациям этих характеристик. Сочетание распределений, характеризующее формирующиеся двойные звезды, мы ниже будем называть функцией звездообразования (ФЗ). ФЗ может служить одним из критериев при выборе моделей звездообразования, см., напр., [1, 2]. ФЗ также важна в популяционном синтезе

для оценки количества объектов или частоты событий с определенными характеристиками, например, частоты взрывов сверхновых звезд типа Ia [3] или слияний нейтронных звезд и (или) черных дыр [4].

Начиная с 1980-х гг., на основании исследований спектрально-двойных, затменно-двойных и визуально-двойных звезд ФЗ обычно представляется в виде произведения распределений по начальной функции масс первичного компонента M_1 , отношения масс компонентов $q = M_2/M_1$, большой полуоси орбиты a , эксцентриситетам орбит e :

$$d^4N \propto f_m(M_1) f_q(q) f_a(a) f_e(e) dM_1 dq da de \text{ год}^{-1}. \quad (1)$$

В популяционном синтезе соотношение (1) нормируется на считающуюся хорошо известной величину, например, частоту формирования белых карликов или массу диска галактики. Функции f_m , f_q , f_a , f_e обычно полагаются независимыми, хотя есть утверждения, что существует связь между орбитальными периодами и q [5]. Данная статья посвящена исследованию ФЗ двойных звезд по данным о визуальных двойных звездах.

2. Статистические данные

Считается, что звездное население поля Галактики формируется в результате распада молодых звездных групп (скоплений и ассоциаций) [6, 7, 8]. Если предположить, что свойства начальной популяции двойных звезд (НПДЗ) не зависят от характеристик отдельных групп (см. обсуждение в [9]), исследование статистических характеристик двойных звезд поля может позволить их определить.

Статистические исследования двойных звезд в последние годы существенно продвинулись благодаря прогрессу в области наблюдений. Следует отметить фундаментальные работы Рагавана и др. [10] и Токовина [11, 12], исследовавших кратность звезд солнечного типа в выборках звезд, которые можно считать полными в окрестности Солнца, и Дюшена и Крауса [5], объединивших данные о свойствах двойных и кратных звезд в широком диапазоне физических и наблюдательных характеристик с целью выявления общих тенденций. Анализу данных по наблюдаемым двойным звездам всех типов будет способствовать недавно разработанная База данных двойных звезд [13].

Основная сложность в статистических исследованиях связана с устранением эффектов наблюдательной селекции (см., напр., детальное обсуждение в [11, 14]). Кроме того, двойные звезды поля являются совокупностью объектов различного возраста, так что ее статистиче-

ские свойства заведомо отличаются от характеристик НПДЗ. Исследования групп звезд одинакового возраста в молодых скоплениях и ассоциациях недостаточно информативны [5]. Поэтому использование метода популяционного синтеза может оказаться ключевым инструментом для восстановления свойств НПДЗ. Идея симуляции популяции двойных и кратных звезд, с учетом наблюдательных ограничений и эволюционных эффектов и дальнейшего сравнения со статистическими характеристиками двойных звезд впервые была реализована Поповой и др. [15] при исследовании спектрально-двойных звезд и Эгглтоном [16] для исследования кратности звезд поля.

3. Определение ФЗ двойных звезд методом решения обратной задачи

Мы рассматриваем проблему определения параметров функции звездообразования двойных звезд f_M , f_q , f_a и f_e (фундаментальных параметров) как решение обратной задачи, исходя из распределений двойных звезд по наблюдаемым характеристикам. Как свойственно обратным задачам, она некорректна и может решаться только при условии наложения дополнительных ограничений на свойства искомым распределений. В этом качестве мы опробовали существующие гипотезы о виде начальных распределений двойных звезд по фундаментальным параметрам, выявленные ранее [5, 10, 11, 14, 15, 17].

В качестве исходного набора наблюдательных данных использована выборка двойных звезд V класса светимости из каталога визуальных двойных звезд WDS [18], находящихся в пределах 500 пк от Солнца (на основании тригонометрических параллаксов Gaia DR1 TGAS [19], дополненных параллаксами Hipparcos, учитывая неполноту DR1). Для этой выборки, очищенной нами от оптических двойных и ошибочных данных, исследованы эффекты наблюдательной селекции и выделена область параметров, свободная от наблюдательной неполноты: угловое разделение компонентов $2 \leq \rho \leq 200''$, блеск вторичного компонента $V_2 \leq 11.0^m$ и разность блеска $\Delta V = V_2 - V_1 \leq 3.0^m$ [20, 21]. Результирующая выборка содержит данные о 1546 визуальных парах.

Используя метод Монте-Карло, мы построили модели ансамбля визуально-двойных звезд с упомянутыми выше ограничениями по наблюдаемым характеристикам для различных комбинаций распределений по фундаментальным параметрам: четырех сценариев образования двойных звезд (pairing scenarios, PS [1]), двух вариантов начальной функции масс (Солпитера [22] и Кроуны [23]) для M_1 или

$M_t = M_1 + M_2$, в зависимости от PS, трех f_q (для PS, которые допускают q как свободный параметр), трех вариантов f_a и трех f_e . Всего рассмотрено 144 комбинации начальных распределений. Для каждой из этих комбинаций смоделирована околосолнечная область в пределах 500 пк, заполненная исключительно двойными звездами, сформировавшимися по использованным сценариям. При этом звезды считались одиночными, если имели компонент с массой $\leq 0.08M_\odot$. Существование кратных звезд мы на этом этапе игнорировали. Плотность звезд нормирована на определенную по Gaia DR1 [24]. Был принят барометрический закон распределения звезд по z . Радиальный градиент распределения звезд и поглощение не учитывались, т. к. рассматривалась близкая окрестность Солнца. Скорость звездообразования на протяжении 14 млрд. лет принималась равной $15 e^{-t/\tau}$, где $\tau = 7$ млрд. лет [25]. Эволюция звезд описывалась приближенными формулами Харли и др. [26]. «Наблюдаемая» модельная выборка определялась сформулированными выше критериями отбора по $V_1, \Delta V, \rho$.

Модельная выборка считалась удовлетворительной, если численность звезд в ней была близка к наблюдаемой. На рис. 1 представлены распределения по $V_1, V_2, \Delta V, \rho$ для наблюдательной выборки и для двух вариантов синтетических распределений для различных комбинаций характеристик НПДЗ, наилучшим образом согласующихся с наблюдениями. Это два сценария формирования двойных звезд — Random Pairing и Total Primary Pairing (соответственно, M_1, M_2 или $M_t, M_1 < M_t$ выбираются случайным образом из заданной НФМ), НФМ Кроуны и $f_a \propto 1/a$.

4. Заключение

Результаты моделирования не позволяют выбрать «лучшие» начальные распределения по каждому параметру, но можно выбрать предпочтительные комбинации распределений НПДЗ. Принятое распределение f_e на результаты влияет существенно слабее.

Чтобы сделать более определенные выводы о статистических свойствах НПДЗ, требуется сопоставить результаты моделирования с наблюдательными данными о других типах двойных звезд, с иными типичными характеристиками, чем у визуальных двойных, что позволит более полно исследовать пространство параметров двойных звезд.

Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28. В исследовании использованы ресурсы Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и база библиографических данных ADS.

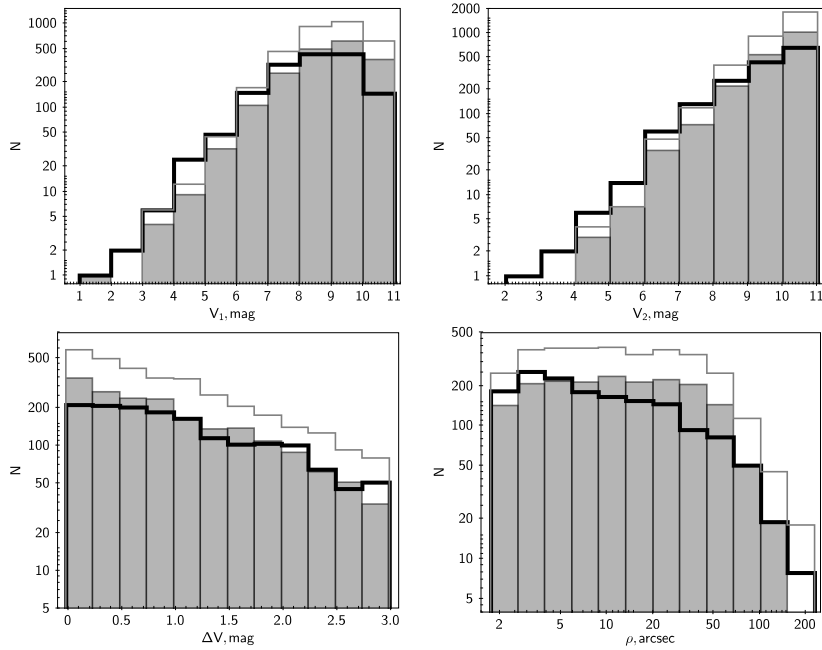


Рис. 1. Распределения V_1 , V_2 , ΔV , ρ в наблюдательной выборке (жирная линия) и в моделях с f_m Кроупы, $f_a \propto 1/a$ и сценариями образования Random pairing (серые гистограммы) и Total primary pairing (тонкие линии).

Список литературы

1. M. B. N. Kouwenhoven, A. G. A. Brown, S. P. Goodwin, S. F. Portegies Zwart, and L. Kaper, *A&A*, **493**, 979, 2009.
2. M. R. Bate, in S. M. Rucinski, G. Torres, and M. Zejda, eds., *Living Together: Planets, Host Stars and Binaries*, *ASP Conf. Ser.*, volume 496, 37 (2015).
3. I. Iben, Jr. and A. V. Tutukov, *ApJS*, **54**, 335, 1984.
4. A. V. Tutukov and L. R. Yungelson, *MNRAS*, **260**, 675, 1993.
5. G. Duchêne and A. Kraus, *ARA&A*, **51**, 269, 2013.
6. D. Belloni, P. Kroupa, H. J. Rocha-Pinto, and M. Giersz, *MNRAS*, **474**, 3740, 2018.
7. J. L. Ward and J. M. D. Kruijssen, *MNRAS*, **475**, 5659, 2018.
8. M. Marks and P. Kroupa, *MNRAS*, **417**, 1702, 2011.
9. D. Belloni, A. Askar, M. Giersz, P. Kroupa, and H. J. Rocha-Pinto, *MNRAS*, **471**, 2812, 2017.

10. D. Raghavan, H. A. McAlister, T. J. Henry, D. W. Latham, et al., *ApJS*, **190**, 1, 2010.
11. A. Tokovinin, *AJ*, **147**, 86, 2014.
12. A. Tokovinin, *AJ*, **147**, 87, 2014.
13. D. Kovaleva, P. Kaygorodov, O. Malkov, B. Debray, and E. Oblak, *Astronomy and Computing*, **11**, 119, 2015.
14. S. Vereshchagin, A. Tutukov, L. Yungelson, Z. Kraicheva, and E. Popova, *Ap&SS*, **142**, 245, 1988.
15. E. I. Popova, A. V. Tutukov, and L. R. Yungelson, *Ap&SS*, **88**, 55, 1982.
16. P. P. Eggleton, *MNRAS*, **399**, 1471, 2009.
17. A. Duquennoy and M. Mayor, *A&A*, **248**, 485, 1991.
18. B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf, G. G. Douglass, and C. E. Worley, *VizieR Online Data Catalog*, **1**, 2016.
19. L. Lindegren, U. Lammers, U. Bastian, J. Hernández, et al., *A&A*, **595**, A4, 2016.
20. D. Kovaleva, O. Malkov, L. Yungelson, D. Chulkov, and G. M. Yikdem, *Balt. Astron.*, **24**, 367, 2015.
21. D. Kovaleva, O. Malkov, L. Yungelson, and D. Chulkov, *Balt. Astron.*, **25**, 419, 2016.
22. E. E. Salpeter, *ApJ*, **121**, 161, 1955.
23. P. Kroupa, *MNRAS*, **322**, 231, 2001.
24. J. Bovy, *MNRAS*, **470**, 1360, 2017.
25. G. Nelemans, L. R. Yungelson, S. F. Portegies Zwart, and F. Verbunt, *A&A*, **365**, 491, 2001.
26. J. R. Hurley, O. R. Pols, and C. A. Tout, *MNRAS*, **315**, 543, 2000.

Моделирование функции звздообразования двойных систем

Малков О.Ю., Сытов А.Ю., Юнгельсон Л.Р.,
Ковалева Д.А., Тутуков А.В., Чулков Д.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье описаны принципы моделирования распределений начальной популяции двойных звезд по характеристикам.

Modeling star formation function of binary systems

Malkov O.Yu., Sytov A.Yu., Yungelson L.R., Kovaleva D.A.,
Tutukov A.V., Chulkov D.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The article deals with principles of modelling of initial distributions of binary star population over characteristics.

1. Введение

Для решения многих астрофизических задач важно понимать, каковы свойства рождающихся двойных звезд, как распределены массы их компонентов, какие параметры орбиты характерны для молодых двойных. Эти распределения связаны с характеристиками процесса звездообразования, а в перспективе определяют, например, частоту вспышек сверхновых Ia и гравитационных всплесков. Комплекс начальных распределений рождающихся двойных звезд по фундаментальным параметрам называют функцией звездообразования (ФЗ) двойных звезд. В простейшем случае ФЗ представляется в виде произведения распределений образующихся двойных звезд по набору начальных параметров, например, по начальной функции масс первичного компонента M_1 , отношению масс компонентов $q = M_2/M_1$, большой полуоси a и эксцентриситету e орбиты [1].

Представления о виде начальных распределений двойных звезд по параметрам, как правило, основываются на наблюдательных статистических исследованиях различных выборок двойных звезд. В силу сложности учета эффектов неполноты и наблюдательной селекции [2, 3], а также в результате эволюционных изменений характеристик

части двойных, существует набор популярных гипотез в отношении практически каждого из таких распределений.

Так, для начального распределения двойных по большой полуоси орбиты a конкурирующими являются гипотезы о логнормальном распределении [4, 5, 2] и степенном, в особенности логарифмически плоском (при показателе степени -1) распределении [6, 7, 8, 9]. Обсуждаемые гипотезы для начального распределения двойных по эксцентриситетам включают «тепловое» распределение, предложенное Амбарцумяном [10], «колоколообразное» [4], равномерное [5], степенное (с меньшим показателем степени, чем у теплового) [11]. Подробное исследование вопроса о том, какие функции массы двойной системы и/или ее компонентов могут являться фундаментальными, и к каким результатам при моделировании процесса звездообразования это приводит, было предпринято Ковенхофеном и др. [12]. Было разработано множество сценариев образования двойной (pairing scenarios, PS), в которых разными законами определяются массы компонентов, и/или масса системы, и/или отношение масс компонентов. В указанных PS фигурирует начальная функция масс одиночных звезд (НФМ), первое выражение для вида которой было предложено Солпитером [13], а в настоящее время предпочтительной, как правило, считается НФМ Кроуны [14]. Знание распределения двойных по отношению масс компонентов q чрезвычайно важно для изучения различных наблюдательных распределений MS и preMS звезд [15, 16].

Чтобы восстановить начальный вид распределений двойных звезд по характеристикам, получив таким образом ФЗ, мы применили подход моделирования рождения и эволюции популяции двойных звезд в различных предположениях о начальных распределениях (Юнгельсон и др., этот сборник). Для этой цели были разработаны, в частности, методы генерации начальных распределений популяции двойных по параметрам. Их описанию и посвящена настоящая статья, в которой изложены принципы генерации случайной величины с заданным законом распределения. Общие соображения приводятся в разделе 2. Законы распределения, использованные для генерации больших полуосей и эксцентриситетов орбит, а также скорости звездообразования и масс компонентов, обсуждаются в последующих разделах: постоянная, линейная, степенная и экспоненциальная функции описаны в разделах 3, 4, 5, 6, соответственно. Раздел 7 посвящен пространственному распределению систем. В разделе 8 дано заключение.

2. Общий случай

Пусть задана функция плотности вероятности $f(x)$, а также x_{\min} и x_{\max} — минимальное и максимальное значения аргумента. Из условия нормировки

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} kf(x)dx = 1 \quad (1)$$

определяется коэффициент k . Затем вычисляется интегральный закон распределения вероятности

$$F(x) = \int kf(x)dx \equiv \Phi(x) + C, \quad (2)$$

где Φ — первообразная (antiderivative) функции $f(x)$, а константа C вычисляется из начального условия $F(x_{\min}) = 0$. По определению функция $F(x)$ может принимать значения от 0 до 1. Именно это значение, $R \equiv F(x)$, генерируется случайным образом, равновероятно, в диапазоне $[0,1]$ (например, в языке C это: $R=\text{rand}()/\text{randmax}$);

Искомая величина x вычисляется из случайно сгенерированной R обращением функции $\Phi(x)$:

$$x(F) = \Phi^{-1}(R - C), \quad (3)$$

и, следовательно, ее дифференциальное распределение (т.е., плотность вероятности величины x) описывается функцией $f(x)$. Рассмотрим несколько часто используемых функций.

3. Постоянная функция $f(x) = k$

Из условия

$$1 = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} kdx = k(x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

получаем k :

$$k = 1/(x_{\max} - x_{\min}). \quad (5)$$

Интегральный закон распределения вероятности

$$F(x) = \int kdx = kx + C. \quad (6)$$

Из условия $F(x_{\min}) = 0$ следует, что

$$C = -kx_{\min} = -\frac{x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7)$$

и

$$F(x) = k(x - x_{\min}) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (8)$$

Вычисление искомой величины x из случайно разыгранного значения R функции $F(x)$ производится в соответствии с выражением:

$$x = R/k + x_{\min} = R(x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}. \quad (9)$$

В частном случае, когда $x_{\max} = 1$ (используется для распределений по отношению масс компонентов q с фиксированным $q_{\min} > 0$):

$$x = R(1 - x_{\min}) + x_{\min}. \quad (10)$$

В частном случае, когда $x_{\min} = 0$ и $x_{\max} = 1$ (используется для распределений по эксцентриситету e в диапазоне $[0,1]$): $k = 1$, $F(x) = x$, и

$$x = R. \quad (11)$$

4. Линейная функция $f(x) \sim x$

Из условия

$$1 = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} kx dx = k \left(\frac{x_{\max}^2 - x_{\min}^2}{2} \right) \quad (12)$$

вычисляется нормировочный коэффициент k :

$$k = \frac{2}{x_{\max}^2 - x_{\min}^2}. \quad (13)$$

Интегральный закон распределения вероятности

$$F(x) = \int kx dx = k \frac{x^2}{2} + C. \quad (14)$$

Из условия $F(x_{\min}) = 0$ следует, что

$$C = -k \frac{x_{\min}^2}{2} \quad (15)$$

и

$$F(x) = \frac{k}{2} (x^2 - x_{\min}^2). \quad (16)$$

Вычисление искомой величины x из случайно разыгранного значения R функции $F(x)$ производится в соответствии с выражением:

$$x = \sqrt{\frac{2R}{k} + x_{\min}^2} = \sqrt{R(x_{\max}^2 - x_{\min}^2) + x_{\min}^2}. \quad (17)$$

В частном случае, когда $x_{\max} = 1$:

$$x = \sqrt{R(1 - x_{\min}^2) + x_{\min}^2}. \quad (18)$$

В частном случае, когда $x_{\min} = 0$ и $x_{\max} = 1$: $k = 2$, $C = 0$, $F(x) = x^2$, и

$$x = \sqrt{R}. \quad (19)$$

5. Степенная функция $f(x) \sim x^\gamma$

Проблемы моделирования кусочно степенной функции (которое требуется, например, для генерации масс компонентов, распределенных в соответствии с НФМ Кroupy [14]) здесь в деталях не рассматриваются, но сводятся, в принципе, к нижеизложенным алгоритмам.

5.1. $\gamma \neq -1$

Из условия

$$1 = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} kx^\gamma dx = \frac{k}{\beta} (x_{\max}^\beta - x_{\min}^\beta) \quad (20)$$

(здесь $\beta = \gamma + 1$) вычисляется нормировочный коэффициент k :

$$k = \frac{\beta}{x_{\max}^\beta - x_{\min}^\beta}. \quad (21)$$

Интегральный закон распределения вероятности

$$F(x) = \int kx^\gamma dx = \frac{k}{\beta} x^\beta + C = \frac{x^\beta}{x_{\max}^\beta - x_{\min}^\beta} + C. \quad (22)$$

Из условия $F(x_{\min}) = 0$ следует, что

$$C = -\frac{x_{\min}^\beta}{x_{\max}^\beta - x_{\min}^\beta} \quad (23)$$

и

$$F(x) = \frac{x^\beta - x_{\min}^\beta}{x_{\max}^\beta - x_{\min}^\beta}. \quad (24)$$

Вычисление искомой величины x из случайно разыгранного значения R функции $F(x)$ производится в соответствии с выражением:

$$x = \left(R(x_{\max}^\beta - x_{\min}^\beta) + x_{\min}^\beta \right)^{1/\beta}. \quad (25)$$

В частном случае, когда $x_{\max} = 1$:

$$x = (R(1 - x_{\min}^2) + x_{\min}^2)^{1/\beta}. \quad (26)$$

В частном случае, когда $x_{\min} = 0$ и $x_{\max} = 1$: $k = \beta$, $C = 0$, $F(x) = x^\beta$ и

$$x = R^{1/\beta}, \quad (27)$$

при этом должно выполняться условие $\gamma \geq 0$, иначе функция плотности вероятности $f(x) \rightarrow \infty$ при $x \rightarrow 0$.

5.2. $\gamma = -1$

Здесь и ниже опущен знак модуля в выражении $\ln |x|$, поскольку мы имеем дело только с положительными значениями аргумента x . Из условия

$$1 = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} kx^{-1} dx = k (\ln x_{\max} - \ln x_{\min}) \quad (28)$$

вычисляется нормировочный коэффициент k :

$$k = (\ln x_{\max} - \ln x_{\min})^{-1}. \quad (29)$$

Интегральный закон распределения вероятности

$$F(x) = \int kx^{-1} dx = k \ln x + C = \frac{\ln x}{\ln x_{\max} - \ln x_{\min}} + C. \quad (30)$$

Из условия $F(x_{\min}) = 0$ следует, что

$$C = -\frac{\ln x_{\min}}{\ln x_{\max} - \ln x_{\min}} \quad (31)$$

и

$$F(x) = \frac{\ln x - \ln x_{\min}}{\ln x_{\max} - \ln x_{\min}}. \quad (32)$$

Вычисление искомой величины x из случайно разыгранного значения R функции $F(x)$ производится в соответствии с выражением:

$$x = e^{R(\ln x_{\max} - \ln x_{\min}) + \ln x_{\min}}. \quad (33)$$

В частном случае, когда $x_{\max} = 1$:

$$x = e^{(1-R) \ln x_{\min}}. \quad (34)$$

Частный случай, когда $x_{\min} = 0$, здесь не рассматривается, поскольку функция плотности вероятности $f(x) \rightarrow \infty$ при $x \rightarrow 0$.

6. Экспоненциальная функция $f(x) \sim e^{-x/\tau}$

Из условия

$$1 = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} k e^{-x/\tau} dx = -k\tau E, \quad (35)$$

где

$$E \equiv e^{-x_{\max}/\tau} - e^{-x_{\min}/\tau}, \quad (36)$$

вычисляется нормировочный коэффициент k :

$$k = -\frac{1}{\tau E}. \quad (37)$$

Интегральный закон распределения вероятности

$$F(x) = \int k e^{-x/\tau} dx = -k\tau e^{-x/\tau} + C = \frac{e^{-x/\tau}}{E} + C. \quad (38)$$

Из условия $F(x_{\min}) = 0$ следует, что

$$C = -\frac{e^{-x_{\min}/\tau}}{E} \quad (39)$$

и

$$F(x) = \frac{e^{-x/\tau} - e^{-x_{\min}/\tau}}{E}. \quad (40)$$

Вычисление искомой величины x из случайно разыгранного значения R функции $F(x)$ производится в соответствии с выражением:

$$x = -\tau \ln(RE + e^{-x_{\min}/\tau}). \quad (41)$$

В частном случае, когда $x_{\min} = 0$ (используется для распределения по времени рождения звезд):

$$E = e^{-x_{\max}/\tau} - 1 \quad (42)$$

и

$$x = -\tau \ln(R(e^{-x_{\max}/\tau} - 1) + 1). \quad (43)$$

7. О распределении звезд по расстояниям

Здесь рассматриваются различные распределения звезд в пространстве, используемые для вычисления расстояний d . Простейший случай — равномерное распределение звезд в пространстве ($f(d) \sim d^2$). Более сложный подход — равномерное распределение звезд в плоскости Галактики ($f(r) \sim r$) и барометрическое распределение плотности звезд с удалением от плоскости Галактики ($f(z) \sim e^{-\frac{z}{H}}$), при этом расстояние вычисляется согласно $d = \sqrt{r^2 + z^2}$.

7.1. Равномерное распределение в пространстве

В этом приближении количество звезд N , заключенных в сфере с радиусом d_{\max} , $N \sim d^3$, а дифференциальное распределение (плотность вероятности) $\sim d^2$:

$$f(d) = kd^2. \quad (44)$$

Из условия нормировки

$$1 = \int_0^{d_{\max}} kd^2 dd = k \frac{d_{\max}^3}{3} \quad (45)$$

следует

$$k = \frac{3}{d_{\max}^3}. \quad (46)$$

Интегральный закон вероятности

$$F(d) = \int \frac{3}{d_{\max}^3} d^2 dd = \frac{d^3}{d_{\max}^3} + C, \quad (47)$$

и из граничного условия $F(0) = 0$ следует, что $C = 0$. Вычисление расстояния d из случайно разыгранного значения R функции $F(d)$ производится в соответствии с:

$$d = d_{\max} R^{1/3}. \quad (48)$$

7.2. Равномерное распределение в плоскости Галактики

В этом приближении количество звезд N , заключенных в диске с радиусом r_{\max} , $N \sim r^2$, а дифференциальное распределение (плотность вероятности) $\sim r$. Здесь мы пренебрегаем радиальным градиентом плотности. Аналогично изложенному в предыдущем разделе:

$$f(r) = kr. \quad (49)$$

Из условия нормировки

$$1 = \int_0^{r_{\max}} kr dr = k \frac{r_{\max}^2}{2} \quad (50)$$

следует

$$k = \frac{2}{r_{\max}^2}. \quad (51)$$

Интегральный закон вероятности

$$F(r) = \int \frac{2}{r_{\max}^2} r dr = \frac{r^2}{r_{\max}^2} + C, \quad (52)$$

и из граничного условия $F(0) = 0$ следует, что $C = 0$. Вычисление расстояния r из случайно разыгранного значения R функции $F(r)$ производится в соответствии с:

$$r = r_{\max} \sqrt{R}. \quad (53)$$

7.3. Барометрическое распределение

Здесь предполагается, что плотность звезд падает экспоненциально с удалением от плоскости Галактики. Наблюдатель располагается в плоскости Галактики. Тогда плотность вероятности:

$$f(z) = ke^{-\frac{z}{H}}, \quad (54)$$

где H — высота однородного слоя. Из условия нормировки

$$1 = \int_0^\infty ke^{-\frac{|z|}{H}} dz = -kH(e^{-\frac{\infty}{H}} - e^{\frac{0}{H}}) = kH \quad (55)$$

получаем

$$k = \frac{1}{H}. \quad (56)$$

Интегральный закон вероятности

$$F(z) = \int \frac{1}{H} e^{-\frac{|z|}{H}} dz = -e^{-\frac{|z|}{H}} + C, \quad (57)$$

и из граничного условия $F(0) = 0$ следует, что $C = 1$. Вычисление расстояния от плоскости Галактики z из случайно разыгранного значения R функции $F(z)$ производится в соответствии с:

$$z = -H \ln(1 - R). \quad (58)$$

8. Заключение

В статье кратко описаны принципы моделирования распределений начальной популяции двойных звезд по параметрам. Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28. Авторы также благодарят МСЦ РАН.

Список литературы

1. A. G. Masevich and A. V. Tutukov, *Evolutsiia zvezd: teoriia i nabludeniia* (1988).
2. A. Tokovinin, *AJ*, **147**, 86, 2014.
3. S. Vereshchagin, A. Tutukov, L. Iungelson, Z. Kraicheva, and E. Popova, *Ap&SS*, **142**, 245, 1988.
4. A. Duquennoy and M. Mayor, *A&A*, **248**, 485, 1991.
5. D. Raghavan, H. A. McAlister, T. J. Henry, D. W. Latham, et al., *ApJS*, **190**, 1, 2010.
6. A. Poveda, C. Allen, and A. Hernández-Alcántara, in W. I. Hartkopf, P. Harmanec, and E. F. Guinan, eds., *Binary Stars as Critical Tools for Tests in Contemporary Astrophysics, IAU Symposium*, volume 240, 417–425 (2007).
7. A. Tokovinin, *MNRAS*, **468**, 3461, 2017.
8. G. Duchêne and A. Kraus, *ARA&A*, **51**, 269, 2013.
9. A. Poveda and C. Allen, in C. Allen and C. Scarfe, eds., *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series*, volume 21, 49–57 (2004).
10. V. Ambartsumian, *Astronomicheskij Zhurnal*, **14**, 207, 1937.
11. A. Tokovinin and O. Kiyeva, *MNRAS*, **456**, 2070, 2016.
12. M. B. N. Kouwenhoven, A. G. A. Brown, S. P. Goodwin, S. F. Portegies Zwart, and L. Kaper, *A&A*, **493**, 979, 2009.
13. E. E. Salpeter, *ApJ*, **121**, 161, 1955.
14. P. Kroupa, *MNRAS*, **322**, 231, 2001.
15. A. E. Piskunov and O. Y. Malkov, *A&A*, **247**, 87, 1991.
16. O. Malkov, A. Piskunov, and H. Zinnecker, *A&A*, **338**, 452, 1998.

Роль магнитного звездного ветра в эволюции тесных двойных звезд

Тутуков А.В., Ковалева Д.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассмотрена роль магнитного звездного ветра (МЗВ) в эволюции тесной двойной звезды, один из компонентов которой является звездой главной последовательности с массой $0.3M_{\odot} - 1.4M_{\odot}$. Звезды таких масс имеют глубокие конвективные оболочки при наличии радиативного ядра, что является, вероятно, условием эффективного торможения вращения из-за МЗВ.

Role of magnetic stellar wind in evolution of close binary stars

Tutukov A.V., Kovaleva D.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The evolution of close binaries with masses of main components between $0.3M_{\odot} - 1.4M_{\odot}$ due to influence of magnetic stellar wind (MSW) is discussed. Main sequence stars of such masses have convective envelopes and radiative nuclei, which is probably a condition of efficient MSW rotation braking.

1. Введение

Вращение — неотъемлемое свойство звезд, отражающее условия их образования и эволюции. Коллапс исходных вращающихся газо-пылевых облаков предопределяет высокие скорости осевого вращения молодых звезд главной последовательности (ГП). Однако звезды с массами, близкими к $1M_{\odot}$, заметно тормозятся с возрастом. Количественное выражение для такого торможения предложено Скуманичем [1]: $v_e \approx 10^{14}t^{-1/2}$ см/с $\approx \frac{180}{t_6^{1/2}}$ км/с, где t — время в секундах, а t_6 — в млн. лет [2, 3]. Диапазон масс звезд, для которых справедливо это соотношение: $0.3 - 1.4M_{\odot}$ [4], — соответствует массам звезд ГП, обладающих глубокой конвективной оболочкой и радиативным ядром [2, 3, 4, 5].

Причины появления сильного магнитного поля у звезд ГП с указанными массами остаются неясными [6]. Движение конвективных элементов оболочки этих звезд генерирует сильный МЗВ, с которым и связывается торможение вращения. Не исключено, что реликтовое

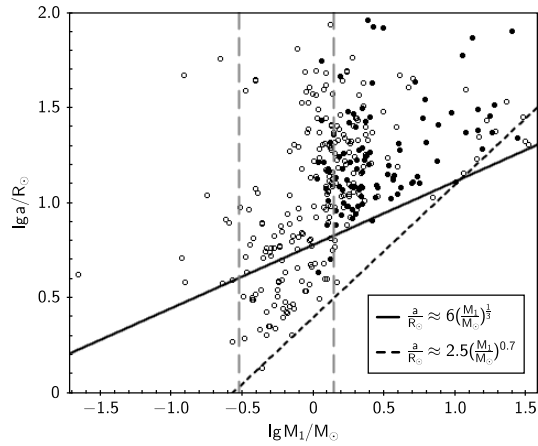


Рис. 1. Диаграмма «большая полуось орбиты — масса главного компонента» для разделенных двойных звезд с компонентами на ГП. Яркие главные компоненты ($V_1 < 8.5^m$) обозначены черными кружками. Характерные ошибки соответствуют размеру значков на диаграмме.

магнитное поле сохраняется только в радиативных ядрах этих звезд, а конвективная оболочка, погружаясь в ходе эволюции этих звезд в радиативное ядро, только усиливает его [7]. В отсутствие радиативного ядра для звезд с массами, меньшими $\sim 0.3M_\odot$, эффективность МЗВ существенно падает, что и может объяснить их быстрое вращение [4].

Большинство звезд являются двойными. В тесных двойных системах (ТДС) угловое вращение компонентов ГП с глубокими конвективными оболочками в силу приливных эффектов должно быть синхронизовано с их орбитальным вращением. Это обстоятельство превращает МЗВ в важный эволюционный фактор для ТДС, где один из компонентов является звездой ГП с массой $0.3 - 1.4M_\odot$. Настоящая работа посвящена изучению роли МЗВ в эволюции таких тесных двойных звезд.

2. Роль МЗВ в образовании звезд типа W UMa

В отсутствие надежной теории магнитного звездного ветра мы опираемся при оценке эффективности потери за счет МЗВ углового момента системы на эмпирическое соотношение Скуманича [1]. При этом делается ряд упрощающих предположений [7, 8]. Это позволяет оце-

нить [7] характерное время потери углового момента ТДС τ_{MSW} как $\tau_{\text{MSW}} \approx 3 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{a}{R_{\odot}}\right)^5 \frac{M_1}{M_{\odot}} \cdot \left(\frac{R_{\odot}}{R_2}\right)^4 \left(\frac{M_{\odot}}{M_1+M_2}\right)^2$ лет, где a — большая полуось орбиты системы, M_2 — масса звезды, обладающей МЗВ, M_1 — масса ее спутника. Определим последнее время потери углового момента для полуразделенных систем, где компонент с массой M_2 заполняет свою полость Роша: $\tau_{\text{MSW}} \approx 3 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{M_1}{M_{\odot}}\right)^{8/3} \left(\frac{M_{\odot}}{M_2}\right)^{2/3} \left(\frac{M_{\odot}}{M_1+M_2}\right)^2$ лет. Отсюда следует, что МЗВ донора в полуразделенных тесных двойных системах с компонентами солнечных масс имеет характерное время эволюции много короче ядерной шкалы времени донора ($\sim 10^{10}$ лет). Это означает, что МЗВ может быть ведущим фактором эволюции орбит таких систем.

Анализ наблюдаемых распределений ТДС с компонентами — звездами ГП — в плоскости $a - M_1$ [4] позволил установить, что в силу ограничения размеров молодых звезд, начальные большие полуоси орбит ограничены снизу соотношением $\frac{a_0}{R_{\odot}} \gtrsim 6 \left(\frac{M_1}{M_{\odot}}\right)^{1/3}$. Теперь можно оценить условия сближения одинаковых компонентов солнечной массы таких систем за время их жизни. Разделенные тесные двойные звезды, состоящие из двух одинаковых компонентов ГП с массой M , могут стать контактными за счет МЗВ, только если их начальные большие полуоси подчиняются условию [7] $\frac{a_0}{R_{\odot}} \lesssim 10 \frac{M}{M_{\odot}}$. Это значит, что только ТДС с $\Delta \lg \frac{a}{R_{\odot}} \approx 0.2$ способны превратиться со временем в контактные системы типа W UMa [9].

На рис. 1 представлена диаграмма «большая полуось орбиты — масса главного компонента» для разделенных двойных звезд с компонентами на ГП, для которых имеются высокоточные (лучше 10%) определения масс прямыми методами. Используются данные о затменно-двойных звездах с линиями обоих компонентов в спектре из [10, 11], а также (для маломассивных систем) из оригинальных работ последних лет, посвященных поискам спектральной двойственности у затменно-двойных звезд, обнаруживаемых в ходе фотометрических обзоров (ASAS, OGLE, WFCAM, NSVS, и др.) и целенаправленных высокоточных астрометрических исследований орбитальных и разрешенных спектральных маломассивных двойных звезд.

Рис. 1 демонстрирует, что только ТДС с массами компонентов в диапазоне примерно $0.3 - 1.4 M_{\odot}$ могут эволюционировать до контакта под влиянием МЗВ. ТДС с полностью конвективными компонентами ГП и с массами, меньшими $\sim 0.3 M_{\odot}$, или с радиативными оболочками при массах компонентов выше $\sim 1.4 M_{\odot}$, лишены возможности

активной потери углового момента и остаются при $a/R_\odot \gtrsim 6M/M_\odot$. Независимая оценка начальных масс звезд типа W UMa [12] приводит к значениям в диапазоне $0.2 - 1.5M_\odot$, подтверждая вероятную роль МЗВ в их формировании.

Эволюция звезд на контактной стадии систем типа W UMa заканчивается слиянием компонентов и образованием в итоге т.н. «голубых бродяг», продолжающих главную последовательность старых скоплений [9]. События, сопровождающие слияние компонентов систем типа W UMa, достаточно редки (~ 0.04 в год в Галактике). Новый класс эруптивных явлений с $L \sim 10^{10}L_\odot$ в М31 и в других галактиках может быть связан со слиянием компонентов предельно тесных двойных звезд [13, 14].

3. Катаклизмические двойные звезды и МЗВ

Другой классической проблемой, для решения которой привлекается МЗВ, является проблема эволюции катаклизмических двойных систем. В частности, именно связанное с МЗВ объяснение было предложено [4] для известной проблемы дефицита наблюдаемых катаклизмических систем с периодами обращения 2–3 часа [15, 9].

Необходимая для развития МЗВ «компактность» ($a \gtrsim 10R_\odot$) предкатаклизмических звезд и, вероятно, предшественников рентгеновских двойных с донорами малой массы достигается на фазе с общей оболочкой системы [4], после чего возникает система, состоящая из будущего донора — звезды ГП с массой $0.1 - 1.4M_\odot$, и вырожденного карлика или, в случае рентгеновской системы, нейтронной звезды. Уравнение для времени потери углового момента при условии заполнения донором — звездой ГП — своей полости Роша ($a = 2.5(M_1/M_\odot)^{1/3}(M_2/M_\odot)^{1/3}$) позволяет оценить характерное время эволюции такой системы за счет МЗВ донора. Сравнивая это время с тепловым временем донора, найдем, что в ходе эволюции системы при $M_2/M_\odot \lesssim 0.4$ донор катаклизмической системы потеряет тепловое равновесие [16]. С исчезновением радиативного ядра при $M_2 \approx 0.3M_\odot$ МЗВ выключается или существенно ослабевает. Донор при этом сжимается к равновесному радиусу и теряет контакт с полостью Роша. В итоге, система при орбитальном периоде ~ 3 часа становится разделенной. Контакт с полостью Роша донором восстанавливается только по достижении системой орбитального периода ~ 2 часов [4], и катаклизмические системы с периодами, меньшими 2 часов, хорошо известны.

Были обнаружены и системы с орбитальными периодами в интервале 2–3 часа [15]. Их эволюция в рамках обсуждаемого сценария может быть понята двумя путями [17, 16]. Первая возможность связана с тем, что донор к моменту заполнения им полости Роша обогатил свое ядро гелием. Конвективная оболочка донора в этом случае не может проникнуть в ядро, которое остается радиативным, а МЗВ — активным даже при уменьшении массы донора до $\sim 0.1M_{\odot}$, а орбитального периода системы — до 10 минут [16, 18]. Вторая возможность исчерпывается предположением, что исходная масса донора $\sim 0.3M_{\odot}$.

4. Роль МЗВ в эволюции планетных систем

В результате торможения осевого вращения звезд ГП с массами $0.3 - 1.4M_{\odot}$ у большинства таких звезд периоды осевого вращения достигают до 10–30 дней [5]. По крайней мере у трети таких звезд имеются планетные системы [4, 19], нередко включающие планеты с орбитальными периодами ниже 10 дней. Орбитальное вращение близких горячих планет тормозится приливным взаимодействием с центральными звездами, приводя со временем к сближению. Такое торможение было обнаружено [20]. Таким образом, при определенных условиях, ближайšie уже сформированные планеты могут последовательно поглощаться своими звездами, в то время как образование планет продолжается на внешнем крае планетного диска системы [4]. Обнаружено бимодальное распределение наблюдаемых орбитальных периодов планет: при $P \gtrsim 10$ дней $dM \sim 4d \lg P$ [21], а при меньших орбитальных периодах $dN/dP \sim P^{0.4}$ [20]. Если принять, что уменьшение числа планет с уменьшением периода при $P \leq 10$ дней [22] вызвано их приливным торможением, характерное время которого при $P \approx 10$ дней порядка Хаббловского, то для времени торможения планет τ найдем: $\tau \sim 5 \cdot 10^8 (P/\text{дни})^{1.4}$ лет.

5. Заключение

Высокая эффективность МЗВ в потере углового момента звезд с массами компонентов $0.3 - 1.4M_{\odot}$ не только тормозит их вращение со временем, но и приводит к ряду важных эволюционных последствий для ТДС малой массы и планетных систем. МЗВ, в частности, объясняет причины наблюдаемого распределения молодых звезд в плоскости $a - M_1$ (рис. 1), причины возникновения и эволюции контактных двойных типа W UMa, эволюцию катаклизмических двойных звезд и рентгеновских двойных малой массы. Медленное, за счет торможения

МЗВ, вращение старых звезд малой массы эффективно способствует приливному торможению орбитального вращения наиболее близких к своим звездам планет и, со временем, поглощению их звездами.

Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. A. Skumanich, *ApJ*, **171**, 565, 1972.
2. C. T. Coker, M. Pinsonneault, and D. M. Terndrup, *ApJ*, **833**, 122, 2016.
3. G. Somers, J. Stauffer, L. Rebull, A. M. Cody, and M. Pinsonneault, *ApJ*, **850**, 134, 2017.
4. A. G. Masevich and A. V. Tutukov, *Evoliutsiia zvezd : teoriia i nabludeniia* (1988).
5. L. M. Rebull, J. R. Stauffer, A. M. Cody, L. A. Hillenbrand, T. J. David, and M. Pinsonneault, *ArXiv e-prints*, 2018.
6. A. E. Dudorov and A. V. Tutukov, *Sov. Astron.*, **34**, 171, 1990.
7. A. V. Tutukov, *Astrophysics*, **21**, 671, 1984.
8. F. Verbunt and C. Zwaan, *A&A*, **100**, L7, 1981.
9. A. V. Tutukov, G. N. Dremova, and M. A. Svechnikov, *Astron. Rep.*, **48**, 219, 2004.
10. Z. Eker, S. Bilir, F. Soydugan, E. Y. Gökçe, E. Soydugan, M. Tüysüz, T. Şenyüz, and O. Demircan, *PASA*, **31**, e024, 2014.
11. J. Southworth, *VizieR Online Data Catalog*, **5152**, 2017.
12. M. Yildiz and T. Doğan, *MNRAS*, **430**, 2029, 2013.
13. L. A. Molnar, D. M. Van Noord, K. Kinemuchi, J. P. Smolinski, et al., *ApJ*, **840**, 1, 2017.
14. Y. V. Pavlenko, A. Evans, D. P. K. Banerjee, J. Southworth, M. Shahbandeh, and S. Davis, *ArXiv e-prints*, 2018.
15. J. Southworth, B. T. Gänsicke, and E. Breedt, in M. T. Richards and I. Hubeny, eds., *From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools, IAU Symposium*, volume 282, 123–124 (2012).
16. I. Iben, Jr. and A. V. Tutukov, *ApJ*, **284**, 719, 1984.
17. E. I. Popova, A. V. Tutukov, and L. R. Yungelson, *Sov. Astron. Lett.*, **8**, 160, 1982.
18. A. V. Tutukov, A. V. Fedorova, E. V. Ergma, and L. R. Yungelson, *Sov. Astron. Lett.*, **11**, 52, 1985.
19. W. Zhu, C. Petrovich, Y. Wu, S. Dong, and J. Xie, *ArXiv e-prints*, 2018.
20. J. N. Winn, R. Sanchis-Ojeda, and S. Rappaport, *ArXiv e-prints*, 2018.
21. A. V. Tutukov, *Nauchnye Informatsii*, **63**, 161, 1987.
22. C. Damiani and R. F. Díaz, *A&A*, **589**, A55, 2016.

Переменность блеска ROTD звезды KIC 6222381

Саванов И.С.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Выполнен детальный анализ переменности блеска звезды спектрального класса А (объекта типа ROTD) KIC 6222381. Рассчитанный по всему доступному набору наблюдательных данных спектр мощности указал на периодичность изменений блеска звезды с частотой $F1_{\text{phot}} = 1.2289 \text{ сут}^{-1}$. Пик, соответствующий значению $F1_{\text{phot}}$, присутствует на большинстве диаграмм, построенных для сетов наблюдений длительностью около 90 суток, но на них он не является доминирующим. Максимум амплитуды достигался для одного из многочисленных пиков на меньших частотах. Эти пики претерпевали эволюцию на характерных временах порядка продолжительности сета. Получены указания на достаточно быструю эволюцию образований на поверхности KIC 6222381.

Light variability of the ROTD star KIC 6222381

Savanov I.S.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We performed analysis of the photometric variability of A type star (ROTD type object) KIC 6222381. Periodograms calculated over the entire available set of observational data indicated the period of variations in the brightness of the star with the frequency $F1_{\text{phot}} = 1.2289 \text{ day}^{-1}$. The peak corresponding to the value of $F1_{\text{phot}}$ appeared on most diagrams constructed for sets of observations with the duration of about 90 days but on them it was not dominant. The maximum amplitude was achieved for one of the numerous peaks at lower frequencies. These peaks indicated evolution at characteristic times of the duration of the set. Evidence for a sufficiently rapid evolution of spots on the surface of KIC 6222381 is obtained.

1. Введение

На основе высокоточных фотометрических наблюдений, полученных с космическим телескопом Кеплер, в [1, 2] (см. также ссылки в них) было показано, что переменность блеска большого количества звезд ранних спектральных классов по своему характеру подобна переменности блеска звезд спектральных классов G-M, обладающих пятнами и локальными магнитными полями на своей поверхности.

Анализ наблюдательных данных позволил автору [2] выделить среди звезд спектрального класса А новый для этого спектрального класса тип объектов — ROTD. Эти объекты обладают переменностью блеска, обусловленной вращательной модуляцией пятен на поверхности. Их основное отличие от других звезд, изученных в [2], состоит в том, что спектры мощности этих объектов содержат характерные особенности, включающие узкий пик, а также на меньших частотах — широкий пик, как правило, состоящий из многочисленных деталей.

Примеры спектров мощности звезд типа ROTD можно найти в [2]. Как отмечено в [2], природа появления такого набора пиков на спектрах мощности изучаемых объектов осталась до конца не понята. Согласно одной интерпретации, группы пиков могли бы соответствовать пятнам, расположенным на различных широтах звезд, обладающих дифференциальным вращением. Однако такая конфигурация пиков никогда не наблюдалась в спектрах мощности холодных, активных, дифференциально-вращающихся звезд. Альтернативные объяснения состояли в предположениях о наличии планеты или тел на синхронной орбите, о существовании эффекта отражения в системах без затмения и проч. Вероятное объяснение особенностей спектра мощности звезд ROTD было дано в [3] и связано с проявлением колебаний набора мод волн Россби. Эти моды были обнаружены авторами [3] у звезд спектральных классов В, А и F главной последовательности, у запятанных звезд, у объектов типа γ Дог и др.

Цель нашего исследования состоит в детальном анализе переменности блеска одного из объектов такого типа — КIC 6222381. Это достаточно яркая звезда ($V = 9^m.88$) спектрального класса А с эффективной температурой 8675 К и ускорением силы тяжести $\lg g = 3.7016$ (данные каталога MAST).

2. Спектры мощности

Наш анализ был выполнен на основе полного доступного набора наблюдательных данных архива MAST — сеты наблюдений (Q0 – Q17). Обработка данных была аналогична представленной нами ранее при исследовании звезд солнечного типа и холодных карликов (например, [4], [5]). Долговременные систематические изменения блеска звезды были учтены как линейные тренды, были устранены дефекты. Поиск периодов вращения проводился с применением программы LNP-TEST из библиотек IDL. Рассчитанный спектр мощности указал на периодичность изменений кривой блеска звезды с частотой $F_{1\text{phot}} = 1.2289 \pm 0.0011 \text{ сут}^{-1}$ (рис. 1). Это значение полностью совпадает с

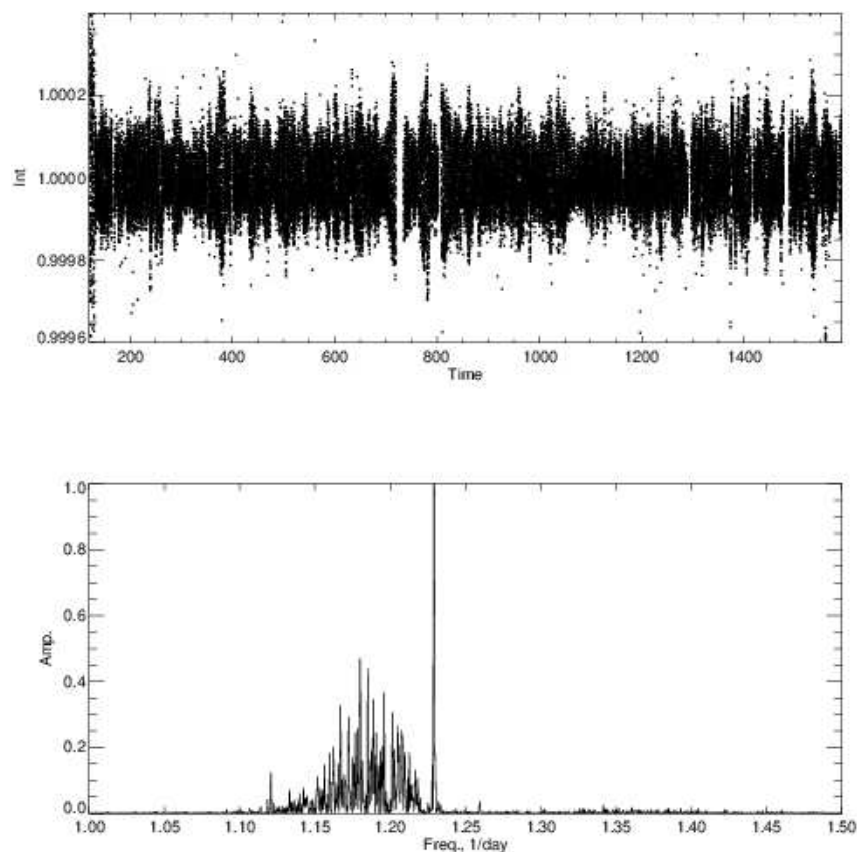


Рис. 1. Вверху: Блеск звезды KIC 6222381 по данным 18 сетов наблюдений. По оси ординат — интенсивности, нормированные на средние для каждого сета величины, по оси абсцисс — время в сутках. Внизу: Спектр мощности (амплитуда нормирована на максимальное значение).

результатом, полученным в [2] (1.2290 сут^{-1}). На меньших частотах обращает на себя внимание широкий пик, состоящий из многочисленных деталей.

Результаты, представленные на рис. 1, получены по всему набору данных длительностью 4 года. На рис. 2 приведены спектры мощности, построенные по каждому из сетов наблюдений. Длительность каждого сета составляет около 90 суток (сет Q0 меньшей продолжи-

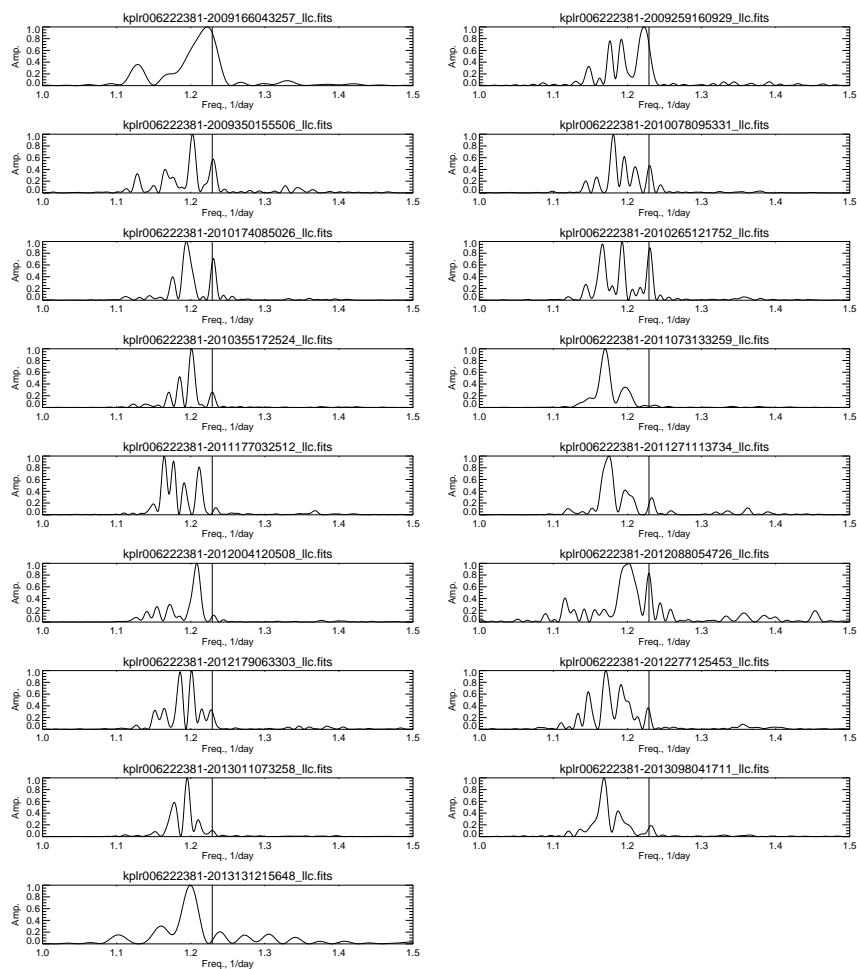


Рис. 2. Результаты периодограммного анализа переменности блеска KIC 6222381 для 17 сетов. Вертикальная прямая соответствует значению $F1_{\text{phot}} = 1.2289 \text{ сут}^{-1}$.

тельности был исключен). На диаграммах со спектрами мощности вертикальная прямая соответствует значению $F1_{\text{phot}} = 1.2289 \text{ сут}^{-1}$. Ширина пиков на диаграмма превышает ширину пиков на рис. 1

вследствие меньшей продолжительности рассматриваемого временно-го ряда (всего один сет в 90 суток).

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что пик, соответствующий значению $F1_{\text{phot}} = 1.2289 \text{ сут}^{-1}$, присутствует на большинстве диаграмм, но не является доминирующим. Многочисленные пики на меньших частотах претерпевали эволюцию, они появлялись и исчезали на характерных временах, сопоставимых с продолжительностью сета. Во многих случаях часть пиков доминировала по амплитуде по отношению к пику на F1.

3. Заключение

Выполнен детальный анализ переменности блеска объекта типа ROTD KIC 6222381. Рассчитанный по всему доступному набору наблюдательных данных спектр мощности указал на периодичность изменений кривой блеска звезды с частотой $F1_{\text{phot}} = 1.2289 \pm 0.0011 \text{ сут}^{-1}$.

Найдено, что на спектрах мощности, построенных по каждому из сетов наблюдений длительностью около 90 суток, пик, соответствующий значению $F1_{\text{phot}}$, присутствует на большинстве диаграмм, но не является доминирующим по амплитуде. Как правило, доминирующим являлся один из многочисленных пиков на меньших частотах, которые претерпевали эволюцию на характерных временах порядка продолжительности сета. Полученные нами результаты могут рассматриваться, как указание на достаточно быструю эволюцию образований (это могут быть волны Россби и/или пятна, если придерживаться традиционной интерпретации) на поверхности KIC 6222381.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект N 18-12-00423).

Список литературы

1. L. A. Balona, *MNRAS*, **431**, 2240, 2013.
2. L. A. Balona, *MNRAS*, **467**, 1830, 2017.
3. H. Saio, D. W. Kurtz, S. J. Murphy, V. L. Antoci, and U. Lee, *MNRAS*, **474**, 2774, 2018.
4. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astron. Rep.*, **56**, 116, 2012.
5. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astron. Rep.*, **62**, 273, 2018.

SPI — инструмент для определения характеристик звезд

Сичевский С.Г.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Представлен Stellar Parameter Interface (SPI) — инструмент с веб-интерфейсом, который позволяет сформировать и отправить запрос для вычисления радиуса, массы и светимости звезды по ее атмосферным характеристикам (T_{eff} , $\lg g$ и $[M/H]$). Вычисления выполняются на основе расчетов современных моделей внутреннего строения и эволюции звезд.

SPI tool to determine the characteristics of stars

Sichevsky S.G.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Stellar Parameter Interface (SPI) is described. The SPI is a web interface tool for determining a star's radius, mass and luminosity from its atmospheric characteristics (T_{eff} , $\lg g$ and $[M/H]$) based on modern model computations of the stellar internal structure and evolution.

1. Введение

Появление массовых расчетов моделей звезд привело к широкому применению метода интерполяции на сетках эволюционных треков и изохрон. Согласно расчетам звездных моделей соотношение масса-светимость ($M - L$) для красной границы главной последовательности подобно аналогичному соотношению для начальной главной последовательности. На этом факте основан принцип геометрического подобия эволюционных треков. Этот принцип применен в работе [1], который показал, что при специальной разбивке эволюционных треков можно по положению звезды на диаграмме Гершпрунга-Рассела определить ее возраст и массу. Этот метод был обобщен в работе [2]. В [3], также на основе принципа геометрического подобия эволюционных треков, рассмотрен способ определения масс и возрастов звезд по эффективным температурам T_{eff} и поверхностным ускорениям $\lg g$.

В данной работе представлена реализация способа определения радиусов, масс и светимостей звезд, основанного на эволюционных расчетах звезд, но не требующего ни выделения стадий эволюции, ни специальной разбивки эволюционных треков.

2. Способ определения характеристик звезд

В работе использованы эволюционные расчеты группы из Женевской обсерватории [4, 5], двух типов — с учетом и без учета вращения звезд. Соответствующие эволюционные треки описывают эволюцию звезд с начальной массой от $0.8M_{\odot}$ до $120M_{\odot}$ двух химических составов — $Z = 0.014$ и $Z = 0.002$. Способ определения радиуса, массы и светимости звезды является последовательным развитием подходов, изложенных в работах [6, 7], и на основе метода максимального правдоподобия позволяет получать как точечные оценки, так и интервальные оценки.

Звезды с идентичными значениями T_{eff} и $\lg g$ могут иметь различные значения R . Особенности рождения и эволюции звезд приводят к тому, что плотности вероятности значений R , $\lg g$, а также M и L не постоянны. С целью учесть разную скорость эволюции и начальную функцию масс вычислены функции вероятностей радиусов, масс и светимостей. Для этого сделано предположение о постоянном темпе звездообразования на протяжении 13.7 млрд лет. В качестве начальной функции масс взята классическая зависимость из работы [8]. Функции вероятностей вычислены для узких последовательных интервалов, полностью покрывающих весь диапазон эффективных температур, определяемый эволюционными треками.

На рис. 1 показан результат вычисления функции вероятностей значений R для случая $T_{\text{eff}} = (4800 \pm 43)$ К. Из рисунка можно представить, как учет скорости эволюции и начальной функции масс влияет на оценку R . На врезке на нижней панели видно, что оценка смещена к более вероятным значениям. Поэтому в рассматриваемом случае предположение о равной вероятности значений R приведет к систематическому завышению его оценки. Аналогичные результаты получены для массы и светимости. Таким образом для каждого интервала эффективных температур получена зависимость характеристик звезды (R , M , L) от поверхностного ускорения, которая вместе с линейной интерполяцией обеспечивают решение исходной задачи.

Интервальная оценка вычисляется на основе многократной генерации значений T_{eff} , $\lg g$ и металличности $[M/H]$ с учетом их погрешностей и в предположении равномерного распределения и определения соответствующих значений R , M , L . На основе полученных выборок для каждого набора (R , M , L) вычисляются первый (Q_1) и

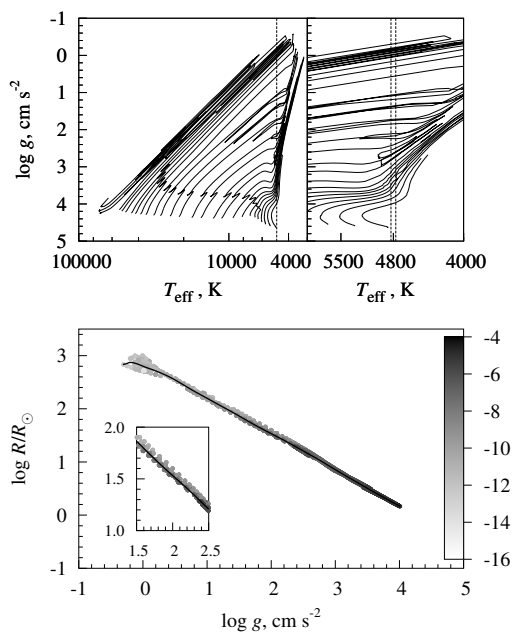


Рис. 1. Вверху — область, покрываемая эволюционными треками (левая часть), и область (правая часть), для которой внизу показана зависимость $\lg R$ от $\lg g$ для узкого интервала $T_{\text{эфф}}$. Сплошная линия внизу — среднее вероятное значения радиуса; оттенки серого — логарифм вероятности того, что звезда имеет соответствующий радиус.

третий (Q_3) квантили¹, определяющие интервальную оценку. Другие подробности рассматриваемого способа приведены в работе [9], в которой также выполнен анализ ошибок, к которым приводит линейная интерполяция, в том числе по металличности, и предложен способ их исправления.

Способ был проверен на звездах, хорошо изученных различными методами, — затменных двойных звездах [10], кандидатах в обладатели планет [11] и красных гигантах из каталога APOKASC [12]. На рис. 2 слева характеристики R_o , M_o и L_o красных гигантов и канди-

¹Квантиль — значение случайной величины, которое оно не превышает с заданной вероятностью. Первый и третий квантили соответствуют таким значениям случайной величины, которые оно не превышает с вероятностью 0.25 и 0.75, соответственно.

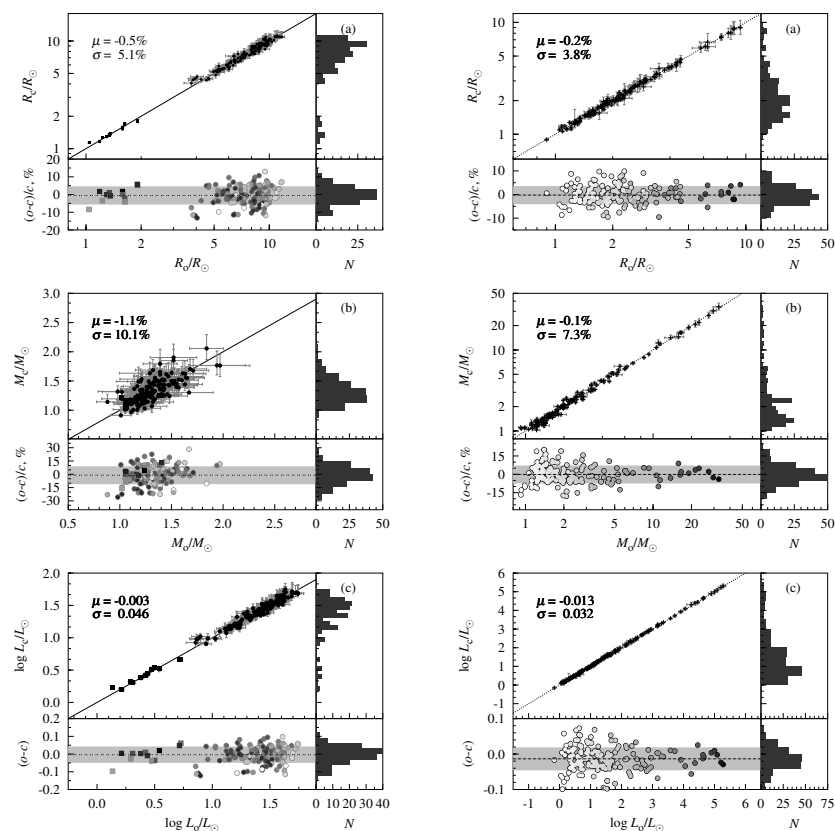


Рис. 2. Слева — сравнения радиусов (а), масс (б) и светимостей (с) красных гигантов (кружки) и кандидатов в обладатели планет (квадраты) с их оценками, определенными по их температурам, поверхностным ускорениям и металличностям. Оттенки серого — значения металличностей (большим значениям соответствуют более темные тона). Справа — сравнение радиусов (а), масс (б) и светимостей (с) компонентов затменных двойных звезд с их оценками, сделанными по их температурам и поверхностным ускорениям. Оттенки серого — значения масс компонентов двойных звезд (большим значениям соответствуют более темные тона).

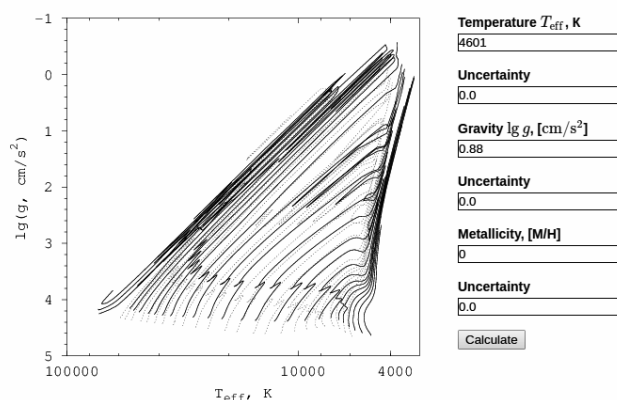


Table — List of requests and results of calculations.

ID	T_{eff} , K	$\lg g$, [cm/s ²]	[M/H]	R_* , R_{\odot}	\mathfrak{M}_* , \mathfrak{M}_{\odot}	$\lg L_*$, [L_{\odot}]	K_d	RC
3491	4601.0 ± 0.0	0.88 ± 0.00	0.00 ± 0.00	166.96 ^{+9.46} _{-4.96}	7.50 ^{+0.99} _{-0.41}	4.03 ^{+0.04} _{-0.02}	1.00	N

Рис. 3. Общий вид веб-интерфейса инструмента SPI.

датов в обладатели планет сравниваются с их оценками R_c , M_c и L_c . Справа на том же рисунке — результат определения R , M , L компонентов двойных звезд. Видно, что достигнуто хорошее соответствие с наблюдениями и практически отсутствуют систематические отклонения — относительные отклонения оценок имеют среднее значение (μ) близкое к 0% и среднеквадратичные отклонения (σ) не превышают $\sim 10\%$.

Вышеописанный способ определения характеристик звезд реализован по технологии «тонкого клиента» в комплекте программ для ЭВМ. Stellar Parameter Interface (SPI) — инструмент с веб-интерфейсом доступен в сети Интернет². Он позволяет пользователю быстро сформировать и отправить запрос для вычисления характеристик звезды (радиуса, массы и светимости). Общий вид веб-интерфейса показан на рис. 3. Есть два способа сформировать запрос. Первый — для одиночного запроса. Достаточно поместите курсор в нужное место на рисунке с эволюционными треками и сделайте один щелчок ле-

²<http://spi.inasan.ru/en/index>

вой кнопкой, чтобы отправить запрос и начать вычисление физических характеристик. Второй — групповой запрос сразу для нескольких звезд, но не более 500. Для этого нужно воспользоваться формой для загрузки файла с значениями атмосферных характеристик звезд. Каждая строка файла должна содержать шесть чисел — $[M/H]$, $\lg T_{\text{eff}}$, $\lg g$ и их погрешности.

3. Заключение

В работе рассмотрен способ вместе с его реализацией, позволяющей оценить радиус, массу и светимость звезды по ее атмосферным характеристикам. Проверка на хорошо изученных звездах, которые покрывают две густонаселенные области — область главной последовательности и ветвь красных гигантов, — показала хорошее согласие с наблюдениями. Практически отсутствуют систематически отклонения точечных оценок характеристик как для звезд главной последовательности, так и красных гигантов. Способ был реализован в виде комплекта программ, названного SPI (Stellar Parameter Interface). Обладая веб-интерфейсом, SPI является доступным и простым в использовании инструментом для определения характеристик звезд.

Список литературы

1. V. V. Muzylev, *Nauchnye Informatsii*, **41**, 94, 1978.
2. V. I. Myakutin and A. E. Piskunov, *Astron. Rep.*, **39**, 316, 1995.
3. O. Y. Malkov, S. G. Sichevskij, and D. A. Kovaleva, *MNRAS*, **401**, 695, 2010.
4. S. Ekström, C. Georgy, P. Eggenberger, G. Meynet, et al., *A&A*, **537**, A146, 2012.
5. C. Georgy, S. Ekström, P. Eggenberger, G. Meynet, et al., *A&A*, **558**, A103, 2013.
6. S. G. Sichevskij, *Astron. Rep.*, **60**, 598, 2016.
7. S. G. Sichevskij, *Astron. Rep.*, **60**, 816, 2016.
8. E. E. Salpeter, *ApJ*, **121**, 161, 1955.
9. S. G. Sichevskij, *Astron. Rep.*, **61**, 193, 2017.
10. O. Y. Malkov, *MNRAS*, **382**, 1073, 2007.
11. V. Silva Aguirre, G. R. Davies, S. Basu, J. Christensen-Dalsgaard, et al., *MNRAS*, **452**, 2127, 2015.
12. M. H. Pinsonneault, Y. Elsworth, C. Epstein, S. Hekker, et al., *ApJS*, **215**, 19, 2014.

**Структура, динамика,
кинематика и эволюция
звездных систем**

Глобальный обзор звездных скоплений в Млечном Пути I: трехмерная карта поглощающей материи

Пискунов А.Э.¹, Харченко Н.В.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, Украина*

По данным о рассеянных скоплениях из обзора MWSC (Milky Way Star Clusters) построена трехмерная карта распределения межзвездной поглощающей материи в диске Галактики в окрестности Солнца размером $10 \times 10 \times 4$ кпк. В качестве рабочего параметра использован коэффициент поглощения $a_V = A_V/d$. Карта показывает, что при малых значениях $a_V \lesssim 0.9^m/\text{кпк}$ мы получаем однородный диск с толщиной $0.4 - 0.8$ кпк. При $a_V > 0.9^m/\text{кпк}$ межзвездная среда существенно неоднородна с характерным размером областей повышенной плотности до 1 кпк. Некоторые плотные облака находятся на значительных высотах $|Z|$ до 0.6 кпк.

The Global survey of open clusters in the Milky Way I: 3D map of absorbing matter

Piskunov A.E.¹, Kharchenko N.V.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Main Astronomical Observatory of the NANU, Kiev, Ukraine*

Basing on data on open clusters from MWSC (Milky Way Star Clusters) survey we construct a 3D map of a distribution of interstellar absorbing matter as indicated by $a_V = A_V/d$ in the wide Solar Neighbourhood of the Galactic disk with a size of $10 \times 10 \times 4$ kpc. The map shows at lower extinctions $a_V \lesssim 0.9^m/\text{kpc}$ a uniform disc with a thickness of $0.4 - 0.8$ kpc. At $a_V > 0.9^m/\text{kpc}$ interstellar medium exhibits inhomogeneity with typical size of the enhanced density regions below 1 kpc. Some dense clouds are found at considerable heights of $|Z|$ up to 0.6 kpc.

1. Введение

Исследования распределения поглощающей материи в Галактике неоднократно проводились по данным фотометрии и спектрофотометрии звезд поля (см., например, [1] и список литературы там), в результате чего межзвездное поглощение картировано до гелиоцентрических расстояний $d \approx 3$ кпк. Реализация глубоких фотометрических проектов, 2MASS [2] или PS1 [3], позволила картировать поглощение до

$d \approx 7$ кпк [4, 5]. Большинство этих работ базируется на фотометрических расстояниях до отдельных звезд, которые отягощены заметными случайными и систематическими ошибками. Поэтому многие из полученных карт поглощения имеют радиальную гелиоцентрическую составляющую (см., например, [4]), которая противоречит реальному распределению поглощающей материи.

В отличие от отдельных звезд, расстояния и параметры поглощения звездных скоплений определяются по диаграммам цвет-величина и цвет-цвет, что дает более точные результаты. Ранее мы использовали это свойство скоплений [6] и построили карты поглощения в области 4×4 кпк в рамках проекта COCD по данным Hipparcos/Tycho для 650 скоплений. Карта COCD показала основные локальные облачные структуры, но не смогла детально описать межзвездную среду за пределами 1 кпк. Поэтому в этой работе мы использовали обзор MWSC [7], который глубже своего предшественника COCD, и позволяет продвинуться на большие d .

2. Данные

Мы использовали базовые параметры звездных скоплений, полученные нами при выполнении всенебесного обзора MWSC. Обзор основан на точной астрометрии и фотометрии из глубоких каталогов 2MASS [2] и PRMXL [8] и содержит многомерный массив параметров скоплений, которые определены по однородной методике в однородной по всему небу системе для 3061 рассеянного и 147 шаровых скоплений. Для всех звезд в области скопления были определены комбинированные кинематические и фотометрические вероятности членства и построены диаграммы цвет-величина наиболее вероятных членов. Для определения расстояния, покраснения, возраста скоплений их диаграммы цвет-величина совмещались с набором изохрон, покрывающих широкий диапазон возрастов и рассчитанных с помощью сервера CMD2.2¹ (см. детали построения сетки изохрон и процедуры определения параметров в [7, 9]). Так как для типичного химического состава населения диска Галактики изохроны слабо зависят от содержания металлов, мы пользовались единой сеткой изохрон с солнечной металличностью. В результате, для всех объектов MWSC мы определили необходимые для построения карты межзвездного поглощения однородные данные: координаты центров, расстояния до объектов d , избытки цвета $E(J - K_s)$, значения межзвездного поглощения света

¹<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

A_{K_s} в ближней ИК фотометрической системе 2MASS. При определении параметров поглощения в системе 2MASS мы использовали соотношения: $A_K/A_{K_s} = 0.95$ и $A_{K_s}/E(J - K_s) = 0.670$, а в оптической системе UBV : $A_V/E(B - V) = 3.1$ и $E(J - K_s)/E(B - V) = 0.480$. Сравнение [7] с независимыми данными разных авторов показывает, что точность наших данных составляет 11% для расстояний d и 7% для избытков цвета $E(B - V)$.

3. Карта распределения межзвездной материи

В качестве рабочего параметра, характеризующего распределение поглощающей материи в Галактическом диске, мы взяли коэффициент поглощения $a_V = A_V/d$. Так как a_V имеет смысл градиента, он хорошо описывает скачки межзвездного поглощения, то есть фронты газо-пылевой облачной структуры и, следовательно, распределения сосредоточенной в облаках поглощающей материи.

3D карта распределения коэффициента поглощения a_V в широких окрестностях Солнца показана на рис. 1. Карта построена в центрированной на Солнце прямоугольной Галактической системе координат XYZ , в которой ось X направлена на центр Галактики, ось Y — в сторону ее вращения, ось Z — в Северный полюс Галактики. Карта охватывает область размером $10 \times 10 \times 4$ кпк и включает расположение четырех ближайших спиральных рукавов.

С расстоянием от Солнца среднее значение a_V падает и составляет на периферии рассмотренной области $0.4\text{--}0.9^m/\text{кпк}$. Это близко к принятым в литературе типичным для Галактики значениям и соответствует первым трем градациям a_V на шкале плотности в правом верхнем углу рис. 1. В пределах двух ближних килопарсек наблюдаются развитые структуры, ассоциирующиеся с газо-пылевыми облаками в Орионе, Персее, Лебеде и Стрельце. Такая сегрегация отчасти связана с наблюдательной селекцией: во-первых, указанные 2 кпк составляют предельное расстояние полноты обзора MWSC, во-вторых, далекие и сильно покрасненные скопления имеют меньше шансов попасть в обзор и увеличить покраснение. В целом, занятая $a_V \leq 0.9^m/\text{кпк}$ область представляет собой однородный слой поглощающей материи с характерной толщиной $0.4\text{--}0.8$ кпк, которая падает с увеличением поглощения. Интересно, что вблизи верхнего предела этого интервала a_V регулярная дискообразная форма поглощающего слоя нарушается и мы видим на $l \approx 210^\circ$ и $l \approx 300^\circ$ коридоры прозрачности, возможно свидетельствующие о разрушении диска. Отно-

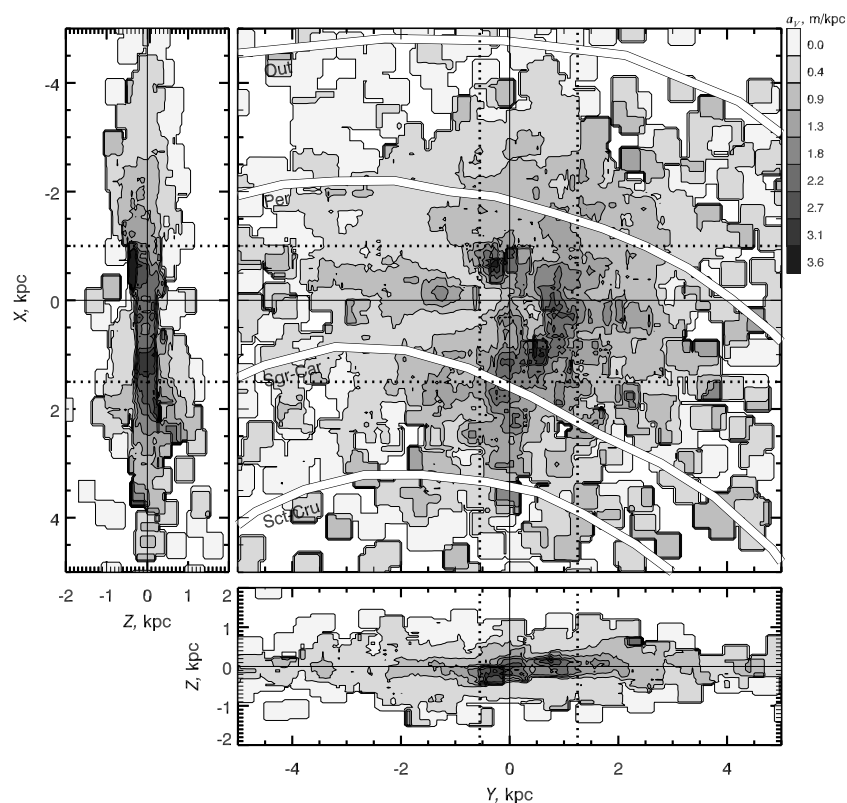


Рис. 1. Карта пространственного распределения поглощающей материи (коэффициента поглощения a_V) в Галактическом диске. Центральная панель показывает контуры распределения a_V в плоскости (X, Y) , левая и нижняя панели — в плоскостях (X, Z) и (Z, Y) . Эти вертикальные срезы показаны для центральных полос диска, выделенных на плоскости (X, Y) пунктирными линиями. Соответствующая выбранным уровням a_V черно-белая шкала показана в правом верхнем углу рисунка. Области рисунка, где данные отсутствуют, не окрашены. Белыми толстыми линиями показано положение спиральных рукавов по данным [10] (снизу-вверх: Scutum-Crux, Sagittarius-Carina, Persei, Outer)

сительно плоскости Галактики диск расположен симметрично и не показывает заметных систематических уклонений от нее.

При $a_V > 0.9^m/\text{кпк}$ однородный диск распадется на отдельные области с размером от 1 кпк до 0.5 кпк в своей самой плотной части.

Они ассоциируются с известными областями недавнего или продолжающегося звездообразования. Симметрия слоя с малым a_V нарушается при больших значениях поглощения. Области с повышенным поглощением, возможно, слегка повернуты вокруг оси $X \approx 0.25$ кпк: при $X \gtrsim 0.25$ кпк середина слоя находится над плоскостью Галактики, а при $X \lesssim 0.25$ кпк она уходит под плоскость. Можно отметить, что сильно поглощенные области диска находятся как глубоко под плоскостью (Орион, $[XYZ] \approx [0.5, -0.25, -0.4]$ кпк), так и высоко над ней (облако с координатами $[XYZ] \approx [1.75, 2.25, 0.6]$ кпк). Если соединить эти области линией, то окажется, что в плоскости XY линия лежит в так называемом Шпуре Ориона, и имеет к плоскости Галактики наклон около 19° . Согласно [11], это близко к наклону пояса Гулда, а также к наклону комплекса молодых скоплений ОСС1, отождествленному нами в [6].

4. Заключение

Если сравнить нашу карту с опубликованными версиями, основанными на одиночных звездах поля, можно увидеть, что звездные скопления, несмотря на меньшее число использованных объектов, дают значительно более адекватную картину распределения газо-пылевых облаков, которая лишена гелиоцентрических трендов. Построенная карта показывает, что:

- при малом a_V имеем однородный диск высотой 0.4–0.8 кпк;
- большие значения a_V характеризуются неоднородностью с характерным размером областей повышенной плотности 0.5–1 кпк;
- некоторые плотные облака находятся на значительных высотах 0.4–0.6 кпк и образуют наклоненную к Галактической плоскости систему, с углом наклона, близким к наклонам известных структур (Пояс Гулда, комплекс молодых скоплений ОСС1), хотя и имеют большую протяженность до 2.5 кпк.

Исследование частично поддержано Российским фондом фундаментальных исследований РФФИ (грант 16-52-12027).

Список литературы

1. T. Neckel and G. Klare, *A&A Sup.*, **42**, 251, 1980.
2. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al., *AJ*, **131**, 1163, 2006.
3. N. Kaiser, W. Burgett, K. Chambers, L. Denneau, et al., in *Ground-based and Airborne Telescopes III, Proc. SPIE*, volume 7733, 77330E (2010).
4. G. A. Gontcharov, *Astron. Lett.*, **38**, 87, 2012.

5. G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, H.-W. Rix, et al., *ApJ*, **810**, 25, 2015.
6. A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz, *A&A*, **445**, 545, 2006.
7. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **558**, A53, 2013.
8. S. Röser, M. Demleitner, and E. Schilbach, *AJ*, **139**, 2440, 2010.
9. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **543**, A156, 2012.
10. R. A. Benjamin, in H. Beuther, H. Linz, and T. Henning, eds., *Massive Star Formation: Observations Confront Theory*, *ASP Conf. Ser.*, volume 387, 375 (2008).
11. W. Pöppel, *Fundam. Cosmic Phys.*, **18**, 1, 1997.

Глобальный обзор звездных скоплений в Млечном Пути II: пространственные пределы полноты

Пискунов А.Э.¹, Харченко Н.В.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, Украина*

Рассмотрена методика определения зависимости радиуса области полноты обзора галактических рассеянных скоплений MWSC от их массы. Найдено, что в целом MWSC полон до расстояния 1.9 кпк и наибольший вклад в зоне полноты по численности дают скопления с массами меньше $300M_{\odot}$. Зоны полноты для скоплений больших масс более протяженные и достигают радиуса 9 кпк для $\lg m/M_{\odot} = 4 - 4.5$. Хотя в целом распределение скоплений следует однородному закону поверхностной плотности, для ряда распределений из диапазона $100 - 2000M_{\odot}$ мы наблюдаем в пределах зон полноты некоторый дефицит скоплений, достигающий для всех скоплений нескольких десятков упущенных в MWSC объектов. В качестве иллюстрации мы приводим начальную функцию масс скоплений, построенную с помощью полученного соотношения «масса-радиус зоны полноты».

The global survey of open clusters in the Milky Way II: limits of the spatial completeness

Piskunov A.E.¹, Kharchenko N.V.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Main Astronomical Observatory of the NANU, Kiev, Ukraine*

The technique of construction of a relation between the limit of the completeness zone of the Galactic open clusters and their mass for the MWSC survey is considered. We find that in total the MWSC is complete with heliocentric distance of 1.9 kpc, with the most abundant clusters having masses less than $300M_{\odot}$. The completeness zones of more massive clusters are more extended and reach the radius of 9 kpc for $\lg m/M_{\odot} = 4 - 4.5$. Although the cluster distribution follows in general the uniform surface density law, one can see for a number of low-mass bins (at $100 - 2000M_{\odot}$) a count deficiency within respective completeness zones. We conclude, that in total the MWSC misses a few tens of clusters within 1 kpc from the Sun. As illustration of application the “mass-completeness zone radius” relation we use it for building the cluster initial mass function.

1. Введение

Полнота данных является важным фактором, влияющим на результаты популяционного анализа. Для звездных скоплений проблема осложняется трудностью составления представительных выборок скоплений и их характеристик. Популяционный анализ скоплений стал возможен только с накоплением таких данных, начиная с 1970-х гг., при этом методы оценки полноты выборок скоплений менялись от простой констатации [1] до углубленного статистического анализа [2].

Выполненные нами за последние 15 лет всенебесные обзоры скоплений также были предметом анализа полноты их данных. Мы определили, что основанный на данных Hipparcos обзор COCD [3] полон в пределах 0.85 кпк от Солнца, где он содержит 220 скоплений. Более современный обзор MWSC [4, 5] с базой из каталогов 2MASS и PRMXL полон в пределах 1.8–2.2 кпк от Солнца, где наблюдается около 1300 (примерно половина) известных скоплений.

Несмотря на ее важность, эта информация имеет ограниченное применение. Например, при построении функций светимости или масс скоплений важно знать, как полнота данных меняется со звездной величиной или массой скопления. Первая задача была рассмотрена нами в [5], а сейчас мы намерены сделать статистически обоснованное определение полноты данных о массах рассеянных скоплений, получить зависимость полноты от массы и применить эту зависимость для построения начальной функции масс (НФМ) скоплений.

2. Данные и методика определения полноты обзора

Мы использовали однородные данные о базовых параметрах рассеянных скоплений, полученные нами при выполнении всенебесного обзора MWSC [4, 6, 7]. Обзор содержит многомерный массив морфологических (приливные радиусы), фотометрических (расстояния и покраснения) и астрофизических (возраст) параметров, полученных по однородной методике для 3061 рассеянного и 147 шаровых скоплений. Массы скоплений определялись по их приливным радиусам, как это делалось нами в предыдущем обзоре COCD [8]. Более подробно данные охарактеризованы в первой статье этой серии в данном сборнике и в [4, 6, 7].

Как показывают подсчеты скоплений [5], MWSC может быть классифицирован как выборка, ограниченная по звездной величине. Профиль поверхностной плотности такой выборки может схематически представлен плоской внутренней частью, где неполнота данных незна-

чительна, и длинным внешним хвостом постепенно убывающей плотности из-за неполноты данных для слабых величин. Неполнота статистически может быть выражена отношением текущей плотности к средней локальной плотности [2]. Отметим, что мы используем в качестве меры расстояния до скопления его проекцию на плоскость Галактики d_{xy} и определяем радиус полноты выборки как радиус плоской области профиля поверхностной плотности \hat{d}_{xy} . Зная радиус зоны полноты можно собрать внутри ее неискаженную статистику.

Этот подход, называемый далее приближением единого предела полноты, благодаря своей простоте широко использовался, начиная с пионерской работы [1], но чреват систематической нехваткой объектов, которые абсолютно слабее или ярче типичных для данной выборки скоплений. Например, плотность наблюдаемых вблизи Солнца очень слабых объектов недооценивается, т.к. их число делится на всю площадь полноты, заданную единым пределом полноты более ярких скоплений. Напротив, оттого, что характерное расстояние до ярчайших объектов из-за их низкой плотности может превосходить предел полноты, возможно совсем потерять их из статистики. Для избегания этого можно отказаться от единого предела полноты и использовать переменный предел полноты, применяемый при построении функций светимости, когда для объектов данной светимости определяют свой предел полноты. Мы уже применяли приближение переменной полноты к интегральным величинам скоплений I и нашли, что они связаны зависимостью, которая для полосы K_S может быть записана как:

$$\hat{d}_{xy} = p - q \times I(M_{K_S}), \quad (1)$$

где \hat{d}_{xy} в кпк, $p = 0.80 \pm 0.05$, $q = 0.42 \pm 0.02$. Поскольку светимости скоплений пропорциональны их массам, мы распространили этот подход на шкалу масс и будем находить зоны полноты для скоплений из узких интервалов масс. Как и для интегральных величин, предположим, что поверхностная плотность скоплений Σ не зависит от d_{xy} . Тогда ожидаемое число скоплений внутри цилиндра с радиусом d_{xy} должно расти пропорционально площади основания цилиндра, пока не скажутся эффекты неполноты выборки:

$$\lg N(< d_{xy}) = \lg(\pi \Sigma) - 2 \times \lg d_{xy}. \quad (2)$$

3. Результаты

На диаграмме численностей (левая панель рис. 1) показаны результаты подсчетов скоплений внутри цилиндров с радиусами d_{xy} в зави-

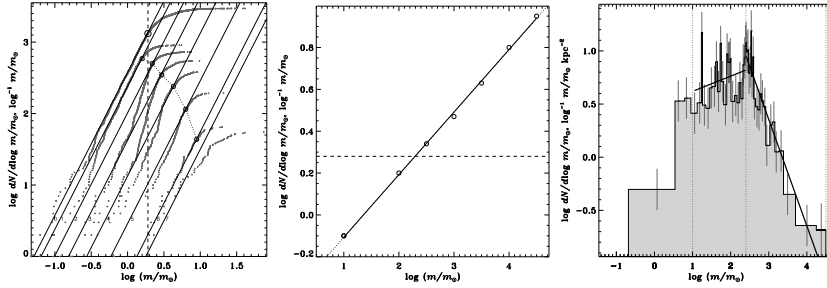


Рис. 1. Диаграмма численностей для определение предела полноты скоплений обзора MWSC (левая панель), соотношение «предел полноты-масса скопления» (средняя панель) и сконструированная НФМ скоплений (правая панель). Детали рисунков описаны в разделе 3.

симости от величины радиуса. Отдельные скопления показаны крестиками, аппроксимирующие соотношения (2) — линиями, обозначенными цифрами от 0 до 7. Подсчетам для полной выборки скоплений соответствует линия с индексом 0, подсчеты для выделенных интервалов масс $\lg m/M_\odot$ обозначены 1 для $\lg m/M_\odot = [1-2]$, 2 для $[2-2.5]$, 3 для $[2.5-3]$, ..., 6 для $[4-4.5]$, 7 для > 4.5 . Как видно, все эмпирические кривые показывают общие черты: пропорциональный квадрату d_{xy} рост, который после некоторого порога замедляется и по исчерпанию скоплений останавливается. Но не все эмпирические подсчеты внутри предела полноты соответствуют уравнению (2). Так, кривые 2–4 показывают в отношении уравнения (2) на $d_{xy} < 1$ кпк дефицит от нескольких до десятка близких скоплений разных групп (в целом на близких расстояниях недостает одного-двух десятков скоплений). Отметим, что кривая 7, соответствующая наиболее массивным скоплениям, нигде не согласуется с однородным распределением. Отсюда мы делаем вывод, что данные о сверхмассивных скоплениях в MWSC нигде не полны.

Незаполненные кружки на левой панели рис. 1 соответствуют дальнему краю области согласия подсчетов и однородного распределения и показывают внешнюю границу зоны полноты. Для общего распределения скоплений (кривая 0) размер зоны полноты составляет $\hat{d}_{xy}^{\text{tot}} = 1.9$ кпк, и содержит около 1300 скоплений, что находится в хорошем согласии с нашей предварительной оценкой (см. Введение). Вертикальная штриховая линия показывает как скопления разных

масс представлены в единой зоне полноты. Видно, что скопления малых масс (кривые 1 и 2) почти полностью попадают в зону полноты, а более массивные группы там представлены относительно плохо и начиная с группы 5 практически отсутствуют в ней.

Соединяя кружки разных групп скоплений на левой панели рис. 1, получим соотношение «масса – предел полноты», которая на диаграмме $\lg \hat{d}_{xy}$, $\lg m_c/M_\odot$ (средняя панель рис. 1) выглядит как прямая линия:

$$\lg \hat{d}_{xy} = a + b \times \lg m_c/M_\odot. \quad (3)$$

Аппроксимация полученных на диаграмме численностей величин линейным законом дает для его коэффициентов значения $a = -0.405 \pm 0.014$, $b = 0.299 \pm 0.004$. Средняя панель рис. 1 снова подтверждает, что полная выборка с пределом в виде горизонтальной штриховой линии недостаточно хорошо представляет массивные скопления. Поэтому в дальнейшем для адекватного представления НФМ скоплений мы будем использовать приближение переменного предела полноты, представляемого уравнением (3).

В качестве иллюстрации применения подхода переменного предела полноты мы показываем на правой панели рис. 1 НФМ скоплений списка MWSC. Для этого выбраны 246 скоплений с возрастом $\lg t = 6.0 - 7.3$, чьи расстояния d_{xy} не превышают пределов полноты соответствующих им массам. Функция масс $f(\lg m/M_\odot)$ вычислялась в соответствии с формулой

$$f_k(\lg m/M_\odot) = \frac{1}{\pi \Delta_k \lg m/M_\odot} \sum_{i=1}^{\Delta_k N} \frac{1}{\hat{d}_{xy,i}^2}, \quad (4)$$

где k показывает индекс ящиков гистограммы, $\Delta_k N$ — количество объектов в k -ом ящике, а переменная ширина ящика обеспечивает в нем минимум 10 объектов.

Можно видеть, что НФМ галактических скоплений состоит из двух частей: почти горизонтальной маломассивной ($\lg m/M_\odot < 2.4$) и массивной, падающей с ростом $\lg m/M_\odot$. Обе части хорошо аппроксимируются линейными функциями с наклонами $x = 0.14 \pm 0.10$ и -1.00 ± 0.09 . Отметим, что последняя величина хорошо согласуется с наклонами для НФМ внегалактических, значительно более массивных скоплений [9]. Маломассивная часть и большая доля массивного отрезка НФМ скоплений в других галактиках не видна.

Это исследование частично поддержано РФФИ (грант 16-52-12027). В ходе исследования были использованы база данных Simbad, сервис

каталогов VizieR и другие сервисы, предоставляемые Страсбургским центром астрономических данных, Франция, а также база данных WEBDA, поддерживаемая, университетом им. Масарика, Чехия.

Список литературы

1. R. Wielen, *A&A*, **13**, 1971.
2. E. F. E. Morales, F. Wyrowski, F. Schuller, and K. M. Menten, *A&A*, **560**, A76, 2013.
3. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz, *A&A*, **438**, 1163, 2005.
4. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **558**, A53, 2013.
5. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **585**, A101, 2016.
6. S. Schmeja, N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Röser, E. Schilbach, D. Froebrich, and R.-D. Scholz, *A&A*, **568**, A51, 2014.
7. R.-D. Scholz, N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Röser, and E. Schilbach, *A&A*, **581**, A39, 2015.
8. A. E. Piskunov, E. Schilbach, N. V. Kharchenko, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **477**, 165, 2008.
9. Q. Zhang and S. M. Fall, *ApJL*, **527**, L81, 1999.

Глобальный обзор звездных скоплений в Млечном Пути III: Кинематика и фундаментальные параметры шаровых скоплений

Харченко Н.В.¹, Пискунов А.Э.²

¹*Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, Украина*

²*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

В статье рассмотрены некоторые результаты глобального обзора звездных скоплений MWSC (Milky Way Star Clusters) в части, касающейся шаровых скоплений. Из 158 известных сейчас шаровых скоплений мы исследовали 142 объекта и дополнительно классифицировали как шаровые скопления три других объекта, увеличив число исследованных объектов до 145. С помощью стандартного конвейера MWSC, модифицированного за счет включения вариаций металличности, мы провели отбор членов скоплений и определили их пространственные, кинематические и астрофизические параметры. Мы рассмотрели эволюционные изменения подсистемы шаровых скоплений Галактики и сравнили полученные результаты с данными о подсистеме рассеянных скоплений MWSC.

Global survey of star clusters in the Milky Way III: kinematics and fundamental parameters of globular clusters

Kharchenko N. V.¹, Piskunov A. E.²

¹*Main Astronomical Observatory of the NANU, Kiev, Ukraine*

²*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

This paper reports some results of the global survey of the Milky Way Star Clusters (MWSC), in part concerning globular clusters. Out of 158 presently known globular clusters we studied 142 objects, and additionally classified as globulars three other objects, increasing the total number of studied clusters to 145. Using our standard within the MWSC project pipeline, modified to accept different metallicities, we have selected cluster members, and determined spatial, kinematic and astrophysical parameters of the clusters. We analyse the evolutionary changes of the subsystem of the Galactic globular clusters and compare the findings with data on the subsystem of open clusters.

1. Введение

В этой статье мы суммируем неопубликованные результаты нашей работы по исследованию шаровых скоплений в рамках обзора MWSC (Milky Way Star Clusters). Введение к обзору и полученные в его рамках основные параметры описаны нами в [1, 2] и здесь не повторяются.

2. Входные данные и конвейер обработки

Как основные источники данных мы использовали глубокие всенебесные каталоги 2MASS [3] и PPMXL [4], представляющие собой современный ближне-инфракрасный фотометрический и астрометрический каркасы небесной сферы, которые были сведены в единый каталог 2MAst (см. [1]). В отличие от рассеянных скоплений, где эффект металличности не играет большой роли, для шаровых скоплений при определении параметров по диаграмме цвет-величина фактор металличности необходимо принимать во внимание. Для определения фотометрических параметров мы использовали двумерную сетку Падуанских теоретических изохрон, рассчитанных для набора типичных для Населения II металличностей и интерполированных с помощью Падуанского сервера изохрон CMD2.3¹. Изохроны покрывают диапазон возрастов $\lg t = 9.8 \dots 10.2$ с шагом 0.1. Для каждого возраста мы использовали набор металличностей $[\text{Fe}/\text{H}]$ в интервале $-2.3 \dots -0.1$ с шагом 0.1. Для обработки скоплений мы применяли наш стандартный конвейер, обеспечивающий кинематический и фотометрический отбор членов скоплений и определения фундаментальных параметров. Для шаровых скоплений конвейер был модифицирован таким образом, чтобы обеспечить наилучшее решение при совмещении диаграмм цвет-величина разной металличности.

3. Выборка скоплений

В настоящее время в Галактике известно 158 шаровых скоплений, 153 из них включены в каталог Харриса (издание 2010 г.) [5]. Из этого списка мы отождествили в 2MAst 142 скопления. Еще три скопления с неясным происхождением из входного списка MWSC, мы классифицировали как шаровые. Одно из них (ESO 093-08) классифицировано как шаровое в базе данных SIMBAD и как рассеянное в [6], другие два ранее не были классифицированы. Список этих скоплений вместе с определенными нами параметрами приведен в табл. 1. Таким образом, мы рассматриваем 145 шаровых скоплений нашей Галактики.

¹<http://stev.oad.inaf.it/cgi-bin/cmd>

Таблица 1. Данные о вновь классифицированных шаровых скоплениях

Номер MWSC	Имя	l град	b град	d кпк	$E(J - K_s)$ зв. вел.	$\lg t$ годы	[Fe/H]	r_t пк
1932	ESO 093-08	293.501	-4.036	14.9	0.200	9.80	0.00	51.7±11.4
2633	FSR 0019	5.492	+6.076	7.3	0.270	10.15	0.00	18.8±5.5
2664	FSR 0025	7.529	+5.656	7.2	0.325	10.20	0.00	19.0±6.0

Для них с помощью нашего конвейера мы в однородной системе переопределили фотометрические параметры скоплений: расстояния d , избытки цвета $E(J - K_s)$, металличности [Fe/H], дополнительно — приливные радиусы r_t , абсолютные собственные движения и возрасты $\lg t$, что существенно расширило базу параметров шаровых скоплений. Так, по сравнению со сводным списком собственных движений 62 шаровых скоплений Галактики [7] объем этих данных увеличен более, чем вдвое. Типичная точность найденных нами собственных движений составляет около 0.6 мкс/год. Сравнение наших определений с [7] показывает их хорошее согласие и отсутствие систематики по всему небу, при дисперсии вокруг корреляционного соотношения около 3 мкс/год. Найденные нами фундаментальные параметры скоплений также показывают хорошее согласие с данными сводного каталога Харриса (издания 2010 г.) [5]. Так, дисперсия разностей наших и литературных величин для d , $E(B - V)$, [Fe/H], $\lg t$ составляет 0.25 кпк, 0.04^m, 0.01, 0.04, соответственно. Также имеется хорошее согласие для r_t , хотя наши радиусы ядер кажутся слегка завышенными. Почти все шаровые скопления имеют измерения лучевых скоростей, что позволило вычислить пространственные скорости для 133 скоплений.

4. Соотношения между различными параметрами скоплений

Рис. 1 показывает связь между галактической Z -координатой шаровых скоплений и их металличностью и возрастом. Видно, что в отношении вертикального распределения скопления могут быть разделены на две группы. В первой группе можно встретить скопления с разными Z с типичной дисперсией Z -координаты около 10 кпк. Вторая группа демонстрирует концентрацию к плоскости Галактики с дисперсией около 1 кпк. Обе группы могут быть выделены и по их металличности и возрасту. Рассеянная по Z группа имеет низкую металличность ([Fe/H] < -1), и больший возраст ($\lg t > 10$), тогда как

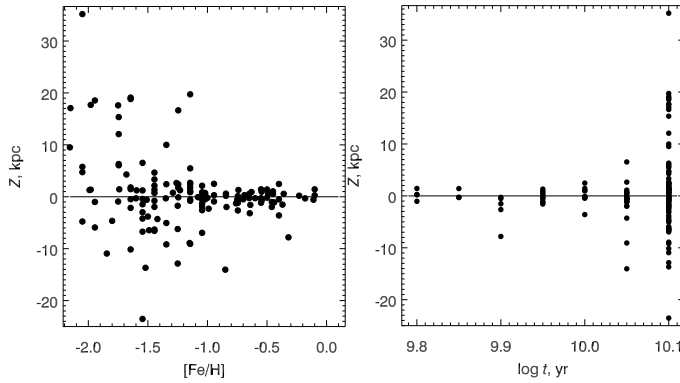


Рис. 1. Соотношение между Z -координатами шаровых скоплений и их металличностью (слева) и возрастом (справа).

«плоская» группа состоит из более молодых и металлических скоплений.

Рис. 2 (левая и средняя панели) показывает вариации металличности скоплений и скорости вращения относительно центра Галактики V_θ с логарифмом возраста $\lg t$. Можно видеть очевидный тренд металличности: чем моложе скопления, тем выше индекс металличности. В среднем их индекс меняется от $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.5$ для старейших скоплений до примерно -0.2 для самых молодых. Так как $[\text{Fe}/\text{H}]$ определялись нами одновременно с возрастными скоплениями из положений членов скоплений относительно изохрон (как правило, ветвей гигантов), мы не исключаем их корреляции и возможно, хотя бы часть наблюдаемого тренда может быть связана с этим обстоятельством. Однако, отметим, что возрастным трендом виден и для независимых от эффектов металличности параметров скоплений (Z , V_θ). Можно видеть, что старейшие скопления почти не вращаются вокруг вертикальной оси Галактики, со временем же средняя скорость вращения медленно нарастает, приближаясь к скоростям, сравнимым со скоростью вращения диска Галактики в окрестности Солнца.

На правой панели рис. 2 мы сравниваем соотношение между Z и возрастом для шаровых и рассеянных скоплений, изученных в рамках проекта MWSC и поэтому имеющих согласующиеся измерения возрастов. Можно видеть, что обе подсистемы звездных скоплений перекрываются в области приблизительно 6.5 млрд. лет, где мы наблюдаем самые старые рассеянные и самые молодые шаровые скоп-

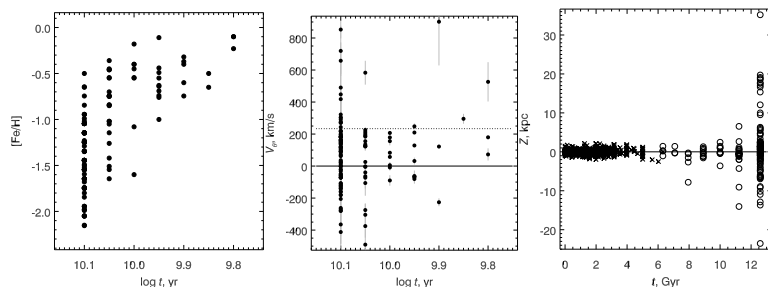


Рис. 2. Зависимость некоторых параметров скоплений от их возраста. Левая панель: отношение для металличности $[Fe/H]$; средняя панель: отношение для вращательной галактоцентрической скорости V_θ , пунктирная горизонтальная линия показывает скорость для солнечного галактоцентрического расстояния; правая панель: сравнение вертикального распределения шаровых (кружки) и рассеянных (крестики) скоплений.

ления. Наиболее интересной чертой этой диаграммы является непрерывность соотношения Z, t при переходе от рассеянных к шаровым скоплениям. Кажется, что рисунок показывает, что все скопления моложе 7 млрд. лет демонстрируют подобное вертикальное распределение. Для более старых скоплений Z -координата монотонно растет с возрастом. Возможно, этот рисунок может рассматриваться как свидетельство постепенной эволюции галактического гало и его плавного перехода к стадии галактического диска на более поздних стадиях.

5. Заключение

Мы представляем некоторые результаты нашего глобального обзора звездных скоплений в Млечном Пути, касающиеся шаровых скоплений. С помощью стандартного для MWSC конвейера, модифицированного за счет эффекта переменной металличности, мы отобрали фотометрико-кинематические члены скоплений (как правило, красные гиганты) и с их помощью определили пространственные, кинематические и астрофизические параметры скоплений. Сравнение с уже опубликованными величинами показывает их разумное согласие. Анализ найденных значений показывает эволюционные изменения, претерпеваемые системой Галактических шаровых скоплений: она становится более плоской, вращается быстрее, а ее металличность возрастает со временем. Сравнение с рассеянными скоплениями показывает

отсутствие резкого перехода между двумя подсистемами галактических скоплений.

Это исследование поддержано частично Российским фондом фундаментальных исследований РФФИ (грант 16-52-12027).

Список литературы

1. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **543**, A156, 2012.
2. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz, *A&A*, **558**, A53, 2013.
3. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al., *AJ*, **131**, 1163, 2006.
4. S. Röser, M. Demleitner, and E. Schilbach, *AJ*, **139**, 2440, 2010.
5. W. E. Harris, *AJ*, **112**, 1487, 1996.
6. W. S. Dias, B. S. Alessi, A. Moitinho, and J. R. D. Lépine, *A&A*, **389**, 871, 2002.
7. D. I. Casetti-Dinescu, T. M. Girard, V. I. Korchagin, W. F. van Altena, and C. E. López, *AJ*, **140**, 1282, 2010.

Изучение кинематики звезд в скоплении Гиады методом AD-диаграмм

Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Для изучения внутренней кинематики Гиад привлечены данные беспрецедентно высокой точности Gaia DR1 TGAS. Построено распределение звезд, входящих в состав скопления, в 2D и 3D. Сопоставлена форма скопления с его положением на орбите в галактическом диске. Аппроксимация этой области пространства показала, что звезды вписываются в эллипсоид, большая ось которого ориентирована приблизительно вдоль орбиты скопления в диске Галактики. Метод AD-диаграмм показал однородность распределения апексов звезд. Полученное положение апекса сравнено с определениями других авторов.

Study of the kinematics of stars in the Hyades cluster by the AD-diagram method

Postnikova E.S., Vereshchagin S.V., Chupina N.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In the study of the internal kinematics of Hyades cluster, data of unprecedented high accuracy of Gaia DR1 TGAS are involved. The distribution of the cluster stars in 2D and 3D is constructed. The shape of the cluster is compared with its position in the orbit in the galactic disk. The approximation of the cluster region of space showed that the stars fit into an ellipsoid whose major axis is oriented approximately along the orbit of the cluster in the disk of the Galaxy. The method of AD-diagrams showed homogeneity of the apex distribution of stars. The obtained position of apex is compared with the definitions of other authors.

1. Введение

Рассеянное звездное скопление (РЗС) Гиады — одно из самых близких к нам звездных скоплений, расстояние от Солнца составляет 47 пк. Видимые размеры 5.5° . Это одно из самых старых рассеянных скоплений, возраст составляет 625 – 750 млн. лет, [1], [2]. Другие названия — Collinder 50, Melotte 25. Экваториальные координаты центра: $\alpha(J2000) = 04^{\text{h}}26^{\text{m}}54^{\text{s}}$, $\delta(J2000) = +15^\circ52'00''$. Галактические координаты (J2000): $l = 180.0638^\circ$, $b = -22.3429^\circ$, [3]. Возможно, скопление Гиады образовалось из того же облака газа, что и скопление

Таблица 1. Выборка звезд Гиад. Приведены первые шесть строк, вся таблица размещена в облачном хранилище данных по URL-адресу: <https://yadi.sk/i/BdMdbJvc3VyZyM>

TGAS	HIP	A, °	D,	π ,	σ_π ,	μ_α , σ_{μ_α} ,	μ_δ , σ_{μ_δ} ,	V_r , σ_{V_r} ,
			мсд	мсд	мсд	мсд/год	мсд/год	км/с
144171228809559808	21099	97.8690	6.873	21.70	0.23	106.41 0.130	-39.26 0.077	39.65 0.17
144377799556207488	21256	96.3800	7.232	22.99	0.27	108.32 0.143	-46.26 0.096	41.40 0.40
145293177350363264 ¹	20712	97.2120	7.866	21.46	0.44	103.54 0.059	-37.87 0.037	38.21 0.06
145325544220443904 ¹	20480	96.7272	7.155	20.12	0.25	99.37 0.111	-37.94 0.067	38.54 0.17
145373372976256512	20557	98.0802	6.578	23.36	0.32	117.37 0.054	-45.80 0.032	37.30 0.50
146677874804442240	21637	98.0480	6.344	23.00	0.29	105.49 0.057	-54.19 0.077	39.08 0.21

¹спектрально двойная звезда

Таблица 2. Положения апекса Гиад, определенные разными авторами.

A	σ_A	D	σ_D	Источник
98.20	1.10	6.10	1.00	[7]
97.68	0.42	5.98	0.18	[8]
96.00	—	6.50	—	[9]
97.23	1.41	6.96	0.74	[10]
96.5330	0.563	6.5735	0.226	[11]
97.71	0.57	6.71	0.24	данная работа

Если [1]. РЗС Гиady относится к «движущимся» скоплениям: направления собственных движений звезд, входящих в его состав, сходятся к одной точке — апексу. Это позволяет эффективно использовать для изучения его внутренней кинематики метод AD-диаграмм, основанный на определении положений апексов звезд скопления.

2. Данные

Отправной точкой для настоящей работы является список, взятый из работы [4]. Он содержит 103 звезды-члена скопления, которые были идентифицированы в каталоге Gaia DR1 TGAS [5]. Список звезд содержит точные позиции, параллаксы и собственные движения для 103 звезд. В нем отсутствуют лучевые скорости, которые мы взяли из [3] для 92 звезд. Данные приведены в табл. 1. В ее столбцах указаны номера по каталогам [5] и HIPPARCOS [6], экваториальные координаты индивидуальных апексов звезд (см. раздел 3), собственные движения, параллаксы и их ошибки, лучевые скорости и их ошибки из [3].

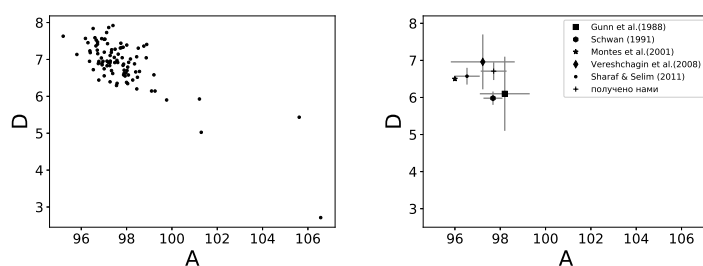


Рис. 1. AD-диаграмма РЗС Гиады, построена по 92 звездам (левая панель) и положение апекса РЗС Гиады по данным разных авторов, см. табл. 2 (правая панель). Единицы измерения по осям — градусы.

3. Положение апекса

Для каждой звезды получено положение апекса. AD-метод основан на переносе начала вектора пространственной скорости в точку наблюдения и определения координат пересечения этого вектора с поверхностью небесной сферы. Точкой пересечения и является искомый апекс. Близость местоположений точек на AD-диаграмме указывает на параллельность соответствующих пространственных векторов скорости. Формальное описание метода и формулы для определения эллипсов ошибок можно найти в [12]. В табл. 2 приведены определения положения апекса Гиад различными авторами.

На рис. 1 показаны положения среднего апекса Гиад, полученные разными авторами, и представлены наши результаты. Сравнение правой и левой панелей рис. 1 показывает, что разброс средних апексов укладывается в область разброса апексов звезд.

Четыре звезды на рис. 1 (левая панель) выходят за пределы трех сигм от среднего апекса. Данные об этих звездах представлены в табл. 3. В ее столбцах приведены номера по каталогам TGAS и HIP-PARCOS, координаты апекса, экваториальные координаты, параллакс, собственные движения и лучевые скорости, дополнительная информация из [3].

Отклонение апекса звезды HIP 19870, возможно, обусловлено отличием ее лучевой скорости от средней. Средняя лучевая скорость Гиад $V_r = 39.1 \pm 0.02$ км/с, [13]. Оставшиеся три звезды представляют собой звезды с высокими собственными движениями [3].

Таблица 3. Звезды, апексы которых значительно отклоняются от среднего.

TGAS	HIP	A °	D °	π мсд	μ_α мсд/год	μ_δ мсд/год	V_r км/с	σ_{V_r} км/с
3300315439330018304 ¹	19441	105.615	5.433	28.08	154.748	-5.447	28.08	0.25
3307528029449757056 ¹	21267	101.214	5.927	21.67	102.816	-17.418	35.00	4.40
3408463506117452544 ¹	22850	101.293	5.024	15.92	62.838	-28.918	35.00	4.30
49365082792386816 ²	19870	106.564	2.712	19.87	109.624	-35.151	27.20	2.00

¹высокоскоростная²спектрально двойная

4. Эллиптичность формы РЗС

В процессе движения по орбите сформировавшееся РЗС претерпевает изменения, связанные как с эволюцией и динамикой звезд, так и благодаря внешним взаимодействиям. Первоначально сферическая форма скопления может становиться эллипсоидальной благодаря гравитационному взаимодействию с элементами диска и диссипации звезд. Представляет интерес понять в каком из направлений происходит растекание скопления. Для этого мы построили 3D изображение, представленное на рис. 2, которое аппроксимировали эллипсоидом. Для построения эллипсоида использовалась программа, реализованная нами на языке программирования PYTHON, алгоритм взят на сайте MathWorks¹.

На рис. 3 показана проекция пространственного распределения звезд на плоскость галактического диска XY. Представлена аппроксимация распределения точек эллипсам путем последовательного уменьшения числа внешних точек. Как видно на рис. 3, скопление имеет эллиптическую форму. Большая ось эллипса направлена под углом 8° относительно оси абсцисс. Это свидетельствует о вытянутости РЗС в настоящее время в направлении оси абсцисс.

5. Заключение

В работе стандартный для TGAS список звезд дополнен лучевыми скоростями из [3]. Построенная AD-диаграмма позволила определить средний апекс скопления. Однородность и компактность формы AD-диаграммы свидетельствует о кинематической однородности ядра и короны. Отдельное место на диаграмме занимают звезды HIP 19441,

¹<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9542-minimum-volume-enclosing-ellipsoid>

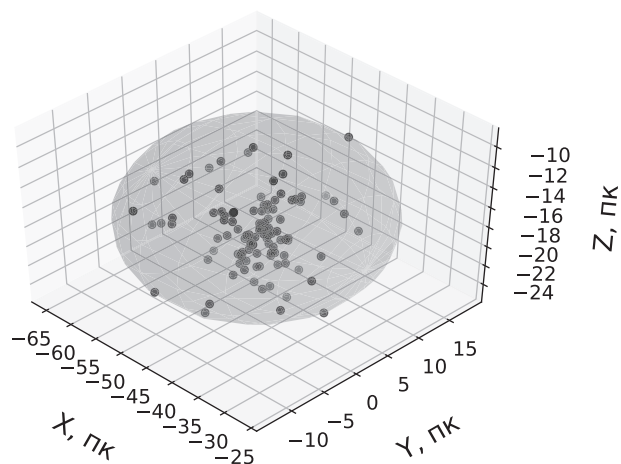


Рис. 2. Распределение звезд Гиад в пространстве. Направления осей: X — в направлении галактической долготы $l = 0^\circ$, Y — в направлении $l = 90^\circ$ и Z — в направлении Северного полюса Галактики.

21267, 22850, 19870. Хотя в [3] они определяются как звезды с высокими собственными движениями, этот фактор не может быть решающим для высокоскоростного РЗС Гиады. Их статус нуждается в дальнейшем уточнении.

Пространственная форма скопления, представление о которой дает рис. 2, его вытянутость приблизительно вдоль орбиты, позволяет рассмотреть версию «размазывания» скопления в пространстве с учетом закона сохранения углового момента. Этот фактор возможно оказывается важным, что видно по параметрам эллипсоида, аппроксимирующего форму Гиад. Факт сплюснутости Гиад по Z-координате и вытянутости по X-координате не нов. На разном материале это показано в [14] и по TGAS в [15]. Отметим, что скопление выглядит компактным как кинематически (рис. 1, левая панель), так и в пространстве (рис. 2), без четкого разделения на ядро и корону.

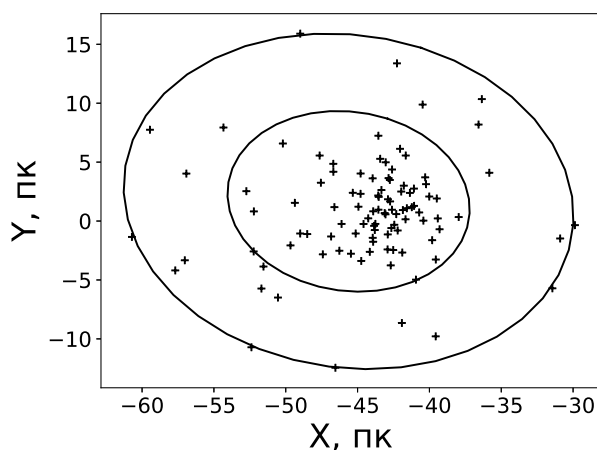


Рис. 3. Распределение звезд Гиад на плоскости XY . Показана аппроксимация эллипсами двух областей точек. Внешний эллипс охватывает все звезды. В области, ограниченной внутренним эллипсом, концентрация звезд по отношению ко всему распределению возрастает более чем в 5 раз.

В работе использовались данные миссии Gaia² Европейского космического агентства (ESA), обработанные Консорциумом обработки и анализа данных Gaia³ (DPAC). Финансирование DPAC было предоставлено национальными учреждениями, в частности учреждениями, участвующими в Многостороннем соглашении по Gaia. Мы использовали базу данных SIMBAD, работающую в CDS, Страсбург, Франция. Н.В. Чупина, С.В. Верещагин и Е.С. Постникова частично поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ, номер гранта 16-52-12027).

Список литературы

1. M. A. C. Perryman, A. G. A. Brown, Y. Lebreton, A. Gomez, et al., *A&A*, **331**, 81, 1998.
2. T. D. Brandt and C. X. Huang, *ApJ*, **807**, 24, 2015.
3. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, P. Dubois, et al., *A&A Sup.*, **143**, 9, 2000.

²<http://www.cosmos.esa.int/gaia>

³<http://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>

4. Gaia Collaboration, F. van Leeuwen, A. Vallenari, C. Jordi, et al., *A&A*, **601**, A19, 2017.
5. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., *A&A*, **595**, A2, 2016.
6. ESA, ed., *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission, ESA Special Publication*, volume 1200 (1997).
7. J. E. Gunn, R. F. Griffin, R. E. M. Griffin, and B. A. Zimmerman, *AJ*, **96**, 198, 1988.
8. H. Schwan, *A&A*, **243**, 386, 1991.
9. D. Montes, J. López-Santiago, M. C. Gálvez, M. J. Fernández-Figueroa, E. De Castro, and M. Cornide, *MNRAS*, **328**, 45, 2001.
10. S. V. Vereshchagin, V. G. Reva, and N. V. Chupina, *Astron. Rep.*, **52**, 94, 2008.
11. M. A. Sharaf and H. H. Selim, *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, **1**, 104, 2011.
12. N. V. Chupina, V. G. Reva, and S. V. Vereshchagin, *A&A*, **371**, 115, 2001.
13. D. R. Ciardi, I. J. M. Crossfield, A. D. Feinstein, J. E. Schlieder, et al., *AJ*, **155**, 10, 2018.
14. S. Röser, E. Schilbach, A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, and R.-D. Scholz, *A&A*, **531**, A92, 2011.
15. S. Reino, J. de Bruijne, E. Zari, F. d'Antona, and P. Ventura, *MNRAS*, 2018.

Параметры 19 рассеянных звездных скоплений по данным каталога Gaia DR1

Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассмотрены пространственная форма и кинематическая структура 19 рассеянных звездных скоплений. Используются данные астрометрии Gaia DR1 TGAS. Определены положения средних апексов с помощью метода AD-диаграмм. Сделана аппроксимация эллипсоидами пространственной формы областей, занятых звездами скоплений. Проанализированы особенности формы и расположения скоплений в пространстве. Отдельным приложением публикуется Атлас AD-диаграмм и XY-распределений звезд с эллипсами, аппроксимирующими форму скоплений.

The parameters of 19 open star clusters from Gaia DR1

Postnikova E.S., Vereshchagin S.V., Chupina N.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The spatial shape and the kinematic structure of 19 open star clusters using the AD-diagram method are considered. Gaia DR1 TGAS astrometry data were used. The positions of the average apexes are determined. An ellipsoids approximation is made for the spatial shape of the regions occupied by cluster member stars. The features of the cluster shapes and positions in space are analyzed. The Atlas AD-diagrams of 19 clusters and XY-distributions of stars with ellipses parameters approximating the spatial form of clusters are published separately.

1. Введение

В работе [1] проведен отбор звезд из каталога Gaia DR1 TGAS [2], входящих в состав 19 рассеянных звездных скоплений (РЗС). Беспрецедентно высокая точность астрометрических данных позволяет рассматривать детали пространственно-кинематической структуры РЗС. Метод AD-диаграмм [3] эффективен для изучения деталей внутренней кинематики скоплений и определения средних положений апексов. Наличие высокоточных параллаксов звезд позволило рассмотреть особенности внутреннего устройства РЗС.

Рассмотренная выборка позволила провести аппроксимацию формы скоплений, построить AD-диаграммы и определить апексы РЗС. Проведенное нами в данной работе сопоставление положений скопле-

Таблица 1. Параметры 19 скоплений, список взят из [1].

Имя	n	возраст млн. лет	μ_α мсд/год	μ_δ мсд/год	σ_μ	V_r км/с	σ_{V_r}	X	Y пк	Z	D пк
Гиады	103	750.0	104.92	-28.00	0.12	39.1	0.02	-41.6	0.0	-17.1	45
Волосы Вероники	50	448.7	-11.72	-8.76	0.29	-1.0	0.48	-7.4	-5.9	86.1	87
Плеяды	152	135.2	19.40	-46.00	0.15	5.5	0.33	-115.8	28.6	-51.8	130
IC 2602	66	32.1	-16.95	9.65	0.18	21.9	2.54	49.8	-141.9	-13.1	151
IC 2391	44	45.8	-24.20	23.42	0.62	14.6	1.39	0.5	-163.8	-19.7	165
α Персея	116	71.4	21.49	-26.11	0.18	-1.4	0.65	-146.5	93.7	-20.0	175
Ясли	79	729.5	-36.54	-13.36	0.11	33.4	0.52	-142.1	-68.6	100.4	187
NGC 2451A	37	60.3	-21.80	15.13	0.61	22.6	4.49	-56.4	-177.6	-25.1	188
Blanco 1	43	62.5	19.71	2.28	0.18	5.5	2.04	45.9	12.1	-245.6	250
NGC 6475	78	298.5	2.58	-4.98	0.33	-12.6	1.04	301.2	-22.8	-23.6	303
NGC 7092	23	278.6	-8.38	-20.27	0.47	-8.6	2.97	-12.8	309.5	-12.1	310
NGC 2232	31	53.3	-4.15	-2.43	0.43	19.8	4.54	-269.9	-185.0	-42.5	330
IC 4665	16	43.1	-0.60	-8.00	0.24	-12.2	1.18	289.7	171.2	103.4	352
NGC 2547	40	38.5	-8.37	4.40	0.61	14.8	1.94	-35.5	-355.2	-54.1	361
NGC 2516	87	112.7	-3.50	10.20	0.29	21.2	1.08	22.9	-358.1	-101.9	373
NGC 6633	47	425.6	-0.30	-2.65	0.35	-25.4	3.79	308.2	223.9	55.6	385
Collinder 140	30	35.3	-7.90	4.28	0.66	22.9	0.83	-162.0	-346.2	-51.5	386
NGC 3532	128	310.5	-10.87	4.89	0.43	1.2	0.72	151.0	-428.0	10.9	454
NGC 2422	34	72.6	-6.63	2.11	0.16	36.7	2.92	-297.0	-364.7	25.8	471

ний в галактическом диске и несимметричности распределений звезд внутри них может быть полезно как для изучения динамики и диссипации звезд из скоплений, так и выявления влияния возможных эффектов селекции и особенностей измерений астрометрических параметров.

2. Данные

В работе [1] приведены однородные и высокоточные астрометрические параметры звезд-членов 19 скоплений из Gaia DR1 TGAS. Названия этих скоплений, количество звезд в них, возрасты из [4], собственные движения и их ошибки из [5], лучевые скорости V_r и их ошибки из [5], прямоугольные галактические координаты XYZ , расстояния от Солнца D , рассчитанные по параллаксам из [2], содержатся в табл. 1.

Прямоугольные координаты определены с помощью стандартных формул. Направления осей: X — в направлении галактической долготы $l = 0^\circ$, Y — в направлении $l = 90^\circ$ и Z — в направлении Северного полюса Галактики. Для Гиад лучевая скорость скопления и собственные движения взяты из [6], возраст — из [7].

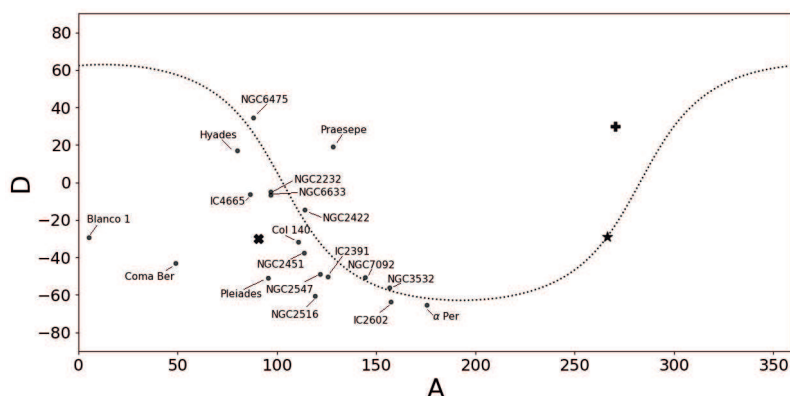


Рис. 1. Сводная AD-диаграмма для 19 РЗС. Величины A и D заданы в градусах. Кривая линия показывает положение плоскости Галактики. Обозначены положения: апекса Солнца — жирным крестиком ($A_{\odot} = 270.6^{\circ}$, $D_{\odot} = 29.9^{\circ}$ [8]), антиапекса Солнца — жирным косым крестиком ($AA_{\odot} = 89.4^{\circ}$, $AD_{\odot} = -30.1^{\circ}$). Положение центра Галактики отмечено звездочкой.

3. AD-диаграммы, пространственные параметры

3.1. AD-диаграммы

Построенные AD-диаграммы для каждого из скоплений размещены в облачном хранилище¹ как Приложение 1 к данной работе. На рис. 1 приведена сводная диаграмма, на которой видно, что большинство РЗС движутся в пределах тонкого диска. Заметно выделяются скопления Blanco 1, Волосы Вероники и Ясли, которые расположены высоко над/под плоскостью диска (см. значения Z -координаты в табл. 1).

Особенности индивидуальных AD-диаграмм можно увидеть в атласе из Приложения 1. Так, например, Blanco 1 расположено настолько далеко от Солнца, что из-за влияния ошибок собственных движений имеет растянутую AD-диаграмму. Для α Персея — относительно молодого, «движущегося» скопления, диаграмма очень узкая, но вытянутая из-за ошибок лучевых скоростей. Отметим также, что NGC 2451 состоит из двух скоплений — NGC 2451A и NGC 2451B, расположенных на одном луче зрения. Интересно рассмотреть детально его AD-диаграмму, но для этого пока недостаточно данных.

¹<https://yadi.sk/i/ZXic8EkS3W7uQv>

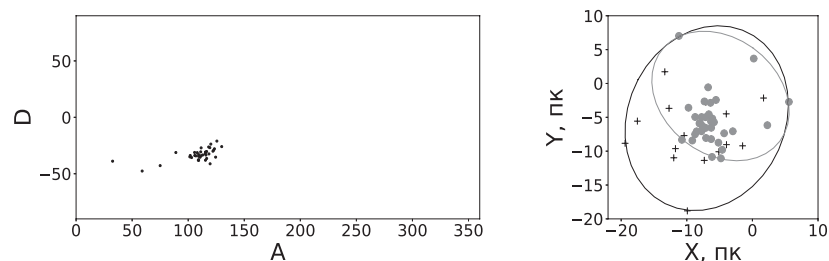


Рис. 2. AD-диаграмма (левая панель) и распределение звезд в плоскости XY (правая панель) для скопления Волосы Вероники. Величины A и D заданы в градусах. Эллипсами показана аппроксимация формы скопления в проекции на плоскость Галактики. Верхний эллипс аппроксимирует точки, показанные серым цветом — это наиболее вероятные члены скопления, отображенные на AD-диаграмме.

3.2. Аппроксимация формы РЗС

Для построения эллипсоидов, аппроксимирующих пространственную форму или расположение звезд внутри скоплений в пространстве, использовалась программа, реализованная нами на языке программирования PYTHON, алгоритм взят на сайте MathWorks². В атласе из Приложения 1 кроме AD-диаграмм даны распределения звезд в плоскости XY и их аппроксимация эллипсами. Опубликованная там информация выглядит так, как показано на рис. 2 для скопления Волосы Вероники.

В дополнение к информации из атласа на рис. 2 мы привели не одну, а две аппроксимации и, соответственно, два эллипса для разных списков вероятных членов скопления. Для выделения звезд с наибольшей вероятностью вхождения в состав скопления использована AD-диаграмма (левая панель рис. 2). Отметим, что малочисленность измерений лучевых скоростей пока является основным фактором, ограничивающим отбор наиболее вероятных членов скоплений.

3.3. Расположение в диске

На рис. 3 приведено сводное распределение эллипсов из атласа для 19 РЗС из табл. 1. На рис. 3 явно заметен эффект гелиоцентрической

²<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9542-minimum-volume-enclosing-ellipsoid>

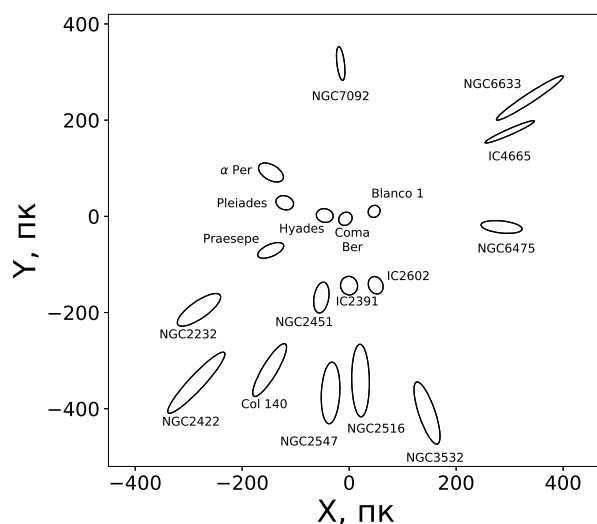


Рис. 3. Распределения РЗС на плоскости XY. Эллипсами показана проекция формы скоплений в масштабе рисунка.

направленности больших осей эллипсов. В [1] показано, что этот эффект в наибольшей степени выражен для далеких скоплений: ошибка в определении расстояний до звезд зависит от относительной ошибки параллакса Gaia и приводит к искусственной растянутости формы РЗС вдоль луча зрения. Внешний вид далеких РЗС (более 100 пк от Солнца) имеет вытянутый вид. На рисунке видно, что всего несколько скоплений (Гиады, Волосы Вероники, Blanco 1, и менее хорошо — IC 2391, IC 2602, NGC 2451) скорее всего отображают свою естественную форму, в то время как чуть более далекое скопление — Плеяды и Ясли, уже имеют характерные следы искажения этим эффектом.

4. Заключение

Мы рассмотрели AD-диаграммы 19 РЗС и определили положения их средних апексов, сводная диаграмма которых представлена на рис. 1.

Особенности пространственной формы скоплений ранее обсуждались, например, в [9]. Проекция на плоскость галактического диска эллипсоидов, аппроксимирующих формы РЗС, приведены на рис. 3. Возникает множество вопросов о вытянутости РЗС. Этот эффект вы-

ражен особенно хорошо для далеких скоплений (вытянутость в сторону Солнца). Для близких скоплений картина меняется и вытянутость исчезает. Как показано на рис. 2, положение и форма эллипса зависят от того, какие звезды взяты для определения этих параметров. К сожалению, для данных [1] есть зависимость ошибок расстояний от Солнца от ошибок параллаксов. В связи с этим форма скоплений искажается, в особенности для далеких скоплений.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 16-52-12027.

Список литературы

1. Gaia Collaboration, F. van Leeuwen, A. Vallenari, C. Jordi, et al., *A&A*, **601**, A19, 2017.
2. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., *A&A*, **595**, A2, 2016.
3. N. V. Chupina, V. G. Reva, and S. V. Vereshchagin, *A&A*, **371**, 115, 2001.
4. Z.-Y. Wu, X. Zhou, J. Ma, and C.-H. Du, *MNRAS*, **399**, 2146, 2009.
5. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Roeser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz, *VizieR Online Data Catalog*, **355**, 2013.
6. D. R. Ciardi, I. J. M. Crossfield, A. D. Feinstein, J. E. Schlieder, et al., *AJ*, **155**, 10, 2018.
7. M. A. C. Perryman, A. G. A. Brown, Y. Lebreton, A. Gomez, et al., *A&A*, **331**, 81, 1998.
8. D. Mihalas and J. Binney, *Science*, **214**, 829, 1981.
9. N. V. Kharchenko, P. Berczik, M. I. Petrov, A. E. Piskunov, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz, *A&A*, **495**, 807, 2009.

Гравитационная неустойчивость газового и звездного дисков галактики M81

Омурканов Т.З., Поляченко Е.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Секулярное формирование спиральных узоров дисковых галактик подразумевает их спонтанное возникновение вследствие развития неустойчивости аксиально-симметричного диска. Имеются две точки зрения на возможность формирования спиралей по такому сценарию. Первая (общепринятая) связана с неустойчивостью звездного диска, тогда как вторая рассматривает возможности возникновения различного рода неустойчивостей в газовом диске. Используя методы теории устойчивости, мы показываем, что звездный диск галактики M81 является сильно неустойчивым, тогда как газовый диск гравитационно устойчив с большим запасом.

Gravitational instability of the gaseous and stellar discs of the galaxy M81

Omurkanov T.Z., Polyachenko E.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The secular formation of spiral patterns of disc galaxies implies their spontaneous appearance due to the development of the instability of an axially symmetric disc. There are two points of view on the possibility of spiral formation in this scenario. The first (generally accepted) is related to the instability of the stellar disc, while the second one considers the possibility of an instability in the gaseous disc. Using methods of stability theory, we show that the stellar disc of the galaxy M81 is highly unstable, whereas the gaseous disc is gravitationally stable with a large margin.

1. Введение

Одним из возможных путей возникновения спиральных узоров галактик считается развитие неустойчивости аксиально-симметричного галактического диска. Поскольку диск, как правило, состоит из газового и звездного компонентов, имеются разные точки зрения на то, какой из компонентов определяет неустойчивость и форму рукавов.

Согласно первой, общепринятой, концепции, первична неустойчивость в звездном диске. Газовый диск, как более легкий и холодный, откликается на формируемые в звездном диске структуры [1]. Другая концепция допускает возможность первичной неустойчивости газовой

го диска благодаря развитию гравитационной или гидродинамической неустойчивости [2].

Цель данной работы — исследовать отдельно устойчивость звездного и газового дисков методами теории устойчивости [3, 4, 5] и сравнить характеристики неустойчивых мод. Параметры модели взяты из работы [6].

2. Неустойчивые спиральные моды

Для вычисления глобальных неустойчивых собственных мод необходимо иметь профили кривой вращения $V_{\text{circ}}(R)$, поверхностных плотностей звездного диска $\sigma_*(R)$ и газа $\sigma_g(R)$, а также дисперсии скоростей звезд $c_*(R)$ и скорости звука в газе $c_s(R)$. В настоящей работе мы используем трехкомпонентную модель диск-балдж-гало, описанную в [6] и слегка модифицированную для удобства расчетов. Так, для звездного диска нами была использована комбинация двух гауссовых дисков Тоомре [7]

$$\sigma_*(R) = \sigma_1 \exp\left(-\frac{\pi\sigma_1}{M_1}R^2\right) - \sigma_2 \exp\left(-\frac{\pi\sigma_2}{M_2}R^2\right), \quad (1)$$

где $\sigma_j = 9M_j/(2\pi a_j^2)$, $j = 1, 2$, $M_1 = 6.9 \cdot 10^{10} M_\odot$, $M_2 = 7 \cdot 10^9 M_\odot$, $a_1 = 10$ кпк, $a_2 = 7$ кпк. Полная масса звездного диска $M_d = 6.2 \cdot 10^{10} M_\odot$. Для дисперсии скоростей звезд примем выражение $c_*(R) = c_{*\text{max}}/\cosh(R^{1.5}/20)$, где $c_{*\text{max}} = 75$ км/с, а радиус R измеряется в кпк.

Для сферического гало мы используем модель [8]:

$$\rho_h(R) = \frac{\rho_{h0}}{1 + (R/R_h)^2}, \quad (2)$$

где $\rho_{h0} = 3.5 \cdot 10^7 M_\odot/\text{кпк}^3$, $R_h = 2.8$ кпк — характерная радиальная шкала гало. Масса гало в пределах 12 кпк равна $M_h = 2.84 \cdot 10^{10} M_\odot$.

Для балджа примем модель из работы [9]:

$$\rho_b(R) = \rho_{b0} \left(1 + \frac{R^2}{R_b^2}\right)^{-1.5}, \quad (3)$$

где центральная плотность $\rho_{b0} = 5.5 \cdot 10^8 M_\odot/\text{кпк}^3$, $R_b = 1$ кпк — радиальная шкала балджа. Масса балджа в пределах 12 кпк равна $M_b = 1.5 \cdot 10^{10} M_\odot$.

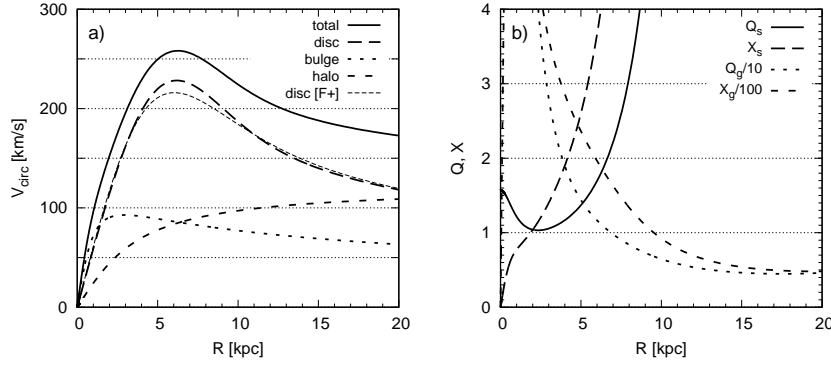


Рис. 1. а) Полная кривая вращения галактики $V_{\text{circ}}(R)$ (сплошная черная линия). Пунктирами показаны вклады соответствующих компонентов системы, тонким пунктиром — вклад, найденный для диска из работы [6]. б) Основные показатели устойчивости дисков $Q_{s,g}$, $X_{s,g}$. Для газового диска принято минимальное из трех перечисленных значений скорости звука.

Газовый компонент задается в виде тонкого диска с поверхностной плотностью [10]:

$$\sigma_g(R) = 4 \exp\left(-\frac{R^2}{2a_1^2}\right) - 3.5 \exp\left(-\frac{R^2}{2a_2^2}\right) \quad (4)$$

(в единицах $M_\odot/\text{пк}^2$), где $a_1 = 15$ кпк, $a_2 = 2.5$ кпк. Масса газа в пределах 10.8 кпк оценивается в $M_g = 1.15 \cdot 10^9 M_\odot$. Там же для скорости звука в газе приняты различные постоянные значения: $c_s = 7, 11, 19$ км/с.

На рис. 1а даны кривая вращения $V_{\text{circ}}(R)$ и вклады различных компонентов галактики — диска, балджа и гало. Видно, что вклад звездного диска нашей модели доминирует над вкладами как балджа, так и гало в пределах 20 кпк. Тонким пунктиром дан для сравнения вклад диска с параметрами оригинальной работы [6]; отличие от принятой нами модели незначительно. Рис. 1б содержит основные профили устойчивости — параметры Тоомре Q и X

$$Q_s = \frac{\kappa c_*}{3.36 G \sigma_*}, \quad Q_g = \frac{\kappa c_g}{\pi G \sigma_g}, \quad X_{s,g} = \frac{\kappa^2 R}{2\pi m G \sigma_{*,g}}, \quad (5)$$

где m — азимутальное число (количество спиральных рукавов), κ — эпициклическая частота, рассчитываемая по кривой вращения. Для

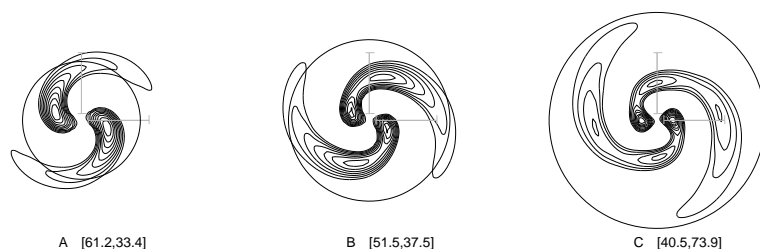


Рис. 2. Спиральные узоры неустойчивых мод. Окружность показывает радиус коротации моды. Вертикальные и горизонтальные шкалы соответствуют 4 кпк. Вращение диска против часовой стрелки. В скобках указаны скорость вращения спирального узора (в км/с/кпк) и характерное время увеличения амплитуды в e раз (в млн. лет).

возникновения неустойчивости ожидается, что эти параметры не должны превосходить 3 в области спиралей или бара [11].

Приведенные на рис. 1b профили устойчивости Q и X для газа, нормированные на 10 и 100, соответственно, показывают, что газовый диск должен быть устойчив. Это же следует из расчета глобальных мод, выполненного матричным методом [5]. Таким образом, газовый диск оказывается гравитационно устойчивым даже при минимальном значении скорости звука. Увеличение массы газового диска в три раза не дает неустойчивых глобальных мод, что свидетельствует об устойчивости газового диска с большим запасом.

Напротив, профили Q и X для *звездного* диска на расстоянии 5–6 кпк от центра находятся в пределах 3, так что наличие глобальных неустойчивых мод здесь вполне ожидаемо. На рис. 2 даны спиральные узоры первых трех мод, которые были найдены с помощью линейного матричного метода [4]. Самая неустойчивая мода имеет скорость вращения $\Omega_p = 61.2$ км/с/кпк (радиус коротации 3.5 кпк) и превосходит оценки скорости бара для нашей Галактики [12]. При этом, характерное время нарастания этой моды мало, всего 33.4 млн лет, что говорит о сильной неустойчивости данной модели галактики M81.

3. Заключение

В данной работе, используя матричные методы теории устойчивости, мы исследовали на устойчивость одну из возможных моделей галак-

тики M81 (отдельно газовый и звездный диски). В рамках нашего анализа — решения задач на собственные значения — мы не обнаружили глобальных неустойчивых мод в газовом диске. Это касается как гравитационных, так и гидродинамических мод. Отсутствие последних связано с тем, что кривая вращения и профили поверхностной плотности и скорости звука не имеют особенностей в виде изломов и скачков [13]. Гравитационные газовые моды отсутствуют вследствие малой массы газового диска.

Напротив, в звездном диске проявляется несколько неустойчивых глобальных мод в виде спиралей различной закрутки. Наиболее неустойчивая из них имеет форму открытой спирали. Такая спираль в численном моделировании в отсутствие газа быстро превращается в бар. Отсутствие бара на изображениях галактики может свидетельствовать о том, что влияние центрального уплотнения и газа нужно учитывать более тщательно при моделировании данного объекта.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-02-00649 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28 (подпрограмма II «Астрофизические объекты как космические лаборатории»).

Список литературы

1. V. L. Polyachenko and A. M. Fridman, *Equilibrium and stability of gravitating systems*. (1976).
2. A. M. Fridman and O. V. Khoruzhii, *Space Sci. Rev.*, **105**, 1, 2003.
3. E. V. Polyachenko, *MNRAS*, **348**, 345, 2004.
4. E. V. Polyachenko, *MNRAS*, **357**, 559, 2005.
5. E. V. Polyachenko, *ArXiv e-prints*, 2017.
6. C.-C. Feng, L.-H. Lin, H.-H. Wang, and R. E. Taam, *ApJ*, **785**, 103, 2014.
7. A. Toomre, *ApJ*, **138**, 385, 1963.
8. S. A. Lowe, W. W. Roberts, J. Yang, G. Bertin, and C. C. Lin, *ApJ*, **427**, 184, 1994.
9. E. Athanassoula, *MNRAS*, **259**, 328, 1992.
10. H.-H. Wang, W.-K. Lee, R. E. Taam, C.-C. Feng, and L.-H. Lin, *ApJ*, **800**, 106, 2015.
11. A. Toomre, in S. M. Fall and D. Lynden-Bell, eds., *Structure and Evolution of Normal Galaxies*, 111–136 (1981).
12. E. V. Polyachenko, P. Berczik, and A. Just, *MNRAS*, **462**, 3727, 2016.
13. Y. M. Torgashin and T. Z. Omurkanov, *Astron. Nachr.*, **334**, 870, 2013.

К резонансному поглощению волн плотности в спиральных галактиках

Поляченко Е.В.¹, Шухман И.Г.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

Рассматривается задача взаимодействия спиральной волны с внутренним линдбладовским резонансом галактического диска. Как известно из линейной теории, волна затухает благодаря механизму, предположительно аналогичному затуханию Ландау, т.е. связанному с определенным правилом обхода полюса в окрестности резонанса. Аналогичная проблема возникает в гидродинамике при решении уравнения Рэлея, где включение малой вязкости приводит к тому же правилу обхода и затуханию волны. Однако учет слабой нелинейности может привести к тому, что гидродинамическая волна будет не затухать, а полностью отражаться от резонанса. В данной работе мы исследуем модификацию правила обхода полюса, соответствующую доминирующей слабой нелинейности в гидродинамике и показываем, что и в этом случае нет полного отражения волны.

To the resonance decay of the density waves in spiral galaxies

Polyachenko E.V.¹, Shukhman I.G.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Institute of Solar-Terrestrial Physics, RAS Siberian Branch, Irkutsk, Russia*

Interaction of the spiral wave with the inner Lindblad resonance of the galactic disc is considered. The linear theory gives the wave decay due to a mechanism supposedly analogous to the Landau damping and related to a certain bypass rule near the resonance. A similar problem arises in hydrodynamics in the solution of the Rayleigh equation, where the inclusion of a low viscosity leads to the same bypass rule and wave decay. However in the presence of the weak nonlinearity, the hydrodynamic wave could not decay but be completely reflected from the resonance. In this paper we investigate the modification of the pole bypass rule corresponding to the dominant weak nonlinearity in hydrodynamics, and show that the stellar wave does not reflect completely from the resonance.

1. Введение

Согласно принятой сейчас точке зрения, спиральные узоры дисковых галактик представляют собой волны плотности в звездно-газовой среде. Считается, что сама возможность формирования узора как в

звездном, так и в газовом компоненте определяет доминирующий по массе звездный диск. Распространение волн плотности подчиняется дисперсионному соотношению Линя-Шу-Калнайса [1, 2]:

$$\frac{k_T}{k} s_k = \mathcal{F}^{(LS)}(\nu, x), \quad (1)$$

где $k = k(r)$ — радиальное волновое число, описывающее быстрое изменение фазы возмущенного потенциала и плотности Φ , $\sigma(r, \varphi, t) \sim V(r), S(r) \cdot \exp\{i[\int^r k(r') dr' + m\varphi - \omega t]\}$, $k_T(r) \equiv \varkappa^2(r)/(2\pi G \sigma_0(r))$, $s_k = \text{sgn}[\text{Re}(k)]$, $\nu \equiv (\omega - m\Omega)/\varkappa$ — безразмерная частота, ω — вещественная частота возмущений, $\Omega(r)$ — угловая частота вращения, $\varkappa(r)$ — эпициклическая частота, $m = 2$ — количество спиральных рукавов, $x \equiv k^2 c^2/\varkappa^2$, $\sigma_0(r)$ и $c(r)$ — поверхностная плотность и радиальная дисперсия скоростей звезд. Функция $\mathcal{F}^{(LS)}$ есть так называемый редуционный фактор Линя-Шу, который для функции распределения Шварцшильда имеет вид

$$\mathcal{F}^{(LS)}(\nu, x) = \frac{2}{x} e^{-x} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n(x)}{1 - \nu^2/n^2}, \quad (2)$$

где $I_n(x)$ — модифицированные функции Бесселя 1-го рода. Уравнение (1), определяющее зависимость волнового вещественного числа $k(r)$ от радиуса r при различных значениях частоты вращения спирального узора $\Omega_p = \omega/m$, имеет три важных ограничения: а) оно получено вдали от резонансов звездного диска, б) в главных порядках эпициклического и ВКБ приближений и в) предполагается, что два малых параметра задачи, $1/(kr)$ и $\epsilon = a/r$, где $a = c/\varkappa$ — размер эпицикла, имеют одинаковый порядок: $(kr)^{-1} \sim \epsilon$.

В дальнейшем мы рассматриваем обобщение дисперсионного уравнения (1) в области резонанса, предполагая k комплексным. Однако его мнимая часть k_i , появляющаяся только в окрестности резонанса, считается существенно меньше реальной части k_r .

Впервые задача взаимодействия волны с внутренним линдбладовским резонансом при упомянутых предположениях была рассмотрена Марком [3, 4]. Резонансный вклад \mathcal{F}^{RES} в редуционный фактор, $\mathcal{F} = \mathcal{F}^{\text{NR}} + \mathcal{F}^{\text{RES}}$, отвечающий в (2) слагаемому $\nu(R) = -1$, можно

записать в виде следующего интеграла по скоростям:

$$\mathcal{F}^{\text{RES}}(\nu, y, r) = -\frac{1}{(2\pi)^2 r^2 \epsilon^2(r) x} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\xi d\eta}{\nu(R) + 1} \exp\left[-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2\epsilon^2(r)}\right] \times \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left\{-i s + i(kr) [\eta(1 + \cos s) + \xi \sin s]\right\} ds. \quad (3)$$

В этом выражении R — радиус ведущего центра эпицикла, $\xi = v_r/(r\kappa)$, $\eta = \gamma \tilde{v}_\varphi/(r\kappa)$, $\epsilon \equiv c/(\kappa r)$, $\gamma = 2\Omega/\kappa$, $\tilde{v} = v_\varphi - \Omega(r)r$. Эпициклическое приближение дает $\gamma \tilde{v}_\varphi = -\kappa(r - R)$, поэтому справедливо соотношение $R = r(1 + \eta)$. В выражении (3) везде, где это несущественно, мы заменили R на r . Однако в резонансном знаменателе, $[\nu(R) + 1]^{-1}$, сохранена правильная зависимость $\nu(R)$, т.к. интеграл движения R при фиксированном r зависит от η .

Далее, вычисляя интеграл (3), Марк использует стандартные правила обхода особой точки (радиуса внутреннего линдбладовского резонанса) $R = R_L$, т.е. точки $\eta = \eta_c = R_L/r - 1$, вытекающие из принципа причинности, записывая резонансный знаменатель в виде

$$\frac{1}{\nu(R) + 1} = \frac{L}{r} \frac{1}{\eta - (\eta_L - i0)} = -i \frac{L}{r} \int_{-\infty}^0 \exp\{-i[\eta - (\eta_L - i0)]\lambda\} d\lambda, \quad (4)$$

где $(\eta_L - i0)$ означает, что у вещественной переменной η_L есть отрицательная мнимая часть, которая и определяет правило обхода полюса. Тогда получившийся тройной интеграл удастся представить в виде

$$\mathcal{F}^{\text{RES}}(\nu, y, r) = -\frac{iL}{r\epsilon(r)x} \int_{-\infty}^0 I_1(x - \mu y) e^{-(x - \mu y)} e^{-\frac{1}{2}\mu^2} e^{-i u_L \mu} d\mu, \quad (5)$$

где $y \equiv kr\epsilon$, $x = y^2$, $1/L \equiv [d\nu/dr]_{r=R_L}$. Важно подчеркнуть, что, как правило, для реальных галактик производная $[d\nu/dr]_{r=R_L}$ положительна, и это обстоятельство совместно с принципом причинности определяет правило обхода в линейной теории (знак мнимой добавки к η_L). Кроме того, мы ввели безразмерный параметр u_L ,

$$u_L = -\eta_L/\epsilon = (r - R_L)/(r\epsilon) = [L/(r\epsilon)] [\nu(r) + 1], \quad (6)$$

представляющий расстояние от рассматриваемой точки r до резонанса R_L в единицах эпициклического размера $a = r\epsilon$. Заметим, что при

удалении от резонанса к периферии галактики (в область прозрачности ВКБ волны) $u_L(r) > 0$.

Напомним вкратце смысл упомянутого принципа причинности, который диктует правило обхода в линейной теории. Он вытекает из предположения, что в далеком прошлом возмущение отсутствовало. Формально это приводит к тому, что при выборе возмущения в виде $\sim e^{-i\omega t}$ надо считать, что у частоты есть малая *положительная* мнимая часть, чтобы при $t = -\infty$ возмущение отсутствовало. Тогда в конструкции вида $1/[\Omega(z) - \omega]$ вблизи резонансной точки $z = z_c$, где $\Omega(z_c) = \omega$, можно записать

$$\frac{1}{\Omega(z_c) + \Omega'_c(z - z_c) - (\omega + i\varepsilon)} = \frac{1}{\Omega'_c} \frac{1}{z - (z_c + i\varepsilon/\Omega'_c)}. \quad (7)$$

где $\varepsilon \rightarrow +0$. Поэтому при $\Omega'_c > 0$ обход нужно делать снизу, а при $\Omega'_c < 0$ — сверху. Это правило называется правилом обхода Ландау [5] и формально вытекает из решения начальной задачи методом преобразования Лапласа. Применительно к нашей ситуации с $\nu' > 0$ это правило диктует обход особой точки $\eta = \eta_c$ сверху.

Аналогичная проблема в гидродинамике связана с решением невязкой версии уравнения Навье-Стокса, т.е. уравнения Рэлея. В уравнении Рэлея для стационарной волны в плоскопараллельном сдвиговом течении $U_x = u(y)$ для возмущений вида $\sim \exp[i(kx - \omega t)] = \exp[ik(x - ct)]$ возникает особая точка $y = y_c$ (в гидродинамике она называется *критическим уровнем*). Эта проблема была решена Линем (1955), однако не с помощью перехода к начальной задаче, а с помощью включения малой вязкости и дальнейшим стремлением вязкости к нулю. В результате оказалось, что правило обхода особой точки в интегралах типа $\int dy (\dots)/[u(y) - c]$ совпадает с правилом обхода Ландау (т.е. снизу при $u'(y_c) > 0$). Поэтому иногда это правило обхода называют правилом обхода Ландау-Линя.

В гидродинамике сдвиговых течений проблема обхода формулируется на языке так называемого *скачка фазы логарифма* в решении $\psi(y)$ уравнения Рэлея при переходе через особую точку. Дело в том, что общее решение уравнения Рэлея вблизи особой точки имеет вид

$$\psi(y) = A f_A(\xi) + B f_B(\xi), \quad \xi \equiv y - y_c, \quad (8)$$

где

$$f_A(\xi) = 1 + q_c \xi \ln \xi, \quad f_B = \xi + \dots \quad (9)$$

и проблема состоит в том, как понимать логарифм при $\xi < 0$, т.е. при переходе через критический уровень. Если записать

$$\ln(y - y_c) = \ln|y - y_c| + i\Phi \quad (10)$$

и считать, что при $y - y_c > 0$ фаза логарифма Φ равна нулю, то при $y - y_c < 0$ (при условии, что $u'_c > 0$) фаза Φ окажется равной $-\pi$ (разрез в комплексной области y проводится вверх от точки ветвления логарифма). Таким образом, скачок фазы логарифма Φ при переходе справа налево равен $-\pi$. Это и означает правило обхода снизу.

Позднее оказалось, что правило обхода Ландау-Линия не является единственно возможным. Так, наличие слабой нелинейности приводит к образованию узкого слоя в окрестности критического уровня шириной порядка $\epsilon^{1/2}$, где ϵ — мера нелинейности (амплитуды волны) [6, 7]. Это так называемый *нелинейный критический слой* (КС). Его следует отличать от линейного вязкого КС, ширина которого определяется вязкостью и равна $\nu^{1/3}$. Вязкий КС существует даже в обычной линейной задаче, когда амплитуда ϵ является самым малым параметром, т.е. она даже меньше вязкости (в соответствующих безразмерных единицах), которая тоже очень мала. При $\epsilon > \nu^{2/3}$ роль нелинейности более важна, чем роль вязкости¹. Заметим, что при малой вязкости и малой нелинейности их роль никак не сказывается вне КС. Однако, если доминирует нелинейность, скачок фазы логарифма вместо $\Phi = -\pi$ становится равным нулю, $\Phi = 0$. Последнее обстоятельство означает, что интеграл с особенностью должен вычисляться как интеграл в смысле главного значения.

Цель данной работы — исследовать поведение спиральных волн звездного диска вблизи резонанса в ситуации, когда обход особой точки определяется не правилом обхода Ландау-Линия, а модифицируется по аналогии с гидродинамическими задачами о поведении волн в сдвиговых течениях при наличии критических слоев. Разумеется, такая модификация правила обхода является чисто гипотетической, поскольку ее обоснование требует тщательного и технически очень сложного анализа деформации функции распределения под действием нелинейной волны в узкой резонансной области (как это было сделано в аналогичных гидродинамических задачах). Тем не менее, исследовать такую гипотезу представляется интересным. Не исключено,

¹Это верно при условии, что речь идет только о стационарной волне, а не неустойчивости. В случае неустойчивости с конечным инкрементом о резонансе вообще можно забыть, а если он очень мал, т.е. вблизи порога неустойчивости, инкремент определяет ширину КС порядка $\gamma \ll 1$, и тогда речь идет о конкуренции не двух, а трех факторов.

что если в стандартном подходе затухание целиком обвязано обходу полюса, то может оказаться, что в модифицированном варианте волна плотности будет полностью отражаться от резонанса.

2. Модификация правила обхода резонанса

Интеграл в смысле главного значения равен полусумме интегралов, взятых с обходом сверху и снизу. Поэтому вместо (4) нужно записать

$$\frac{L}{r} \frac{1}{\eta - \eta_L} = \frac{L}{2r} \left[\frac{1}{\eta - (\eta_L - i0)} + \frac{1}{\eta - (\eta_L + i0)} \right]. \quad (11)$$

В итоге вместо известного результата Марка (5) получим после некоторых преобразований:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_P^{\text{RES}} &= \frac{L}{r\epsilon x} \int_{-\infty}^0 d\mu e^{-\mu^2/2} \left[T_{\text{even}}(\mu, y) \sin(u_L \mu) + i T_{\text{odd}}(\mu, y) \cos(u_L \mu) \right], \\ T_{\text{even}} &= -\frac{1}{2} \left[I_1(x + \mu y) e^{-(x+\mu y)} + I_1(x - \mu y) e^{-(x-\mu y)} \right], \\ T_{\text{odd}} &= \frac{1}{2} \left[I_1(x + \mu y) e^{-(x+\mu y)} - I_1(x - \mu y) e^{-(x-\mu y)} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где индекс P означает взятие интеграла в смысле главного значения, а индексы odd и even — антисимметричную и симметричную относительно $y = 0$ функции. Поскольку $T_{\text{odd}} \neq 0$, величина $\mathcal{F}_P^{\text{RES}}$ не является вещественной даже при вещественном y (т.е. при вещественном k). Это дает вместо уравнения (1) модифицированное уравнение

$$\frac{y^2}{y_L^2} = (2y s_y) \left[\frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{-y^2(1-\cos\theta)} \cos\theta d\theta \cdot \left(e^{-Z^2/2} \int_0^Z e^{s^2/2} ds \right) \right], \quad (13)$$

где $Z = u_L + i y (1 - \cos\theta)$, $s_y = \text{sgn}[\text{Re}(y)]$, $y_L^2 = (k_L r \epsilon)^2 = \pi G \sigma_0 L / c^2$. В пределе $\text{Re } x \gg 1$ оно упрощается:

$$\frac{y^2}{y_L^2} = e^{-u_L^2/2} \left(-i s_y e^{-2i u_L y} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{u_L} ds e^{s^2/2} \right), \quad (14)$$

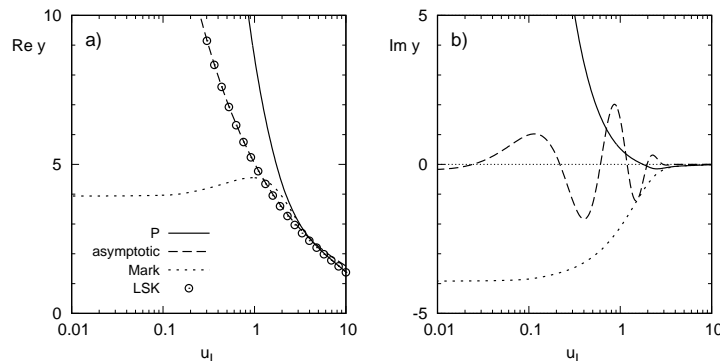


Рис. 1. Сравнения решений модифицированного дисперсионного уравнения (14), соответствующего учету слабой нелинейности; его асимптотической формы (15); уравнения с резонансным членом Марка (5). Кругжками показано решение Лия-Шу-Калнайса (1).

При достаточно больших u_L уравнение (14) дает

$$\begin{aligned} |y_r| &= y_L \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/4} u_L^{-1/2}, \\ y_i &= -\frac{1}{2} y_L u_L^{1/2} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/4} \cos(2 u_L y_r) e^{-u_L^2/2}. \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 1 показаны решения дисперсионных соотношений в трех вариантах с учетом только резонансных членов. Параметры модели диска галактики приняты такими же, как в работе [4]. В отличие от решения Марка, для которого характерны конечные значения реальной и мнимой частей волнового вектора, полученные нами решения (сплошные линии) оказываются бесконечными при приближении к резонансу. Более того, мнимая часть $k(r)$ оказывается положительной, что означает рост амплитуды отстающей тугозакрученной волны в направлении резонанса. Таким образом, есть серьезная проблема с интерпретацией затухания волны в духе Ландау.

Другой проблемой, упомянутой в [4], является согласование этих результатов с известной работой [8], из которой прямо следует отсутствие затухания и поглощения волны при замене правила обхода на взятие в смысле главного значения. Для сравнения интерес представляет *среднее* по резонансной области значение мнимой $k_i(r)$, поскольку

ку ослабление волны определяется фактором

$$\Gamma = \exp \left[- \int_{R_L}^{R_L + \Delta r} k_i(r) dr \right] = \exp \left[- \int_0^{\infty} y_i(u_L) du_L \right], \quad (16)$$

где $\Delta r \gg c/\kappa$. Очевидно, что условие $\Gamma = 1$ не выполняется ни для решения Марка, ни для нашего модифицированного решения. Однако ему удовлетворяет асимптотическое решение (15), выведенное нами на основе метода срачиваемых асимптотических разложений.

3. Заключение

Предпринята попытка исследовать природу затухания спиральной волны в галактическом диске на основе аналогии с решениями уравнений гидродинамики вблизи критического уровня, заменив правило обхода Ландау на взятие соответствующего интеграла в смысле главного значения. Такая замена соответствует учету слабой нелинейности в гидродинамике.

Показано, что в главном порядке эпициклического приближения и приближения ВКБ решения не дают ожидаемого отражения волны от резонанса, а предсказывают его бесконечное усиление. Кроме того, наш результат противоречит известной работе [8], из которой следует необходимость отсутствия затухания волны в среднем. Последнее удалось получить лишь в асимптотическом пределе уравнений, справедливом достаточно далеко от резонанса. Это означает, что приближение ВКБ неприменимо непосредственно вблизи резонанса.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-02-00649 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28, а также выполнялась как часть Госзадания 2018, проект №007-00163-18-00 от 12.01.2018 (И.Ш.)

Список литературы

1. C. C. Lin and F. H. Shu, *PNAS*, **55**, 229, 1966.
2. A. J. Kalnajs, *The Stability of Highly Flattened Galaxies.*, Ph.D. thesis, HARVARD UNIVERSITY., 1965.
3. J. W. K. Mark, in *BAAS*, *BAAS*, volume 3, 370 (1971).
4. J. W.-K. Mark, *ApJ*, **193**, 539, 1974.
5. L. D. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **16**, 574, 1946.
6. D. Benney and R. E. Bergeron, *Studies in Appl. Math.*, **48**, 181, 1969.
7. R. E. Davis, *J. Fluid Mech.*, **36**, 337, 1969.
8. D. Lynden-Bell and A. J. Kalnajs, *MNRAS*, **157**, 1, 1972.

Метод конечных элементов в задаче о неустойчивости звездного диска

Поляченко Е.В.¹, Банньярд П.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*ENSTA ParisTech, Париж, Франция*

Матричные методы вычисления неустойчивых глобальных мод являются мощным инструментом исследования устойчивости звездных систем. В данной работе предлагается новая матричная формулировка для звездных дисков на основе метода конечных элементов в двумерном пространстве действий. Приводится решение тестовой задачи.

Finite element method in stability problem for stellar disc

Polyachenko E.V.¹, Banniard P.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*ENSTA ParisTech, Paris, France*

Matrix methods for calculating unstable global modes are the powerful tool for studying the stability of stellar systems. In this paper, we propose a new matrix formulation for stellar discs based on the finite element method in a two-dimensional action space. A solution of the test problem is given.

1. Введение

Определение неустойчивых мод звездного диска представляет собой задачу на собственные значения. В теории возмущений она имеет матричную форму [1, 2]. Сравнительно недавно стали развиваться линейные матричные методы [3, 4, 5, 6], в которых задача представляется в виде стандартной алгебраической задачи на собственные значения ($\mathbf{A}\mathbf{x} = \omega\mathbf{x}$), где ω — искомая комплексная частота.

Напомним, что при исследовании устойчивости звездного диска используются линейризованное уравнение Больцмана и уравнение Пуассона. Первое удобно записать в переменных действие-угол (\mathbf{J}, \mathbf{w}), поэтому в этих же переменных нужно записать и уравнение Пуассона. Итоговое уравнение имеет вид [4]:

$$\mathcal{F}_l(\mathbf{J})[\omega - l\Omega_1(\mathbf{J}) - m\Omega_2(\mathbf{J})] = G\mathcal{F}'_{0,l}(\mathbf{J}) \int d\mathbf{J}' \sum_{l'=-\infty}^{\infty} \Pi_{l,l'}(\mathbf{J}, \mathbf{J}') \mathcal{F}_{l'}(\mathbf{J}'), \quad (1)$$

где $\{\mathcal{F}_l\}$ — собственные векторы, определяющие форму спиралей, $\Omega_{1,2}(\mathbf{J})$ — частоты звезды на орбите \mathbf{J} , определяемые интегрируемым гамильтонианом системы, $\mathcal{F}'_{0,l}(\mathbf{J})$ — комбинация частных производных невозмущенной функции распределения (ФР)

$$\mathcal{F}'_{0,l}(\mathbf{J}) = l \frac{\partial \mathcal{F}_0(\mathbf{J})}{\partial J_r} + m \frac{\partial \mathcal{F}_0(\mathbf{J})}{\partial L_z} . \quad (2)$$

Ядра интегрального уравнения даются выражением

$$\Pi_{l,l'}(\mathbf{J}, \mathbf{J}') = 4 \int_0^\pi dw_1 \int_0^\pi dw'_1 h[r(w_1, \mathbf{J}), r(w'_1, \mathbf{J}')] \times \\ \cos(lw_1 + m\theta) \cos(l'w'_1 + m\theta'), \quad (3)$$

где

$$h[r(w_1, \mathbf{J}), r(w'_1, \mathbf{J}')] \equiv \frac{1}{2\pi r_>} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(m\alpha)}{\sqrt{1 + z^2 - 2z \cos \alpha}} , \quad (4)$$

$r(w_1, \mathbf{J})$ — радиус невозмущенной орбиты, m — азимутальное число, $z = r_</r_>$, $r_< = \min[r(w_1, \mathbf{J}), r(w'_1, \mathbf{J}')]$, $r_> = \max[r(w_1, \mathbf{J}), r(w'_1, \mathbf{J}')]$;

$$\theta(w_1, \mathbf{J}) \equiv w_2 - \phi = w_2 - L_z \int_{r_{\min}}^r \frac{dx}{x^2 v_r(x, \mathbf{J})} , \quad (5)$$

$\phi = \phi(w_1, w_2, \mathbf{J})$ — азимут звезды, v_r — радиальная скорость:

$$v_r(r, \mathbf{J}) = [2(E - \Phi(r)) - L_z^2/r^2]^{1/2} . \quad (6)$$

Пара $\mathbf{J} = (J_1, L_z)$ однозначно определяет форму орбиты и позволяет найти энергию $E = E(\mathbf{J})$. Для фиксации орбиты вместо радиального действия и проекции углового момента на ось z можно пользоваться другими парами, например (E, L_z) . Но в любом случае неизвестные функции $\{\mathcal{F}_l\}$ заданы на *двумерном* фазовом пространстве.

В работах [4, 7] уравнение (1) решается методом коллокации, т.е. приравниванием левой и правой частей уравнения в заданных точках сетки. Другим возможным способом решения задачи (1) является разложение неизвестных функций в сумму по некоторым базисным функциям, определенным на небольших (элементарных) областях, и переход к т.н. слабой матричной задаче. Такой подход составляет суть метода конечных элементов. Целью работы является переформулирование задачи с использованием метода конечных элементов.

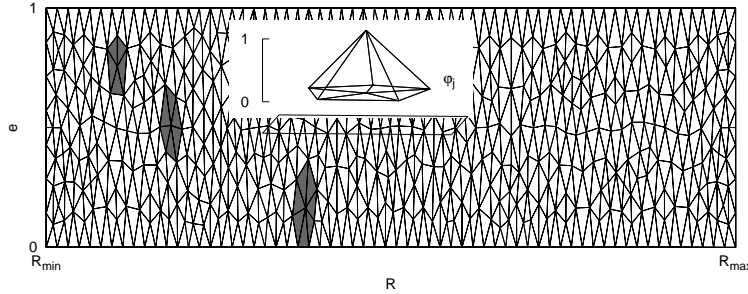


Рис. 1. Разбиение фазовой области на треугольные элементы. На врезке показана базисная функция, определенная на 5 треугольниках, имеющих общую вершину (количество треугольников может различаться, см. группы выделенных треугольников).

2. Метод конечных элементов

Разбиение фазовой области на элементы должно учитывать геометрию фазовой области. Наиболее простую форму — прямоугольную — она имеет в переменных (R_c, e) таких, что минимальный и максимальный радиусы орбиты $R_{1,2}(\mathbf{J}) = R_c(1 \mp e)$. Якобиан перехода от переменных \mathbf{J} к (R_c, e) есть

$$\mathcal{D} = \left| \frac{\partial(J_r, L_z)}{\partial(E, L_z)} \frac{\partial(E, L_z)}{\partial(R_1, R_2)} \frac{\partial(R_1, R_2)}{\partial(R_c, e)} \right| = \frac{2R_c}{\Omega_1 |L_z|} \frac{\tau_1 \tau_2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (7)$$

где $\tau_n \equiv 2(E - \Phi(R_n)) - R_n^2 \Phi'(R_n)$, $\Phi(R)$ — потенциал системы.

На рис. 1 показана фазовая область, разбитая на 1132 треугольников, имеющих 565 вершин. Данное разбиение получено с помощью стороннего программного обеспечения GMSH¹. Каждая из вершин определяет базисную функцию, равную 1 в вершине и нулю в вершинах треугольников, имеющих данную вершину общей (см. врезку). Так определенные базисные функции используются для разложения произвольной функции в фазовом пространстве:

$$\mathcal{F}_i(\mathbf{J}) \rightarrow \sum_j f_i^j \varphi_j(\mathbf{J}). \quad (8)$$

Интегрируя (1) по фазовой плоскости (R_c, e) , несложно получить матричное уравнение в слабой форме (здесь по повторяющимся ин-

¹<http://gmsh.info>

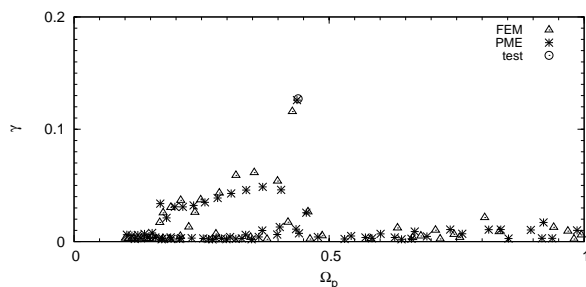


Рис. 2. Сравнение спектров неустойчивых мод, полученных методом конечных элементов (FEM) и линейным матричным методом [4] (PME). Кругом показано тестовое значение наиболее неустойчивой моды, приведенное в статье Тоомре [8].

дексам подразумевается суммирование):

$$\omega[1]_{kj} f_l^j = l[\Omega_1]_{kj} f_l^j + m[\Omega_2]_{kj} f_l^j + G[F'_{0,i}]_{ki} P_{ll'}^{in} [D]_{nj'} f_{l'}^{j'} , \quad (9)$$

где введено обозначение $[g]_{kj} = \int dR_c de \varphi_k \varphi_j g$, а функции ядра представлены в виде двойной суммы:

$$\Pi_{l,l'}(\mathbf{J}, \mathbf{J}') \rightarrow \sum_{in} P_{ll'}^{in} \varphi_i(\mathbf{J}) \varphi_n(\mathbf{J}') . \quad (10)$$

Тестирование метода проводилось на известной модели Тоомре-Цанга диска Местеля [8]. В таком диске имеется неустойчивая $m = 2$ мода с угловой скоростью вращения $\Omega_p = 0.439$ и скоростью экспоненциального нарастания $\gamma = 0.127$. Полученные нами FEM-спектр и спектр ранее апробированного метода (PME) представлены на рис. 2.

Наиболее неустойчивая FEM-мода имеет $(\Omega_p, \gamma) = (0.428, 0.116)$, что несколько меньше тестовых значений. Сравнение точности с методом коллокаций PME также оказалось не в пользу нового метода: первый дает для этой моды $(\Omega_p, \gamma) = (0.437, 0.126)$. Отметим, однако, что полученная новым методом точность сопоставима с точностью других линейных методов [5, 6, 7] и составляет несколько процентов.

3. Заключение

В работе впервые применен метод конечных элементов к решению задачи на нахождение глобальных неустойчивых мод звездного диска.

Созданные нами программы протестированы на ряде моделей и показывают точность, сравнимую с точностью других линейных методов.

В дальнейшем мы планируем развивать использование этого метода в направлении оптимизации выбора количества и формы элементов фазового пространства, замены представления функций ядра (10), а также тестировании на большем объеме моделей галактик.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-02-00649 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. A. J. Kalnajs, *ApJ*, **166**, 275, 1971.
2. A. J. Kalnajs, *ApJ*, **212**, 637, 1977.
3. E. V. Polyachenko, *MNRAS*, **348**, 345, 2004.
4. E. V. Polyachenko, *MNRAS*, **357**, 559, 2005.
5. M. A. Jalali, *ApJ*, **669**, 218, 2007.
6. M. A. Jalali, *MNRAS*, **404**, 1519, 2010.
7. E. V. Polyachenko and A. Just, *MNRAS*, **446**, 1203, 2015.
8. A. Toomre, *ARA&A*, **15**, 437, 1977.

Исследование неустойчивости методом конечных элементов на примере одной точно решаемой модели газового диска

Поляченко Е.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Исследование неустойчивости в газовых галактических и аккреционных дисках, в отличие от звездных, до сих пор не было формализовано в стандартных методах. Лишь недавно было предложено использовать для этой цели метод конечных элементов, позволяющий свести задачу нахождения неустойчивых мод к линейной алгебраической задаче на собственные значения. Мы показываем, что данный метод можно успешно применить к точно решаемой модели диска Хантера с давлением, и анализируем ошибки метода.

Investigation of instability by the finite element method on the example of one exactly solvable model of the fluid disc

Polyachenko E.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Investigation of instability in fluid galactic and accretion discs, in contrast to stellar discs, has not yet been formalised in standard methods. Recently, it has been proposed to use the finite element method for this purpose, which makes it possible to reduce the problem of finding unstable modes to a linear algebraic eigenvalue problem. We show that this method can be successfully applied to the exactly solvable Hunter disc model with pressure, and analyse the method errors.

1. Введение

Образование спирального узора в галактиках часто связывают с неустойчивостью аксиально симметричной системы. Нахождение неустойчивых мод — это задача на собственные значения. Для звездных дисков она ставилась и успешно решалась многими авторами [1, 2, 3]. Интересно отметить, что при исследовании звездных дисков использовались также и их газовые аналоги, ввиду того, что уравнения гидродинамики проще соответствующих уравнений кинетической теории. Однако характер взаимодействия с резонансами в этих средах различен,

что делает расчет неустойчивых мод в звездном диске в некотором смысле проще. Проблема с газовым диском заключается в том, что он допускает существование спиральных волн плотности, уходящих на бесконечность, что неизбежно влечет необходимость учета внешнего линдбладовского резонанса (OLR). До недавнего времени надежных и проверенных методов нахождения газовых мод не существовало.

В работе [4] предлагается использовать для этой цели метод конечных элементов. Цель настоящей работы — проверить работоспособность метода на примере одной точно решаемой модели с известным аналитическим дисперсионным соотношением.

2. Неустойчивость газового диска

Модель Хантера [5] является примером точно решаемой модели газового бесконечно-тонкого диска без давления. Она предполагает диск с конечным радиусом a и профилем поверхностной плотности

$$\Sigma_0(R) = \Sigma_* \xi, \quad \xi \equiv \left[1 - R^2/a^2\right]^{1/2}. \quad (1)$$

Такое распределение создает квадратичный гравитационный потенциал $\Phi_0(R) = \Omega_D^2 R^2/2$ с

$$\Omega_D^2 = \frac{\pi^2 G \Sigma_*}{2a}. \quad (2)$$

В 1976 г. И.Г. Шухман (частное сообщение, см. также [6]) обобщил эту модель, добавив давление газа с показателем адиабаты $\gamma = 3$:

$$p_0(R) = \frac{1}{3} \Sigma_* c_*^2 \xi^3. \quad (3)$$

Соответствующая скорость звука $c_s = c_* \xi$, а условие сохранения радиального равновесия теперь выглядит так:

$$\Omega_D^2 = \Omega^2 + \frac{c_*^2}{a^2}. \quad (4)$$

Угловая скорость вращения Ω при этом по-прежнему постоянна.

Собственные функции поверхностной плотности и потенциала в модели с давлением остаются теми же, что и в модели Хантера:

$$\Sigma_n(R) = \Sigma_* \frac{P_n^m(\xi)}{\xi}, \quad (5)$$

$$\Phi_n(R) = -4\Gamma_n^m a^2 \Omega_D^2 P_n^m(\xi), \quad (6)$$

где P_n^m — присоединенные многочлены Лежандра, а коэффициенты Γ_n^m даются выражением (m — азимутальное число, принятое в дальнейшем равным 2):

$$\Gamma_n^m = \frac{(n+m)!(n-m)!}{2^{2n+1} \left[\left(\frac{n+m}{2} \right)! \left(\frac{n-m}{2} \right)! \right]^2}, \quad n = 2, 4, 6, \dots \quad (7)$$

Обращает на себя внимание, что $\Sigma_n(R)$ имеют интегрируемую сингулярность — следствие эйлеровского описания задачи, подразумевающее фиксированную границу.

Как следует из гидродинамических уравнений, для ненулевого давления достаточно заменить функции Φ_n на $\Phi_n + c_s^2 \Sigma_n / \Sigma_0$. Это, в свою очередь, приведет к замене выражения $-4\Gamma_n^m a^2 \Omega_D^2$ в уравнении Хантера на $c_*^2 - 4\Gamma_n^m a^2 \Omega_D^2$ и в итоге к следующему характеристическому уравнению:

$$1 = \frac{c_*^2/a^2 - 4\Gamma_n^m \Omega_D^2}{\omega_*^2 - 4\Omega^2} \left(n^2 + n - m^2 - \frac{2m}{\omega_*} \right). \quad (8)$$

В пределе $n \gg 1$ коэффициенты $\Gamma_n^m \approx 1/(\pi n)$ и (8) сводится к уравнению ВКБ:

$$\omega_*^2 - 4\Omega^2 = c_*^2 \frac{n^2}{a^2} - \frac{4n}{\pi} \Omega_D^2. \quad (9)$$

При этом критерий устойчивости Тоомре имеет вид:

$$Q = \frac{\kappa c_s}{\pi G \Sigma_0} = \frac{\pi \Omega c_*}{a \Omega_D^2} > 1. \quad (10)$$

Частоты неустойчивых мод, найденные из уравнения (8), сравнивались с решениями линейной задачи на собственные значения [4]. Параметры модели $\Omega = 1$ и $a = 1$ были фиксированы, c_s варьировалось от нуля до 1. На рис. 1 а и б даны скорости вращения спирального узора и инкремента нарастания как функции параметра Q (10), рассчитанные обоими методами. Для $Q = 1$ имеются три неустойчивые моды, соответствующие $n = 2, 4, 6$. С увеличением давления инкременты мод уменьшаются; последняя стабилизируется при $Q = \pi/2$.

Рис. 1с и d демонстрируют точность расчетов в одной из моделей, $c_* = 0.1$. Отклонения Δ_n найдены как разность FEM и аналитических значений частоты. Поскольку мнимая часть Δ_n оказалась много больше действительной, мы используем именно ее для описания точности

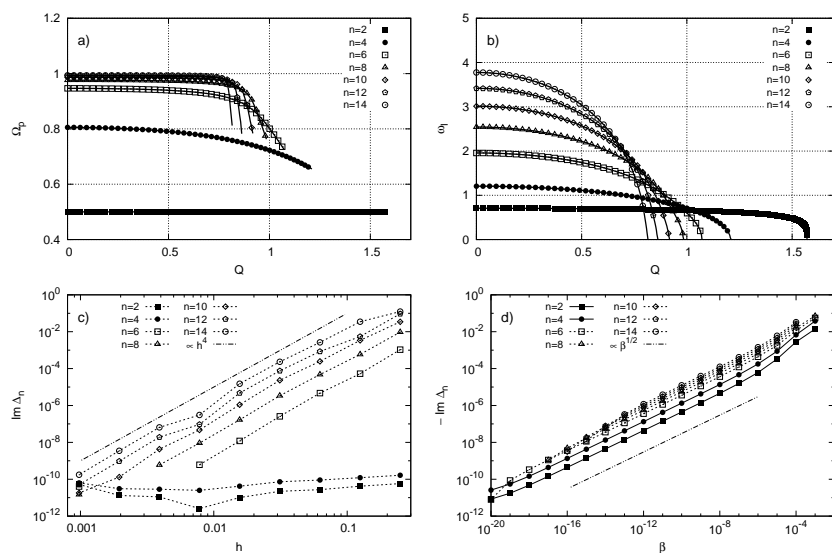


Рис. 1. Первые 7 самых крупномасштабных FEM-мод: а) скорость вращения спирального узора; б) инкременты нарастания; в) и д) точность вычисления в зависимости от шага радиальной сетки $h = 1/N$ и смягчения гравитации b . Черные линии на верхних панелях показывают решения аналитического уравнения (8).

вычислений. На рис. 1с показана сходимость частот при уменьшении шага сетки h , полученная при $b = 10^{-20}$. Отметим, что первые две моды вычисляются почти точно при любом h вследствие того, что базисные функции точно описывают полиномы степени не выше $N_d = 4$. Отклонения для остальных мод пропорционально 4-й степени h .

Смягчение b уменьшает частоту волны с волновым числом k на величину $\exp(-b|k|)$. Поэтому при малых b естественно ожидать линейного поведения точности с ростом b . Как видно из рис. 1д, на самом деле наблюдается зависимость $b^{1/2}$. Причина заключается в наличии дополнительной сингулярности возмущений поверхностной плотности (помимо всегда имеющейся логарифмической сингулярности потенциала). Можно показать, что одновременная регуляризация этих двух сингулярностей как раз и приводит к наблюдаемой зависимости $b^{1/2}$.

3. Заключение

В данной работе апробируется предложенный недавно метод расчета неустойчивых мод самогравитирующего газового диска с давлением. Метод тестируется на модели Хантера [5], допускающей обобщение на ненулевое давление с простым характеристическим уравнением.

Сравнение показало отличную работоспособность метода конечных элементов. Погрешность метода, связанная с конечным размером шага сетки h , убывает как h^4 . Это позволяет экстраполировать полученные данные и рассчитывать неустойчивые моды с очень высокой точностью, несмотря на наличие дополнительной сингулярности в собственных функциях возмущения поверхностной плотности диска.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-02-00649 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. A. J. Kalnajs, *ApJ*, **166**, 275, 1971.
2. E. V. Polyachenko, *MNRAS*, **357**, 559, 2005.
3. M. A. Jalali, *ApJ*, **669**, 218, 2007.
4. E. V. Polyachenko, *ArXiv e-prints*, 2017.
5. C. Hunter, *MNRAS*, **126**, 299, 1963.
6. F. Takahara, *Progress of Theoretical Physics*, **56**, 1665, 1976.

Аномальная релаксация в звездных системах с почти гармоническим потенциалом

Поляченко Е.В.¹, Шухман И.Г.², Берцик П.П.³

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

³*Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина*

Впервые представляются результаты моделирования гравитационной конусной неустойчивости методом задачи N -тел сферической звездной системы в почти-гармоническом потенциале. Показано, что в отличие от неустойчивости радиальных орбит здесь не происходит заметного изменения формы скопления, однако неустойчивость приводит к возникновению аномально высокой диффузии.

Anomalous relaxation in stellar systems with near-harmonic potential

Polyachenko E.V.¹, Shukhman I.G.², Berczik P.P.³

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Institute of Solar-Terrestrial Physics, RAS Siberian Branch, Irkutsk, Russia*

³*Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

The results of the gravitational loss-cone instability N -body simulations of a spherical stellar system in the near-harmonic potential are presented for the first time. Unlike the radial-orbit instability, there is no significant change in the cluster shape, but instability leads to an anomalously high diffusion.

1. Введение

Неустойчивость радиальных орбит [1] является основным механизмом образования триаксиальных систем в изолированных сферически-симметричных звездных системах. Однако, если эта неустойчивость подавлена, возможно наступление благоприятных условий для развития другой неустойчивости — гравитационной конусной [2, 3]. Согласно теории, это может иметь место, в частности, в скоплениях вблизи черных дыр и в центральных областях скоплений галактик [4, 5]. Однако до сих пор теоретические предсказания не были подтверждены прямым моделированием в рамках задачи N -тел.

Цель данной работы — провести такое моделирование скопления в доминирующем почти-гармоническом потенциале на примере модели, исследованной ранее теоретически [6] в линейном приближении, и проследить его нелинейную эволюцию.

2. Описание модели и численное моделирование

Рассмотрим функцию распределения (ФР) сферической системы массы M_G и радиуса R вида $F(E, L) = N\delta(E - E_0)f(\alpha)$, где E и L — удельные энергия и угловой момент звезды, $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака, E_0 — некоторое фиксированное значение энергии (одинаковое для всех звезд), N — нормировочная константа, $\alpha \equiv L/L_{\text{circ}}(E_0)$ — безразмерный угловой момент, $L_{\text{circ}}(E_0)$ — удельный угловой момент на круговой орбите с энергией E_0 . Функция f определяет зависимость ФР скопления от углового момента и свойства его устойчивости.

Система находится внутри гало, так что полный гравитационный потенциал системы есть: $\Phi = \Omega_0^2 r^2/2 + \Phi_G(r)$. Предполагается, что внешний потенциал доминирует, т.е. параметр $\varepsilon \equiv GM_G/(R^3\Omega_0^2) \ll 1$. Как известно, в гармоническом и кеплеровском потенциалах орбиты замкнуты при любом значении углового момента. Наличие небольшой добавки в виде самогравитирующего потенциала Φ_G создает медленную прецессию орбит. Поскольку неустойчивость связана с (отрицательной) прецессией орбит, малый параметр ε определяет медленную «прецессионную» шкалу времени, $t_{\text{pr}} \sim (\varepsilon\Omega_0)^{-1}$. Именно на этой шкале происходит развитие неустойчивости.

Для ряда моделей, в частности, для семейства вида $f(\alpha) = \alpha^n$ в работе [6] были рассчитаны инкременты нарастания в зависимости от индекса n . Результаты расчетов представлены на рис. 1а. Для модели $n = 2$, которую мы будем в дальнейшем исследовать численно, инкремент неустойчивости составил $0.014 \varepsilon\Omega_0$.

Задача N -тел решалась tree-code программой `ber-gal0` [7, 8] с количеством частиц $N = 250\text{k}$ и 1M , углом открытия $\theta = 0.5$; параметр смягчения гравитации ϵ варьировался от 0.025 до 0.001 в единицах $R = M_G = G = 1$. На рис. 1б показан рост амплитуды сферической гармоники $l = 2$ со временем; он хорошо согласуется с теорией. Неожиданным для нас оказалось раннее насыщение неустойчивости на уровне ≈ 0.02 .

Детальное исследование эволюции фазового распределения показало, что причиной раннего насыщения стала быстрая диффузия звезд по энергии, сопровождающаяся перераспределением угловых моментов и заполнением конуса потерь. Эти процессы показаны на

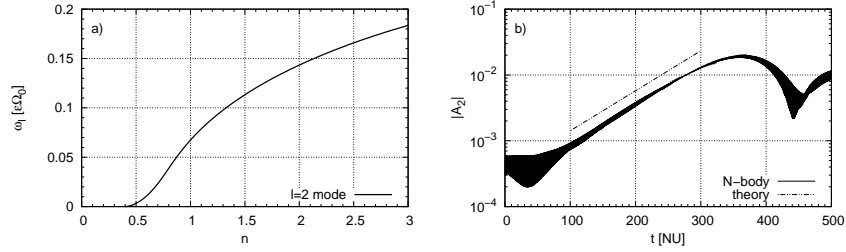


Рис. 1. Гравитационная конусная неустойчивость гармоника $l = 2$ в серии моделей $f = \alpha^n$: а) теоретический инкремент нарастания; б) амплитуда нарастания модели $n = 2$. Штрихпунктирная линия показывает наклон, соответствующий теоретически найденному инкременту нарастания.

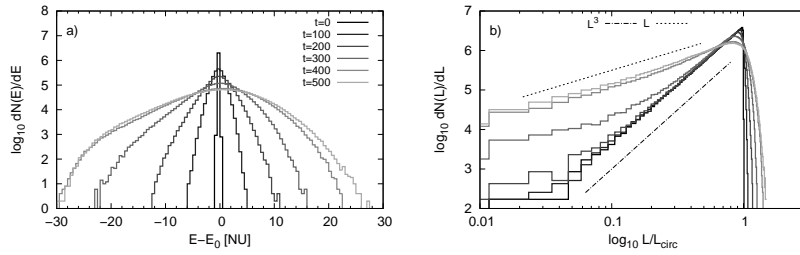


Рис. 2. Моделирование задачи N -тел модели $n = 2$: распределение частиц по E и L в различные моменты времени.

рис. 2, где приведены распределения по E и L в различные моменты времени. Слева первоначальное δ -образное распределение превращается в гауссово. Справа видно изменение первоначального распределения $dN(L)/dL = 8\pi^2 \int dE LF(E, L)T_r(E, L)$ ($T_r(E, L)$ — период радиальных колебаний), соответствующее заполнению конуса потерь.

Стандартный процесс парной релаксации предсказывает линейное изменение квадрата дисперсии энергии $\sigma^2(E)$ со временем, с характерным временем релаксации:

$$\frac{t_{\text{relax}}}{t_{\text{dyn}}} \sim \frac{N}{\ln \Lambda} \frac{\Omega_0^4}{\Omega_{\text{sg}}^4}, \quad \Omega_{\text{sg}}^2 = \frac{GM_G}{R^3}. \quad (1)$$

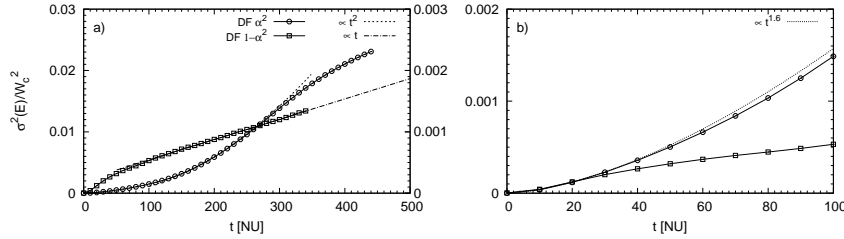


Рис. 3. Рост квадрата дисперсии энергии $\sigma^2(E)$ со временем в неустойчивой модели $f(\alpha) = \alpha^2$ и в устойчивой модели $f(\alpha) = 1 - \alpha^2$, нормированный на величину вириала Клаусиуса W_c в начальный момент времени (правая ось показывает значения для второй модели). Справа дана та же величина, но для начального периода моделирования $t \leq 100$.

Существует также еще один механизм релаксации, более эффективный, чем парная — так называемая резонансная [9], но она затрагивает изменение лишь углового момента L . Ее характерная шкала времени:

$$\frac{t_{\text{res}}}{t_{\text{dyn}}} \sim \frac{N}{\ln \Lambda} \frac{\Omega_0^2}{\Omega_{\text{sg}}^2}. \quad (2)$$

Как следует из рис. 3а, $\sigma^2(E)$ в модели $f(\alpha) = \alpha^2$ растет квадратично со временем, а не линейно. Для сравнения мы провели исследование устойчивой модели $f(\alpha) = 1 - \alpha^2$ и, как видно из рисунка, в ней наблюдается ожидаемый линейный рост $\sigma^2(E)$, согласующийся по величине с (1). Последнее означает, что аномальное расплывание по энергии связано с наличием неустойчивости в первой модели. На правой панели (b) показан первоначальный этап эволюции систем до появления неустойчивости — поведение дисперсий одинаково.

3. Заключение

Представленные результаты моделирования гравитационной конусной неустойчивости в почти-гармоническом потенциале показывают, что в отличие от более сильной неустойчивости радиальных орбит она не приводит к формированию заметных трехосных конфигураций. Однако действие неустойчивости проявляется в усилении диффузии и изменении ее характера: вместо стандартного закона $\sigma(E) \propto t^{1/2}$ наблюдается $\sigma(E) \propto t$.

Безусловно, интересным было бы получить аналогичный результат для звездных систем в поле черной дыры, поскольку усиление диффузии означает повышенный поток вещества на центр. С этим может быть связано увеличение активности ядер галактик. Данная задача будет рассмотрена в отдельной статье.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-02-00649 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН №28, а также выполнялась как часть Госзадания 2018, проект №007-00163-18-00 от 12.01.2018 (И.Ш.).

Список литературы

1. V. L. Polyachenko and I. G. Shukhman, *Sov. Astron.*, **25**, 533, 1981.
2. V. L. Polyachenko, E. V. Polyachenko, and I. G. Shukhman, *Astron. Lett.*, **33**, 227, 2007.
3. E. V. Polyachenko, V. L. Polyachenko, and I. G. Shukhman, *MNRAS*, **379**, 573, 2007.
4. V. L. Polyachenko, E. V. Polyachenko, and I. G. Shukhman, *Astron. Lett.*, **34**, 86, 2008.
5. E. V. Polyachenko, V. L. Polyachenko, and I. G. Shukhman, *MNRAS*, **386**, 1966, 2008.
6. V. L. Polyachenko, E. V. Polyachenko, and I. G. Shukhman, *Astron. Lett.*, **36**, 175, 2010.
7. I. A. Zinchenko, P. Berczik, E. K. Grebel, L. S. Pilyugin, and A. Just, *ApJ*, **806**, 267, 2015.
8. E. V. Polyachenko, P. Berczik, and A. Just, *MNRAS*, **462**, 3727, 2016.
9. K. P. Rauch and S. Tremaine, *New Astron.*, **1**, 149, 1996.

Динамика газа и структура магнитного поля в галактиках с баром

Хоперсков С.А.¹, Храпов С.С.², Вениченко Ю.А.³

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия*

³*Университет Хайдельберга, Хайдельберг, Германия*

В работе предложена МГД модель газового компонента диска в галактиках с баром с учетом самогравитации газа, радиационного нагрева и охлаждения межзвездной среды. Расчеты с высоким пространственным разрешением позволяют воспроизвести облачную структуру галактики во внешних областях диска. Внутри бара морфология газа очень сложная и заметно различается в моделях с магнитным полем и без него. Мы показали, что приток газа внутрь центрального килопарсека не зависит от наличия магнитного поля, однако приток газа в самый центр (< 0.1 кпк) на два порядка выше в расчетах с учетом магнитного поля. Кроме того, магнитное поле позволяет стабилизировать течение в околоядерной области и сформировать устойчивый, на временах порядка 0.5 млрд лет, околоядерный диск. Таким образом результаты численных экспериментов доказывают важность учета магнитного поля для понимания процесса подпитки активных галактических ядер.

Gas flows and magnetic field structure in barred galaxies

Khoperskov S.A.¹, Khrapov S.S.², Venichenko Yu.A.³

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Volgograd State University, Volgograd, Russia*

³*Heidelberg University, Heidelberg, Germany*

The paper proposes an MHD model of the gaseous component of a disk in galaxies with a bar, taking into account the self-gravitation of the gas, radiative heating, and cooling of the interstellar medium. Simulations with high spatial resolution make it possible to reproduce the cloud structure of the galaxy in the outer regions with respect to the corotation of the bar. Inside the bar, the morphology of the gas is very complex and differs markedly in models with and without a magnetic field. We have shown that the inflow of gas inside the central kpc does not depend on the presence of a magnetic field, but in MHD models the gas inflow is two orders of magnitude higher (for central region < 0.1 kpc). Also, the magnetic field makes it possible to stabilize the current in the nuclear region and form a circumnuclear disk stable at times of the order of 0.5 Gyr. Thus, the results of numerical experiments demonstrate the importance of the magnetic field in order to understand the processes of the active galactic nuclei feeding.

1. Введение

Галактические бары являются драйверами как динамических процессов, так и секулярной эволюции дисковых галактик [1, 2]. Рождение бара приводит к перераспределению углового момента во всем диске (и внутренней части гало) и возникновению крупномасштабного неосесимметричного возмущения гравитационного поля, которое в свою очередь приводит к формированию сложных и нестационарных течений газа и ударных волн [3, 4]. Благодаря этому внутренние области галактик с баром крайне богаты на различные структуры: околядерные диски и спирали, резонансные кольца, ударные волны и облака молекулярного газа, свойства которых варьируются в широких диапазонах и существенно зависят от характеристик родительской галактики. Необходимо отметить, что все эти структуры наблюдаются в ряде ближайших галактик [5] и исследованы в различных моделях [6, 7].

В рамках МГД моделирования в данной работе мы проведем сравнение течений газа в гравитационном поле галактики с центральной перемычкой. Особый интерес представляет определение роли влияния магнитного поля на морфологию газовых структур, а также темп притока газа в околядерную область, наличие газа в которой в свою очередь может являться важным механизмом поддержания активности галактического ядра (см. подробнее [8]).

2. Модель

В наших моделях для галактического газового диска внешний гравитационный потенциал представляет собой суперпозицию поля темного гало, звездного балджа и звездного диска, с параметрами обеспечивающими типичную кривую вращения дисковой галактики, выходящую на плато на больших расстояниях от центра. Кроме того, в модели гравитационного поля звездного диска был учтен неосесимметричный вклад бара с амплитудой 10% и положением коротации на концах бара.

Для решения системы уравнений магнитной газодинамики была использована явная трехмерная TVD схема типа MUSCL для декартовой системы координат. Детально численный метод с учетом тестовых расчетов представлен в [9, 10]. Газодинамические расчеты проводились на сетке $2048 \times 2048 \times 32$ ячеек, что соответствует пространственному разрешению ≈ 19 пк. Далее мы проведем сравнение двух моделей, с магнитным полем (Model 2) и без него (Model 1). В каче-

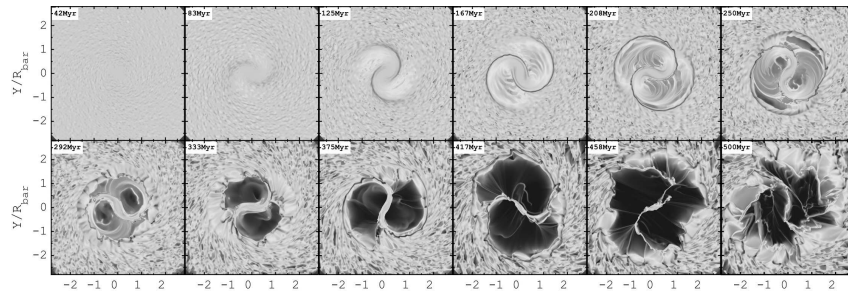


Рис. 1. Эволюция поверхностной плотности газа в модели с магнитным полем (M2). Пространственная шкала представлена в единицах размера бара, где $R_{\text{bar}} = 5$ кпк.

стве начального состояния в обеих моделях мы выбрали постоянное значение поверхностной плотности ($10M_{\odot}/\text{пк}^2$). Начальное магнитное поле представляло собой суперпозицию нормальных мод (гауссиан), которые обеспечивают турбулентный характер структуры магнитного поля со средним значением плазменного параметра $\beta = 1$.

3. Результаты

На рис. 1 изображена эволюция поверхностной плотности газа в модели с магнитным полем. Вначале при сверхзвуковом течении газа сквозь потенциал бара формируются гладкие спиральные ударные волны. После $t = 50$ млн. лет эволюции образуется хорошо развитая спиральная структура в газовом компоненте, охватывающая область внутри коротации бара. Спиральные рукава являются тугозакрученными и тонкими структурами, которые довольно быстро замыкаются, образуя резонансное кольцо, подобное тому, что ожидается в Галактике на расстоянии 3 кпк от центра. Однако на больших временах ($t > 450 - 500$ млн лет) это резонансное кольцо неустойчиво на концах бара, что оставляет открытым вопрос о существовании реальной материальной кольцевой структуры в диске нашей Галактики, несмотря на большую распространенность подобных колец в других галактиках [11].

В то же время вдоль лидирующих кромок бара формируются ударные волны (УВ). Отметим, что такие структуры газа, проявляющиеся в виде, например, пылевых прожилок внутри бара [12], хорошо видны на изображениях SB-галактик (например, NGC 1672,

NGC 1300, NGC 1365, NGC 3627 и др.). Вдоль УВ формируются сильные сдвиговые течения, при этом ударные волны во вращающемся потенциале подвержены гидродинамической неустойчивости типа Кельвина-Гельмгольца (wiggle instability, [6]): развиваются мелкомасштабные шпурсы, вихри и фронт УВ искажается.

Во внешних частях галактики охлаждение и гравитационная неустойчивость газового диска приводят к его фрагментации, особенно на мелких масштабах и образованию гигантских облаков газа. Многочисленные изолированные облака газа формируются уже после 50 млн. лет эволюции и к временам порядка $t \sim 200$ млн. лет формируется хорошо развитая иерархия облачных структур. В дальнейшем ($t \sim 300$ млн. лет) облака формируют протяженные ассоциации с размерами до нескольких сотен парсек, а размеры самих облаков варьируются в диапазоне $\sim 10 - 100$ пк. Таким образом дальнейшая фрагментация происходит под действием как тепловых процессов, так и самогравитации газа. В Модели 2 наличие магнитного поля частично стабилизирует диск относительно гравитационной неустойчивости, что выражается в меньшей контрастности и плотности облаков во внешнем диске (см. рис. 2). Более того, в модели с магнитным полем облачные структуры представляют собой крупномасштабные филаменты, что согласуется с результатами наших моделей спиральных галактик [10].

Крупномасштабная структура магнитного поля в целом отслеживает положение спирального узора и бара, однако морфология напряженности магнитного поля более гладкая. Относительно начальных значений величина поля в среднем увеличивается в 2 – 3 раза через 500 млн. лет, но во внешних (относительно коротации бара) спиралах величина может превышать $10 \mu G$. Рост магнитного поля в нашей модели обеспечивается за счет закручивания магнитного поля в дифференциально вращающемся диске. Отметим однако, что темп усиления магнитного поля существенно меньше, чем предсказывают различные модели динамо [13], что объясняется сопоставимым вкладом теплового и магнитного давлений в начальных условиях.

Во внутренних частях галактик с баром ($< R_{\text{bar}}$) газ теряет угловой момент и вдоль УВ скапливается к центру галактики [14]. Однако магнитное поле вносит существенный вклад в эту картину, что наглядно демонстрирует рис. 3. На динамической шкале времени основная часть газа, находящаяся внутри шкалы бара, концентрируется вдоль большой оси бара, при этом динамика газа определяется именно особенностями потенциала (амплитуда бара, скорость вращения), и приток газа внутрь центрального килопарсека с хорошей точностью

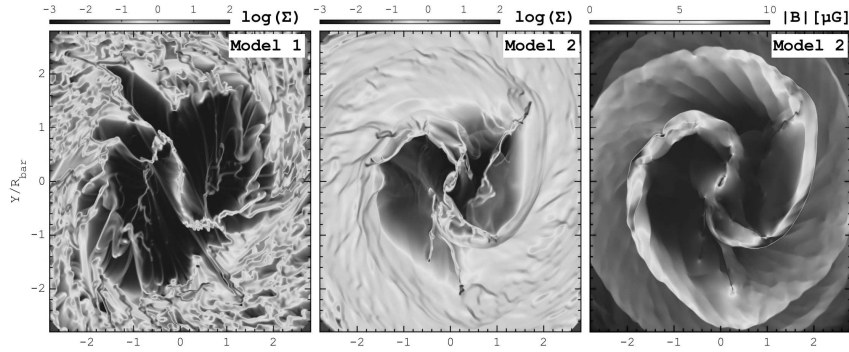


Рис. 2. Сравнение морфологии газа в моделях без магнитного поля (слева), с магнитным полем (в центре) и структура магнитного поля (справа) после 500 млн лет эволюции. Пространственная шкала представлена в единицах размера бара, где $R_{\text{bar}} = 5$ кпк.

совпадает в обеих рассмотренных моделях. Однако далее структура течений существенно различается. В модели с магнитным полем формируется околядерный диск, уравновешенный магнитным полем (см. рис. 2), через который происходит дальнейший радиальный приток газа в центр галактики (< 0.1 кпк), величина которого на 2 порядка выше, чем в модели без магнитного поля.

4. Заключение

Проведенные численные расчеты позволяют сделать вывод о важности учета магнитного поля при рассмотрении динамики газа в галактиках с центральной перемычкой. Во внутренних частях галактики (< 0.1 кпк), темп притока газа на два порядка выше в модели с магнитным полем, чем в гидродинамическом расчете. Также устойчивый околядерный диск формируется только в модели с магнитным полем. Во внешнем диске ($R_{\text{bar}} > 5$ кпк), газовые облака могут образовывать небольшие группы и крупные цепочки структур, таким образом отражая процессы разрушения крупных облаков на мелкие, за счет мощного дифференциального вращения, и одновременно коагуляцию маленьких МО в более крупные в результате столкновений под действием самогравитации в областях, где орбиты облаков подходят близко друг к другу. Магнитное поле оказывает стабилизирующее влияние,

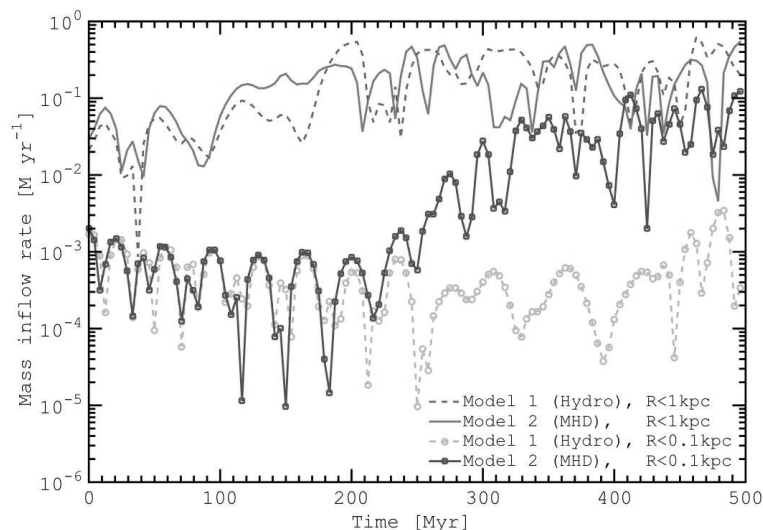


Рис. 3. Сравнение темпа притока газа в различных моделях: с учетом магнитного поля и без, на различных расстояниях от центра.

препятствуя сжатию облаков в радиальном направлении, что приводит к развитию системы крупномасштабных филаментов.

Работа поддержана грантами РФФИ 16-32-60043 и 16-02-00649. ХСС благодарит за поддержку Министерство образования и науки РФ (гос. задание №2.852.2017/4.6).

Список литературы

1. J. Kormendy and R. C. Kennicutt, Jr., *ARA&A*, **42**, 603, 2004.
2. J. A. Sellwood, *Rev. Mod. Phys.*, **86**, 1, 2014.
3. S. A. Khoperskov, E. O. Vasiliev, A. M. Sobolev, and A. V. Khoperskov, *MNRAS*, **428**, 2311, 2013.
4. Y. Fujimoto, E. J. Tasker, M. Wakayama, and A. Habe, *MNRAS*, **439**, 936, 2014.
5. S. L. Ellison, P. Nair, D. R. Patton, J. M. Scudder, J. T. Mendel, and L. Simard, *MNRAS*, **416**, 2182, 2011.
6. K. Wada and J. Koda, *PASJ*, **53**, 1163, 2001.
7. S. A. Khoperskov, A. V. Khoperskov, M. A. Eremin, and M. A. Butenko, *Astron. Lett.*, **37**, 563, 2011.

8. I. Shlosman, M. C. Begelman, and J. Frank, *Nature*, **345**, 679, 1990.
9. S. A. Khoperskov, E. O. Vasiliev, A. V. Khoperskov, and V. N. Lubimov, *Journal of Physics Conf. Ser.*, volume 510, 012011 (2014).
10. S. A. Khoperskov and S. S. Khrapov, *A&A*, **609**, A104, 2018.
11. L. M. Mazzuca, R. A. Swaters, J. H. Knapen, and S. Veilleux, *ApJ*, **739**, 104, 2011.
12. E. Athanassoula, *MNRAS*, **259**, 345, 1992.
13. J. Schober, D. Schleicher, C. Federrath, R. Klessen, and R. Banerjee, *Phys. Rev. E*, **85**, 026303, 2012.
14. J. Binney, O. E. Gerhard, A. A. Stark, J. Bally, and K. I. Uchida, *MNRAS*, **252**, 210, 1991.

Гравитационная неустойчивость в неоднородном галактическом диске: влияние магнитного поля

Хоперсков С.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Изучено влияние глобального галактического магнитного поля на гравитационную неустойчивость газового диска конечной толщины в МГД-приближении. Получено дисперсионное уравнение, учитывающее равновесные радиальный и вертикальный компоненты магнитного поля, дифференциальность вращения газа и радиальную неоднородность поверхностной плотности газового компонента. В слабонеоднородном диске совместное влияние магнитного поля и конечной толщины газового диска наиболее эффективно подавляет неустойчивые возмущения. В случае существенно радиально неоднородного диска имеем сложную картину взаимодействия звуковых ветвей колебаний с градиентными колебаниями, что оказывает дополнительный дестабилизирующий эффект.

Gravitational instability in galactic disk: the role of inhomogeneities and magnetic field

Khoperskov S.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

By means of linear analysis of MHD equations, we study the influence of the global galactic magnetic field on the gravitational instability of a finite thickness gaseous disk. We obtain a dispersion equation for isentropic gaseous disk taking into account both radial and vertical components of the magnetic field, the differential rotation of the gas, and the radial inhomogeneity of the surface density. Combined influence of the magnetic field and the finite gaseous disk thickness suppresses unstable perturbations. In the case of an essentially radially inhomogeneous disk, we predict a complex picture of the interaction of the sound branches of oscillations with gradient oscillations, which has an additional destabilizing effect.

1. Введение

Гравитационная неустойчивость является важнейшим фактором эволюции галактик. В массивных дисковых галактиках она приводит к формированию крупномасштабного спирального узора, на более мел-

ких масштабах иерархия различных структур и облаков газа также во многом определяется самогравитацией в межзвездной среде.

Условие гравитационной устойчивости бесконечно тонкого диска относительно осесимметричных коротковолновых возмущений определяется параметром Тоомре [1]:

$$Q_T = \frac{c_s}{c_T}, \quad c_T = \frac{\pi G \sigma_0}{\kappa}, \quad \kappa = 2\Omega \left(1 + \frac{r}{2\Omega} \frac{d\Omega}{dr} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где c_s — адиабатическая скорость звука, κ — эпициклическая частота, Ω — угловая скорость вращения газа. Хорошо известно, что условие $Q_T = 1$ для определения границы устойчивости в приложении к реальным газовым дискам практически неприменимо [2, 3] поскольку для стабилизации гравитационной неустойчивости неосесимметричных волн из-за неоднородности вращения требуется в 1.5 – 2 раза сильнее разогреть газ по сравнению с твердотельно вращающимся диском (например, [4, 3]). По сути, условие гравитационной устойчивости $Q_T \geq 1$ учитывает только три фактора: вращение газа, температуру газа и самогравитацию.

Влияние магнитного поля на гравитационную неустойчивость тонких газовых дисков в различных приближениях рассматривалось в работах [5, 6, 7]. Значительные усилия направлены на исследования Паркерской неустойчивости для объяснения формирования межзвездных облаков с упором на описание вертикальных движений [8]. Укажем на стабилизирующий эффект магнитного поля на неустойчивость типа Рэля-Тейлора [9]. Представляет интерес результат [10], демонстрирующий возможность дополнительной дестабилизации гравитационной неустойчивости из-за поляризованной волны Альфвена в однородном магнитном поле. Многочисленные исследования гравитационной неустойчивости с магнитным полем и учетом различного рода сложных диссипативных факторов и свойств плазмы также ограничены предельно коротковолновым приближением [11].

В данной работе мы ставим задачу получения критерия устойчивости для галактического газового диска конечной толщины с учетом радиальных неоднородностей и магнитного поля.

2. Динамика линейных возмущений

Рассмотрим коротковолновое приближение в плоскости диска. Магнитное поле рассмотрено в пренебрежении электрическим сопротивлением, считая, что диссипативная шкала времени намного превышает временную шкалу гравитационной неустойчивости. Тем самым,

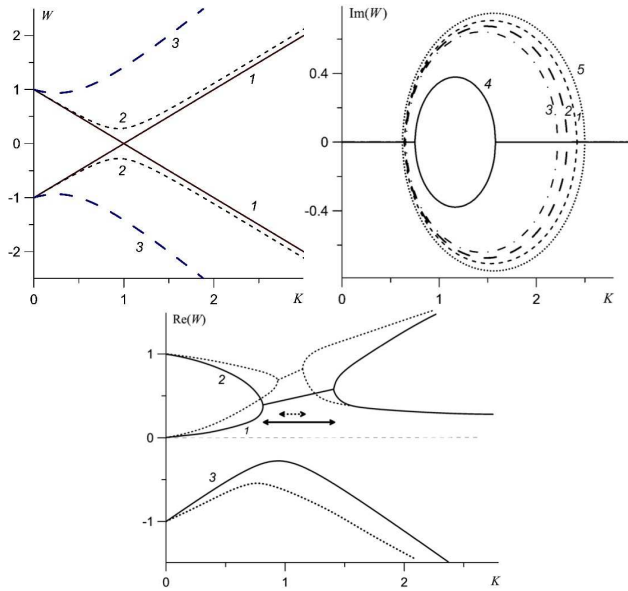


Рис. 1. Слева — зависимость частот ω от волнового числа K при различных значениях магнитного поля $v_A = 0$ (кривая 1), $v_A = 0.2$ (кривая 2), $v_A = 1$ (кривая 3) и фиксированных значениях параметров Тоомре $Q_T = 1$ и $k_h = 1$. Справа — зависимость инкремента гравитационной неустойчивости при фиксированных значениях магнитного поля $v_A = 0.2$, параметра Тоомре $Q_T = 0.8$ и различных значениях величины $k_h = 0$ (кривая 1), $k_h = 0.5$ (кривая 2), $k_h = 1$ (кривая 3) и $k_h = 5$ (кривая 4). Для сравнения приведена кривая 5 для случая без магнитного поля ($v_A = 0$). Внизу — дисперсионные кривые в неоднородном диске. Горизонтальные стрелки показывают области неустойчивых решений с $Im(\hat{\omega}) > 0$ при $Q_T = 0.9$. Кривая 1 — градиентная ветвь колебаний, кривые 2 и 3 звуковые ветви. Сплошные линии — $v_A = 0.1$, пунктирные линии — $v_A = 0.3$.

учитываем радиальный и вертикальный компоненты магнитного поля как в радиальном равновесии, так в динамике малых возмущений.

Ограничимся рассмотрением изэнтропического газа, для которого в случае тонкого диска должно выполняться условие

$$S_0 = \ln(p_0 \Omega_z^{1-\gamma_s} / \sigma_0^{\gamma_s}) = \text{const.} \quad (2)$$

Условие (2) вытекает из линеаризованного уравнения непрерывности, в котором величина S_0 играет роль энтропии с учетом приближения

тонкого диска. В силу линейности и однородности относительно t и φ будем искать решения линейризованных уравнений МГД в виде $f_1 = f(r) \cdot \exp\{-i\omega t + im\varphi\}$, что позволяет нам ввести частоту с учетом доплеровского сдвига $\hat{\omega} = \omega - m\Omega$. С учетом этого линейризованная система уравнений МГД в конечном счете представима в виде

$$-i\hat{\omega} \frac{\Sigma}{c_T^2} + \frac{d\hat{u}}{dr} + \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{L_\sigma}\right) \hat{u} + \frac{im}{r} \hat{v} = 0, \quad (3)$$

$$-i\hat{\omega}\hat{u} - 2\Omega\hat{v} = -\frac{dR}{dr} - \frac{d\hat{\Phi}}{dr} - \frac{\Sigma}{c_T^2} \left(-\frac{B_{z0}B_{r0}}{2\pi\sigma_0} + \frac{h_0}{2\pi\sigma_0} \frac{dB_{z0}^2}{dr}\right) - \quad (4)$$

$$-\frac{B_{z0}\hat{B}_r}{2\pi\sigma_0} - \frac{B_{r0}\hat{B}_z}{2\pi\sigma_0} + \frac{h_0}{2\pi\sigma_0} \frac{dB_{z0}}{dr} \hat{B}_z + \frac{h_0B_{z0}}{2\pi\sigma_0} \frac{d\hat{B}_z}{dr}, \quad (5)$$

$$-i\hat{\omega}\hat{v} + \frac{\varkappa^2}{2\Omega}\hat{u} = -\frac{im}{r}R - \frac{im}{r}\hat{\Phi} - \frac{imh_0}{\pi r\sigma_0} (B_{r0}\hat{B}_r + B_{z0}\hat{B}_z), \quad (6)$$

$$i\hat{\omega}\hat{B}_z + B_{z0} \frac{d\hat{u}}{dr} + \frac{B_{z0}}{r} \hat{u} - \frac{imB_{z0}}{r} \hat{v} = 0, \quad (7)$$

где $R = \gamma_s \Sigma$, $\hat{\Phi} = -\frac{2\pi G \sigma_0}{kc_T^2} \Sigma$, $R = p_1/\sigma_0$, $\Sigma = c_T^2 \sigma_1/\sigma_0$, $1/L_\sigma = d(\ln \sigma_0)/dr$, $c_T^2 = p_0/\sigma_0$. Система уравнений (3–7) является исходной для анализа динамики малых возмущений в модели газового диска с произвольными распределениями $\Omega(r)$, $\sigma_0(r)$, $B_{z0}(r)$, B_{r0} . Значительный прогресс может быть достигнут на основе ВКБ-анализа в радиальном направлении $f(r) \propto \exp\{ik_r r\}$ в предположении $k_r r \gg 1$, $k_r L \gg 1$, где L – минимальный масштаб радиальной неоднородности диска. Для применимости ВКБ приближения необходимо выполнение условия

$$\frac{m|\hat{\omega}|}{\varkappa} \ll kr = \sqrt{k_r^2 r^2 + m^2}, \quad (8)$$

которое согласуется с приближением $|\hat{\omega}| \ll \varkappa$. Приравнивая определитель системы уравнений (3–7) к нулю с учетом ВКБ приближения, мы получаем дисперсионные зависимости $\omega(k_r, k_\varphi)$.

Для рассмотрения осесимметричных возмущений в однородном диске с магнитным полем при обезразмеривании уравнений дополнительно к параметрам $K = k_r/k_0$, Q_T , c_T введем безразмерный параметр

$$v_A^2 = \frac{V_A^2}{\varkappa h_0 c_T}, \quad (9)$$

для которого по порядку величины с учетом оценки $\Omega h_0 \sim c_s$

$$v_A \sim V_A/c_s, \quad (10)$$

и величина v_A пропорциональна отношению Альфвеновской скорости к скорости звука. Безразмерный параметр

$$k_h \equiv \frac{\varkappa^2 h_0}{\pi G \sigma_0} \quad (11)$$

по порядку величины $k_h \sim c_s/c_T$ и определяет запас гравитационной устойчивости по критерию Тоомре (1).

На рис. 1 слева показаны зависимости реальной части частоты $\hat{\omega}$ от безразмерного волнового числа $K = k/k_0$, где $k_0 = \frac{\varkappa^2}{\pi G \sigma_0}$ определяет наиболее неустойчивую длину волны в однородном диске без магнитного поля. Кривые 1 соответствуют модели без магнитного поля на границе устойчивости, когда $\hat{\omega} = 0$ только в одной точке $K = 1$ и $Im(\hat{\omega}) = 0$ везде. Магнитное поле вносит стабилизирующий эффект, увеличивая абсолютные значения частот.

Для определения роли конечной толщины диска рассмотрим влияние параметра k_h на инкремент гравитационной неустойчивости. Зафиксируем параметры магнитного поля для модели, допускающей развитие неустойчивости с $Im(\hat{\omega}) > 0$ (рис. 1). С ростом величины k_h инкремент неустойчивости уменьшается, а область неустойчивых длин волн сужается. Важно подчеркнуть, что данная стабилизация работает только совместно с магнитным полем и перестает действовать при $B_0 = 0$. Рассмотренный фактор отличается от стабилизирующего влияния конечной толщины из-за действия так называемого форм-фактора, эффективно уменьшающего поверхностную плотность $\sigma_0 \rightarrow \sigma_0/(1 + kh_0)$.

Рассмотрим предельный случай неосесимметричных возмущений в неоднородном диске без магнитного поля $\mathbf{B} = 0$, учитывая радиальную неоднородность $V_0(r)$ и $\sigma_0(r)$. Дисперсионное уравнение примет вид

$$\hat{\omega}^3 - \hat{\omega} \left\{ \varkappa^2 + \left(k^2 c_s^2 - 2 \pi G \sigma_0 k \right) \left(1 - 2 \left(\frac{k_\varphi}{k} \right)^2 \frac{r}{\varkappa^2} \frac{d\Omega^2}{dr} \right) \right\} - 2 \frac{k_\varphi}{k} \Omega (k c_s^2 - 2 \pi G \sigma_0) \frac{d}{dr} \ln \left(\frac{2 \Omega \sigma_0}{\varkappa^2} \right) = 0, \quad (12)$$

который совпадает с результатом работы [4]. Это дисперсионное уравнение описывает для равновесного диска (2) три ветви колебаний, две из которых являются звуковыми.

На рис. 1 справа показан эффект стабилизации возмущений магнитным полем в неоднородном диске. Неоднородность угловой скорости вращения и поверхностной плотности обуславливает появление дополнительно к двум акустическим ветвям колебаний третьей ветви $\hat{\omega}_3$, имеющей градиентную природу, причем $\hat{\omega}_3 \propto k_\varphi$. Эти волны являются аналогом внутренних гравитационных волн или волн Россби.

3. Заключение

Рассмотрено влияние магнитного поля на гравитационную устойчивость радиально неоднородного диска конечной толщины относительно неосесимметричных возмущений. Развита общий подход для описания динамики линейных неустойчивых неосесимметричных волн в неоднородном газовом диске с учетом вертикального равновесия в диске. Показано, что предельные случаи нашего дисперсионного уравнения совпадают с известными решениями. В целом магнитное поле оказывает стабилизирующий эффект и при типичных значениях параметров газовых галактических дисков уменьшает критическое значение параметра Тоомре на 15–25%. Однако в существенно радиально неоднородном диске мы имеем сложную картину взаимодействия звуковых ветвей колебаний с градиентными колебаниями, что напротив оказывает дополнительный дестабилизирующий эффект.

Работа поддержана грантом РФФИ 16-32-60043.

Список литературы

1. A. Toomre, *ApJ*, **139**, 1217, 1964.
2. V. L. Polyachenko and A. V. Strel'nikov, *Astron. Tsirk.*, **1529**, 1, 1988.
3. E. Griv, *Ap&SS*, **449**, 573, 2006.
4. A. G. Morozov, *Sov. Astron.*, **29**, 120, 1985.
5. S. Lizano, D. Galli, M. J. Cai, and F. C. Adams, *ApJ*, **724**, 1561, 2010.
6. T. Nakamura, *Progress of Theoretical Physics*, **70**, 747, 1983.
7. S. M. Lee and S. S. Hong, *ApJS*, **169**, 269, 2007.
8. S. Ames, *ApJ*, **182**, 387, 1973.
9. F. Jiang and S. Jiang, *J. Math. Fluid Mech.*, **17**, 639, 2015.
10. A. Gazol and T. Passot, *Ap&SS*, **411**, 1, 2003.
11. R. P. Prajapati, G. D. Soni, and R. K. Chhajlani, *Physics of Plasmas*, **15**, 062108, 2008.

Неустойчивые гидродинамические моды в газовых дисках галактик с «двугорбой» кривой вращения

Торгашин Ю.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Численно исследованы глобальные гидродинамические неустойчивые моды колебаний в газовом диске спиральной галактики, которая имеет скачок скорости на кривой вращения во внутренней области диска. Наряду с известной центробежной *cf*-веткой, формирующей отстающую спиральную волну плотности, в диске могут возбуждаться «низкочастотные» *A*-ветки колебаний. Последние образуют сильно локализованную по радиусу псевдо-кольцевую структуру, состоящую для двухрукавной гармонике из двух кусков туго закрученных примерно четверть-оборотных спиральных ветвей. Присутствие в центральной области газового диска заметного уплотнения способно ощутимо усиливать неустойчивые ветки колебаний. Время нарастания амплитуды возмущений на порядок величины оценивается как $\lesssim 10^9$ лет.

Unstable hydrodynamic modes in the gaseous galactic disks with a “two-humped” rotation curves

Torgashin Yu.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Large-scale unstable hydrodynamic modes in a gaseous disk of spiral galaxy, which has a velocity jump on the rotation curve in the inner part of the disk, are numerically studied. In addition to centrifugal *cf*-branch, which generates trailing spiral density waves, a “low-frequency” *A*-branches also can arise. The last ones form radially localized pseudo-ring structure, consisting of tightly wound quarter-turn parts of two spirals (for two-arm harmonic). Presence of appreciable condensation in the central part of gas disk is capable of the instability strengthening. The time-scale of 10 times amplitude growth is estimated as $\lesssim 1$ Gyr.

1. Введение

Многие массивные спиральные галактики в течение нескольких последних миллиардов лет не испытывали мерджинга или существенных столкновений с соседями, при этом их «секулярная» (медленная и плавная) крупномасштабная эволюция в основном определялась кол-

лективными процессами формирования в дисках этих галактик глобальных волновых структур — баров, спиралей и псевдо-колец [1]. Согласно наиболее общепринятой гравитационной концепции, возникновение таких структур связано с развитием одной из разновидностей коллективных гравитационных мод — бар-моды — и спиральных мод в звездном галактическом диске [2, 3, 4].

Во внутренних областях дисков ряда спиральных галактик наблюдается скачок скорости на кривой вращения [5, 6]. Это допускает гидродинамический (ГД) механизм формирования спиральной структуры [7]. Для проявления ГД механизма требуется, чтобы в результате предыдущей эволюции галактика обладала бы следующими свойствами: 1) в ней сформировался бы заметный скачок скорости вращения с относительной амплитудой $\gtrsim (0.2 - 0.3)$, см. рис. 1; 2) скорость в области скачка должна спадать быстрее, чем по кеплеровскому закону:

$$\alpha_{\Omega \min} \lesssim ((-1.75) - (-1.85)) \quad (1)$$

3) дисковые подсистемы галактики должны быть устойчивы (или находиться вблизи границы устойчивости) относительно гравитационных мод колебаний. Кроме того, для построения линейной модели неустойчивых ГД мод нужно, чтобы состояние галактического диска было приближенно осесимметричным, т.е. чтобы в галактике не было бара с заметной амплитудой.

Как показывают многие численные эксперименты, в процессе развития в звездном диске галактики неустойчивой бар-моды и (или) спиральных мод происходит разогрев звездного диска, выход на насыщение амплитуд и постепенное расплывание сформировавшихся структур [9]. В итоге происходит выход звездного галактического диска в состояние, близкое к границе гравитационной устойчивости. Анализ наблюдений в целом подтверждает такое предположение [10]. Кроме того, в процессе развития в звездном диске бар-моды или спиральной волны плотности происходит радиальное перераспределение газа, сопровождающееся формированием уплотнения в центральных областях диска [11]. Ясно, что такого рода перераспределение масс в галактическом диске способствует образованию скачка скорости во внутренней области диска. Все это говорит о возможности выполнения указанных выше условий для возбуждения в газовом диске неустойчивых ГД мод, численному исследованию которых и посвящена данная работа.

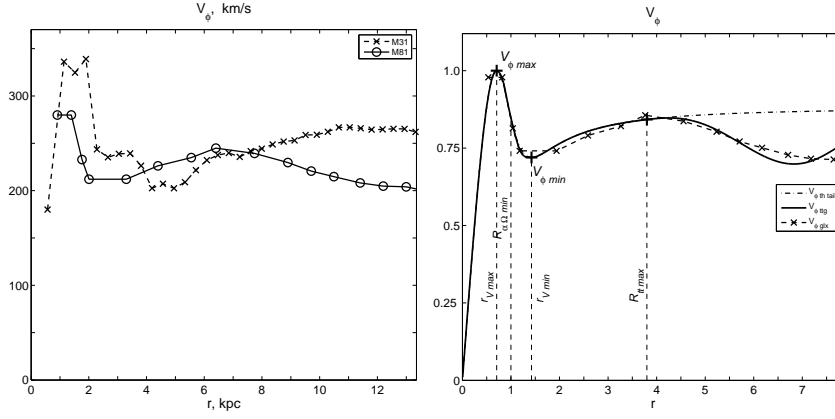


Рис. 1. Слева — наблюдаемые кривые вращения в галактиках M31 [6] и M81 [8]. Справа — нормированные модельные профили $V_{\varphi \text{ th tail}}(r)$, $V_{\varphi \text{ ttg}}(r)$, и галактическая кривая вращения $V_{\varphi \text{ glx}}(r)$ для M81.

2. Описание возмущений в тонком несамогравитирующем газовом галактическом диске

Для возмущенных энthalпии $\tilde{\eta} = \tilde{p}/\sigma_0$ и радиального Лагранжева смещения $\tilde{\xi}$ несложно получить систему линейных однородных ОДУ [12]:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\eta}}{dr} &= \left[\frac{2m\Omega_0}{\hat{\omega}} - \frac{(\gamma-1)}{\gamma}\alpha_\sigma \right] \frac{\tilde{\eta}}{r} + \left[(\hat{\omega}^2 - \kappa^2) - \frac{(\gamma-1)}{\gamma^2} \frac{\alpha_\sigma^2}{M_*^2 r^2} \right] \tilde{\xi}; \\ \frac{d\tilde{\xi}}{dr} &= \left[\frac{m^2}{r^2 \hat{\omega}^2} - M_*^2 \right] \tilde{\eta} - \left[1 + \frac{2m\Omega}{\hat{\omega}} + \frac{\alpha_\sigma}{\gamma} \right] \frac{\tilde{\xi}}{r}; \end{aligned} \quad (2)$$

Остальные возмущения выражаются через $\tilde{\eta}$ и $\tilde{\xi}$ алгебраически. Здесь используем обозначения:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}(r) &\equiv \omega - m\Omega(r); & \Omega(r) &\equiv V_{\varphi 0}(r)/r; & \kappa^2(r) &\equiv 4\Omega^2(1 + \alpha_\Omega/2); \\ \tilde{\eta} &\equiv \tilde{p}/\sigma_0; & M_* &= V_{\varphi \text{ max}}/C_{S0}; & \alpha_f &\equiv d \ln f(r)/d \ln r. \end{aligned}$$

Поскольку температура газа в диске меняется очень плавно, пренебрегаем ее изменениями: $C_{S0}(r) \approx C_{S0}(r = R_{\alpha\Omega \text{ min}}) = \text{const}$. Используемые в системе (2) нормировки описаны в [12].

3. Задание модели газового галактического диска

Крупномасштабные ГД моды в газовом галактическом диске могут возбуждаться, когда в радиальном распределении удельного вращательного момента есть заметный локальный минимум. Это условие выполняется для используемого в данной работе базового модельного профиля:

$$V_{\varphi \text{ th tail}}(r) = r \cdot \Omega_{\text{th tail}}(r); \quad \Omega_{\text{th tail}}(r) = \Omega_{\text{th}}(r) \cdot f_{\text{tail}}(r);$$

$$\Omega_{\text{th}} = \langle \Omega \rangle - \left(\frac{\Delta \Omega}{2} \right) \text{th} \left(\frac{r - R_{0\text{th}}}{L_{\Omega}} \right); \quad f_{\text{tail}} = \left[1 + \left(\frac{r}{R_{\text{tail}}} \right)^N \right]^{-1/N} \quad (3)$$

Такой профиль удовлетворительно аппроксимирует кривую вращения моделируемой галактики M81 при $N = 2$ и следующих «галактических» параметрах профиля

$$R_{\alpha \Omega \text{ min}} = 1.7 \text{ kpc}; \quad V_{\varphi \text{ max}} = 286 \frac{\text{km}}{\text{s}}; \quad \delta V_{\varphi} = 0.28;$$

$$\alpha_{\Omega \text{ min}} = -1.80; \quad q_{\text{tail}} = 0.88; \quad (4)$$

Здесь $\delta V_{\varphi} = (V_{\varphi \text{ max}} - V_{\varphi \text{ min}})/V_{\varphi \text{ max}}$ — относительная амплитуда скачка скорости, $R_{\alpha \Omega \text{ min}}$ — радиус центра скачка, $q_{\text{tail}} = V_{\varphi \infty}/V_{\varphi \text{ max}}$, $V_{\varphi \infty}$ — скорость на периферии. Решением обратной задачи по параметрам (4) были определены параметры $\{\langle \Omega \rangle; (\Delta \Omega/2); R_{0\text{th}}; L_{\Omega}; R_{\text{tail}}\}$ для профиля (3). Затем найденный профиль $V_{\varphi \text{ th tail}}(r)$ был немного деформирован, итоговый профиль (здесь обозначим его $V_{\varphi \text{ ttg}}(r)$), сохраняющий параметры (4), хорошо аппроксимирует наблюдаемую кривую вращения вплоть до радиусов ~ 13 кпк, см. рис. 1.

В некоторых галактиках во внутренней области диска присутствует заметное уплотнение [13]. Поэтому было проведено исследование эффектов скачка $\sigma_0(r)$. Последний задавался в виде:

$$\sigma_0(r) = \sigma_{02} \left[\frac{(Q_{\sigma} + 1)}{2} - \frac{(Q_{\sigma} - 1)}{2} \tanh \left(\frac{r - R_{\sigma}}{L_{\sigma}} \right) \right] \quad (5)$$

Здесь использовались параметры: $Q_{\sigma} = \sigma_{01}/\sigma_{02} = 20$, $L_{\sigma} = 0.1$. Параметр R_{σ} , дающий положение центра скачка плотности, варьировался в пределах $0.6 \leq R_{\sigma} \leq 1.4$. Для имитации процессов охлаждения газа в диске задаем $\gamma = 1.1$.

4. Неустойчивые ГД моды в неоднородном газовом галактическом диске со скачком скорости вращения

На первом этапе был исследован случай газового диска, однородного по равновесной поверхностной плотности, $\sigma_0(r) = \text{const}$, $\alpha_{\sigma}(r) = 0$. В

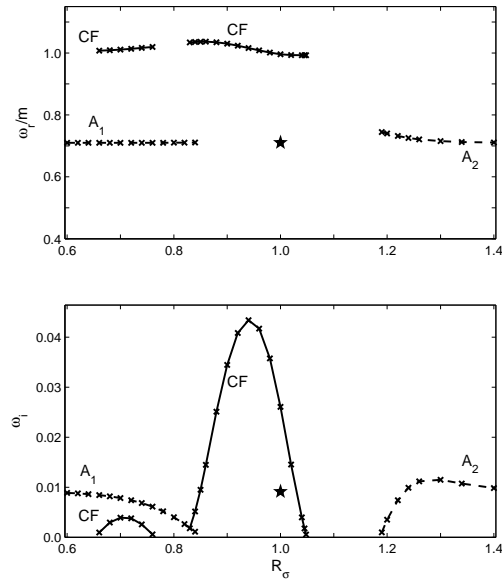


Рис. 2. Собственные значения неустойчивых веток возмущений (для $m = 2$), для $M_* = 15$. Профиль скорости вращения $V_{\varphi \text{ ttg}}(r)$ с параметрами (4), профиль $\sigma_0(r)$ из (5) с указанными там параметрами. Верхняя панель — ω_i/m , нижняя панель — ω_i . Звездочкой обозначен А-корень в однородном диске.

этом случае было обнаружено, что при переходе в модельном профиле $V_{\varphi \text{ ttg}}(r)$ от $\alpha_{\Omega \text{ min}} = -2.0$ до $\alpha_{\Omega \text{ min}} = -1.8$ и фиксированных остальных параметров в (4) неустойчивая cf-ветка возмущений при $M_* \gtrsim 10$ стабилизируется при значениях $\alpha_{\Omega \text{ min}} \approx ((-1.9) - (-1.85))$, т.е. в однородном по поверхностной плотности диске с реалистичными значениями $\alpha_{\Omega \text{ min}} \approx ((-1.85) - (-1.80))$ такая ветка неустойчивых мод, по-видимому, возбуждаться не может.

В присутствии скачка плотности (5) с указанными выше параметрами, профиле $V_{\varphi \text{ ttg}}(r)$ с $\alpha_{\Omega \text{ min}} = -1.8$ и остальными параметрами из (4) была обнаружена «реанимация» неустойчивой cf-ветки при типичных для газового галактического диска значениях параметра $M_* \sim (10 - 20)$, причем инкременты этой ветки могут быть примерно в два раза выше, чем у А-корней, см. рис. 2.

Рассчитанные возмущения поверхностной плотности для cf-ветки, нормированные на невозмущенную поверхностную плотность $\sigma_0(r)$,

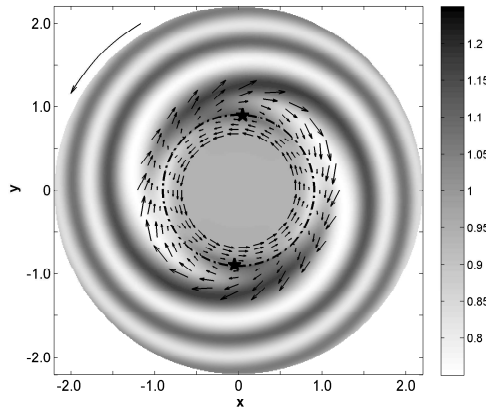


Рис. 3. Возмущения поверхностной плотности, нормированные на равновесную плотность $\sigma_0(r)$, для неустойчивой sf -ветки при $R_\sigma = 0.94$. Параметры модельного диска даны в подписи к рис. 2 и в тексте. Жирный штрихпунктир — коротационная окружность, стрелки — поле скоростей в системе координат волны. Звездочки — центры антициклонических вихрей.

при параметрах, указанных в подписи к рис. 2, приведены на рис. 3 для значения $R_\sigma = 0.94$. Они формируют отстающую спиральную волну плотности с характерным радиальным масштабом спада амплитуды ~ 4 кпк. Возмущения поверхностной плотности для A -корней формируют (для гармоники $m = 2$) два куска туго закрученных примерно четверть-оборотных спиралей, напоминающих псевдо-кольца в галактиках. Эти возмущения сильно локализованы по радиусу в окрестности коротационной окружности. Для всех неустойчивых веток возмущений коротация лежит внутри области скачка скорости, для sf -ветки — ближе к внутренней части скачка, для A -корней — ближе к наружной части.

5. Заключение

Исследованы крупномасштабные неустойчивые ГД моды возмущений в модельном газовом диске, аппроксимирующем реальный неоднородный газовый галактический диск, кривая вращения которого имеет скачок скорости во внутренней области диска. Показано, что присутствие достаточно резкого скачка плотности способно усиливать sf -

ветку возмущений, которая формирует отстающую спиральную волну плотности. «Низкочастотные» А-ветки возмущений порождают туго закрученные четверть-оборотные двух-рукавные спирали, похожие на псевдо-кольца в некоторых спиральных галактиках. Оценки времени нарастания амплитуды возмущений на порядок величины дают значения примерно $\lesssim 10^9$ лет.

Список литературы

1. J. Kormendy and R. C. Kennicutt, Jr., *ARA&A*, **42**, 603, 2004.
2. A. Toomre, *ApJ*, **139**, 1217, 1964.
3. A. Toomre, in S. M. Fall and D. Lynden-Bell, eds., *Structure and Evolution of Normal Galaxies*, 111–136 (1981).
4. E. V. Polyachenko, *MNRAS*, **348**, 345, 2004.
5. Y. Sofue and V. Rubin, *ARA&A*, **39**, 137, 2001.
6. L. Chemin, C. Carignan, and T. Foster, *ApJ*, **705**, 1395, 2009.
7. A. G. Morozov, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, **5**, 75, 1989.
8. P. Tenjes, U. Haud, and J. Einasto, *A&A*, **335**, 449, 1998.
9. J. A. Sellwood, *MNRAS*, **410**, 1637, 2011.
10. A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, and A. S. Saburova, *Astron. Lett.*, **37**, 374, 2011.
11. H. Salo, P. Rautiainen, R. Buta, G. B. Purcell, M. L. Cobb, D. A. Crocker, and E. Laurikainen, *AJ*, **117**, 792, 1999.
12. Y. M. Torgashin and T. Z. Omurkanov, *Astron. Nachr.*, **334**, 870, 2013.
13. T. T. Helfer, M. D. Thornley, M. W. Regan, T. Wong, K. Sheth, S. N. Vogel, L. Blitz, and D. C.-J. Bock, *ApJS*, **145**, 259, 2003.

Один из механизмов формирования кольцевых структур в галактических и протопланетных дисках

Федорова А.В., Тутуков А.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

До сих пор считалось, что основной механизм, обеспечивающий формирование колец в галактических дисках — это «лобовые» столкновения галактик. Нами показано, что кольцевые структуры могут также сформироваться при близких прохождениях галактик, если возмущающая галактика движется в плоскости, близкой к экваториальной плоскости основной дисковой галактики, и в направлении, обратном направлению вращения диска. Угол наклона траектории возмущающей галактики к экваториальной плоскости основной галактики не должен превышать $\sim 25^\circ$, в противном случае формируются спиральные структуры. Характерное время существования ярко выраженных колец составляет 200–300 млн. лет, что близко к соответствующему времени для «лобовых» столкновений. Эти результаты можно применить также к случаю близкого прохождения одной звезды около другой звезды с протопланетным диском.

One more mechanism of formation of ring structures in galactic and protoplanetary disks

Fedorova A.V., Tutukov A.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Up to now it was believed that the main mechanism of the formation of ring structures in galactic disks is “head-on” collision between galaxies. We show that ring structures can be formed also during close passages of galaxies if the perturbing galaxy moves in a plane close to the equatorial plane of the perturbed disk galaxy, opposite to the direction of rotation of the disk. The initial inclination of the trajectory of the perturbing galaxy to the equatorial plane of the perturbed galaxy must be less than 25° . Otherwise the spiral structures are formed. The characteristic time scale for the existence of pronounced rings is 200–300 million years, close to the corresponding time for “head-on” collisions. The results of these simulations can also be applied to a close passage of one star by another star with a protoplanetary disk.

1. Введение

Галактики с кольцевыми звездными структурами в дисках («ring galaxies») наблюдаются уже давно, хотя и достаточно редки. Каталог

[1] содержит информацию о 127 таких галактиках. Проблема формирования колец в галактических дисках исследуется уже несколько десятилетий (см., например, [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]). Согласно современным представлениям, около 60% галактик с кольцами формируются в результате столкновений двух галактик, причем возможность формирования именно кольцевых структур обусловлена определенными параметрами столкновения [9], при которых гравитация проходящей галактики воздействует на орбиты звезд «основной» галактики таким образом, что они на некоторое время концентрируются в кольцеобразные структуры. Подобному же влиянию подвергаются элементы газового компонента диска галактики. В дальнейшем для краткости «основную» галактику будем называть «галактика 1», а проходящую около нее и воздействующую на ее диск «возмущающую» галактику — «галактика 2».

Еще самые первые численные расчеты [2, 3] установили, что кольца могут сформироваться в том случае, когда столкновение является «лобовым», то есть галактика 2 «падает» на диск галактики 1 вертикально либо почти вертикально, и проходит галактику 1 «насквозь», причем столкновение является почти центральным. Именно в рамках этой модели были выполнены многие последующие численные исследования (см., например, [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]). Согласно их результатам, характерное время существования колец — порядка 100 миллионов лет. В большинстве случаев сформировавшиеся кольца постепенно расширяются и перемещаются к периферии галактики, а потом «размываются» и исчезают.

Второй предложенный механизм формирования колец на периферии галактик — их возникновение в результате аккреции вещества из межгалактического пространства или вещества соседней богатой газом галактики [13]. Третий возможный сценарий связан с резонансными эффектами в галактиках, имеющих бары [14].

Нами предложен еще один механизм формирования кольцевых структур в галактических дисках. Расчеты показывают [15, 16], что кольца могут образовываться при близких прохождении двух галактик в определенном интервале значений параметров их сближения. Согласно результатам численного моделирования, если галактика 2 движется почти в экваториальной плоскости галактики 1 либо почти параллельно этой плоскости, и при этом направление ее движения противоположно направлению вращения диска галактики 1, то при близких прохождении, когда расстояние между центрами галактик не превышает 2–4 радиусов диска R_1 , в диске галактики 1 могут сфор-

мироваться достаточно ярко выраженные кольца. В других случаях при близких прохождениях галактик формируются не кольцевые, а спиральные структуры. Стоит отметить, что исследования такого рода имеют прямое отношение к возможности образования различных структур в протопланетных дисках около молодых звезд, находящихся в достаточно плотном молодом звездном скоплении.

2. Результаты численного моделирования

Используемый метод расчета описан в работах [15, 16]. На рис. 1 представлена картина постепенного развития и изменения кольцевых структур со временем для близкого прохождения при массах галактик 1 и 2, равных $10^{11} M_{\odot}$, относительной скорости галактик $V = 300$ км/с, нулевого угла наклона исходной траектории движения галактики 2 к экваториальной плоскости галактики 1, и значении «прицельного параметра» $b = 3R_1$. Минимальное расстояние между центрами двух галактик в данном случае составляет $\sim 2.2R_1$.

Эта картина типична для прохождений, в которых формируются кольцевые структуры. Характерно, что кольца начинают появляться в диске галактики 1 уже после того, как галактика 2 начинает удаляться от нее. Время существования ярко выраженных колец в данном случае порядка динамического времени на краю галактики 1 и составляет 200–300 млн. лет, что сравнимо с характерными временами, полученными при исследовании «лобовых» столкновений галактик.

2.1. Влияние различных параметров сближения галактик на формирование колец

- 1) *Влияние угла Φ наклона исходной траектории движения галактики 2 к экваториальной плоскости галактики 1.* Ярко выраженные кольцевые структуры формируются в диске исследуемой галактики при $\Phi = 0^\circ - \sim 25^\circ$. При Φ больше $\sim 30^\circ$ во внешней области галактики 1 уже появляются элементы спиральных ветвей.
- 2) *Влияние высоты траектории возмущающей галактики.* Формирование колец имеет место только при достаточно малых начальных высотах траектории галактики 2, порядка $3 R_1$. При высотах более $5 R_1$ формирующиеся кольца выражены уже очень слабо.
- 3) *Влияние относительной скорости движения галактик V .* Как и следует ожидать, ярко выраженные кольцевые структуры форми-

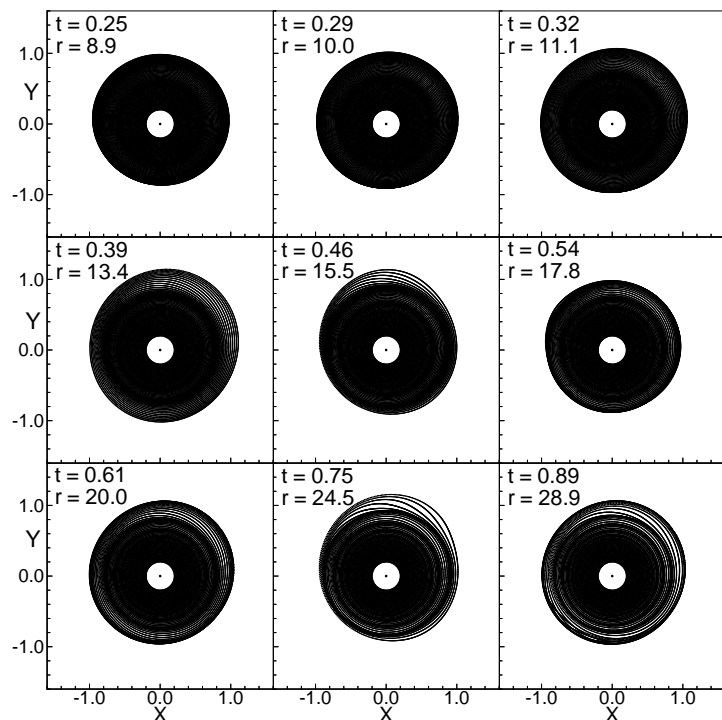


Рис. 1. Последовательные фазы изменения кольцевой структуры звездного компонента дисковой галактики 1 при близком прохождении возмущающей галактики 2 (параметры прохождения указаны в тексте). Цифрами на рисунках отмечены: t — время, прошедшее с момента максимального сближения галактик (в млрд. лет), r — расстояние между галактиками в единицах начального радиуса диска галактики 1.

руются при малых V , когда время гравитационного взаимодействия галактик максимально. Однако и при больших V , около 1500 км/с, наблюдается образование достаточно четко выраженных структур, если минимальное расстояние между галактиками ненамного превышает $2 R_1$.

- 4) *Влияние отношения масс галактик $q = M_2/M_1$.* При $q = 0.5$ формируются почти такие же кольца, как при $q = 1.0$. Однако

при $q = 0.1$ структуры, образующиеся в диске галактики 2, почти неразличимы.

2.2. Применение результатов расчетов к протопланетным дискам

Свойства используемого метода расчета позволяют применить результаты численного моделирования к случаю близкого прохождения одной звезды около другой звезды с протопланетным диском в молодом звездном скоплении, в котором велика вероятность близких прохождений соседних звезд. Кольцевые и спиральные структуры, возникающие в протопланетных дисках при таких прохождениях, могут оказывать влияние на процесс формирования и эволюции планетезималей и, возможно, на характер формирования планет и их распределение по большой полуоси орбиты [17]. Наши расчеты показывают, что при размерах протопланетных дисков 100–1000 а.е. время существования достаточно ярко выраженной системы колец может составлять соответственно ~ 1000 –30000 лет. Эти интервалы времени могут быть достаточно значимыми для начальных стадий процесса возникновения планетезималей. В околозвездных пылевых дисках действительно наблюдаются относительно тонкие кольцевые структуры [18, 19]. Этот факт, вероятно, можно рассматривать, как аргумент в пользу исследуемой здесь возможности.

3. Заключение

Нами показано, что имеется еще один механизм возникновения кольцевых структур в галактических дисках: они могут сформироваться при близких прохождениях галактик, если возмущающая галактика движется в плоскости, близкой к экваториальной плоскости основной дисковой галактики, и притом в направлении, обратном направлению вращения диска. Результаты расчетов дают такую же картину появления и эволюции кольцевых структур, которая типична для «лобовых» столкновений галактик — основного исследованного до сих пор механизма. Эти результаты применимы также к случаю близкого прохождения одной звезды около другой звезды с протопланетным диском.

Список литературы

1. B. F. Madore, E. Nelson, and K. Petrillo, *ApJS*, **181**, 572, 2009.
2. R. Lynds and A. Toomre, *ApJ*, **209**, 382, 1976.
3. J. C. Theys and E. A. Spiegel, *ApJ*, **212**, 616, 1977.
4. C. Horellou and F. Combes, *Ap&SS*, **276**, 1141, 2001.
5. E. D'Onghia, M. Mapelli, and B. Moore, *MNRAS*, **389**, 1275, 2008.
6. K. K. Ghosh and M. Mapelli, *MNRAS*, **386**, L38, 2008.
7. M. Mapelli, B. Moore, L. Giordano, L. Mayer, M. Colpi, E. Ripamonti, and S. Callegari, *MNRAS*, **383**, 230, 2008.
8. M. Mapelli, B. Moore, E. Ripamonti, L. Mayer, M. Colpi, and L. Giordano, *MNRAS*, **383**, 1223, 2008.
9. M. Mapelli and L. Mayer, *MNRAS*, **420**, 1158, 2012.
10. R. Smith, R. R. Lane, B. C. Conn, and M. Fellhauer, *MNRAS*, **423**, 543, 2012.
11. L. Fogarty, N. Thatte, M. Tecza, F. Clarke, et al., *MNRAS*, **417**, 835, 2011.
12. D. Fiacconi, M. Mapelli, E. Ripamonti, and M. Colpi, *MNRAS*, **425**, 2255, 2012.
13. M. A. Ilyina, O. K. Sil'chenko, and V. L. Afanasiev, *MNRAS*, **439**, 334, 2014.
14. R. Buta and D. A. Crocker, *AJ*, **105**, 1344, 1993.
15. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, *Astron. Rep.*, **50**, 785, 2006.
16. A. V. Tutukov and A. V. Fedorova, *Astron. Rep.*, **60**, 116, 2016.
17. I. Thies, P. Kroupa, and C. Theis, *MNRAS*, **364**, 961, 2005.
18. G. Schneider, B. A. Smith, E. E. Becklin, D. W. Koerner, et al., *ApJL*, **513**, L127, 1999.
19. P. Kalas, J. R. Graham, M. C. Clampin, and M. P. Fitzgerald, *ApJL*, **637**, L57, 2006.

**Наблюдательные
инструменты, приборы,
методики**

Принципы глобальной навигации аппаратов на поверхности Луны

Багров А.В., Леонов В.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Госкорпорацией «РОСКОСМОС» рассматривается возможность создания системы глобальной навигации на Луне по отработанной схеме ГЛОНАСС. Вместе с тем существует концепция фиксации каркаса селенографических координат на искусственных точечных реперах — оптических маяках. Каркас может быть сформирован на небольшом количестве маяков с помощью одного искусственного спутника Луны (ИСЛ) на полярной орбите. ИСЛ должен иметь на борту высокоточную систему ориентации по звездам и панорамную камеру для съемки лунной поверхности. Эти устройства входят в состав бортовой аппаратуры всех спутников Луны, и реализация концепции не требует внесения изменений в проекты разрабатываемых ИСЛ. Ожидается, что в результате проведения миссий «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс» будет достигнута точность навигации на Луне на уровне единиц метров. На этой основе предложена схема глобальной навигации для Луны, базирующаяся только на одном полярном ИСЛ и двух КА в точках Лагранжа L_1 и L_2 системы «Земля-Луна».

The principles of global navigation of spacecrafts on the surface of the Moon

Bagrov A.V., Leonov V.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Roskosmos Agency discusses an opportunity to create a global positioning system for the Moon as analogue of well-done system GLONASS. On the other hand, there is conception of selenographic coordinates system based on artificial point-like signs, which are optical beacons. The system may be made on observations with a single artificial lunar satellite (ALS) on polar orbit. The ALS must be equipped with a high accuracy stellar orientation system and a panoramic camera for picturing the lunar surface. These devices are built-in in all ALS, and an implementation of the conception will not require any correction to the ALS projects. It is expected that as a result of the realization of missions of “Luna-Glob” and “Luna-Resurs” an accuracy of navigation will be attained on Moon at the level of few meters. On this basis, a global navigation system for Moon can include only on one polar ALS and two spacecrafts in Lagrange points L_1 and L_2 of the system “Earth-Moon”.

1. Введение

Предусмотренное ФКП России активное изучение Луны и подготовка строительства на ней постоянной базы потребуют использования в работе высокоточной системы навигации космических аппаратов в окололунном пространстве и на поверхности Луны.

Задача высокоточного определения селенографических координат на Луне пока не имеет решения. Эта система сферических координат определяет широту, долготу и высоту пункта на Луне. Широта определяется относительно лунного экватора или лунных полюсов. Долгота на Луне отсчитывается от «направления, соединяющего центры масс Земли и Луны в момент нулевых значений либрации Луны» [1]. Это значит, что если из многолетних рядов измерений положений наиболее ясно выделяемых на поверхности Луны деталей относительно видимого с Земли центра диска Луны исключить периодические изменения их положений, сопровождающих либрации (покачивания) Луны по широте и по долготе, то можно определить точку в центре лунного диска, у которой широта и долгота равны нулю. Такая работа была выполнена в Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта КГУ. В результате почти вековых телескопических наблюдений около 800 образований на лунной поверхности была построена система селенографических координат со средней ошибкой положений 200–300 м. Тем не менее точность привязки системы координат конкретных объектов на Луне остается равной примерно 1 км, т.к. она определяется разрешающей способностью наземных телескопов.

Глобальная навигация означает возможность определения координат измеряемой точки, желательно — в любой момент времени. На Земле система глобального позиционирования долгое время основывалась на астрономических наблюдениях в точке измерений и всемирной системе времени, которая была связана с «нулевым меридианом». Во второй половине прошлого столетия задача глобального позиционирования получила другое решение, основанное на применении космической техники. Системы позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др.) содержат группировку спутников, пространственное положение каждого из которых известно с высокой точностью, и специальный приемник у потребителя. Спутники передают сведения о своем пространственном положении и сигналы точного времени, а в приемнике на основании этих сигналов вычисляются расстояния до спутников и определяется пространственное положение приемника. Таким образом, в спутниковых системах навигации измерения про-

пространственных положений опорных и измеряемых объектов разделены: спутники измеряют и транслируют данные о своем положении, а потребитель измеряет свое положение относительно спутников группировки и определяет свои координаты. Как при астрономическом измерении координат, так и при спутниковом позиционировании потребитель должен проводить свои измерения непосредственно в точке позиционирования.

2. Навигация на Луне

На поверхности Луны или возле нее имеется только небольшое количество аппаратов, требующих измерения их координат. Часть из них находится на лунной поверхности в неподвижном состоянии, и измерение их координат может быть разовым. Подвижные аппараты постоянно изменяют свое положение, и оно должно определяться с достаточной точностью на любой момент времени.

Для определения координат посадочных модулей достаточно один раз их измерить, и оснащать посадочный модуль астрономическим инструментом ради одного измерения не продуктивно. Создавать группировку из окололунных навигационных спутников для позиционирования нескольких аппаратов на Луне также нецелесообразно. Тем более, что точное пространственное положение каждого навигационного спутника должно постоянно поддерживаться независимыми высокоточными измерениями (на Земле для каждой группировки спутников это сотни астрономических и радиотехнических инструментов).

Наше предложение заключается в отказе от любых измерений в позиционируемом пункте и размещении измерительной аппаратуры вместе с вычислительным комплексом на борту космического аппарата. Точка позиционирования на поверхности Луны задается положением точечного светового маяка. Она наблюдается с борта искусственного спутника Луны (ИСЛ), и с помощью бортовой аппаратуры измеряется ее угловое положение относительно звезд. Каждое измерение видимого положения маяка в проекции на небесную сферу (2 координаты) зависит от положения спутника (6 орбитальных параметров), селенографических координат маяка (3 параметра) и момента времени. Считая орбиту постоянной и координаты позиционируемой точки неизменными, можно уравнение, связывающее эти 12 параметров, разрешить относительно априори неизвестных координат маяка и орбиты спутника. Для этого достаточно провести 9 независимых измерений угловых положений маяка из разных точек орбиты. Если же число измерений будет существенно больше, то число получен-

ных с ними уравнений получится избыточным, и их решение методами математического уравнивания позволит даже исследовать изменение орбитальных параметров спутника со временем. Математическое обоснование этого подхода приведено в [2]. Концепция маяков была заложена в планы миссий «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс» для обеспечения высокоточной навигации российских аппаратов на поверхности Луны и в окололунном пространстве [3, 4].

3. Глобальная навигация с использованием световых маяков

Благодаря глобальной съемке поверхности Луны телекамерами на ИСЛ методами фотограмметрии была построена система селенодезических координат высокой точности, которая привязана к телу Луны фиксацией координат огромного количества мелких деталей лунной поверхности. Эта система координат может быть использована и для определения координат находящихся на Луне объектов, но только по снимкам местности с различимыми на них объектами. С одной стороны, высокое разрешение съемочной техники для получения снимков нужного качества требует проведения съемки с малой высоты орбиты и при благоприятном солнечном освещении. С другой, ИСЛ на низкой орбите не может пролетать над произвольной точкой на Луне на каждом витке. Поэтому методы фотограмметрии не могут решить задачу оперативного позиционирования объектов на Луне.

Применение световых маяков позволяет не только с их помощью зафиксировать каркас селенодезической системы координат на теле Луны, но и использовать их для координатных измерений на большом удалении от Луны. Например, световые маяки на КА «Луна-25» разработаны так, чтобы их излучение можно было уверенно фиксировать на расстоянии 200 км от маяка бортовой телевизионной камерой, и даже с Земли в телескоп с апертурой более 50 см [4]. Поэтому позиционирование маяка, размещенного в любом месте лунной поверхности, может проводиться с борта ИСЛ на любой полярной орбите. В случае позиционирования посадочного модуля описанным способом координаты маяка могут быть получены после первого же наблюдения маяка. Если возле Луны находится только один ИСЛ, то он в состоянии обеспечить глобальное позиционирование всех оптических маяков на Луне, но не на каждом витке. Если же стоит задача непрерывного позиционирования светового маяка, например, размещенного на луноходе, то предлагается другое решение. Измерение угловых по-

ложений маяков на видимой стороне Луны можно непрерывно вести из точки Лагранжа L_1 системы «Земля-Луна».

4. Заключение

Использование находящегося на окололунной орбите угломерного инструмента для измерения положения светового маяка позволяет зафиксировать каркас селенодезических координат с субмиллиметровой точностью без применения астропунктов на Луне. Глобальное позиционирование объектов на Луне, снабженных оптическими маяками, может выполняться ИСЛ на полярной орбите только в моменты пролета ИСЛ над объектом, а непрерывное позиционирование могут обеспечить наблюдения маяков из точек Лагранжа L_1 и L_2 системы «Земля-Луна».

Список литературы

1. N. G. Rizvanov, Y. A. Nefed'Ev, and M. I. Kibardina, *Sol. Syst. Res.*, **41**, 140, 2007.
2. A. M. Shirenin, E. M. Mazurova, and A. V. Bagrov, *Cosmic Res.*, **54**, 452, 2016.
3. P. V. Kazmerchuk, M. B. Martynov, I. V. Moskatniev, and A. D. Sysoev, V. K. Yudin, *Vestnik "NPO S.A. Lavochkina"*, **4**, 9, 2016, in Russian.
4. A. V. Bagrov, A. O. Dmitriev, V. A. Leonov, I. V. Moskatniev, V. K. Sysoev, A. E. Shirshakov, and A. D. Yudin, *Vestnik "NPO S.A. Lavochkina"*, **4**, 5, 2017, in Russian.

Оптические маяки на Луне для решения задач уточнения теории движений Луны

Багров А.В.^{1,2}, Леонов В.А.¹

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*АО «НПО Лавочкина», Химки, Россия*

Построение полной теории движения Луны, включающей в себя влияние Земли, Солнца, планет, фигур Земли и Луны, которая соответствовала бы данным наблюдений, является одной из труднейших задач астрономии. Математическая сторона теории развивается очень успешно, однако прогресс в повышении точности измерений положений Луны идет медленно. Наиболее точным методом измерений является лазерная локация отражателей, установленных на лунной поверхности. Но этот метод имеет принципиальные ограничения, так что развитие теории ведет к необходимости повышения точности измерений положений центра масс Луны. В проекте миссии «Луна-Глоб» предусмотрена доставка на Луну лазерного оптического маяка, предназначенного для прецизионных наблюдений положений Луны наземными телескопами. Описана предполагаемая схема наблюдений маяка и дана оценка уровня точности проводимых наблюдений.

Optical beacons on lunar surface for improvement of the Moon Motion Theory

Bagrov A.V.^{1,2}, Leonov V.A.¹

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*JSC “NPO Lavochkin”, Khimki, Russia*

A construction of a complete of Moon Motion Theory that would plug in it influence of Earth, Sun, planets, figures of Earth and Moon and would correspond to observations data, is one of the most difficult tasks of astronomy. The mathematical part of theory develops very successfully. At the same time progress in the increase of measurement accuracy of positions of Moon goes slowly. The most accurate method of observations is the laser location of the reflectors set on a lunar surface. But this method has fundamental limitations, so that development of theory conduces to the necessity of increase of accuracy of measuring of positions of the lunar centre-of-mass. In the project of the “Luna-Glob” mission the delivery of laser optical beacons is planned to the Moon for the precision observations of Moon positions by telescopes from the Earth. The proposed scheme of light beacons observations is described as well as estimation of accuracy level of angular observations of the Moon.

1. Введение

Теория движения Луны после открытия закона всемирного тяготения превратилась из эмпирической модели движения в математическую модель, способную привлечь во внимание большое число параметров, влияющих на движение Луны. Среди них — либрации Луны [1], притяжение Земли, Солнца и других планет, распределение масс в теле Земли и Луны [2], приливные воздействия и т.д. Некоторые из этих параметров могут быть исследованы независимыми методами, например, распределение масс внутри Земли и ее гравитационного поля. При этом многие параметры остаются в теоретических моделях «свободными», подлежащими уточнению через сравнение эфемеридных положений Луны с наблюдениями.

Многовековые наблюдения Луны позволили установить с высокой точностью характер обращения Луны вокруг Земли и обнаружить сложность ее движения. Самые выдающиеся математики приняли участие в построении аналитической теории движения Луны, попутно развивая методы решений дифференциальных уравнений (И. Ньютон, Ж. Д'Аламбер, Дж.У. Хилл, А.К. Клеро, П.-С. Лаплас и др.). К настоящему времени теория движения Луны достигла уровня, на котором ее дальнейшее совершенствование ограничивается точностью наблюдений [3, 4, 5] и разнородностью получаемых наблюдательных данных [6].

2. Лазерные маяки миссии «Луна-Глоб»

На посадочной станции «Луна-Глоб» предусмотрены в составе служебной системы два оптических маяка. Основная их задача — фиксация места посадки станции на лунной поверхности и измерение селенографических координат точки посадки. Размеры посадочного модуля не позволяют обнаружить его на снимках, получаемых с борта искусственного спутника Луны (ИСЛ), находящегося на круговой орбите высотой 200 км. Поскольку эллипс, в пределах которого может произойти спуск аппарата, имеет размеры 15×30 км [7], с точки зрения качественного анализа получаемой с него информации очень важно установить характер рельефа в месте посадки. Не менее важно получить точные селенографические координаты места посадки, в т.ч. для более надежного определения положения лазерного отражателя на посадочном аппарате относительно центра масс (ЦМ) Луны.

Первая задача будет решена простым фотографированием района посадки, т.к. на снимке точное положение посадочного аппарата

будет обозначено ярко светящейся точкой включенного маяка (рис. 1), свет которого направлен в сторону зенита места посадки [8].

Световой сигнал маяка может фиксироваться любым спутником на окололунной орбите, пролетающим над зоной посадки, поэтому конструкция маяка предусматривает его включение по команде с Земли, если в это время будет работать ИСЛ другого государства. Ранее было показано, что световой маяк точечных размеров, который может использоваться как селенодезический репер, позволяет зафиксировать на поверхности Луны каркас селенографических координат [9, 10]. Эта возможность была детально проработана при подготовке миссии «Луна-Глоб» [11] и заложена в план дальнейших исследований Луны при проведении миссии «Луна-Ресурс» [8, 12]. После выполнения миссий «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс» отечественная космонавтика получит систему селенодезических координат, привязанную к телу Луны, которая обеспечит точность позиционирования снабженных оптическими маяками аппаратов на уровне единиц метров.

Одновременно на борту спускаемого аппарата «Луна-25» будет работать лазерный маяк, излучение которого будет направлено на Землю. В силу технических ограничений этот лазерный маяк не будет иметь системы активной ориентации, способной поддерживать направление излучения на выбранную точку Земли в течение длительного времени. После посадки КА бортовые датчики ориентации определят фактическое положение спускаемого аппарата и направления узких лучей веерно расположенных лазерных излучателей (рис. 2).

Направления свечения каждого из них относительно посадочного аппарата — это конструктивные параметры, поэтому после посадки можно будет составить эфемериды направления оси пучка любого излучателя. Большая неопределенность в ожидаемой ориентации посадочного аппарата по азимуту и углу места и довольно широкая область видимых перемещений Земли на лунном небосводе в результате либраций обусловили выбор схемы «веерных излучателей». При фиксированной ориентации посадочного модуля свет только одного из излучателей в некоторый момент времени может попасть на Землю и быть виден из наземной обсерватории.

Световой маяк, направленный на Землю, будет включаться по команде с Земли только при одновременном совпадении трех условий: пятно света маяка проходит через астрономическую обсерваторию; наблюдательная аппаратура готова к работе; погодные условия в обсерватории удовлетворительны. Вследствие вращения Земли продолжительность попадания светового пятна от маяка на место располо-

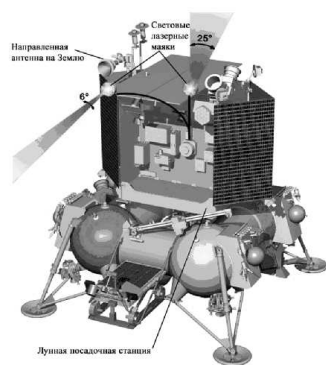


Рис. 1. Расположение световых маяков на посадочной станции КА «Луна-Глоб» [8].

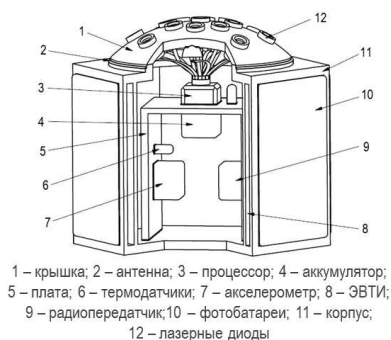


Рис. 2. Схема верных излучателей [13].

жения обсерватории не будет превышать 30 мин. Предполагается, что маяк будет наблюдаться из 3–4 астрономических обсерваторий, поэтому энергопотребление маяка будет небольшим, и для работы маяка можно будет использовать штатные батареи посадочной станции.

3. Схема проведения телескопических наблюдений

При наблюдении точечного источника в телескоп можно определить только его угловое положение относительно реперов. Самыми эффективными реперами для такой цели являются яркие звезды, положение которых в небесной системе координат установлено с точностью $0.001''$. Световой маяк будет размещен вблизи южного полюса Луны, и его угловое расстояние от края лунного диска не превысит $5'$ (для наземного наблюдателя). В поле зрения телескопа, отслеживающего световой маяк, звезды фона будут перемещаться относительно Луны с угловой скоростью около $0.08''/с$. За время одной экспозиции продолжительностью 40 мс угловое смещение звезды составит $0.0032''$. Такое небольшое смещение довольно сложно измерить при среднем диаметре изображения звезды $2''$, обусловленном ночным астроклиматом [13]. Тем не менее, если масштаб изображения в поле зрения телескопа составляет $0.04''/пикс$, а число фотонов, формирующих изображение точечного источника, превышает 10^8 , положение центра изображения можно определить с точностью 0.05 пикс ($0.001''$) [14].

Снижение уровня фоновой подсветки будет обеспечено использованием узкополосных интерферометрических светофильтров Фабри-Перо с полосой пропускания, центрированной на рабочую длину волны лазерного маяка. При этом световой поток от звезд снизится на два порядка, но останется достаточным для проведения высокоточных позиционных измерений.

Обычный астрономический телескоп по схеме Ричи-Кретьена имеет хорошо исправленное поле диаметром до $40'$, и для предлагаемых наблюдений двух объектов (маяка и звезды) достаточно использовать две небольшие ПЗС-матрицы, перемещаемые независимо по полю зрения телескопа. Для наземных наблюдений лазерного маяка потребуются разработать и изготовить «двухкамерные» светоприемники. Камеры будут устанавливаться на расчетное расстояние друг от друга. Одна камера будет направлена на маяк, и телескоп будет отслеживать как суточное движение, так и видимое орбитальное движение Луны. Вторая камера будет направлена на область, через которую будет проходить звезда. Сами наблюдения будут проходить при фиксированном расположении обеих матриц, причем точное расстояние между ними будет калиброваться по звездам до и после сеанса наблюдений.

4. Оценка ожидаемой точности измерений

Формальная точность измерений положений центров изображений точечных объектов будет составлять $0.001''$. Однако нестабильность атмосферы будет вносить свои искажения. В условиях ночного астроклимата радиус атмосферной когерентности (параметр Фрида) составляет около 10 см, что сопоставимо с диаметром телескопа, на котором планируются наблюдения лунного маяка. Из-за этого атмосферное дрожание вызовет разброс измеренных положений звезд и маяка. Вместе с тем за время 30-минутного сеанса наблюдений будет получено несколько тысяч независимых измерений этих положений, усреднение которых позволит определить точность измеренных перемещений звезды относительно маяка на уровне $0.025''$. Это существенно выше, чем по покрытию звезд Луной, поскольку изрезанность края лунного диска горами с высотой до 2500 м приводит к ошибке в измерении положения ЦМ Луны относительно звезд в $2''$. Наблюдение положений лунного лазерного маяка относительно звезд, помимо всего прочего, с большой точностью обеспечит редукцию полученных результатов непосредственно к ЦМ Луны, так как координаты маяка в системе селеноцентрических координат будут известны с точностью

не хуже 10 метров (эта точность соответствует ошибке в измерениях углового положения маяка, равной $0.008''$).

5. Заключение

Размещение оптического лазерного маяка на Луне, который можно наблюдать наземными телескопами, является качественно новым подходом к практическому решению задач селенодезии и теории движения Луны. Наблюдения маяка традиционными методами астрометрии позволят повысить точность определения положений ЦМ Луны на порядок по сравнению с традиционными телескопическими методами, а точная привязка координат находящихся на Луне угловых отражателей повысит точность лазерных измерений расстояний между ЦМ Земли и Луны.

Список литературы

1. D. H. Eckhardt, *Moon and Planets*, **25**, 3, 1981.
2. E. V. Pitjeva, *Sovremennye Chislennye Teorii Dvizheniia Solntsa, Lunny i Bol'shikh Planet* [Modern Numerical Ephemerides of the Sun, the Moon and Major Planets], Preprints by Inst. of Appl. Astron. RAS, 2003, in Russian.
3. T. V. Ivanova, *Sol. Syst. Res.*, **47**, 359, 2013.
4. V. V. Pashkevich, *Vestnik of Saint Petersburg University*, **4**, 681, 2017, in Russian.
5. A. V. Gusev, N. K. Petrova, and K. Khanada, *Vrashchenie, Fizicheskaiia Libratsiia i Vnutrennee Stroenie Aktivnoi i Mnogosloinoi Luny* [Rotation, Physical Libration, Internal Structure of the Active and Multi-layer Moon] (2015), in Russian.
6. G. A. Krasinskii, E. V. Pit'eva, M. L. Sveshnikov, and E. S. Sveshnikova, *Soviet Physics Doklady*, **26**, 1103, 1981.
7. M. A. Ivanov, M. Y. Marov, A. T. Basilevskiy, and Y. A. Kostitsin, *Vestnik "NPO S.A. Lavochkina"*, **2**, 44, 2017, in Russian.
8. A. V. Bagrov, A. O. Dmitriev, V. A. Leonov, I. V. Moskatiniyev, V. K. Sysoev, A. E. Shirshakov, and A. D. Yudin, *Vestnik "NPO S.A. Lavochkina"*, **4**, 5, 2017, in Russian.
9. A. V. Bagrov, Establishing of Fine Co-ordinate Frame for Mars and Atmosphere-less Bodies, Space Res. Inst., 2010.
10. A. V. Bagrov, *Transactions of the Inst. of Appl. Astron. RAS*, **13**, 258, 2005, in Russian.
11. A. M. Shirenin, E. M. Mazurova, and A. V. Bagrov, *Cosmic Res.*, **54**, 452, 2016.
12. A. V. Bagrov, L. V. Vernigora, P. A. Vyatlev, M. B. Martynov, B. P. Papchenko, and V. K. Sysoev, *Vestnik "NPO S.A. Lavochkina"*, **4**, 37, 2011, in Russian.

13. A. V. Bagrov, L. V. Vernigora, P. A. Vyatlev, M. B. Martynov, B. P. Papchenko, and V. K. Sysoev, Avtonomnoe Signal'noe Ustroistvo [Self-Contained Signaling Device], Patent Russia No. RU 110857, Bull. No. 33., 2011.
14. E. A. Vitrichenko, *Metody Issledovaniia Astronomicheskoi Optiki [Methods of a Research of Astronomical Optics]* (1980), in Russian.

Симеизская обсерватория. История и перспективы развития

Крючков С.В.¹, Николенко И.В.^{1,2}, Баканас Е.С.¹

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Симеиз, Россия*

Симеизская обсерватория, основанная в 1900 г. как любительская, имеет богатую историю. В статье представлено развитие обсерватории в разное время. Особое внимание уделено периоду после 1974 г., когда Астросоветом АН СССР на базе обсерватории была организована станция наблюдений искусственных спутников Земли.

Simeiz Observatory. The history and development prospects

Kryuchkov S.V.¹, Nikolenko I.V.^{1,2}, Bakanas E.S.¹

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Crimea Astrophysical Observatory of RAS, Simeiz, Russia*

Simeiz Observatory, founded in 1900 as an amateur observatory, has a rich history. The article presents the development of the observatory in different periods. Special attention is paid to the period after 1974, when the Astronomical Council of the USSR Academy of Sciences, on the basis of the observatory, has organized an observation station for artificial Earth satellites.

16 апреля 1974 г. заместитель председателя Астрономического совета АН СССР А.Г. Масевич подписала приказ об организации в системе Астросовета АН СССР экспериментальной станции лазерных наблюдений искусственных спутников Земли в Симеизе на базе филиала Крымской астрофизической обсерватории АН СССР (рис. 1). Так началась еще одна эпоха из жизни Симеизской обсерватории — история экспериментальной лазерной спутниковой станции. Предыдущая история Симеизской обсерватории довольно подробно представлена в научной и краеведческой литературе [1, 2, 3].

Все началось в 1900 г., когда любитель астрономии из Симеиза Н.С. Мальцов построил на своих землях астрономическую башню и установил там 4-дюймовый рефрактор. В 1908 г. Мальцов передает свою обсерваторию вместе с астрономическими инструментами Пулковской обсерватории. Обсерватория успешно работала и развивалась

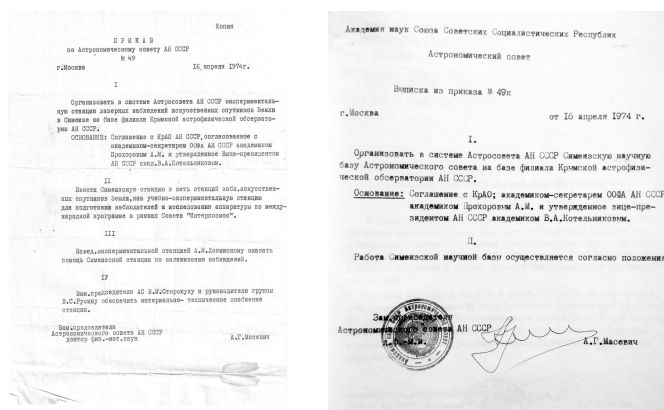


Рис. 1. Приказ об организации Симеизской станции наблюдений ИСЗ.

до Великой Отечественной войны. С начала 1950-х гг. центр наблюдений постепенно сместился на новую обсерваторию в поселок Научный.

В 1974 г., как мы уже упоминали, Симеизская обсерватория была передана Астросовету. Это событие можно считать вторым рождением обсерватории. Основной задачей обсерватории стало наблюдение искусственных спутников Земли в целях геодезии. В сентябре 1975 г. начал работу лазерный дальномер первого поколения «Криптон», ответственный за работу — Л.С. Штирберг. Кроме того, в 1974–1976 гг. были установлены и запущены в работу фотографическая спутниковая установка АФУ-75, спутниковая камера SBG и астролябия Данжона ОРЛ-23. Для «Криптона», АФУ-75 и астролябии были построены новые павильоны, а для SBG была реконструирована одна из старых башен. Для обеспечения сеанса наблюдений за ИСЗ на АФУ-75 и «Криптоне» в 1976 г. была организована экспедиция Астросовета на Симеизскую станцию. Начальником экспедиции и ее научным руководителем была назначена к.ф.-м.н. Л.В. Рыхлова.

С 1975 г. Симеизская спутниковая станция принимала участие во всех международных и специальных программах по геодинاميке и космической геодезии в сети «Интеркосмос». В 1983–1984 гг. проводился международный эксперимент «МЕРИТ», целью которого было измерение параметров вращения Земли. В рамках этого эксперимента на дальномере «Криптон» после его доработки в Симеизе впервые в СССР была произведена локация геодезического спутника

Lageos. В 1988 г. был введен в строй лазерный спутниковый дальномер второго поколения «Крым», который измеряет расстояние до спутника с точностью до нескольких сантиметров. С 1998 г. он был включен в международную сеть лазерных станций (ILRS). Дальномер «Крым» успешно работает в Симеизе до настоящего времени (см. статью Л. Штирберга и В. Мазурова в данном сборнике).

С 1980 г. астролябия Данжона, работавшая по программе комплексных определений вращения Земли, начала регулярно передавать результаты определения поправок времени и широты в Международное бюро времени (Франция).

Светосильная широкопольная фотографическая камера SBG Carl-Zeiss Jena, использовалась для обзорных наблюдений объектов на геостационарной орбите, астрометрических наблюдений кометы Галлея в 1985–1986 гг. Для привязки наблюдений оптических инструментов к точному времени была организована служба времени на базе комплекса «Кипарис» и приемника сигналов точного времени. Впоследствии для привязки лазерных наблюдений был установлен рубидиевый стандарт частоты.

В 1977 г. в Симеизе была установлена ЭВМ М-222, перевезенная со Звенигородской станции Астросовета. На ЭВМ был установлен комплекс программ, составленный в Симеизе, который обеспечил оперативную работу по вычислению эфемерид и первичной обработке наблюдений (Г.С. Курбасова, М.Н. Рыбалова). Вычисление эфемерид спутников осуществлялось для 40 станций сети «Интеркосмос» по всему миру. В 1986 г. ЭВМ была заменена на ЕС-1033, а затем на СМ-1420, которая проработала до эпохи ПК.

С 1981 г. велись работы по измерению доплеровского смещения частот, излучаемых спутником серии «Транзит» с помощью приемника МХ-1502. Эти данные позволили уточнить координаты станции (С.В. Филиков). При содействии Полтавской гравиметрической обсерватории проводились наблюдения приливных вариаций силы тяжести с гравиметром «Аскания GR-12» и наклонов поверхности Земли с помощью фотоэлектрических наклономеров (Г.Н. Шликарь).

В середине 1980-х гг. Институтом космических исследований в старой Мальцовской башне был установлен 60-сантиметровый зеркальный телескоп Carl-Zeiss Jena (ГДР). На нем проводились наблюдения с использованием дифракционного спектрографа, одноканального фотометра, планетарной камеры.

Сотрудники станции проводили наблюдения не только в Симеизе. Многие выезжали для проведения лазерных и фотографических на-



Рис. 2. Башня 1-метрового телескопа (в 1920-е гг., в период реконструкции (конец 1980-х гг.) и в наши дни).

блюдений спутников на станции сети «Интеркосмос» на Кубу, в Монголию, Вьетнам, Боливию, Мозамбик, Анголу. На станции проходили стажировку специалисты из Боливии, Монголии, Вьетнама.

В 1983 г. Астросоветом было принято решение установить на Симеизской научной базе 1-метровый зеркальный телескоп производства Carl-Zeiss Jena. Для его установки была реконструирована башня, построенная в 1926 г. для 1-метрового рефлектора (рис. 2).

В 1987 г. башня была готова для монтажа телескопа, и в апреле 1988 г. приехали специалисты из ГДР и Венгрии для проведения монтажа 8-метрового купола и телескопа с системой управления. В 1989 г. монтаж телескопа был завершен и начались наблюдения.

В 1991 г., после распада СССР, на базе станции была организована Симеизская международная обсерватория, но уже в 1993 г. она вернулась в состав КраО. 1990-е гг. — сложный период в истории Симеизской обсерватории. Прекратилось сотрудничество со многими организациями. Сократилось количество сотрудников. В этот период в основном работали два инструмента — лазерный дальномер и метровый телескоп. В 2000 г. по соглашению с NASA в Симеизе была установлена опорная GPS станция.

Метровый телескоп продолжал работать по программам ИНАСАН (бывший Астросовет). Основными направлениями работы были следующие: позиционные и фотометрические наблюдения геосинхронных спутников; поисковые наблюдения крупных тел в метеорных и болидных потоках; позиционные наблюдения и фотометрия астероидов, сближающихся с Землей. В 1995 г. 1-метровый телескоп включен в Наземную сеть оптических средств по программе контроля околоземного космического пространства. Примером использова-

ния фотометрических наблюдений, проведенных на 1-метровом телескопе в этот период, является определение формы верхней ступени «Транстейдж-13» после ее разрушения [4].

С начала 1990-х гг. и по настоящее время сотрудниками ИНАСАН и ГАИШ проводится программа измерений лучевых скоростей, фотометрия переменных звезд и кратных звездных систем [5]. Несколько позже начала проводится дифференциальная поляриметрия протяженных астрономических объектов [6].

Для поисковых наблюдений были своими силами изготовлены несколько редукторов фокуса с разными характеристиками, позволившие в 1995 г. впервые обнаружить объекты декаметрового размера в метеорном потоке Персеиды, которые получили неофициальное название «инасаны» [7]. В настоящее время частью наблюдательной программы на 1-метровом телескопе является определение параметров вращения и оптических свойств астероидов из различных групп, в том числе сближающихся с Землей. Начиная с 2015 г., проведены астрометрические и фотометрические наблюдения 17 астероидов. В их числе как астероиды Главного пояса, так и сближающиеся с Землей [8].

С начала 1990-х гг. было произведено несколько модернизаций системы управления, в частности, установлены современные датчики положения, движение купола точно синхронизировано с движением телескопа. В настоящее время проводятся работы по переводу системы на новую элементную базу. Новая система — это комплекс контроллеров, выполняющих локальные задачи и соединенных между собой и с центральным компьютером по сети Ethernet. Это позволит управлять телескопом с любого компьютера в сети. На башне установлено дополнительное оборудование. Это метеостанция и широкоугольная камера, контролирующая состояние неба. Планируется установить датчик облачности и осадков. Информация с них позволяет принять решение о начале и прекращении наблюдений.

После перехода Крыма в состав России в 2014 г. началась новая глава в жизни Симеизской обсерватории. ИНАСАН, который вновь является владельцем 1-метрового телескопа, планирует установку новой камеры на телескоп, модернизацию существующих и проектирование новых инструментов.

Несмотря на политические и экономические катаклизмы, Симеизская обсерватория живет и развивается.

Список литературы

1. S. N. Neui'min, *Astronomical Calendar*, **37**, 115, 1934, in Russian.
2. P. P. Dobronravin, *Kry'mskaia astrofizicheskaia observatoriia Akademii nauk SSSR [Crimean Astrophysical Observatory of the USSR Academy of Sciences]* (1955), in Russian.
3. I. I. Neyachenko, *Zvezda v podarok [Star as a present]* (1984), in Russian.
4. V. A. Smirnov, *Observations of artificial celestial bodies*, **88**, 17, 1994, in Russian.
5. N. A. Gorynia, A. S. Rastorguev, N. N. Samus', A. D. Zen'kovich, and I. V. Nikolenko, *Bull. CrAO*, **104**, 28, 2009.
6. I. A. Maslov, I. V. Nikolenko, and S. V. Kryuchkov, *Bull. CrAO*, **111**, 34, 2015, in Russian.
7. S. I. Barabanov and M. A. Smirnov, *Sol. Syst. Res.*, **39**, 231, 2005.
8. I. V. Nikolenko, S. I. Bakanas, E. S. Barabanov, and S. V. Kryuchkov, in *Proceedings of the Conf. Near-Earth Astronomy — 2009*, 257–261 (2010), in Russian.

Оценка астроклиматических условий для создания совместной Российско-Кубинской обсерватории

Нароенков С.А., Наливкин М.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты исследования климатических и астроклиматических условий в предполагаемом месте размещения совместной Российско-Кубинской обсерватории. Были исследованы такие параметры как качество астрономических изображений (сиинг) и фон неба.

Assessment of astroclimatic conditions for creation of joint Russian-Cuban observatory

Naroenkov S.A., Nalivkin M.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The results of studies of climatic and astroclimatic conditions for joint Russian-Cuban observatory are presented. The quality of astronomical images (seeing) and the background of the sky were studied.

1. Введение

Многие задачи, связанные с мониторингом космических объектов, требуют постоянных оптических наблюдений независимо от смены дня и ночи. В таких случаях желательно иметь пункты наблюдения, расположенные на различных географических долготах. Например, опасный астероид, сближающийся с Землей, обнаруженный обзорным телескопом на одной обсерватории, может быть потерян, если не будут продолжены наблюдения в ту же ночь или следующую. При фотометрических измерениях ряд данных, полученных с одной обсерватории, будет иметь пропуски из-за смены дня и ночи. В таком случае, затруднительно определение периода и формы кривой блеска звезды. Создание Российской глобальной сети мониторинга околоземного пространства позволит сформировать единую цепочку оптических обсерваторий, которые смогут последовательно наблюдать космические объекты, передавая их друг другу на сопровождение. Размещение обсерваторий на территории Российской Федерации (Терскольская обсерватория ИНАСАН), а также на территории Республики Куба поз-

волит эффективно осматривать небесную сферу для решения астрономических задач. Преимущество такого размещения инструментов состоит в разнице долгот: когда в одной из обсерваторий заканчивается ночь наблюдений, в следующей обсерватории, расположенной западнее, ночь только начинается. Такая разница позволяет максимально близко подойти к реализации «идеальной» глобальной сети с круглосуточным обзором всего неба. Для оценки астроклиматических условий в предполагаемом месте размещения будущей совместной Российско-Кубинской обсерватории сотрудниками ИНАСАН совместно с сотрудниками Института геофизики и астрономии республики Куба в рамках выполнения Соглашения 14.613.21.0070 с Министерством образования и науки Российской Федерации в ноябре-декабре 2017 г. была организована научная экспедиция. Результаты исследования представлены в данной статье.

2. Исследование климата в месте размещения будущей совместной Российско-Кубинской обсерватории

Создание совместной Российско-Кубинской обсерватории планируется в западной части острова, в 70 км от Гаваны на территории заповедника Сиерра-дель-Розарио (Sierra del Rosario) на склоне горы. Координаты места будущей обсерватории 22.85° северной широты, 83° западной долготы, высота над уровнем моря 214 м. Климат Кубы тропический пассатный [1]. На него влияют Гольфстрим, тропические циклоны и пассатные ветры. Погодные условия отличаются высокой влажностью и высокой температурой на протяжении всего года. На Кубе четко выражены два климатических сезона: дождливый (май-сентябрь) и сухой (октябрь-апрель). На сезон дождей приходится 3/4 всей годовой суммы осадков. Куба подвержена действию тропических циклонов, которые зарождаются в летне-осенний период (июнь — середина ноября) к востоку от Малых Антильских островов и на западе Карибского моря, передвигаясь затем в сторону Флориды.

Исследование климатических особенностей в месте размещения будущей обсерватории позволило определить особенности климата: колебания температуры окружающей среды, влажности, скорости и направления ветра. Для исследования были использованы архивные метеорологические данные за последние несколько десятилетий, а также экспериментальные данные, полученные в ходе проведения экспедиции в ноябре-декабре 2017 г.

Анализ архивных метеоданных, предоставленных Институтом геофизики и астрономии республики Куба, дал представление о количе-

стве осадков в месте размещения обсерватории в зависимости от времени года и количестве ясных дней в году. Наименьшее количество осадков выпадает в зимние и весенние месяцы (в среднем 100 мм), максимум осадков в июне-сентябре (в среднем 250 мм).

В зависимости от сезона количество ясных дней в месяц меняется в пределах 6–14. Пик ясных дней и ночей приходится на сухой сезон с ноября по апрель. Переменная облачность наблюдается в среднем 14 дней в месяц. Количество ясных дней в 2017 г. составило 142 дня.

Средняя температура воздуха в осенние и зимние месяцы составляет $+22^{\circ}\text{C}$, в весенние и летние месяцы $+27^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха в течение всего года колеблется в пределах 80–85%. При такой высокой относительной влажности с раннего вечера фиксируется выпадение обильной росы. Исследование направления ветра по данным за 2017 г. показало, что в течение всего года преобладали восточные и северо-восточные ветра. Преобладающая скорость ветра в течении года — менее 5 м/с. Непродолжительное время дуют ветры со скоростью около 8 м/с. Во время сильных гроз возможны усиления ветра до 17 м/с, нельзя исключать вероятность ураганов.

3. Исследование астроклимата

Исследование астроклимата в месте размещения совместной Российско-Кубинской обсерватории, проведенное в ноябре-декабре 2017 г., позволило определить качество астрономических изображений (сиинг) и измерить фон неба — интенсивность свечения атмосферы из-за антропогенных факторов. Исследование качества астрономических изображений было проведено в период с 29 ноября по 4 декабря 2017 г.

Одним из главных факторов, ограничивающих угловое разрешение телескопов, является атмосферная турбулентность. Количественную оценку ее вклада в качество изображения, сиинг, можно выполнить несколькими методами, в частности методом измерений дифференциальных движений изображения (differential image motion measurements, DIMM) [2, 3]. Известна измененная реализация этого метода с применением маски Гартмана, так называемый H-DIMM метод [4], позволяющий определить дополнительные векторные параметры турбулентного слоя. Для получения данных была использована наиболее простая двухапертурная реализация метода H-DIMM [4]. Параметр Фрида ρ_0 определяет минимальное значение апертуры телескопа, не подверженного влиянию атмосферной турбулентности при дифракционном качестве изображения. При этом эквивалентное

значение параметра FWHM на изображении с длительной экспозицией может быть оценено по эмпирическому соотношению

$$\text{FWHM} = 0.98 \cdot \frac{\lambda''}{\rho_0},$$

где λ — длина волны.

Для измерений качества астрономических изображений был использован комплекс исследования климата и астроклимата, состоящий из телескопа Максутова-Кассегрена фирмы Carl Zeiss Jena $D = 150$ мм и $F = 2250$ мм, установленного на экваториальной монтировке HEQ8Pro. Перед мениском была установлена двухапертурная маска Гартмана с диаметром отверстий 40 мм и расстоянием между ними 150 мм. В качестве регистрирующей камеры применялась КМОП камера QHY163M с размером пикселя 3.8 мкм, позволяющая использовать короткие экспозиции в 5 и 10 мс, в зависимости от яркости опорной звезды. Проводилось усреднение по 10 экспозициям.

В качестве опорных звезд были выбраны несколько объектов: α Aur (Капелла, 0.05^m), α Per (Мирфак, 1.75^m), β Gem (Поллукс, 1.07^m). Зенитное расстояние до исследуемой звезды в процессе наблюдения составляло $z=30\pm 2^\circ$. Результаты измерений качества астрономических изображений, полученных 2 декабря 2017 г. для звезды α Per, представлены на рис. 1.

Исследование позволило определить, что время стабильного состояния атмосферы в среднем составляло около 1 минуты, наблюдаемое значение FWHM составляло $1 - 2''$. К сожалению, малое количество измерений и их продолжительность не позволяют однозначно охарактеризовать астроклиматические условия в месте предполагаемого строительства обсерватории районе заповедника Сиерра-дель-Розарио. Ряды измерений должны быть продолжены в дальнейшем. Анализ длинных рядов наблюдений позволит сделать выводы о целесообразности установки в данном месте телескопов метрового класса.

Исследования яркости фона неба является одной из ключевых характеристик астрономического климата. Чем ниже фон неба, тем более слабые объекты можно наблюдать, и для достижения заданного значения сигнал/шум требуется меньшая экспозиция. Измерения фона неба были проведены 11 и 12 декабря 2017 г. Наблюдения производились при помощи 50 мм гида телескопа, установленного на экваториальной монтировке. Регистрация изображений осуществлялась на ПЗС камеру QHY6. Поле зрения системы составило $0.8^\circ \times 0.62^\circ$. Измерения фона звездного неба проводились в полном соответствии со стандартной методикой фотометрических наблюдений. В начале

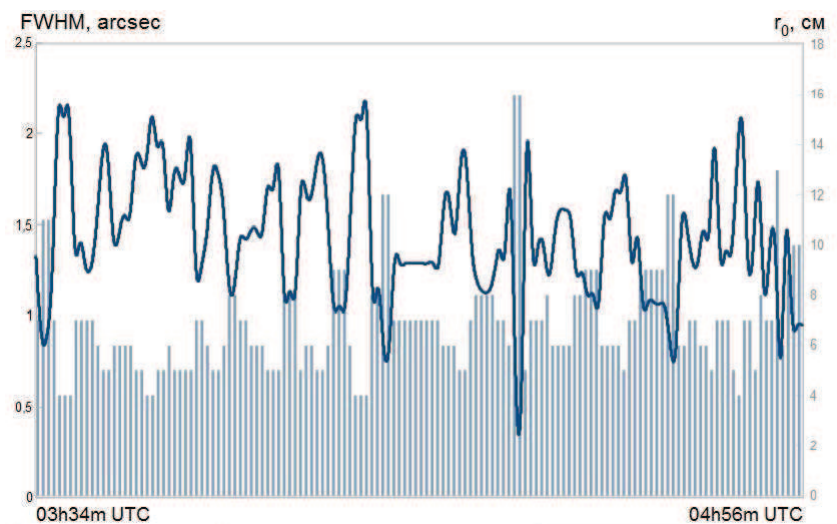


Рис. 1. Результаты измерения FWHM и параметра Фрида ρ_0 в месте предполагаемого строительства обсерватории, заповедник Сиерра-дель-Розарио, Республика Куба. Значения FWHM представлены в виде графика, параметр Фрида представлен в виде гистограммы.

каждой наблюдательной сессии делались сетки калибровочных кадров (bias, flat field, dark) которые использовались для последующей корректной обработки кадров звездного неба. Наблюдения неба проводились в интегральном свете. Регистрируемые площадки выбирались исходя из открытости неба (ночи были с переменной облачностью), но по возможности равномерно распределены на всей полусфере. Для получения изображений участков звездного неба использовались экспозиции по 10, 30, 60 секунд, количество кадров для одного участка звездного неба варьировалось от 7 до 11 для каждой экспозиции.

Для измерения фона неба было обработано 636 изображений. Исследование показало, что фон неба по всей видимой небесной сфере составляет $19.86^m \pm 0.8^m$. Следует отметить, что сильное влияние на фон неба имеет фаза Луны и высота Луны над горизонтом в месте наблюдения. В момент проведения экспериментальных исследований фаза Луна составляла 0.72, что заметно увеличило значение фона

неба. Проведенное моделирование фона неба с учетом засветки от Луны показало, что в безлунные ночи минимальный фон неба в пересчете на зенит составил $22.1^m/\text{кв.}''$.

3. Заключение

К сожалению, малое количество измерений и их продолжительность, не позволяют однозначно охарактеризовать астроклиматические условия в месте предполагаемого строительства обсерватории районе заповедника Сиерра-дель-Розарио. Полученные данные показывают, что исследования должны быть продолжены в дальнейшем. Анализ длинных рядов (не менее одного года) наблюдений позволит сделать выводы о целесообразности установки в данном месте телескопов метрового класса.

Авторы благодарят сотрудников Института геофизики и астрономии республики Куба за оказанную организационную помощь, а также участников второй экспедиции ИНАСАН В. Пузина и А. Карташову за выполнение наблюдений.

Список литературы

1. В. Р. Alisov, *Klimaticheskiye oblasti zarubezhnykh stran* (1950).
2. M. Sarazin and F. Roddier, *A&A*, **227**, 294, 1990.
3. N. Shestakov, A. Kurenkov, O. Shanin, and A. Shepelev, *Sov. J. Opt. Technol.*, **57**, 270, 1990.
4. J. Bally, D. Theil, Y. Billawalla, D. Potter, R. F. Loewenstein, F. Mrozek, and J. P. Lloyd, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, **13**, 22, 1996.

INF: проект высокопроизводительного обзора сети ИНАСАН

Наливкин М.А., Шугаров А.С.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Уровень развития современных технологий позволяет получать снимки всего неба в оптическом диапазоне каждую ночь и проводить обработку данных в реальном времени. В ИНАСАН разработан проект INF (INASAN NEOs Finder) для задачи обнаружения опасных астероидов декаметрового размера за один-два дня до их возможного столкновения с Землей, а также для проведения синхронных и алертных наблюдений в кооперации с другими телескопами, включая детекторы гравитационных волн. Ключевым элементом системы является телескоп VT-78d, который обеспечивает уникальное сочетание параметров: фокального отношения $f/1.58$ при апертуре 250 мм и качества изображения $4 - 5''$ по всему полю диаметром 10° . Многоапертурная система INF будет состоять из восьми телескопов VT-78d на быстрой монтировке. Система INF будет способна проводить всенебесный обзор на площади 20000 кв. гр. за 1 час до 19.4^m .

INF project: a high-performance sky survey for INASAN network

Nalivkin M.A., Shugarov A.S.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We have designed the survey system INF (INASAN NEOs Finder) for the purpose of finding decameter size dangerous asteroids one-two days before possible impact and also making synchronous and alert observation in cooperation with other telescopes including gravitation wave detectors. The key element of the system is a VT-78d telescope that provides unique combination of parameters: focal ratio $f/1.58$ with aperture 250 mm, image quality $4 - 5''$ on 10° field of view. The INF multiaperture system should consists of 8 VT-78d telescopes on a fast mount. INF system will be capable to get all-sky 20000 sq. deg survey in 1 hour up to 19.4^m .

1. Научные задачи и требования к обзорному телескопу INF

Распределенные сети широкоугольных оптических телескопов, обеспечивающие непрерывный обзор всего неба со скважностью около одного часа, открывают новые возможности в современной астрономии.

В ИНАСАН ведутся работы по созданию мультиапертурной широкоугольной системы, названной INF (INASAN NEOs Finder). Основные научные задачи проекта — обнаружение опасных астероидов декаметрового размера не позднее, чем за один день до их возможного столкновения с Землей, а также проведение синхронных и алертных наблюдений в кооперации с другими телескопами, включая детекторы гравитационных волн.

Атмосферный взрыв метеороида над Челябинском 15 февраля 2013 г. [1] привлек значительное внимание к созданию специальных средств обнаружения опасных небесных тел (ОНТ). В настоящее время, в основном благодаря усилиями США, каталогизирована большая часть (> 90%) астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) размером более 1 км. Начата каталогизация малых тел 100-метрового класса, однако эта работа может занять десятилетия. Статистические данные о численности популяции, физическим свойствам и динамическим характеристикам все еще остаются недостаточными.

Что касается тел размером от 10 м, то здесь полнота данных чрезвычайно мала. Технические возможности существующих и перспективных наземных и космических телескопов позволяют наблюдать такие тела только на небольшом расстоянии, примерно до 10 млн. км. Поэтому в обозримом будущем не представляется возможным создание и поддержание актуального каталога декаметровых тел и прогнозирование их столкновения с Землей. Вместе с тем, количество тел размером от 10 м оценивается в 10^8 шт., а частота их столкновений с Землей составляет примерно одно событие в 5–10 лет, более мелкие болиды падают ежегодно. Учитывая невозможность каталогизации декаметровых тел, единственный путь их обнаружения — создание службы для их выявления в непосредственной близости от Земли.

Действующий проект ATLAS, наиболее близкий по идеологии к INF, позиционируются как полноценная система последнего предупреждения о столкновении с ОНТ размерами > 30 м на расстоянии < 0.01 а.е. [2, 3]. Основное отличие INF от ATLAS состоит в радикальном увеличении темпа обзора (примерно на порядок) при сохранении высокой проникающей силы, что позволит массово обнаруживать опасные тела размером 10 м и более примерно за сутки до их возможного столкновения с Землей.

Широкоугольные оптические телескопы способны регистрировать объекты и явления различной физической природы. Так, в августе 2017 г. сеть телескопов апертурой от 0.4 м до 10 м зарегистрировала транзитное явление в оптическом, ИК и УФ диапазонах длин

волн. Источником излучения послужило слияние нейтронных звезд. Оптическое послесвечение зарегистрировано от источника гравитационных волн GW170817 и впервые выполнены консолидированные фотометрические и спектрометрические мультидиапазонные наблюдения этого события в динамике [4].

Список научных задач для широкоугольной обзорной системы INF достаточно обширен:

- обнаружение потенциально опасных объектов размером более 10 м не позднее чем за сутки до их сближения с Землей;
- поиск комет, околоземных астероидов и астероидов Главного пояса, изучение их свойств;
- поиск, мониторинг и изучение космического мусора;
- наблюдения транзитных кривых блеска экзопланет;
- изучение переменных звезд;
- наблюдения оптического послесвечения гамма-всплесков и источников гравитационных волн по алертам.

Для достижения оптимальной полноты обзора системы INF предполагается построение сети из 6-ти и более наблюдательных пунктов, распределенных по географической долготе. Предполагается сотрудничество с другими наземными и космическими средствами, такими как СОДА [5], различными «телескопами подхвата» метрового класса и более.

2. Выбор оптической схемы широкоугольного телескопа и типа детектора, конструктивные решения

Оптические схемы и решения для широкоугольных телескопов рассмотрены в работах [6, 7]. Для проекта INF В.Ю. Тербижем разработана новая оптическая схема широкоугольного телескопа VT-78d (патент РФ 162010U1), построенная на простых типах стекол без применения асферических элементов. Основные характеристики телескопа таковы:

- апертура — 250 мм;
- фокальное отношение — $f/1.58$;

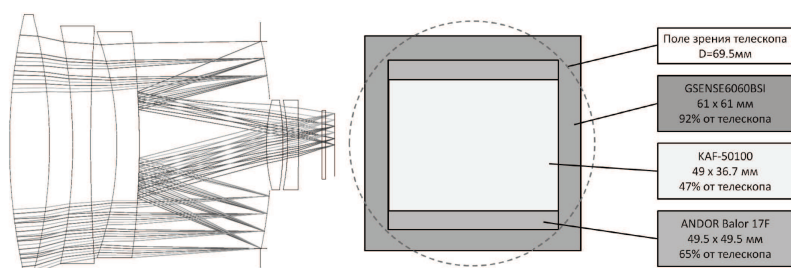


Рис. 1. Ход лучей в телескопе VT-78d и поле зрения с различными типами детекторов.

- угловое поле зрения — 10° ;
- линейное поле зрения — 69.5 мм;
- качество изображения в интегральном свете по всему полю (D_{80}) — 4–5".

Уникальное сочетание технических характеристик телескопа VT-78d обеспечивает высокую эффективность его работы в обзорном режиме, что рассмотрено ниже.

В качестве возможного приемника изображения рассматриваются сенсоры [8]:

- KAF-50100 (ПЗС),
- ANDOR Balor17F (КМОП),
- GSENSE6060BSI (КМОП),
- GSENSE4040BSI (КМОП),

поля зрения которых сопоставлены на рис. 1. Наиболее перспективным представляется КМОП-сенсор GSENSE6060BSI с обратной за светкой формата $6k \times 6k$ (61×61 мм) и квантовой эффективностью до 90%. Масштаб изображения составит $5.2''/\text{пиксель}$, поле зрения на детекторе — $8.8^\circ \times 8.8^\circ$. Для кластера из восьми телескопов мы получаем огромное поле $17.6^\circ \times 35.2^\circ$ (574 кв. гр.), общее количество пикселей 298 млн.



Рис. 2. Компоновка обзорного телескопа INF.

При создании сверхширокоугольных систем умеренной апертуры использование мультиапертурных систем является экономически более выгодным, чем увеличение поля зрения одного телескопа и применение мозаичного детектора. Авторами статьи предлагается компромиссное с экономической точки зрения решение — кластер из восьми широкоугольных телескопов на быстрой и мощной монтировке с прямым приводом ASA DDM160. Из-за большого поля зрения и скорости наведения предполагается использование открытого типа купола (рис. 2).

Коллективом авторов ИНАСАН разработана конструкторская документация и ведется изготовление прототипа системы INF, состоящего из 2-х телескопов на монтировке с прямым приводом.

3. Эффективность обзора INF

Для проекта мультиапертурной системы INF, состоящей из восьми телескопов VT-78d, были рассчитаны время обзора видимой небесной полусферы 20000 кв. гр. и предельная звездная величина для отношения сигнал/шум ($C/\text{Ш}$) = 7 при оптимальных погодных условиях для различных экспозиций. Расчет выполнен при коэффициенте заполнения поля зрения телескопа детектором 92% и времени перенаведения 5 с. При экспозиции 10 с время обзора составит всего 9 минут при предельной звездной величине 18.3^m. При экспозиции 100 с достигается близкое к предельному значение 19.4^m, а полный обзор видимой полусферы займет 1 час.

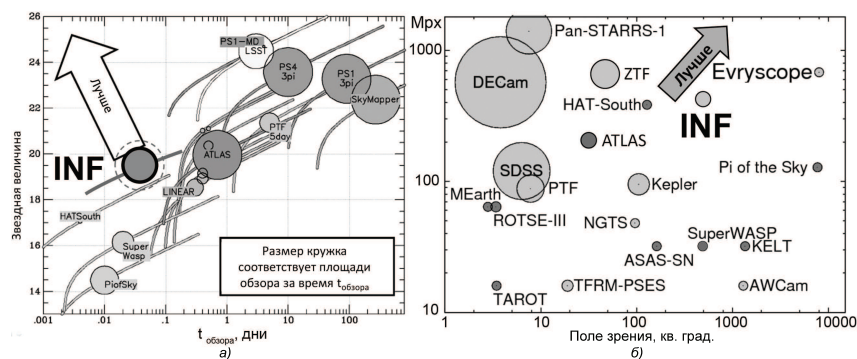


Рис. 3. Сравнительные характеристики обзоров на диаграммах «проникающая способность – время обзора» (а) и «информационная емкость кадра – поле зрения» (б).

Сравнение характеристик INF с другими обзорами на диаграммах «проникание – время обзора» и «информационная емкость кадра – поле зрения» приведено на рис. 3, на котором данные по другим проектам взяты из [2]. По соотношению проникающей способности и времени обзора, проект INF превосходит существующие системы, а по информационной емкости детектора и площади поля зрения уступает Everyscope. Однако проникающая способность последнего недостаточна для обнаружения декаметровых тел из-за малой апертуры. Параметр охвата ($grasp$) для одного узла сети INF составляет $18 \text{ м}^2 \text{ гр.}^2$, уступая лишь Everyscope и LSST [9].

Сравнения различных систем показывают, что предлагаемая мультиапертурная система INF не имеет действующих аналогов и по совокупности характеристик способна решать поставленные научные задачи.

Список литературы

1. V. V. Emel'yanenko, O. P. Popova, N. N. Chugai, M. A. Shelyakov, et al., *Sol. Syst. Res.*, **47**, 240, 2013.
2. J. L. Tonry, *PASP*, **123**, 58, 2011.
3. J. L. Tonry, L. Denneau, A. N. Heinze, B. Stalder, et al., *PASP*, **130**, 064505, 2018.
4. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, et al., *ApJL*, **848**, L12, 2017.

5. A. S. Shugarov, B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, and M. A. Zvereva, *Cosmic Res.*, **56**, 300, 2018.
6. V. Y. Terebizh, *Astron. Nachr.*, **332**, 714, 2011.
7. V. Y. Terebizh, *AJ*, **152**, 121, 2016.
8. S. A. Naroenkov, IAA Planetary Defense Conference (2017).
9. N. M. Law, O. Fors, J. Ratzloff, P. Wulfken, et al., *PASP*, **127**, 234, 2015.

О перспективах развития лазерного спутникового дальномера Simeiz-1873 для решения задач астрометрии и геодинамики

Штирберг Л.С.¹, Мазуров В.А.²

¹*Технион — Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль*

²*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

Рассмотрена актуальность работы спутникового дальномера (LSR) Simeiz-1873 для решения задач астрометрии и геодинамики, сделана оценка его возможностей для участия в перспективных исследованиях и соответствия требованиям Международной службы вращения Земли (International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)), предложено направление его модернизации.

On the prospects of development of a laser satellite range finder (LSR) of Simeiz-1873 for the solution of problems of astrometry and geodynamics

Shtirberg L.S.¹, Mazurov V.A.²

¹*Technion — Israel Institute of Technology, Haifa, Israel*

²*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

The paper addresses the relevance of the work of the laser satellite rangefinder (LSR) Simeiz-1873 for the solution of problems of astrometry and geodynamics. The assessment of its capabilities for the participation in prospective studies, the assessment of compliance with requirements of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) is considered. It is very important that also the direction of upgrade for the LSR Simeiz-1873 is suggested.

1. Введение

Современные технологии позволили создать новые астрономические приборы, системы и методы для изучения и использования движения ИСЗ и геодинамики. Это, например, система длиннобазисной радиоинтерферометрии (VLBI), лазерная локация искусственных спутников Земли (SLR), спутниковые системы навигации (GNSS), как действующие (GPS, ГЛОНАСС), так и перспективные (Galileo и Beidou), Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS), Precise Range and Range-rate Equipment (PRARE). Среди этих технологий особое место занимает SLR.

Геодезическая опорная сеть:	VLBI	SLR	GNSS	Геодезическая опорная сеть:	VLBI	SLR	GNSS
Инерциальная система ориентации	4	2	0	Вращение Земли и время			
Ориентация Земли	2	4	3	Движение полюса:			
Геоцентр	0	4	2	- вековые	3	3	1
Высотная основа	0	4	2	- долгопериодические	3	3	3
Гравитационное поле	0	3	(4)	- короткопериодические (<1 дня)	3	1	4
Изменения гравитационного поля:				Всемирное время UT:			
- гравитационные приливы	0	2	1	- вековые	4	1	0
- неприливные изменения	0	1	1	- долгопериодические	4	2	1
- долгопериодические возмущения	0	3	0	- короткопериодические (<1 дня)	3	1	2
Деформации:				Приливы:			
Глобальная тектоника плит	3	3	3	Приливы Твёрдой Земли	1	2	1
Глобальные изменения высот	2	3	2	Океанические приливы	0	2	1
Региональные деформации по горизонту	2	2	4	Океанические нагрузочные приливы	2	2	2
Региональные деформации по вертикали	1	2	2				
Сейсмические деформации	2	2	3				

Рис. 1. Сравнительная оценка эффективности различных измерительных систем космической геодезии для решения задач современной геодинамики.

Ведущая роль в организации SLR в СССР принадлежит научному руководителю Астросовета АН СССР А.Г. Масевич (Астросовет был переименован в ИНАСАН в 1991 г.). Астросовет создал сеть спутниковых лазерных дальномеров «Интеркосмос» [1], а в 1975 г. организовал Симеизскую экспериментальную спутниковую лазерную станцию с перспективой создания геодинимического полигона.

Если раньше в классической астрометрии достичь оперативной точности измерений в 1 метр на поверхности Земли было невозможно, то сейчас новые методы позволяют реализовать миллиметровые точности.

Астрометрические и космические навигационные задачи невозможно решать без знания инерциальной ориентации Земли, геодинимических параметров вращения Земли, Всемирного времени UT, движения полюсов Земли. С 1988 г. Международная служба вращения Земли (IERS) использует все вышеперечисленные технологии. Результаты анализа их возможностей, проведенного IERS для VLBI, SLR и GNSS, показаны на рис. 1. Критерии эффективности: максимальная оценка — 4 балла, минимальная — 0. Из рисунка видно, что ни одна система не обеспечивает измерение всех основных геодинимических параметров, а также видны преимущества и недостатки каждой системы. Так, геоцентр хорошо определяет SLR, всемирное время UT обеспечивает VLBI и т.д.

При стратегическом подходе необходимо иметь локальные полигоны, где VLBI, SLR, GNSS (GPS) работают рядом. Единственное такое место на территории России [2] — лаборатория радиоастрономии КрАО. Здесь работает VLBI на базе телескопа PT-22, LSR Симеиз-

1873, станция «GPS-CRAO» (поддерживаемая NASA), расположенная рядом с дальномером, и LSR Katzively-1893.

В настоящее время работу LSR на земном шаре координирует международная служба International Laser Ranging Service (ILRS), организованная в 1998 г. Эта организация занимается сбором, обработкой, распространением и стандартизацией получаемой информации, дает возможность обмена опытом в публикациях и на конференциях, предоставляет результаты SLR для IERS. В сети ILRS в настоящее время работает около 50 лазерных дальномеров разных стран. Современные требования ILRS (которые непрерывно растут) к LSR: количество результативных сеансов в год более 3500, из них спутников Lageos более 600, высоких спутников более 3000, низких спутников более 2300, точность измерений (rms) Lageos менее 10 мм, возможность локации спутников с высотами орбит от 400 км до 20000 км и выше.

По отчетам ILRS за март 2017 г. — март 2018 г. в России работает более 10 станций. Лучшие 4 станции, в том числе Simeiz-1873, имеют меньше 3000 прохождений в год. Абсолютное большинство российских станций не соответствуют требованиям по точности. То есть ни одна российская станция не укладывается в современные требования. Станции из США, Германии, Китая, Австрии, Италии соответствуют, а некоторые в разы превосходят эти требования.

2. Лазерный спутниковый дальномер Simeiz-1873

На совещании в NASA «Solid Earth and Natural Hazards Branch» в сентябре 1997 г. был рассмотрен единственный вопрос о LSR Simeiz-1873. Было решено, что «станция Simeiz-1873 — уникальное место для геодинимических и тектонических исследований, для изучения изменяющегося уровня Черного моря». Решение способствовало поддержке Simeiz-1873 со стороны NASA и определилось следующими факторами:

1. Удачное расположение станции вблизи тектонического разлома возле Крыма.
2. Необходимый репер для изучения Анатолийского разлома, который является полигоном NASA для прогнозирования землетрясений.
3. Единственная станция в СНГ, прошедшая аттестацию IERS методом колокации.

4. В 1992 г. представитель NASA на всех объектах СССР, желающих сотрудничать с NASA, проверил наличие точного времени. Только на Simeiz-1873 оно было точным.
5. Поддержка Simeiz-1873 руководством ИНАСАН, в том числе А.А. Боярчуком, А.Г. Масевич и С.К. Татевян.

В результате в 1998 г. было подписано прямое соглашение между NASA и Крымской астрофизической обсерваторией о запуске в Симеизе основной станции в системе International GPS Service for Geodynamics. После трех лет наблюдений был получен непрерывный ежесуточный вектор движения антенны станции GPS-CRAO. Она движется следующим образом: в северном направлении скорость составляет 12.9 ± 0.2 мм/год; в восточном направлении 26.2 ± 0.3 мм/год, в вертикальном направлении -2.6 ± 0.8 мм/год. Это подтвердило, что станция не находится в оползневой зоне, а движется как Евро-Азиатская плита. В 1999–2000 гг. при участии С.К. Татевян для Simeiz-1873 был получен американский грант CRDF UG1-332.

Отметим, что на станции в Симеизе, вначале на дальномере «Интеркосмос-4», затем на дальномере Simeiz-1873 первыми в СССР стали измерять энергию сигналов, отраженных от спутников [1]. Эта информация позволила оптимизировать энергетические возможности дальномеров. В Симеизе даже на дальномере «Интеркосмос-4» с диаметром приемного зеркала 340 мм стали уверенно наблюдать Lageos в одноквантовом режиме, что ранее считалось невозможным для этого дальномера. Станция Simeiz-1873 первая в СССР в 1991 г. вошла в IERS. По последнему отчету ILRS при наблюдениях Lageos на 304 прохождениях у Simeiz-1873 rms составляет 14 мм.

Главным элементом дальномера Simeiz-1873 является альт-азимутальный телескоп «Крым» с входной апертурой $D = 1000$ мм (система Ричи-Кретьена) с куде-фокусом [3]. Предполагалось, что этот телескоп обеспечит следующие возможности: локацию Луны (реализовать не удалось), колокацию (реализовать не удалось), локацию ИСЗ с сантиметровой точностью (реализовано).

Для обеспечения требований по количеству сеансов LSR должен наблюдать ночные освещенные, неосвещенные и дневные прохождения спутников, находящиеся в рабочей зоне согласно списку приоритетов ILRS. Отметим, однако, что для локации ИСЗ телескоп оказался неудачным по ряду причин. Дальномер «Интеркосмос-4» с диаметром зеркала 0.34 м в Симеизе успешно лоцировал Lageos. Большинство современных станций работают на небольших апертурах. На

телескопе же «Крым» вес метрового зеркала вместе с оптическими и механическими подвижными узлами измеряется сотнями кг, и, как следствие, отмечается низкая скорость сопровождения спутников, наличие слепых зон, динамическое гнутие. Это резко ограничивает возможность слепого сопровождения спутников, т.е. неосвещенных и в дневное время. Огромная хроматическая абберация системы Ричи-Кретьена не позволяет простым способом обеспечить работу на двух длинах волн одновременно, что необходимо для оценки влияния атмосферы. На станции в Потсдаме по изложенным выше причинам первыми отказались от телескопа «Крым» и в настоящее время имеют более 5000 прохождений в год.

3. Об улучшении точности наблюдений

Точность наблюдений определяется влиянием внешних и внутренних факторов. К внешним относятся неопределенность центра масс спутников, атмосферная рефракция, неточность привязки временной шкалы, неточность координат станции и ошибки государственных служб стандартизации и контроля.

Несколько слов об устранении влияния внешних ошибок. Базовые спутники Lageos-1, Lageos-2 позволяют осуществить привязку к их центру масс с субмиллиметровой ошибкой. Влияние атмосферы на точность можно минимизировать при работе на двух и даже трех длинах волн одновременно. Лазер обычно генерирует две-три гармоники одновременно. Одновременные измерения дальности на разных длинах волн устраняют влияние атмосферы.

Если требуемая абсолютная точность измерения расстояний при локации составляет сантиметры, то для определения ошибок измерений необходим другой дальномер, работающий рядом. Этот метод называется колокацией. Другого способа нет. Поэтому Астросовет заключил договор с European Space Agency (ESA) и организовал на станции геодинимический полигон. В 1991 г. станция была сертифицирована ESA способом колокации. Рядом почти три месяца работал дальномер MTLRS-1 из IFAG (Institute for Applied Geodesy).

Внутренние ошибки LSR устраняются калибровками. Для устранения температурных дрейфов нестабильности электроники, лазерных флуктуаций и т.п. калибровки должны вестись до сеансов, во время сеансов и после. Проведение калибровок обеспечивается конструкцией телескопа.

Для достижения высокой точности, естественно, также необходима хорошая служба времени. В настоящее время используется привязка к времени GPS.

4. Выводы и перспективы

Подведем некоторые итоги:

1. С момента запуска Simeiz-1873 работал и работает по международным программам, таким как TOPEX/Poseidon; ERS-1,2; GLONASS; GPS; Etalon-1,2 и др.
2. С 1981 г. регистрируются сигналы, отраженные от ИСЗ. Проводилось сравнение отечественных отражателей с зарубежными [4].
3. В 1982 г. Симеизская станция первая в сети дальномеров «Интеркосмос» провела успешную локацию ИСЗ Lageos [4].
4. Это единственная станция в России, аттестованная ESA методом совместной работы двух дальномеров, расположенных рядом. С тех пор накоплен большой объем данных.
5. Станция — первая в стране, вошедшая (в 1991 г.) в IERS, в которой она успешно работает.
6. Станция Simeiz-1873, несмотря на недостатки телескопа, находится в тройке лучших российских станций, конкурируя с новыми российскими станциями.
7. Simeiz-1873 принимает участие в современных экспериментах, например, в 2018 г. в калибровке на орбите детектора ТУС спутника «Ломоносов».

Теперь о перспективах. Для соответствия современным требованиям необходима модернизация дальномеров, нужен новый телескоп, отвечающий поставленным задачам. Перспективным направлением работы модернизированной станции может стать локация низких спутников без отражателей для уточнения орбиты и измерения величины отраженного сигнала с целью оценки возможности генерации обращенного волнового фронта.

Если ИНАСАН выступит правопреемником Астросовета в Симеизе в области лазерной локации, организует замену телескопа «Крым» на соответствующий современным требованиям, ИНАСАН укрепит

свой авторитет и несомненно получит поддержку различных международных служб. Желательно дополнить полигон системой DORIS и сейсмической станцией.

Детально результаты работы станции Simeiz-1873 представлены на сайте NASA [5].

Список литературы

1. A. G. Masevich and L. S. Shtirberg, in *Proceed. of the Intern. Conf. Use of observations of the artificial Earth satellite for geodesy and geophysics — 1982* (1984), in Russian.
2. A. E. Vol'vach, A. D. Dmitrotsa, and D. I. Neyachenko, *Trans. Inst. Appl. Astron. RAS*, **37**, 55, 2016, in Russian.
3. S. K. Tatevian, L. S. Shtirberg, N. E. Kuz'menko, V. A. Mazurov, and L. V. D., in *Proceed. of the Intern. Conf. Use of laser observations of artificial satellites of the earth for determination of space bases — 1988* (1989), in Russian.
4. A. G. Masevich, L. S. Shtirberg, G. S. Kurbasova, and V. A. Mazurov, *Ekspierimental'nye izmereniia signalov, otrazhennykh ot sputnika "Interkosmos-Bolgariia-1300"* [Experimental measurements of the signals reflected from the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite] (1982), in Russian.
5. International Laser Ranging Service. Official Website. URL: <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/>.

Комплексный контрольно-измерительный стенд телескопа Т-170М

Моисеев А.А.¹, Власенко О.В.², Сичевский С.Г.²

¹АО «НПО Лавочкина», Химки, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Основой космической обсерватории «Спектр-УФ» является телескоп Т-170М с диаметром главного зеркала 170 см, который обеспечит получение в УФ-диапазоне спектров с высоким разрешением и изображений с дифракционным качеством. Особой задачей, без решения которой невозможно создание ультрафиолетового телескопа, является обеспечение особых условий его сборки и юстировки. Поэтому в НПО им. С.А. Лавочкина был разработан и изготовлен комплексный контрольно-измерительный стенд телескопа Т-170М, описанию которого посвящена данная статья.

Assembly Integration and Verification stand of the T-170M telescope

Moisheev A.A.¹, Vlasenko O.V.², Sichevsky S.G.²

¹JSC “NPO Lavochkin”, Khimki, Russia

²Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The basis of the WSO-UV space observatory is the T-170M telescope with 170 cm aperture. This telescope will ensure the production high resolution spectra and diffraction quality images. To create an UV-telescope is impossible without providing special conditions for its assembly and adjustment. Therefore, Assembly Integration and Verification stand of the T-170M telescope was developed and created in JSC “NPO Lavochkin”. The article deals with general description of this stand and its current status.

1. Введение

Космическая обсерватория проекта «Спектр-УФ» включает два важных компонента — наземный комплекс и космический аппарат. Последний в своем составе имеет комплекс научной аппаратуры (КНА), основа которого — это двухзеркальный телескоп Т-170М системы Ричи-Кретьена с диаметром главного зеркала равным 170 см. Телескоп будет обеспечивать сбор и концентрацию излучения, а его регистрацию обеспечат два научных прибора из состава КНА — Блок спектрографов [1, 2] и Блок камер поля [3]. С более подробным описанием проек-

та «Спектр-УФ» читатель может ознакомиться в работах [4, 5, 6, 7, 8], а также в статье Шустова и др. в данном сборнике.

Одним из условий надежной работы выводимой в космос аппаратуры является ее изготовление в чистой среде. Это позволяет обеспечить долговечную и бесперебойную работу электронных и оптических приборов, а также солнечных батарей. Таким образом создание ультрафиолетового телескопа невозможно без обеспечения особых условий его сборки и юстировки. Это и чистота рабочего места не ниже класса 7 ИСО, и жесткие ограничения по температурному режиму, ограничения по влажности воздуха и по составу атмосферы в зоне оптических элементов и фокальных приборов, а также ограничения по микровозмущениям в процессе юстировочных работ. По этой причине в рамках технологической подготовки производства по проекту «Спектр-УФ» в НПО им. С.А. Лавочкина был разработан и изготовлен комплексный контрольно-измерительный стенд телескопа Т-170М.

2. Комплексный контрольно-измерительный стенд

В космической промышленности обеспечение чистой среды сопровождается дополнительными проблемами: большие размеры поверхностей космических аппаратов, уникальность изделия, длительные сроки изготовления и испытаний в условиях соприкосновения с окружающей средой. При сборке телескопа особенно критическим фактором являются требования к чистоте поверхностей оптических элементов. Поэтому комплексный контрольно-измерительный стенд (ККИС) установлен в отдельном чистом модуле, который размещен в помещении, соответствующему по чистоте классу 8 ИСО. В чистом модуле обеспечиваются следующие условия окружающей среды:

- чистота воздуха не ниже класса 7 ИСО;
- температура $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- температурный градиент по трассе интерферометрического контроля при его проведении не более $0.1^\circ\text{C}/\text{м}$ в течении 0.5 часа;
- относительная влажность не более 45%.

Общее представление о ККИС можно получить из рис. 1. Основной задачей ККИС является обеспечение условий, необходимых при выполнении следующих работ:

- входной контроль главного и вторичного зеркала, включая измерение коэффициента отражения и определения полного интегрального рассеяния;

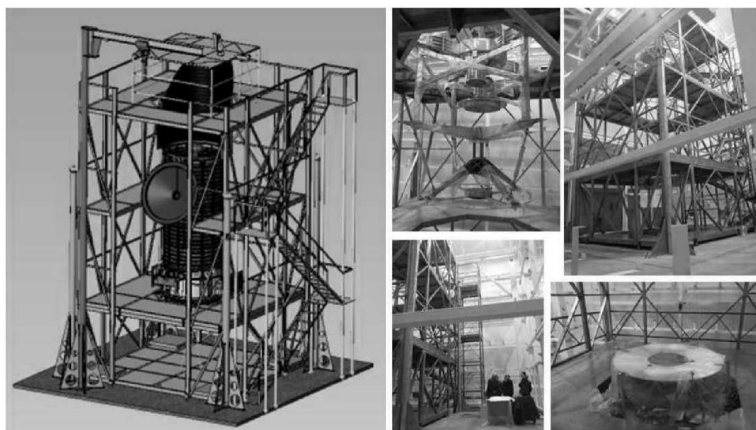


Рис. 1. Общий вид ККИС и отдельные этапы его изготовления.

- измерение микрошероховатости поверхностей главного и вторичного зеркал;
- интерферометрический контроль поверхности главного зеркала;
- интерферометрический контроль и приемо-сдаточные испытания (ПСИ) оптической системы;
- геометрическая и идентификационная юстировки оптической системы;
- сборка и юстировка телескопа;
- установка всех научных приборов на телескоп.

Особенностью сборки и ПСИ оптической системы, а также сборки и юстировки телескопа, является вертикальное положение продольной оси (вертикальная схема контроля). В связи с этим для обеспечения требований по температурному градиенту по трассе интерферометрического контроля и с целью минимизации загрязнения оптических элементов телескопа, внутри чистого модуля организован горизонтальный псевдоламинарный продув профильтрованного, осушенного и термостабилизированного воздуха. С целью демпфирования микровозмущений, воздействующих на элементы оптической системы при интерферометрическом контроле и при проведении юстировочных работ сборочный стапель вывешивается на виброизолирующих

устройствах, которые в свою очередь опираются на виброразвязанную фундаментную плиту.

В зависимости от конкретных работ в ККИС предусмотрена возможность его дооснащения необходимыми оборудованием и приспособлениями. Например, с целью оценки качества рабочей поверхности главного и вторичного зеркал, а также для ПСИ оптической системы, в состав стенда входят следующие измерительные приборы:

- высокоточный интерферометр;
- высокоточный лазерный трекер;
- уникальные роботизированные приборы для измерения коэффициентов отражения и светорассеяния отражающего покрытия зеркал телескопа;
- автоколлиматоры, теодолиты и другие оптические приборы.

Для проведения работ по сборке и юстировке телескопа стенд комплектуется следующим дополнительным оборудованием и приспособлениями оригинальной конструкции:

- крупногабаритным плоским эталонным зеркалом;
- технологической оправой главного зеркала с системой разгрузки;
- изделиедержателями, включающими в свой состав высокоточные шестистепенные гексаподы (4 шт.);
- имитатором точки фокуса;
- имитатором вершины главного зеркала;
- пентапризмой;
- перископом.

На данный момент ККИС практически готов к началу штатной эксплуатации. Для подтверждения выполнения требований технического задания на ККИС в НПО им. С.А. Лавочкина были проведены его конструкторско-доводочные испытания (КДИ). В результате проведенных работ были подтверждены требования по обеспечению условий окружающей среды, проверены технологические и конструкторские решения в части соответствия приборов и оборудования техпроцессу проведения сборочно-юстировочных работ с телескопом Т-170М и его оптической системой. В то же время в ходе КДИ были сформулированы рекомендации по введению доработок, повышающих безопасность эксплуатации стенда и улучшить качество выполняемых работ, реализовать которые планируется к началу штатной эксплуатации ККИС.

3. Заключение

В России в рамках проекта «Спектр-УФ» создан стенд для сборки, интерферометрического контроля и высокоточной юстировки крупногабаритного космического телескопа. Стенд обеспечивает предельно высокие требования по чистоте и температурному режиму окружающей среды, а также, по подавлению внешних микровозмущений. Кроме того, рабочая зона стенда укомплектована автоматизированными высокоточными шестистепенными манипуляторами и измерительными приборами, которые дистанционно управляются операторами, находящимися за пределами чистой зоны.

Список литературы

1. V. Panchuk, M. Yushkin, T. Fatkhullin, and M. Sachkov, *Ap&SS*, **354**, 163, 2014.
2. I. Savanov, M. Sachkov, B. M. Shustov, and A. Shugarov, in *41st COSPAR Scientific Assembly, COSPAR Meeting*, volume 41 (2016).
3. M. Sachkov, B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, A. Shugarov, I. Savanov, E. Kanev, S. Sichevskij, and M. Zvereva, in Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin, eds., *Stars: From Collapse to Collapse, ASP Conf. Ser.*, volume 510, 573–575 (2017).
4. B. Shustov, M. Sachkov, A. I. Gómez de Castro, K. Werner, N. Kappelmann, and A. Moiseev, *Ap&SS*, **335**, 273, 2011.
5. B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, M. Sachkov, A. Moiseev, et al., *Ap&SS*, **354**, 155, 2014.
6. M. Sachkov, B. Shustov, I. Savanov, and A. I. Gómez de Castro, *Astron. Nachr.*, **335**, 46, 2014.
7. M. Sachkov, B. Shustov, and A. I. Gómez de Castro, in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray, Proc. SPIE*, volume 9905, 990504 (2016).
8. B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, M. Sachkov, J. C. Vallejo, et al., *ArXiv e-prints*, 2018.

Робот-телескоп Звенигородской обсерватории ИНАСАН

Нароенков С.А., Наливкин М.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В Институте астрономии РАН ведутся работы по созданию роботизированных систем мониторинга для решения обширного круга астрономических задач. В качестве тестового образца такой системы, на основе серийного 20-сантиметрового широкоугольного телескопа создан полнофункциональный робот-телескоп. Разработано специальное программное обеспечение, позволяющее астрономическим оборудованием в автоматическом режиме без участия оператора. Робот-телескоп IRT-20 установлен на территории Звенигородской обсерватории ИНАСАН. На нем в постоянном режиме проводятся фотометрические наблюдения переменных звезд и поиск оптических транзиентов.

Robotic telescope of Zvenigorod observatory INASAN

Naroenkov S.A., Nalivkin M.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Institute of Astronomy of the RAS works on the robotic monitoring systems to a wide range of astrophysical tasks. As a result of the work, a robotic optical system with 20-cm wide-angle telescope was created. The special software has been developed. This software allows controlling devices in automatic mode without operator's participation. Robotic telescope IRT-20 is located at the INASAN Zvenigorod Observatory. Photometric observations of variable stars and searching of optical transients are carried out in a constant mode by robotic telescope.

1. Введение

В последнее время для решения задач мониторинга околоземного пространства и наблюдения космических объектов преимущественно применяются роботизированные системы телескопов. Напомним, что термин «роботизированный» означает способность программно-аппаратного комплекса выполнять поставленные задачи и взаимодействовать с внешней средой без участия человека. Повсеместный доступ к сети Интернет и быстрое развитие рынка аппаратного обеспечения привели к тому, что роботизированные телескопы становятся все более распространенными. Снижение роли участия оператора — это общая тенденция, повышающая качество научных наблюдений.

Роботизированные телескопы по заранее сформированному плану наблюдений в течение всего сеанса наблюдений выполняют необходимые действия — переводят опорно-поворотное устройство с телескопом на определенную площадку на небесной сфере, производят съемку в разных фильтрах и с требуемыми экспозициями. Такие роботизированные системы позволяют выполнять рутинные операции без вмешательства наблюдателя и достичь максимально возможной скорости обзора. С помощью робота-телескопа можно достаточно быстро среагировать на особые события, например гамма-всплески. Не менее важной частью робота-телескопа является потоковая обработка информации при помощи специального программного обеспечения.

В мире применение роботизированных телескопов давно стало стандартом. В России, например, широко известна система роботизированных телескопов МАСТЕР (МГУ им. М.В. Ломоносова). В ИНАСАН в ответ на «велеия времени» активизируются работы по созданию и внедрению в рутинную практику телескопов такого типа.

2. Робот-телескоп IRT-20

В Звенигородской обсерватории ИНАСАН создан робот-телескоп IRT-20 (INASAN Robotic Telescope) в составе: широкоугольный телескоп Officina Stellare RH-200, опорно-поворотное устройство ASA DDM 85, ПЗС-камера FLI Proline 16803 с колесом светофильтров UBVR1 и фокусирующим устройством, защитный купол ScoreDome 3M, а также специальные средства электропитания и грозозащиты, метеокомплекс для мониторинга параметров погоды в режиме ожидания и во время сеанса наблюдения, компьютер управления астрономическим оборудованием, сервер хранения и обработки данных. Характеристики телескопа Officina Stellare RH-200: фокусное расстояние — 600 мм, поле зрения — 5° , апертура — 200 мм, фокальное отношение — 3. Параметры ПЗС-камеры FLI Proline 16803: размер чипа — 36×36 мм, размер пикселя — 9 мкм, емкость чипа — $4K \times 4K$.

Робот-телескоп IRT-20 является первым в ряду роботов-телескопов наблюдательной оптической сети, создаваемой в ИНАСАН. Постоянные наблюдения на телескопе ведутся с 2016 г. Робот-телескоп IRT-20 является полностью автоматизированным, что позволяет проводить наблюдения без участия оператора, а подключение к сети Интернет позволяет контролировать работу телескопа из любой точки мира. Общий вид робота-телескопа Звенигородской обсерватории ИНАСАН представлен на рис. 1.

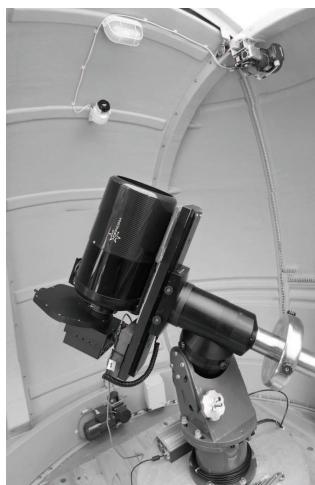


Рис. 1. Общий вид робота-телескопа IRT-20.

Каждое из устройств, из которых состоит робот-телескоп, имеет программные и аппаратные интерфейсы для подключения к компьютеру, предоставляя таким образом возможности управления с помощью специального программного обеспечения. Программная часть робота-телескопа включает в себя следующие элементы:

- планировщик и программа управления сеансом наблюдений;
- программа-драйвер управления опорно-поворотным устройством AutoSlew;
- программа-драйвер управления ПЗС-камерой и колесом светофильтров MaximDL, драйвер управления фокусирующим устройством FocusDrive;
- программа-драйвер управления куполом ScopeDome 3M;
- программный модуль определения погодных условий;
- специальное программное обеспечение потоковой обработки данных Apex II.

Многие производители астрономического оборудования комплектуют свои изделия драйверами, поддерживающими стандарт ASCOM (Astronomy Common Object Model), что позволяет упростить разработку программы для управления такими устройствами. Преимуществом ASCOM является то, что для управления разными типами опорно-поворотных устройств или ПЗС-камер используется единый

набор команд управления, независимо от производителя оборудования. ASCOM-драйвер полностью скрывает от разработчика программы управления нижний уровень взаимодействия с оборудованием. Однако для задач, требующих точной координатно-временной привязки, как например для наблюдений ИСЗ, в настоящее время разрабатываются низкоуровневые решения на платформе Linux.

3. Программа управления сеансом наблюдений

Программа управления сеансом наблюдений объединяет в себе функции управления всеми астрономическими устройствами, участвующими в сеансе наблюдений. Программа управления сеансом наблюдений работает по заранее сформированному оператором плану наблюдений. В плане наблюдений задаются координаты объектов для наблюдения, режимы сопровождения объекта, требуемое количество кадров, время экспозиции, необходимый фотометрический фильтр или последовательность смены фильтров. Программа управления сеансом наблюдений имеет возможность реагирования на триггерные события в процессе наблюдения, например, на срочные заявки, получаемые от Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН или другие события, формируемые сервером заявок. Каждое изображение, получаемое с помощью робота-телескопа, хранится на сервере хранения данных, а ключевые данные о файле и наблюдаемом объекте сохраняются в специальной базе данных. В конце сеанса наблюдений формируется отчет о выполнении заданий, в котором указаны результаты выполнения заданий и возникшие ошибки. Окончание сеанса наблюдений (закрытие купола, и парковка телескопа) производится либо с окончанием плана наблюдений, либо по ухудшению погодных условий.

Потоковая обработка данных для поиска астероидов и обнаружения транзиентов осуществляется с помощью программного пакета Арех II[1] и специального программного модуля потоковой обработки, позволяющего формировать пакеты наблюдений из набора полученных FITS-кадров. Например, при обзорах неба для обнаружения неизвестных астероидов, программный модуль потоковой обработки формирует пакет из нескольких (минимум четыре) кадров одной площадки небесной сферы и запускает обработку этого пакета программой Арех II. После обнаружения неизвестного объекта, модуль потоковой обработки формирует протокол обнаружения нового объекта и создает задание на дополнительное наблюдение на сервере заявок.

4. Метеокомплекс и программный модуль определения погодных условий

В процессе сеанса наблюдений, программа управления сеансом наблюдений получает данные о погоде от программного модуля определения погодных условий. Программный модуль определения погодных условий собирает данные о различных параметрах окружающей среды от метеокомплекса в составе датчика облачности AAG CloudWatcher, метеостанции Davis Davis Vantage Pro 2 и широкоугольной камеры Starlight Xpress Oculus-180. Метеокомплекс и программный модуль определения погодных условий работают независимо от робота-телескопа, собирая информацию о погоде и климате в месте установки телескопа круглосуточно. В специальной базе данных хранятся данные о температуре окружающей среды, влажности, осадках, условиях облачности, скорости и направлении ветра. Непрерывные наблюдения за погодными условиями на Звенигородской обсерватории в 2017–2018 гг. показали, что процентное соотношение облачных, частично облачных и ясных ночей в 2017 г. составило 41, 28 и 31 процента, соответственно. За 2017 г. общее количество ясных часов составило 928. В первой половине 2018 г. суммарное количество ясных часов ночью уже достигло 500 часов.

5. Полученные научные результаты

На работе-телескопе IRT-20 в основном проводятся фотометрические исследования переменных звезд, таких как FK Com, LO Peg, VZ Cam, ET Dra и др., также проводятся наблюдения по заявкам от БНО. Робот-телескоп позволяет наблюдать объекты до 15^m звездной величины с экспозицией 180 сек в фильтре V. Атмосферное качество изображения для Звенигородской обсерватории составляет 3...5". Точность фотометрических измерений в хорошие ночи со спокойной атмосферой для ярких объектов составляет $\pm 0.01^m$ в фильтре V. Для примера на рис. 2 показаны кривые изменения блеска звезд FK Com и ET Dra, полученные в марте-мае 2018 г. В целом, за 2017–2018 гг. было получено более 16000 изображений переменных звезд в различных фильтрах. Результаты наблюдений были опубликованы в работах [2, 3, 4].

Отметим, что возможности телескопа IRT-20 для фотометрических и поисковых наблюдений существенно ограничены малым масштабом изображения — 3.1"/пиксель, большим центральным экранированием и, как следствие, недостаточной проникающей способно-

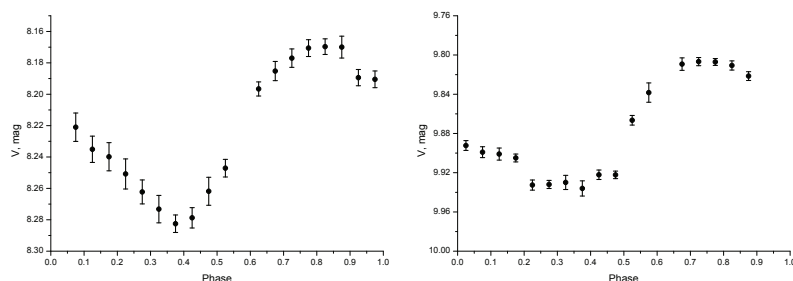


Рис. 2. Кривые изменения блеска звезд FK Com (слева) и ET Dra (справа), полученные в марте-мае 2018 г.

стью. Кроме того, плохой астроклимат и фоновая засветка дополнительно ухудшают проникание. В этой связи обзорные работы на телескопе IRT-20 оказались малоэффективными.

6. Заключение

Работы по созданию роботов-телескопов в ИНАСАН будут продолжены. Создается роботизированная система с широкоугольным телескопом апертурой 40 см для мониторинга околоземного пространства и поисковых задач. Разработанное программное обеспечение является универсальным и может быть использовано для всех устройств, которые поддерживают протокол управления ASCOM. В свою очередь, разработанный метеокомплекс и его специальное программное обеспечение может быть использовано для исследования климата в местах установки новых телескопов.

Список литературы

1. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, *Sol. Syst. Res.*, **44**, 68, 2010.
2. I. S. Savanov, V. I. Puzin, E. S. Dmitrienko, S. V. Karpov, et al., *Acta Astronom.*, **66**, 381, 2016.
3. I. M. Dzaparova, D. D. Dzappuev, A. N. Kurennya, O. I. Mikhailova, et al., *Izvestiya KrAO*, **114**, 22, 2018.
4. I. S. Savanov, S. A. Naroenkov, M. A. Nalivkin, V. B. Puzin, and E. S. Dmitrienko, *Astron. Bull.*, **3**, 0, 2018.

Система обнаружения дневных астероидов (СОДА)

Шугаров А.С., Шустов Б.М., Нароенков С.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Челябинское событие 15 февраля 2013 г. показало, что метеороиды декаметрового размера могут быть достаточно опасными и они должны быть включены в программу обнаружения потенциально опасных объектов. Челябинское тело пришло со стороны дневного неба. Но такие тела невозможно обнаружить заранее наземными или околоземными средствами. Предлагаемый проект СОДА (Система обнаружения дневных астероидов) предназначен для массового обнаружения тел размером более 10 м, движущихся со стороны Солнца, в ближнем космосе. В точке либрации L_1 (Земля-Солнце) предлагается расположить несколько широкоугольных телескопов апертурой ~ 30 см. Наблюдения будут осуществляться в барьерном режиме. Проект может быть реализован на основе имеющихся технологий, приветствуется международная кооперация.

System of observation of day-time asteroids (SODA)

Shugarov A.S., Shustov B.M., Naroenkov S.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Chelyabinsk event of Feb 15, 2014, has demonstrated that meteoroids of decameter size can be dangerous and they should be included in the programs of massive detection of potentially hazardous bodies. Chelyabinsk body came from day sky. Such objects could not be detected by ground based or near space instruments. Proposed project of space system SODA (System of Observation of Day-time Asteroids) is designed for exhaustive detection of decameter bodies coming from the Sun direction into the near space. The set of medium-size (~ 30 cm) wide field telescopes are to be put into vicinity of L_1 (Earth-Sun) point. Observations will be performed in barrier mode. The project could be implemented with off-shelf components. International cooperation is welcome.

1. Введение

В последние годы проблема астероидно-кометной опасности, т.е. угрозы столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами) изучается очень интенсивно (см., например, [1]). Метеороид, взорвавшийся над Челябинском 15 февраля 2013 г., показал, что даже относительно мелкое тело (17 м) при падении в насе-

ленных районах Земли способно привести к заметным разрушениям. Ущерб от более крупных тел может быть катастрофическим.

Количество потенциально опасных тел размером 10 м и более весьма велико (до 10^8 штук), а частота их столкновений с Землей составляет примерно одно событие в 5–10 лет (более мелкие тела падают ежегодно) [2].

С помощью наземных телескопов невозможно обеспечить необходимую полноту обнаружения тел, движущихся со стороны Солнца. Данная область также трудно доступна для космических аппаратов (КА) на околоземной орбите из-за фоновой засветки и неоптимального фазового угла. Для создания эффективной системы обнаружения к наземным телескопам должны быть добавлены телескопы космического базирования, удаленные от Земли на большое расстояние.

2. Проект СОДА

Проект СОДА (Система обнаружения дневных астероидов) [3] предназначен для массового и оперативного обнаружения опасных небесных тел (ОНТ) размером более 10 м, летящих к Земле со стороны Солнца.

Основным элементом системы являются один или два КА, размещенных в окрестности точки либрации L_1 в системе Солнце-Земля (рис. 1). Полезная нагрузка — широкоугольные телескопы апертурой 30 см и полем зрения 3° . Для перенацеливания телескопов перед каждым из них будет установлено полноапертурное подвижное зеркало. При типовой экспозиции 4 с дальность обнаружения 10 м тел составит до 2 млн. км. В качестве детекторов будут применяться современные КМОП-сенсоры формата $6k \times 6k$ с электронным затвором.

Для обнаружения опасных небесных тел (ОНТ) будет использоваться барьерный способ. После обнаружения на барьере ОНТ, если оно будет классифицировано как потенциально опасное, оно будет наблюдаться на всей доступной дуге вплоть до возможного столкновения с Землей. Наличие двух аппаратов позволит проводить синхронные наблюдения, что существенно повысит точность определения орбиты, полноту и достоверность данных.

Проект СОДА позволит обнаруживать ОНТ примерно за сутки до их возможного столкновения с Землей. За 10 часов до падения точность определения точки входа в атмосферу Земли составит около 100 км, за 4 часа до столкновения — ~ 10 км [4, 5]. В табл. 1 приведены примерная последовательность работы системы СОДА для случая Челябинского тела.

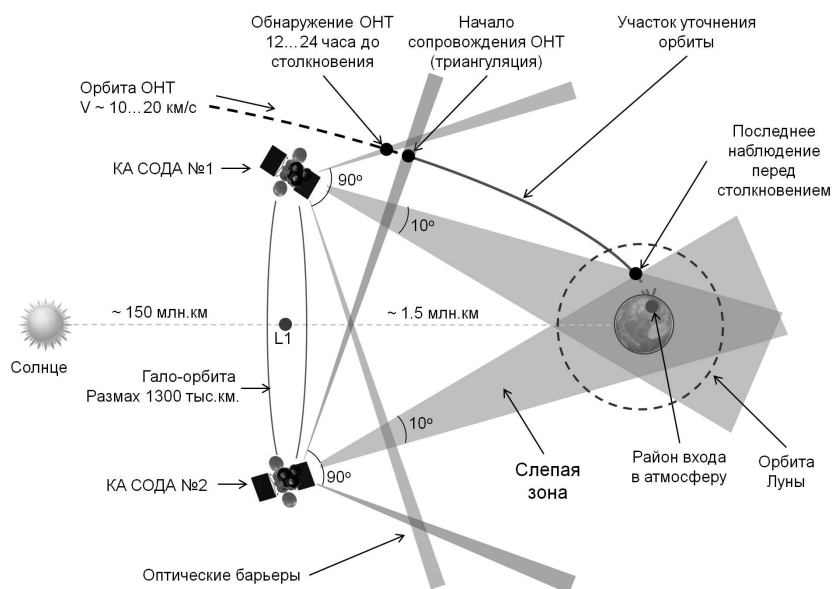


Рис. 1. Принцип работы проекта СОДА, X-Y проекция, т.е. вид с направления на полюс эклиптики.

Результаты моделирования показывают, что в течение 5 лет будет обнаружено не менее 3000 ОНТ размером более 10 м, сближающихся с Землей со стороны Солнца [2]. За 5–10 лет работы будет обнаружено, по крайней мере, одно-два тела на столкновительных орбитах, для которых будет заблаговременно (за 4–10 часов) и с достаточной точностью (10–50 км) определена точка входа в атмосферу Земли.

КА СОДА не оптимизирован для обнаружения тел, летящие с ночного неба. Для обнаружения подобных тел рационально использовать имеющиеся и будущие наземные сети широкоугольных телескопов, например ATLAS (США), МАСТЕР (РФ), ISON (РФ).

В проекте предполагается использовать малоразмерную космическую платформу (рис. 2). Масса полезной нагрузки оценивается в 150 кг. Выведение КА СОДА в L_1 возможно носителем среднего класса с разгонным блоком. Первичная обработка информации будет происходить на борту, необходимая скорость передачи наблюдательной информации — не менее 0.25 Мбит/с.

Таблица 1. Примерная последовательность работы системы СОДА.

Время до столкновения, ч	Точность определения входа в атмосферу, км	Статус прогноза, информирование МЧС России
19	—	Первое обнаружение.
18	± 1.8 млн.	Обнаружено тело, летящее в направлении Земли. Подключение второго КА в режиме триангуляции.
17	± 1400	Информирование МЧС о столкновении Земли с астероидом. Страна падения: РФ или Казахстан.
16	± 300	Уточнение зоны падения: РФ (Курганская, Челябинская, Тюменская области), Казахстан (Костанайская область).
11	± 30	Окончание ручной перепроверки данных. Информирование МЧС о точных координатах падения.
4	± 6	Последнее наблюдение. Выдача окончательного прогноза о месте входа в атмосферу, траектории на атмосферном участке, энергии взрыва.

Для проекта СОДА необходима организация практически непрерывной связи с космическим аппаратом, поскольку время реакции на событие должно быть на уровне десятков минут — часа. В проекте СОДА нужна сеть наземных станций приема и передачи данных. Станции должны быть распределены по долготе так, чтобы в каждый момент времени по крайней мере одна (а для надежности — две) станции находились на солнечной стороне Земли, т.к. условия видимости аппарата близки к условиям видимости Солнца.

На КА СОДА возможна установка дополнительной научной аппаратуры для проведения наблюдений Солнца и Земли. Так, установка четвертого телескопа, направленного строго на Землю, позволит получать снимки с разрешением до 10 км [6] в разных спектральных полосах с частотой примерно раз в час.

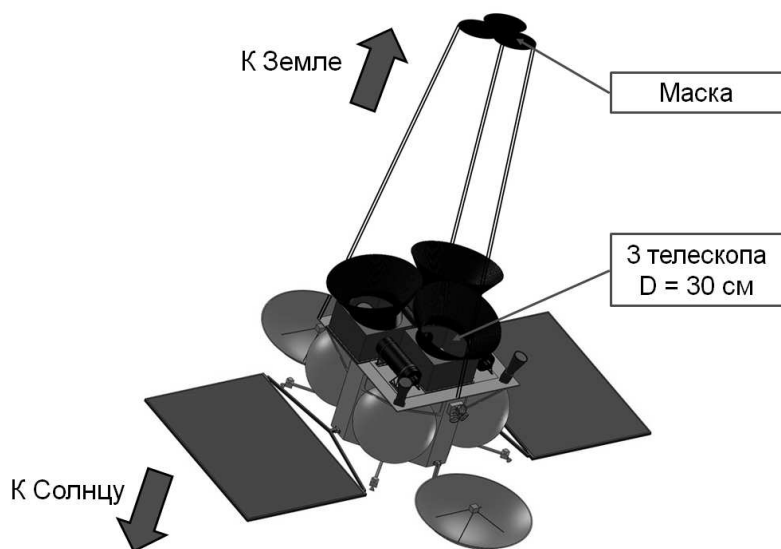


Рис. 2. Концепция КА СОДА с тремя телескопами апертурой до 30 см и экранирующей свет Земли маской.

3. Заключение

Челябинское событие изменило наши представления о приоритетах в решении задачи противодействия астероидно-кометной опасности. Появилось понимание необходимости создания средств для обнаружения тел размером от 10 м, приближающихся со стороны Солнца.

Предлагаемый проект СОДА в настоящее время не имеет действующих аналогов. Реализация проекта позволит создать службу обнаружения опасных небесных тел, заложив основу для создания важной составляющей национальной системы противодействия космическим угрозам, а также позволит впервые получить достаточно полные научные данные о населенности околоземного пространства малыми телами Солнечной системы.

Наличие постоянно действующей системы обеспечит наземные службы, в первую очередь МЧС России, своевременной информацией о космических угрозах. Результаты работы системы СОДА по каталогизации тел могут быть использованы для планирования будущих

космических миссий к астероидам с целью изучения их свойств, разработки методов активного противодействия, добычи ресурсов.

Создание службы обнаружения опасных небесных тел на основе средств космического базирования позволит России получить независимый, достаточно полный доступ к информации об астероидно-кометной опасности, создаст базу для участия в международной кооперации.

Список литературы

1. V.A. Puchkov (ed.), *Asteroidno-kometnaja opasnost': strategija protivodejstvija* (2015).
2. B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, and E. V. Efremova, *Sol. Syst. Res.*, **51**, 38, 2017.
3. B. M. Shustov, A. S. Shugarov, S. A. Naroenkov, and M. E. Prokhorov, *Astron. Rep.*, **59**, 983, 2015.
4. V. V. Emel'yanenko, H. J. Reitsema, S. A. Naroenkov, P. Jenniskens, and O. P. Popova, *Meteoritics and Planetary Science*, **49**, 2169, 2014.
5. S. A. Naroenkov, B. M. Shustov, and V. V. Emel'yanenko, *Cosmic Res.*, **51**, 335, 2013.
6. R. Smith and et. all, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011*, **A43G-03**, 2011.

Астрономические данные
и виртуальные
обсерватории

Каталоги звезд, заподозренных в переменности блеска, — взгляд в прошлое и перспективы

Казаровец Е.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Описаны основные шаги создания переработанной версии «Нового каталога звезд, заподозренных в переменности блеска» в электронной форме. Представлены вносимые изменения по сравнению с печатным изданием. Рассматриваются проблемы в работе и способы их преодоления. Предлагаются дальнейшие варианты развития каталога.

Catalogues of Suspected Variable Stars — Retrospect and Prospects

Kazarovets E.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We describe main compilation stages for the revised electronic version of the “New Catalogue of Suspected Variable Stars”. Changes compared to the printed edition are introduced. We consider problems in the course of our work and their overcoming. Options of the catalogue’s further development are suggested.

1. Введение

История каталогов звезд, заподозренных в переменности блеска, насчитывает более 130 лет. Многочисленные издания «каталогов известных переменных» во второй половине XX в. и дополнений к ним привели к тому, что в эти списки стали попадать и малоизученные переменные. Переменность некоторых из них не подтверждалась дальнейшими наблюдениями. Однако, раз подозрение было высказано, для звезд, заподозренных по тем или иным причинам в переменности, в конце XIX в. Дж. Гором был составлен отдельный каталог [1], насчитывающий 736 объектов. Причины подозрений могли быть разными: от расхождений в оценках звездных величин в разных публикациях или каталогах до грубых ошибок и опечаток.

В первой половине XX в. самые известные каталоги заподозренных переменных были изданы немецкими астрономами Е. Циннером [2] (2171 звезда, включая звезды Дж. Гора) и Р. Прагером в двух

томах [3, 4] (5829 новых заподозренных), с обширной библиографией ранних наблюдений звезд.

После Второй мировой войны решением Международного астрономического союза ведение и публикация каталогов переменных и заподозренных в переменности блеска звезд были переданы СССР. В 1951 г. выходит первый советский «Каталог звезд, заподозренных в переменности блеска» [5], включающий 8134 звезды, а в 1965 г. — «Второй каталог звезд, заподозренных в переменности блеска» [6] — 3907 звезд как продолжение первого. Сокращенное название каталогов — КЗП (или CSV). Опыт работы над «Общим каталогом переменных звезд» (ОКПЗ) показал нецелесообразность публикации ежегодных дополнений к подобным каталогам из-за больших трудозатрат.

2. Новый каталог звезд, заподозренных в переменности блеска

Через 15 лет после каталога [6] было подготовлено следующее (и последнее в печатном виде) издание, названное «Новый каталог звезд, заподозренных в переменности блеска» [7] и вместившее сведения о 14810 объектах. Звезды данного каталога сокращенно обозначаются NSV (New Suspected Variable).

Специфика этого издания заключается в том, что впервые основная таблица каталога не набрана типографским способом, а записана на магнитную ленту и затем распечатана на АЦПУ ЭВМ БЭСМ-4М. Однако печатное устройство не позволяло использовать строчные буквы. Поэтому мы не можем различить, например, системы звездных величин V , R , I и v , r , i или обозначения WR и Wt (номера каталога звезд Вольфа-Райе и нумерация переменных, открытых Р. Вебером). Также изменился вид условных записей типов переменности в отношении греческих и строчных латинских букв. С одной стороны, это вызывало и вызывает некоторые неудобства, а с другой стороны, позволило с появлением персональных компьютеров быстро перевести таблицу в электронную форму. Англоязычные примечания и литературные ссылки были набраны вручную и добавлены позже.

Как и все предыдущие каталоги, NSV содержит сведения о координатах, звездных величинах в максимуме и минимуме блеска (или амплитуде), системе величин, возможном типе переменности, спектральном классе. Дополнительные сведения даны в примечаниях. Для каждой звезды есть две ссылки на литературные источники — сообщение об открытии (с названием звезды в цитируемой работе) и опубликованную карту. Дана таблица идентификаций звезд с каталогами

предварительных обозначений, а также с основными фотометрическими, спектральными и позиционными каталогами для звезд ярче 10^m .

Основные недостатки каталога таковы. Экваториальные координаты для равноденствия В1950.0 даны, в лучшем случае, с точностью до $0.1'$, в худшем — $1'$ и больше. Для нескольких тысяч звезд каталога, имеющих координаты низкой точности, отсутствуют опубликованные поисковые карты. Ограничение числа символов в строке печатного издания каталога повлекло в том числе сокращение обозначений спектральных классов до двух позиций, без указания классов светимости и других характеристик.

В 1998 г. было закончено составление электронного дополнения к каталогу NSV [8] (11206 звезд). Число добавленных звезд сопоставимо с основным каталогом. Однако при работе над дополнением мы старались избежать крупных недочетов, с точки зрения современности, прежних каталогов заподозренных переменных. Благодаря появлению к концу XX в. астрометрических каталогов для слабых звезд до 21^m позиционная точность возросла до десятых долей угловой секунды для звезд слабее 10^m . В электронной версии отпали ограничения количества символов в обозначениях спектров, вернулась возможность использования строчных букв и т.п.

В 2006 г. завершился большой проект по уточнению координат переменных звезд, входящих в ОКПЗ, до $0.1''$ [9, 10, 11]; было принято решение о переработке устаревшей электронной версии «Нового каталога звезд, заподозренных в переменности блеска» прежде всего с точки зрения улучшения позиционной точности, а также в отношении остальной информации — снятия форматных ограничений, пересмотра примечаний, расширения перечня каталогов для идентификаций и др.

3. Новая версия электронного каталога NSV

Сейчас можно подвести промежуточные итоги работы по созданию современной версии каталога NSV. Информация обновлена для 12640 объектов каталога из 14810 (85%). Так, для 830 звезд в статьях об открытии при наличии фотокарт не была указана звездная величина. Для них мы оценили блеск по изображениям из архива цифрового обзора Hubble Space Telescope Science Institute или изображениям Атласа неба Aladin Страсбургского центра астрономических данных. Для прочих звезд обновлены и дополнены данные о спектрах. В примечаниях удалены устаревшие сведения, а информация о параметрах

двойных систем приведена в соответствие с современным состоянием и т.д. Количество таблиц идентификаций с различными каталогами увеличено в несколько раз. Расширен список литературных ссылок.

Но основной объем работы пришелся на позиционную часть. Свыше 3700 ярких звезд, присутствующих в старых обзорах неба *Durchmusterung* (BD, CoD, CPD), HR, HD и других, уже имели точные координаты B1950.0 в астрометрических каталогах середины прошлого века, но координаты были специально закруглены до $0.1'$ под существовавший формат каталогов переменных звезд. Для этих звезд из современных астрометрических каталогов мы заимствовали позиции с точностью $0.01''$ и собственные движения на равноденствие J2000.0.

Способы поиска более слабых звезд и дальнейшую их идентификацию с современными позиционными каталогами можно разделить на две группы — для имеющих опубликованные поисковые карты и для не имеющих таковых. Первые искать относительно легко при наличии фотографической или хорошей рисованной карты окрестностей и координат с ошибкой, не превышающей размер поля карты. Иначе поиск затягивается на неопределенное время. По статистике уже обработанных звезд, ошибки опубликованных координат могут достигать величин от десятых долей угловой минуты до 1° . Самым трудоемким остается обнаружение переменной в отсутствие поисковой карты. Здесь существуют разные варианты решения задачи. Во-первых, для некоторых звезд первооткрыватели публиковали хорошие астрометрические координаты или координаты с ошибкой, не превышающей $1''$. В этом случае мы однозначно выбираем нужную звезду. Во-вторых, даже при грубых координатах переменные с заметной амплитудой с большой вероятностью могут быть найдены глазомерно путем сравнения нескольких изображений в одном цвете (*B*, *R*, *I*) участков неба заданного размера из архивов цифровых обзоров. В-третьих, в последнее десятилетие в открытом доступе появились электронные архивы ПЗС-наблюдений различных обзоров неба. Можно в определенном поле сделать выборку звезд с величинами, согласующимися с фотометрией первооткрывателя, и обработкой архивных данных для них выявить переменную звезду. При отрицательном результате можно расширить границы поля.

Результаты поиска 2520 заподозренных в переменности звезд без опубликованных поисковых карт таковы. На сегодняшний день найдены 2282 из них. Примечательно, что нами переоткрыты уже 900 звезд из вошедших в каталог NSV 1169 звезд, заподозренных в работе [12] В. Лейтеном, крупнейшим американским открывателем пере-

менных звезд первой половины XX в. Мы обработали имеющиеся для большинства из них архивные наблюдательные данные, установили тип переменности, определили элементы изменения блеска. Всего за время работы над электронной версией каталога NSV в ОКПЗ [13] переведено около 3500 звезд. Остались не найденными 238 объектов. Среди них оказались 17 малых планет с известными эфемеридами и 16 сомнительных Новых. Это могут быть дефекты пластинок или «фантомы» ярких звезд при случайной повторной экспозиции одной и той же пластинки. В остальных случаях, после завершения работы над каталогом надо повторить поиски с использованием новых архивов наблюдений.

4. Заключение

Работу над новой электронной версией каталога NSV планируется завершить в течение двух-трех лет. Следующим этапом развития каталога видится объединение основной части NSV и Дополнения к нему с добавлением около 5000 звезд, заподозренных в переменности в последние годы.

Список литературы

1. J. E. Gore, *Proceedings of the Royal Irish Academy, Series 2, Science*, **4**, 267, 1884.
2. E. Zinner, *Astronomische Abhandlungen als Ergänzungshefte zu den Astronomische Nachrichten*, **8**, A1, 1929.
3. R. Prager, *Astronomische Abhandlungen als Ergänzungshefte zu den Astronomische Nachrichten*, **9**, C1, 1934.
4. R. Prager, *Astronomische Abhandlungen als Ergänzungshefte zu den Astronomische Nachrichten*, **10**, A1, 1937.
5. B. V. Kukarkin, P. P. Parenago, Y. N. Efremov, and P. N. Kholopov, in *Catalogue of suspected variable stars. Moscow: Acad. of Sciences USSR* (1951).
6. B. V. Kukarkin, P. N. Kholopov, Y. N. Efremov, and N. E. Kurochkin, in *Second catalogue of suspected variable stars. Moscow: Acad. of Sciences USSR* (1965).
7. B. V. Kukarkin and P. N. Kholopov, *New catalogue of suspected variable stars. Moscow: "Nauka"* (1982).
8. E. V. Kazarovets, N. N. Samus, and O. V. Durlевич, *IBVS*, **4655**, 1998.
9. N. N. Samus', V. P. Goranskii, O. V. Durlевич, A. V. Zharova, E. V. Kazarovets, E. N. Pastukhova, M. L. Hazen, and T. M. Tsvetkova, *Astron. Lett.*, **28**, 174, 2002.

10. N. N. Samus', V. P. Goranskii, O. V. Durlevich, A. V. Zharova, et al., *Astron. Lett.*, **29**, 468, 2003.
11. N. N. Samus', O. V. Durlevich, A. V. Zharova, E. V. Kazarovets, N. N. Kireeva, E. N. Pastukhova, D. B. Williams, and M. L. Hazen, *Astron. Lett.*, **32**, 263, 2006.
12. W. J. Luyten, *Publications of the Astronomical Observatory University of Minnesota*, **6**, 79, 1938.
13. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.

Общий каталог переменных звезд на этапе электронного пятого издания

Самусь Н.Н.¹, Казаровец Е.В.¹, Киреева Н.Н.¹,
Пастухова Е.Н.¹, Дурлевич О.В.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

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

В 2017 г. авторский коллектив Общего каталога переменных звезд объявил о переходе к пятому, электронному изданию (версия 5.1). В статье описаны важнейшие особенности пятого издания, ход текущей работы и планы дальнейшего совершенствования каталога (в частности, включения в него достаточно хорошо изученных переменных звезд в избранных шаровых звездных скоплениях).

General Catalogue of Variable Stars at the Stage of its Electronic Fifth Edition

Samus N. N.¹, Kazarovets E. V.¹, Kireeva N. N.¹, Pastukhova E. N.¹,
Durlevich O. V.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Sternberg Astronomical Institute of the MSU, Moscow, Russia*

In 2017, the author team of the General Catalogue of Variable Stars announced the transition to the fifth, purely electronic edition (Version 5.1). The present paper describes the main features of the fifth edition, the current state of our work, and plans for further improvement of the catalogue (in particular, plans to incorporate sufficiently well studied variable stars in selected globular star clusters).

1. Введение

В 1926–1942 гг. каталоги и эфемериды переменных звезд издавались немецким Астрономическим обществом (Astronomische Gesellschaft) ежегодно. Последний из этих каталогов [1] содержал 9476 переменных звезд. После второй мировой войны Международный астрономический союз поручил издание и публикацию каталогов переменных звезд советским астрономам. С 1948 до 1995 г. вышли из печати четыре издания Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ). Первое издание было однотомным (10930 звезд), второе — двухтомным (14708

звезд), третье — трехтомным (20437 звезд), а четвертое [2] — пятитомным (28435 переменных нашей Галактики и около 12000 звезд в дополнительных списках внегалактических переменных), причем первый том вышел из печати в 1985 г., а пятый — в 1995 г. К 2017 г. обозначения в системе ОКПЗ имели 51853 галактических переменных звезды. От дальнейших попыток составлять каталоги внегалактических переменных звезд мы отказались.

В 2017 г. мы объявили [3] переход на этап пятого, чисто электронного издания ОКПЗ (версия 5.1), описали его структуру и принципы составления. В следующих разделах статьи приводится краткая информация о принципах и особенностях пятого издания ОКПЗ, о дальнейших планах его совершенствования.

2. Особенности версии 5.1 ОКПЗ

Важнейшей особенностью перехода к версии 5.1 ОКПЗ является постепенное устранение лакуны, возникшей из-за неполного формата Списков обозначений переменных звезд с номерами от 78 до 81. Эти списки содержали только координаты, пределы изменения блеска и типы переменности, но элементы изменения блеска периодических переменных, спектральные классы и т.п. в них отсутствовали. Указанные списки включают свыше 13300 переменных звезд. Заполнение лакуны происходит параллельно с полным пересмотром всей информации каталога. Ко времени написания статьи работа по полному пересмотру данных завершена для 20 созвездий (Andromeda-Cepheus), в которых ОКПЗ, вместе со всеми опубликованными списками обозначений, содержит 11175 звезд.

В качестве примера обратимся к ревизии ОКПЗ в созвездии Центавра. В 4-м издании ОКПЗ содержатся 833 переменные звезды этого созвездия, из них только 20 в качестве ссылки на источник классификации и элементов имели ссылку на составителей каталога. В версии 5.1 в созвездии Центавра уже 1408 переменных звезд, причем ссылка на составителей ОКПЗ использована 793 раза (56%). На рис. 1 показана кривая блеска V447 Cep, затменной переменной типа EB с периодом 0.6386 суток, которая входила в 4-е издание как звезда типа RR Лир с периодом 0.46 суток по данным [4]. Кривая блеска основана на наблюдениях обзора Catalina [5]; геоцентрические моменты времени были приведены нами к центру Солнца.

Координаты переменных звезд в версии 5.1 приводятся с намного более высокой точностью, чем в предыдущих изданиях. Это изменение базируется на проведенной нами работе (см. [6] и ссылки в этой

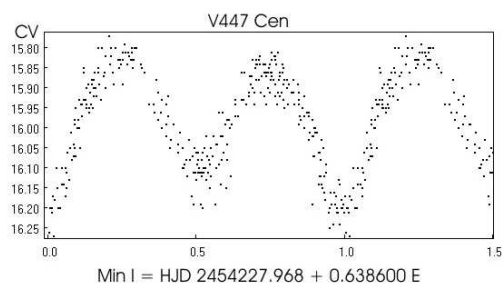


Рис. 1. Кривая блеска V447 Cen.

публикации) по сплошному отождествлению переменных звезд, с использованием поисковых карт, с позиционными каталогами (при необходимости астрометрические координаты измерялись нами по имеющимся изображениям).

В традиционной версии ОКПЗ, в книжном формате, длина строки не позволяла поместить в ней, помимо звездных величин в максимуме и минимуме блеска, звездную величину во вторичном минимуме затменных переменных, и эта информация выносилась в примечания. В электронной таблице каталога такого ограничения нет. Вообще, содержание примечаний для первых 20 созвездий существенно пересмотрено, удалена избыточно подробная информация об изменяемости периодов, существенно точнее и информативнее стали сведения о визуальной двойственности переменных звезд и т.п.

Во всех 20 пересмотренных созвездиях в версии 5.1 указаны типы переменности по традиционной, а также по экспериментальной новой системе классификации переменных звезд (см. <http://www.sai.msu.su/gcvs/future/classif.htm>).

3. Перспективы дальнейшего совершенствования каталога

Мы планируем продолжить полный пересмотр информации ОКПЗ в следующих созвездиях, по-прежнему широко прибегая к самостоятельному анализу наблюдений, находящихся в открытом доступе в Интернете.

ОКПЗ задуман как каталог всех переменных звезд нашей Галактики, исследованных достаточно хорошо для определения хотя бы предварительного типа переменности. Однако по историческим при-

чинам переменные звезды в шаровых звездных скоплениях Галактики, как правило, не включались ни в каталоги немецкого Астрономического общества, ни в ОКПЗ, хотя переменные звезды рассеянных звездных скоплений в наш каталог входят. В издававшихся в Канаде специализированных каталогах переменных звезд в шаровых скоплениях не содержалось экваториальных координат звезд, а только прямоугольные координаты относительно весьма приближенно заданного центра каждого скопления. В 2009 г. нами был опубликован каталог экваториальных координат 3390 переменных звезд в 103 шаровых скоплениях [7], после чего каталог переменных звезд в шаровых скоплениях [8] также перешел на экваториальные координаты. Открылась возможность включения переменных в шаровых скоплениях, удовлетворяющих критериям ОКПЗ, в специальные списки обозначений. (Каталог [8], в отличие от ОКПЗ, включает и звезды, относящиеся, по нашим критериям, к заподозренным переменным.) Начало такой работы запланировано на 2018 г. Предполагается прежде всего включить несколько богатых переменными звездами и хорошо изученных скоплений. При необходимости будут организованы ПЗС-наблюдения для выведения новых элементов изменения блеска.

Работа поддержана грантом подпрограммы II «Астрофизические объекты как космические лаборатории» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. H. Schneller, *Kleine Veroeffentlichungen der Universitaetssternwarte zu Berlin Babelsberg*, **7**, 2.ii, 1942.
2. P. N. Kholopov, *Obshchii katalog peremennykh zvezd, 4th ed., Vol. I* (1985).
3. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.
4. M. Huruwata, *Harvard College Observatory Bulletin*, **913**, 14, 1940.
5. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, E. Beshore, et al., *ApJ*, **696**, 870, 2009.
6. N. N. Samus', O. V. Durlevich, A. V. Zharova, E. V. Kazarovets, N. N. Kireeva, E. N. Pastukhova, D. B. Williams, and M. L. Hazen, *Astron. Lett.*, **32**, 263, 2006.
7. N. N. Samus, E. V. Kazarovets, E. N. Pastukhova, T. M. Tsvetkova, and O. V. Durlevich, *PASP*, **121**, 1378, 2009.
8. C. Clement, *European Physical Journal Web of Conferences*, volume 152, 01021 (2017).

Проблемы исследований переменных звезд по архивам наблюдений

Казаровец Е.В., Пастухова Е.Н.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Рассматриваются проблемы с идентификацией переменных звезд, связанные с низкой точностью координат звезд в обзоре SuperWASP. Случаи неправильной идентификации могут быть выявлены по амплитудам, заниженным по сравнению с характерными для данного типа переменности, а звезды, реально меняющие блеск, найдены в широкой окрестности.

Problems of variable star studies from archives of observations

Kazarovets E.V., Pastukhova E.N.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We consider problems of identifying variable stars arising because of low accuracy of stellar coordinates in the SuperWASP survey. Wrong identifications can be found by too low amplitudes compared to those usual for the variability type, and then the real variables can be identified in a rather wide field.

1. Введение

Открытый доступ к электронным архивам данных многочисленных наземных проектов обзоров неба, ведущихся с начала XXI в., привел к всплеску открытий переменных звезд и их исследований и поднял на новую ступень работу нашего коллектива по ведению Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ) [1]. Наша обработка длинных (5–10 лет) рядов наблюдений из обзоров неба не только дает новые элементы изменения блеска, но и позволяет уточнить тип переменности и даже найти тонкие эффекты (например, вариации периода у короткопериодических переменных, мультипериодичность и т.д.).

Как известно [1], ОКПЗ пополняется присоединением мини-каталогов, содержащих астрометрические и астрофизические сведения о переменных звездах и исторически называемых Списками обозначений. Число объектов, включаемых в ОКПЗ в последние годы, достигает в каждом Списке нескольких тысяч звезд. В настоящее время идет интенсивная работа по составлению очередного 82-го Списка, в который отобрано почти 3300 звезд.

Рассмотрим ряд проблем, связанных с обработкой архивных наблюдений, актуальных для составителей ОКПЗ. Мы выделим две проблемы — отсутствие определенной фотометрической системы в ряде обзоров неба и низкое астрометрическое разрешение.

2. Фотометрические проблемы

Остановим внимание на четырех обзорах: ASAS (All Sky Automated Survey) [2], ROTSE (Robotic Optical Transient Search Experiment) [3], CRTS (Catalina Real-time Transient Survey) [4], SuperWASP (Wide Angle Search for Planets) [5]. У каждого из них была своя цель. Только ASAS проводил фотометрию звезд в фильтрах V и I. Другие же ориентировались на поиск астероидов и комет, специфических астрономических транзиентов, обнаружения экзопланет и многое другое. Распределение наблюдений по небу отличается от одного обзора к другому. Предельная величина ASAS $\sim 14^m$, наблюдениями охвачено 10 лет; предел ROTSE 15.5^m (1 год); в CRTS звезды в основном до 20^m (7–10 лет), а в SuperWASP — до 16^m (5 лет). Число наблюдений — от десятков и сотен на каждую звезду (в первых трех обзорах) до многих тысяч в SuperWASP. Во всех обзорах, кроме ASAS, наблюдения не имеют определенной фотометрической системы. Использовались ПЗС-матрицы без фильтров. В обзоре ROTSE красная граница кривой реакции приходится на 1000 нм, а λ_{eff} — в диапазоне 700–750 нм (полоса, близкая к R). Кривая спектральной чувствительности других обзоров — от 400 до 700 нм с некоторыми вариациями. Центр полосы совпадает с λ_{eff} полосы V Джонсона (555 нм), а границы близки к λ_{eff} полос B и R. Для обработки наблюдений в каждом поле обзора создается вторичный стандарт привязкой к звездам в полосе V Tycho2. Более-менее удачная привязка к V-величинам Tycho2 сделана в обзоре CRTS, но только для звезд ранних спектральных классов. Исследовать красные звезды по CRTS практически невозможно — оценки блеска слишком яркие, а амплитуды изменения блеска сильно занижены. Для менее красных звезд мы с успехом используем данные этого обзора, вводя в каталог обозначение CV для псевдо-V полосы CRTS. В обзоре SuperWASP также заявлена откалиброванная по стандартам полоса V («WASP V»), но многие исследователи склонны считать, что результаты ближе к величинам в полосе R. Мы придерживаемся той точки зрения, что результаты не похожи на фотометрию ни в V, ни в R (скорее, $V + R$), называем их наблюдениями без определенной системы и обозначаем звездочкой (*) в графе «полоса наблюдений». По сравнению с CRTS оценки блеска слишком яркие для всех звезд.

С красными звездами проблемы аналогичны отмеченным для CRTS. Что касается V-полосы обзора ROTSE, то многие исследователи называют ее R1, а мы обозначаем звездочкой (*) как внесистемную. Даже если для некоторых звезд есть ряды псевдо-V наблюдений во всех обзорах, количественно их сопоставить затруднительно, но можно получать отдельные фазовые кривые изменения блеска и определять тип переменности.

3. Астрометрические проблемы

Вторая из рассматриваемых проблем связана с низким астрометрическим разрешением в некоторых обзорах. Для быстрого охвата как можно больших площадей небесной сферы в обзорах использовались широкоугольные камеры (поле зрения $\approx 8^\circ \times 8^\circ$) с разрешением около $14''$ пиксель $^{-1}$, а для обработки взяты апертурные радиусы 3.5 пикселя ($50''$). Таким образом, в SuperWASP проводились измерения блеска бленды из всех объектов, попадающих в поле с заданными координатами центра по входному каталогу USNO-B1.0 [6]. Для ROTSE брались координаты бленды поближе к яркой звезде. Для сравнения, в обзоре ASAS разрешающая способность камеры составляет $20'' - 30''$, а в CRTS (при угловом разрешении матрицы $2.5''$ пиксель $^{-1}$) две звезды разделены на отдельные объекты уже при расстоянии между ними $5'' - 7''$.

Следует отметить, что при использовании архивов таких обзоров, как ROTSE или SuperWASP, мы нередко сталкиваемся с очень непростой задачей поиска реальной переменной звезды в достаточно широком поле вокруг объектов этих каталогов. Для ASAS и ROTSE задача немного облегчается тем, что в поле радиусом $1'$ количество ярких звезд до 13^m невелико. Объем работы возрастает во много раз при поиске слабой переменной до 16^m около объектов SuperWASP. Большинство вопросов снимается при наличии наблюдений CRTS, разделяющих широкие пары на отдельные компоненты, но и здесь не решается проблема разделения визуально близких пар звезд ($< 6''$). Для выявления переменной в таких парах необходимы дополнительные индивидуальные наблюдения на более крупных телескопах.

Приведем некоторые результаты проверки данных работы [7] для звезд, включаемых в ОКПЗ. Статья содержит критерии отбора и вычисленные параметры изменения блеска (период и пределы) для 143 кандидатов в короткопериодические затменные двойные по наблюдениям SuperWASP. Из списка кандидатов мы исключили 5 переменных, которые уже есть в ОКПЗ, и 10 компаньонов близких пар

Таблица 1. Непеременные звезды в работе [7]

	Объект каталога SuperWASP	Max	Min	P , сут.
1	1SWASP J011732.10+525204.9	13.98	14.09	0.22396986
2	1SWASP J022727.03+115641.7	15.08	15.23	0.21095353
3	1SWASP J051459.80-021923.6	13.76	13.85	0.23090420
4	1SWASP J061236.44-281553.0	15.65	15.77	0.23096164
5	1SWASP J070953.45+364417.3	12.06	12.10	0.22304635
6	1SWASP J090758.16-153811.8	13.53	13.56	0.22888374
7	1SWASP J111501.66-361254.2	15.45	15.67	0.22000501
8	1SWASP J121359.79-414742.7	13.48	13.51	0.21926781
9	1SWASP J130711.90+084159.9	15.23	15.37	0.22777182
10	1SWASP J151652.90+004835.8	14.01	14.08	0.21073309
11	1SWASP J161858.05+261303.5	13.21	13.24	0.22878101
12	1SWASP J165734.53+274827.7	14.51	14.62	0.22449661
13	1SWASP J210318.76+021002.2	13.02	13.04	0.22858994
14	1SWASP J221045.95+211842.3	15.48	15.71	0.22853841
15	1SWASP J222514.69+361643.0	12.63	12.65	0.22473352

Таблица 2. Переменные звезды SuperWASP

	R.A. (2000.0) Decl.	Max	Min	P , сут.	Расст. от WASP
1	01 17 32.74 +52 51 43.6	14.65	15.15	0.2239699	23''SE
2	02 27 26.38 +11 56 49.6	14.91	15.46	0.2109523	12''NW
3	05 15 01.12 -02 19 50.4	14.38	15.00	0.2309035	32''SE
4*	06 12 36.04 -28 16 27.0	15.7	16.3	0.230963	34''S
5	07 09 55.49 +36 43 56.4	13.23	13.56	0.2230464	32''SE
6	09 07 56.79 -15 38 36.2	15.33	15.81	0.2288846	30''S-SW
7	11 14 59.40 -36 12 50.8	15.08	15.56	0.2200050	27''W
8	12 14 03.12 -41 47 39.8	15.12	15.86	0.2192675	37''E
9	13 07 10.26 +08 42 08.9	15.89	16.56	0.2277723	25''W-NW
10	15 16 54.54 +00 48 26.4	14.49	14.83	0.2107336	28''E-SE
11*	16 18 57.85 +26 13 38.6	13.71	13.88	0.2287790	35''N
12	16 57 34.63 +27 48 10.3	15.21	16.00	0.2244964	18''S
13	21 03 19.98 +02 09 33.9	15.08	15.84	0.2285898	35''SE
14	22 10 46.69 +21 18 37.6	15.32	16.17	0.2285390	11''SE
15*	22 25 12.79 +36 16 49.8	13.41	13.65	0.224735	25''W-NW

с целью их дальнейших наблюдений. Параметры изменения блеска всех рассматриваемых объектов SuperWASP (включая близкие неразделенные пары) были получены нами в основном по данным CRTS, с привлечением других архивов. В результате 15 звезд на позициях SuperWASP оказались постоянными (10.5% от исходного). Список 15 непостоянных объектов SuperWASP представлен в табл. 1. Помимо наименования объектов, в таблице даны пределы изменения блеска в

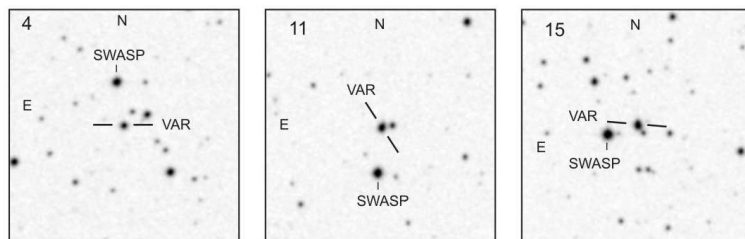


Рис. 1. Карты окрестностей $3' \times 3'$ (POSSII red) для переменных 4, 11 и 15.

полосе «WASP V» и периоды из работы [7], пересчитанные из секунд в доли суток.

Поиск реальных переменных в окрестностях $\pm 1'$ около позиций SuperWASP проводился с условием совпадения периодов изменений блеска. Результаты представлены в табл. 2. Звезды найдены в пределах от $10''$ до $40''$ от координат SuperWASP. Для каждой найденной переменной приведены координаты J2000.0, пределы изменения блеска в полосе CV, вычисленный нами период по данным CRTS (кроме первой) и расстояние от объекта SuperWASP.

Как видно из табл. 2, полученные периоды до пятого знака совпадают с периодами, опубликованными в [7], однако амплитуды изменений блеска, приведенные там (см. табл. 1), намного меньше найденных нами, а звездные величины — слишком яркие. Это следствие измерения суммарного светового потока от бленд, не разрешенных на отдельные объекты звезд, о чем было сказано выше.

Открытые нами переменные из табл. 2 были проверены на присутствие в базе данных по переменным звездам VSX (International Variable Star Index) [8].

На сегодняшний день 9 звезд открыты как переменные в работе [9], 3 — другими исследователями (D. Boyd, 2013; S. Otero, 2015 — частные сообщения в VSX) и 3 — авторами. Три переменные, впервые обнаруженные нами (номера 4, 11 и 15) отмечены в табл. 2 значком * после порядкового номера и показаны на картах (рис. 1).

Благодарим Н.Н. Самуся за помощь в работе.

Список литературы

1. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.
2. G. Pojmanski, *Acta Astronom.*, **47**, 467, 1997.
3. C. Akerlof, S. Amrose, R. Balsano, J. Bloch, et al., *AJ*, **119**, 1901, 2000.
4. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, E. Beshore, et al., *ApJ*, **696**, 870, 2009.
5. D. L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, D. J. Christian, et al., *PASP*, **118**, 1407, 2006.
6. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, H. D. Ables, et al., *AJ*, **125**, 984, 2003.
7. M. E. Lohr, A. J. Norton, U. C. Kolb, P. F. L. Maxted, I. Todd, and R. G. West, *A&A*, **549**, A86, 2013.
8. C. L. Watson, A. A. Henden, and A. Price, *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, **35**, 414, 2007.
9. A. J. Drake, M. J. Graham, S. G. Djorgovski, M. Catelan, et al., *ApJS*, **213**, 9, 2014.

Новые переменные звезды в программе сканирования московской фототеки

Самусь Н.Н.¹, Зубарева А.М.¹, Колесникова Д.М.¹, Антипин С.В.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

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

Обеспечение сохранности астронегативов и возможности их использования в автоматизированных программах поиска и исследования переменных звезд требуют сплошного сканирования астрономических коллекций прямых фотографий звездного неба. Для московской фототеки такая работа ведется с 2006 г. В работе представлен краткий обзор наших результатов по сканированию фотопластинок 40-сантиметрового астрографа ГАИШ МГУ и поиска переменных звезд в нескольких полях. Обсуждаются особенности распределения по периодам открываемых по сканам затменных переменных звезд, в сравнении с данными Общего каталога переменных звезд.

New variable stars in the program of scanning the Moscow astronomical plate collection

Samus N.N.¹, Zubareva A.M.¹, Kolesnikova D.M.¹, Antipin S.V.²

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Sternberg Astronomical Institute of the MSU, Moscow, Russia*

Safe keeping of astronomical photographs and providing possibilities of their use in automatic programs aimed at discovering and investigating variable stars make it necessary to scan whole astronomical collections of direct sky photographs. Such work is under way for the Moscow plate collection since 2006. We present a brief review of our results from scanning photographic plates taken with the Sternberg Institute's 40-cm astrograph and discovering variable stars in several fields. We discuss specifics of period distribution of the eclipsing binaries discovered from the scans, compared to data from the General Catalogue of Variable Stars.

1. Введение

Накопленные в течение интервала времени, почти точно совпадающего с XX в., на многих обсерваториях мира крупные коллекции прямых фотографий звездного неба, вместе взятые, по оценкам содержат около 2 млн. пластинок и пленок (преимущественно пластинок).

Самыми богатыми являются коллекции Гарвардской обсерватории в США (около 500000 астронегативов), Зоннебергской обсерватории в Германии, в настоящее время принадлежащей частной компании 4ri Systeme GmbH (около 300000 негативов) и некоторые другие. В России крупнейшая коллекция астронегативов принадлежит ГАИШ МГУ; полное количество негативов в этой коллекции оценивается как не менее 50000 [1]. В ИНАСАН имеется также коллекция астронегативов Звенигородской обсерватории (см. [2]).

Для обеспечения сохранности информации, содержащейся в фототеках, и возможности ее обработки современными цифровыми способами, необходимо провести сканирование фототек. Такая работа уже длительное время ведется в богатых фототеках (см., напр., [3]). Исключительная важность оцифровки фототек проявилась особенно рельефно, когда 16 января 2016 г. значительная часть гарвардской коллекции подверглась риску полного уничтожения в результате прорыва водопровода высокого давления непосредственно под помещением, где хранятся фотопластинки. К счастью, эффективная работа службы спасения позволила избежать гибели пластинок (ни одна из пострадавших пластинок на момент аварии оцифрована не была).

В настоящее время коллекция астронегативов в Звенигороде полностью оцифрована [4]. В данной статье речь пойдет о проводимой совместно ИНАСАН и ГАИШ работе по сканированию фототеки ГАИШ МГУ, с последующим открытием и исследованием переменных звезд по сканам.

2. Сканирование фототеки

В 2006 г. МГУ им. М.В. Ломоносова были приобретены два сканера CREO EverSmart Supreme (один из двух управляющих компьютеров был приобретен на средства ИНАСАН), что позволило начать сканирование коллекции астронегативов с разрешением 2500 dpi. К сожалению, вскоре после истечения гарантийного срока у обоих сканеров вышли из строя блоки интерфейса, восстановить которые не удалось. В 2013 г. был приобретен новый, надежный и значительно более дешевый сканер Epson Expression 11000XL, в результате сканирование фототеки было продолжено с разрешением 2400 dpi.

Важнейшей частью фототеки являются 22300 прямых снимков звездного неба, полученных при помощи 40-сантиметрового астрографа ГАИШ в Симеизе, пос. Кучино под Москвой и пос. Научный (Крым), где телескоп эксплуатировался с 1958 г. Телескоп был получен в 1945 г. по репарациям из Германии. Его фокусное расстоя-

ние составляет 160 см; на пластинках формата 30×30 см получается изображение звездного поля размером $10^\circ \times 10^\circ$ (со значительными проявлениями комы в углах пластинки). Снимки хорошо воспроизводят фотометрическую полосу B , предельная звездная величина на снимках с характерной экспозицией 45 минут составляла в 1970-е гг. около 17.5 и постепенно ухудшалась к 1990-м гг. Важнейшая задача, для которой предназначалась эта часть московской фототеки — поиск новых переменных звезд и их исследование. Проводилось, как правило, фотографирование избранных площадок, для которых в удачных случаях в фототеке хранится 300–500 негативов (если площадки пересекаются, иногда удается найти исследуемую звезду на 700 и более снимках).

Чтобы не допустить задержки получения научных результатов на долгие годы, до полного окончания сканирования всей фототеки, было принято решение, просканировав все пластинки какого-либо поля, немедленно использовать сканы для поиска и исследования переменных звезд. Для этого используется программное обеспечение VaST [5].

В качестве временного обозначения переменных звезд, выявляемых по нашей программе, введены номера с префиксом MDV (Moscow Digital Variable). По состоянию на май 2018 г. звездам присвоены номера MDV 1 – MDV 870. Из их числа в трех Списках обозначений переменных звезд [6, 7, 8] постоянные имена в системе Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ) уже получили 511 звезд. Номера MDV 1 – MDV 38 соответствуют нашим первым экспериментам, когда мы сканировали небольшие участки пластинок. Список этих переменных приведен в [9]. Там же приводятся результаты поиска и исследования переменных звезд в поле с центральной звездой 66 Змееносца ($18^{\text{h}}00.3^{\text{m}}$, $+04^\circ 22'$, J2000.0). Результаты для поля SA9 ($03^{\text{h}}11.5^{\text{m}}$, $+60^\circ 38'$, J2000.0) опубликовали Sokolovsky et al. [10]. Сведения о 275 переменных звездах, открытых и изученных в поле 104 Геркулеса ($18^{\text{h}}11.9^{\text{m}}$, $+31^\circ 24'$, J2000.0), приводятся в работе Antipin et al. [11]. Здесь даны также результаты сравнения классификации новых переменных звезд по фотографическим фотометрическим данным, выполненной традиционным (экспертным) способом, с автоматической классификацией на основе самообучающегося алгоритма.

В настоящее время обнаружены и исследуются около 1000 новых переменных звезд в полях β Кассиопеи ($00^{\text{h}}09.2^{\text{m}}$, $+59^\circ 09'$, J2000.0) и 61 Лебеда ($21^{\text{h}}06.9^{\text{m}}$, $+38^\circ 45'$, J2000.0). Специфической трудностью в случае поля β Кассиопеи является высокая звездная плотность, вызывающая блендирование и затруднения с идентификацией конкретного

компонента, меняющего блеск. В последние годы программа VaST заметно усовершенствована, что позволяет открыть и исследовать еще несколько десятков переменных звезд в ранее изученных полях.

Некоторые результаты программы открытия и исследования переменных звезд, основанной на сканах московской фототеки, включая кривые блеска, доступны в Интернете¹.

3. Статистика переменных звезд, открытых по программе сканирования

Последнее из полей, для которых мы опубликовали результаты поиска и исследования переменных звезд по сканам [11] — это поле 104 Геркулеса на умеренной галактической широте ($b = 22^\circ$). Среди обнаруженных в нем 275 новых переменных звезд наиболее широко представлены затменные двойные (149 звезд). Весьма много также переменных типа RR Лиры (70). Представлены также красные неправильные и полуправильные звезды, цефеиды II типа. В выборке есть красивая переменная типа RV Тельца, не опознанная при попытке автоматической классификации, поскольку подобные объекты отсутствовали в обучающей выборке.

Продолжена ранее замеченная нами [9] тенденция повышенного, по сравнению с ожидаемым, количества выявляемых звезд типа HADS, то есть звезд типа δ Щита с амплитудой (peak-to-peak) не менее 0.2^m . Следует иметь в виду, что здесь мы не различаем звезды типа δ Щита населения I и звезды типа SX Феникса, относящиеся к населению II. Четкое разделение этих типов вызывает проблемы [12]. Всего, с учетом классификационных трудностей, в трех полях (66 Oph, SA9, 104 Her) суммарной площадью 300 квадратных градусов (0.73% площади небесной сферы) оказалось от 18 до 21 звезд типа HADS, что приводит к минимальной оценке 2500–3000 звезд этого типа для всего неба. На данный момент электронная версия ОКПЗ содержит всего 212 звезд типа HADS. По-видимому, неполное выявление таких переменных в старых работах связано с трудностями определения их коротких периодов без использования компьютеров.

Мы отметили также [9], что распределение по периодам 157 затменных звезд в поле 66 Oph заметно смещено в сторону коротких периодов по сравнению с ОКПЗ. Сейчас мы можем проверить этот результат по заметно расширенной выборке в трех полях (см. выше). Всего в них нами было открыто 370 затменных (78 типа EA, 87 типа

¹<http://www.sai.msu.su/gcvs/digit/digit.html>

Таблица 1. Распределение затменных переменных звезд по периодам в выборках MDV и ОКПЗ

P , сут	EA		EB		EW		
	N	%	N	%	N	%	
0.2–0.4	—	—	0.4	7	8.1, 1.7	121	59.0, 47.8
0.4–0.6	2	2.6,	1.5	35	40.2, 15.4	75	36.6, 30.9
0.6–0.8	9	11.5,	3.8	21	24.1, 17.8	6	2.9, 14.0
0.8–1.0	12	15.4,	4.9	10	11.5, 13.4	3	1.5, 5.5
> 1.0	55	70.5,	89.1	14	16.1, 51.7		

EB и 205 типа EW). Их распределение по периодам, в сопоставлении с версией ОКПЗ 2010 г. (для облегчения сравнения с [9]), представлено в таблице. Оно в выборке MDV по-прежнему заметно смещено в сторону более коротких периодов по сравнению с выборкой ОКПЗ. Причины такого смещения могут быть теми же, что и причины избыточного количества звезд типа HADS в выборке MDV.

4. Заключение

Мы предполагаем проверить необычные особенности распределения затменных переменных звезд по периодам, а также повышенное число открываемых звезд типа HADS, по данным завершающегося исследования переменных, открытых в полях β Cas и 61 Cyg.

Список литературы

1. S. Shugarov, S. Antipin, N. Samus, and T. Danilkina, *Acta Hist. Astron.*, **6**, 81, 1999.
2. N. N. Samus, L. A. Sat, S. V. Vereshchagin, and A. V. Zharova, in M. Tsvetkov, V. Golev, F. Murtagh, and R. Molina, eds., *Virtual Observatory: Plate Content Digitization, Archive Mining and Image Sequence Processing*, 103–108 (2006).
3. J. Grindlay, S. Tang, R. Simcoe, S. Laycock, E. Los, D. Mink, A. Doane, and G. Champine, in W. Osborn and L. Robbins, eds., *Preserving Astronomy's Photographic Legacy: Current State and the Future of North American Astronomical Plates*, *ASP Conf. Ser.*, volume 410, 101 (2009).
4. S. V. Vereshchagin and N. V. Chupina, in *Astroplate 2014*, 119 (2014).
5. K. V. Sokolovsky and A. A. Lebedev, *Astronomy and Computing*, **22**, 28, 2018.

6. E. V. Kazarovets, N. N. Samus, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *IBVS*, **6008**, 2011.
7. E. V. Kazarovets, N. N. Samus, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *IBVS*, **6052**, 2013.
8. E. V. Kazarovets, N. N. Samus, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *IBVS*, **6155**, 2015.
9. D. M. Kolesnikova, L. A. Sat, K. V. Sokolovsky, S. V. Antipin, A. A. Belinskii, and N. N. Samus', *Astron. Rep.*, **54**, 1000, 2010.
10. K. V. Sokolovsky, S. V. Antipin, A. M. Zubareva, D. M. Kolesnikova, A. A. Lebedev, N. N. Samus', and L. A. Sat, *Astron. Rep.*, **58**, 319, 2014.
11. S. V. Antipin, I. Becker, A. A. Belinski, D. M. Kolesnikova, et al., *ArXiv e-prints*, 2018.
12. L. A. Balona, *MNRAS*, **459**, 1097, 2016.

Метод калибровки спектров по длинам волн с помощью базы данных VALD

Пахомов Ю.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Представлен метод идентификации спектральных линий в спектрах ламп полого катода при ограниченной точности предварительной калибровки по длинам волн. Метод основан на статистическом рассмотрении множества возможных спектральных линий различных химических элементов из базы данных VALD в окрестностях спектральных линий лампы. Применение метода, значительно улучшающего точность калибровки, показано на примере спектров двух ламп.

Method of spectral wavelength calibration using the VALD database

Pakhomov Yu.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

A method for identifying spectral lines in the spectra of hollow cathode lamps with limited accuracy of preliminary wavelength calibration is presented. The method is based on a statistical analysis of the set of possible spectral lines of various chemical elements from the VALD database in the vicinity of the lamp spectral lines. The application of the method, which significantly improves the calibration accuracy, is illustrated using the spectra of two lamps.

1. Введение

Спектральный анализ — мощнейший инструмент современной науки. Физические условия в атмосфере звезды, поле скоростей и атомные параметры определяют вид наблюдаемых спектров — профили и положения линий. Для правильной интерпретации спектральных данных необходима правильная идентификация линий, что достигается в процедуре калибровки по длинам волн на основе дополнительных наблюдений (на этом же приборе, в это же время) спектров источников с известными реперными линиями. Таким источником является лампа с полым катодом. Лампа наполнена инертным газом (например, гелием, неоном, аргоном) или их смесью под низким давлением, а катод покрыт тонким слоем металла. При подаче напряжения в лампе возникает тлеющий разряд, и возбужденные атомы газа выбивают

атомы металла из катода и передают им энергию через соударения. Возвращаясь в исходное состояние, атомы металла и газа излучают фотоны соответствующих длин волн. Зная их значения, можно определить дисперсионную кривую $\lambda(x)$ — зависимость длины волны от положения на приемнике излучения.

Использование калибровочных ламп подразумевает, что реперные линии идентифицированы и их длины волн известны. Хотя положения линий постоянны, их интенсивность может сильно меняться в зависимости от температуры тлеющего разряда, давления газа, напряжения электрического тока и срока службы лампы (напыление катода постепенно выгорает). По этой причине не существует двух ламп с одинаковыми спектрами, да и со временем спектр одной лампы меняется, что делает идентификацию линий и калибровку по длинам волн весьма трудоемкими процедурами. Кроме того, иногда используются лампы с материалом катода, где присутствуют примеси, либо этот материал вообще неизвестен [1, 2]. Вследствие этого в спектре появляются неизвестные линии, и калибровка длин волн может быть затруднена или невозможна, особенно при использовании эшелле-спектров, представляющих собой набор десятков отдельных спектров, в которых просто могут отсутствовать привычные реперные линии. В такой ситуации единственным выходом является идентификация неизвестных линий и включение значений их длин волн в список для построения дисперсионной кривой. В классическом случае для идентификации спектральных линий требуется спектр сравнения либо точная шкала длин волн. Но в астрономических наблюдениях второй спектр сравнения не получают, а точной шкалы длин волн нет; есть только грубое приближение, основанное на спектрах объектов или на известных немногочисленных линиях инертных газов лампы.

Предлагаемый в данной работе метод позволяет решить эту проблему и выполнить качественную калибровку спектров по длинам волн.

2. Описание метода

Метод идентификации линий в спектре с предварительной грубой шкалой длин волн основан на статистическом анализе спектральных линий в окрестностях измеренных линий неизвестного элемента. Список возможных линий различных химических элементов выбирается из базы данных VALD [3]. Так как температура разряда не превышает

ет нескольких тысяч градусов, логично выбирать линии только нейтральных и однократно ионизованных атомов.

Предварительная шкала длин волн обладает малой точностью. Например, при спектральном разрешении $R = 60000$ обычная точность дисперсионной кривой составляет $0.002\text{--}0.005 \text{ \AA}$, тогда как калибровка по единичным известным линиям в эшелле-спектре дает точность на порядок меньше, около 0.05 \AA . Рассмотрим около каждой линии неизвестного элемента в два раза большую область длин волн — $\Delta\lambda = 0.10 \text{ \AA}$ в выбранном списке VALD. Будем далее ее называть областью обнаружения. Поскольку эта величина больше средней ошибки шкалы длин волн, то в каждой рассматриваемой области находится линия искомого элемента, а всего в спектре $N_{\Delta\lambda}$ линий. При уменьшении размеров области обнаружения в два раза количество линий искомого элемента останется прежним или слегка уменьшится из-за ошибок калибровки и того факта, что в одной области могут оказаться несколько линий одного элемента, тогда как количество линий других элементов из списка VALD уменьшится примерно в два раза (т.е. величина $N_{\Delta\lambda}/\Delta\lambda \approx \text{const}$), вследствие почти равномерного распределения спектральных линий по длинам волн. Это свойство можно использовать при анализе относительного изменения $N_{\Delta\lambda_2}/N_{\Delta\lambda_1}$, которое будет близко к значению $\Delta\lambda_2/\Delta\lambda_1 = 1/2$ для элементов, отсутствующих в газе калибровочной лампы, и больше этого значения для элементов, чьи линии, действительно, присутствуют в спектре.

Правильность идентификации элемента проверяется путем анализа относительных интенсивностей линий, которые зависят от атомных параметров:

$$I \propto \frac{gf}{\lambda^3} e^{(-E_{\text{ур}}/kT)}, \quad (1)$$

где g — статистический вес верхнего уровня, f — сила осциллятора перехода, λ — длина волны спектральной линии, $E_{\text{ур}}$ — энергия возбуждения верхнего уровня, k — постоянная Больцмана и T — температура газа. Зависимость (1) строго выполняется при локальном термодинамическом равновесии, которое отсутствует в лампах полого катода, но ее можно использовать как первое приближение и записать в линейном виде, удобном для аппроксимации данных:

$$\lg \frac{gf}{I\lambda^3} = a + bE_{\text{ур}},$$

где a — константа, определяющая нуль-пункт в шкале сил осцилляторов рассматриваемого элемента, и $b = 5040/T$. Для линий других

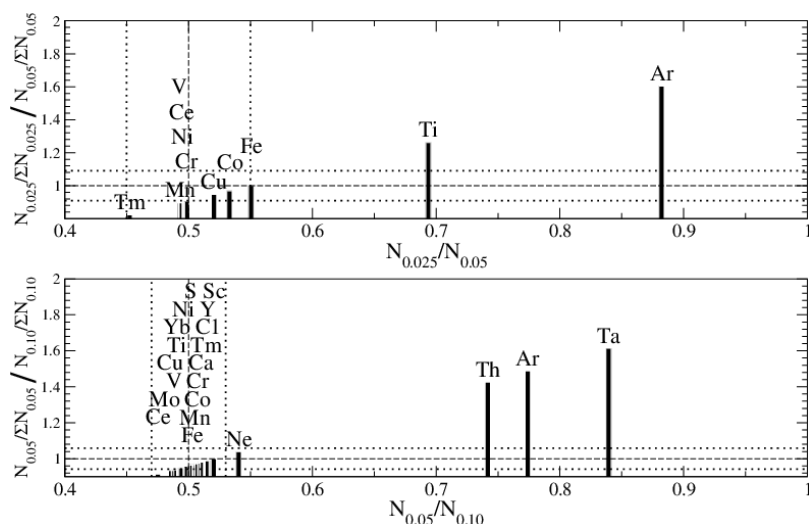


Рис. 1. Относительное изменение доли обнаруженных элементов в зависимости от относительного изменения их количества при уменьшении области обнаружения в два раза. Пунктиром отмечены средние величины с ошибками для элементов, отсутствующих в калибровочной лампе. Вверху: данные для лампы LICK-NCL-002. Внизу: данные для лампы ThAr02.

элементов, составляющих материал катода и газа в лампе, аналогичная зависимость должна иметь тот же самый наклон, т.е. близкое значение b .

Зная состав калибровочной лампы и температуру дуги, можно вычислить интенсивность всех линий данного элемента:

$$I = \frac{gf}{\lambda^3} 10^{a+bE_{ур}}$$

и выбрать из базы данных VALD лишь те из них, которые могут наблюдаться в спектре, т.е. с $I > I_{\min}$, где I_{\min} — минимальная регистрируемая интенсивность. Полученный список линий готов для использования в процедуре калибровки по длинам волн.

3. Применение метода

Работу метода рассмотрим на примере двух ламп, использовавшихся при калибровке спектрографа Hamilton, установленного на 3-метровом

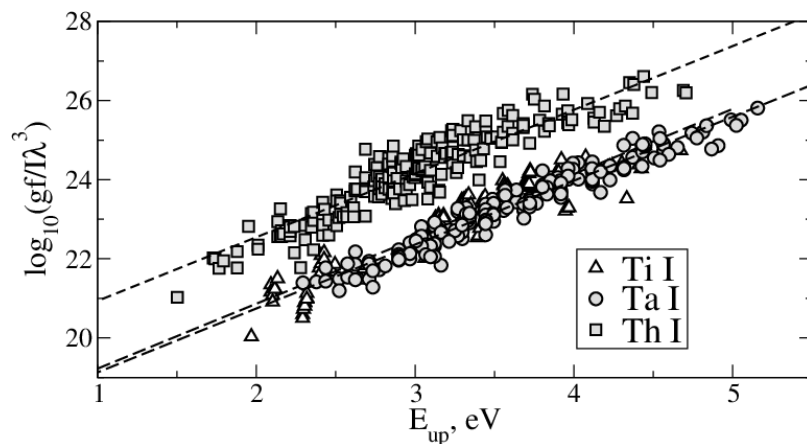


Рис. 2. Проверка идентифицированных спектральных линий на соответствие соотношению (1).

телескопе Shane Ликской обсерватории (США). Первая лампа — S&J Juniper & Co (Serial No. 531495) с условным обозначением LICK-HCL-002 работала в 2012 г., вторая — S&J Vox, Westinghouse WL23418, условное обозначение ThAr02 использовалась в 2011 г. Обе лампы позиционировались как стандартные ThAr. Однако в спектре первой лампы отсутствовали линии тория и присутствовали неизвестные линии [1], а в спектре второй лампы помимо линий тория и аргона были видны и другие, отсутствующие в стандартных списках линий ThAr ламп [2]. На рис. 1 показано изменение доли количества линий обнаруженных элементов в зависимости от относительного изменения их количества при уменьшении области обнаружения в два раза (вверху с 0.05 \AA до 0.025 \AA , внизу с 0.1 \AA до 0.05 \AA). Видно, что для большинства элементов относительное количество линий также упало в два раза, они группируются около значения 0.5 с некоторым статистическим разбросом, а их доля осталась прежней. На значительном отдалении располагаются элементы, которым принадлежат линии, обнаруженные в спектре лампы, и их доля значительно возросла. Первая лампа, в действительности, имеет титановое напыление на катоде и заполнена аргоном, торий отсутствует. Вторая лампа также содержит аргон, а на катод напылена смесь тантала и тория.

Для проверки правильности идентификации построена зависимость величины $\lg \frac{gf}{T\lambda^3}$ от энергии верхнего уровня E_{up} (рис. 2), которая хорошо аппроксимируется линейной функцией. Наклон прямой определяет температуру, которая для первой лампы составила $T = 5040/b = 3200 \pm 150$ К по линиям Ti 1, а для второй $T = 3120 \pm 60$ К и 3130 ± 90 К по линиям Ta 1 и Th 1, соответственно. Согласие температур в пределах ошибок подтверждает правильность отождествления неизвестных линий.

Точность окончательной калибровки по спектру первой лампы с использованием списка линий титана повысилась до 0.002–0.006 Å, а по спектру второй лампы с использованием списка линий тантала до 0.005–0.006 Å (точность меньше из-за эффекта сверхтонкого расщепления).

Работа подготовлена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №28.

Список литературы

1. Y. V. Pakhomov and G. Zhao, *Astron. Journal*, **146**, 97, 2013.
2. Y. V. Pakhomov, *Astron. Rep.*, **59**, 952, 2015.
3. T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, H. C. Stempels, U. Heiter, Y. Pakhomov, and P. S. Barklem, *Physica Scripta*, **90**, 054005, 2015.

База данных двойных звезд BDB

Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Кайгородов П.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Представлено описание базы данных двойных звезд (Binary star DataBase, BDB), поддерживаемой и развиваемой в Институте астрономии РАН. Целью создания BDB является объединение информации из множества разнородных каталогов двойных и кратных звезд, а также разработка удобного инструмента для работы с данными каталогов. Рассматриваются основные проблемы, возникшие в процессе реализации BDB, методики извлечения информации из исходных каталогов, а также методы кросс-идентификации объектов. BDB доступна по адресу <http://bdb.inasan.ru>.

Binary star DataBase, BDB

Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Kaygorodov P.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We describe the Binary star DataBase, BDB, being developed and supported in the Institute of Astronomy of the RAS. The purpose of BDB creation was to join data of many diverse catalogues of binary and multiple stars, and development of an instrument for work with these data. We consider main problems in the course of BDB implementation, obtaining data from source catalogues, and methods of cross-identification of the objects. BDB is available at <http://bdb.inasan.ru>.

1. Введение

Данные, относящиеся к предметной области двойных и кратных звезд, выделяются в пространстве астрономических данных своей неоднородностью, разнообразием и сложностью для организации автоматической обработки. Это связано с тем, что двойные наблюдаются с помощью разнообразных методик, каждая из которых создает свою выборку объектов (*наблюдательных типов* двойных звезд [1]) и данных о них. Существует множество ресурсов данных, каждый из которых ориентирован на определенный наблюдательный тип двойных (например, затменные двойные, визуальные двойные, спектрально-двойные, и пр.) Данные при этом могут относиться и к паре в целом, и к компонентам по отдельности, и к характеристикам их взаимного расположения и движения. Использование кросс-идентификаторов для определения соответствий между данными и объектами внутри

двойной звезды часто оказывается ненадежным инструментом, в силу фотометрической неразрешенности или позиционной близости объектов, а также противоречий в источниках данных.

Все эти факторы создают трудности и для исследования отдельных объектов, и для совокупного анализа данных об ансамбле двойных и кратных звезд, свойства которого играют важную роль в ключевых астрофизических процессах, таких как звездообразование, эволюция звезд и Галактики, и др.

2. BDB: база данных о двойных и кратных звездах

Целью создания базы данных Binary star DataBase¹ было объединение данных всех каталогов двойных и кратных звезд, для обеспечения пользователям возможности работы с полным массивом данных [2, 3]. Это потребовало разработки модели данных для двойных и кратных звезд [4], включающей в себя три категории объектов (сущностей), Системы, Пары и Компоненты. Такая структура позволяет более корректно устанавливать связи между данными и объектами, к которым они относятся. Для решения проблемы кросс-идентификации объектов в двойных и кратных звездах, был разработан и создается каталог идентификаторов двойных и кратных звезд ILB (Identification List of Binaries) [5]. В рамках этого каталога каждой сущности в двойных и кратных звездах должен быть присвоен уникальный идентификатор, в соответствии с разработанной схемой идентификации BSDb [6], которому ищутся соответствия среди идентификаторов в каталогах и сопоставляются данные. В текущей (v3.0) версии базы данных ILB служит ее индекс-каталогом.

Все данные и метаданные включаемых в BDB каталогов хранятся в базе данных неизменными и представляются пользователю как есть. Одновременно, по ряду полей производится индексация для обеспечения возможности поиска по параметрам.

BDB реализована на языке Python с использованием фреймворка Nagare и Elixir — декларативной надстройки над ORM SQLAlchemy, в качестве СУБД используется PostgreSQL. Для онлайн-запросов к внешним сервисам используется модуль ZSI, реализующий протокол SOAP. BDB состоит из двух частей — web-приложения, обеспечивающего взаимодействие с пользователем, и демона, производящего обработку данных при импорте каталогов. Взаимодействие между этими частями происходит через систему обмена данными memcache. В свою

¹<http://bdb.inasan.ru>

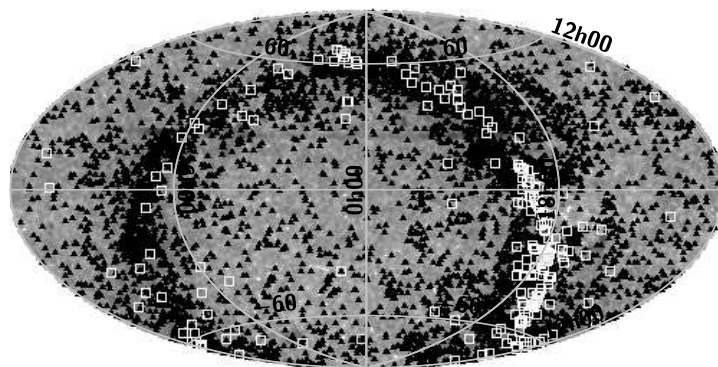


Рис. 1. Распределение двойных звезд некоторых наблюдательных типов из BDB на небесной сфере: бледно-серые точки — визуально-двойные; черные треугольники — затменно-двойные; белые квадраты — рентгеновские двойные. Наибольшее число звезд тяготеет к плоскости Галактики; особенно эта концентрация заметна для относительно немногочисленных рентгеновских двойных.

очередь, web-приложение делится на административную и пользовательскую части. Административная часть предназначена для добавления и удаления каталогов, создания и изменения правил их импорта, а также для настройки некоторых параметров BDB. Пользовательская часть служит для поиска и отображения информации, содержащейся в BDB.

На запрос о любом объекте в составе двойной или кратной системы (это может быть система в целом, пара или компонент) пользователь BDB получает список идентификаторов и «связанных» объектов (и относящихся к ним данных). При этом соответствующая двойная или кратная звезда одновременно визуализируется при помощи схемы расположения компонентов, нанесенной на фон Google Sky². Это позволяет при необходимости уточнить взаимное расположение компонентов. Просмотрев список данных, имеющихся в каталогах для запрошенной звезды, пользователь может перейти непосредственно к посвященным ей записям в оригинальных каталогах.

3. Проблемы и развитие BDB

Основной целью BDB остается оптимизация доступа пользователей к данным. Для достижения этой цели работа ведется по нескольким направлениям.

В частности, важной проблемой является сложность кросс-идентификации сущностей в кратных звездах. Для достижения корректного результата используется многопараметрическая процедура идентификации с привлечением доступных данных из каталогов для каждого объекта. Используются также базовые данные о структуре кратных систем, получаемые из текстовых комментариев к некоторым из крупнейших каталогов.

Постоянно ведется работа по включению новых каталогов в структуру базы данных BDB. Наиболее представительные («базовые» [7]) каталоги для всех наблюдательных типов двойных звезд уже интегрированы в BDB, и мы работаем сейчас над включением важных каталогов для специфических классов объектов, таких как переменные двойные звезды, и каталогов, содержащих данные о физических параметрах звезд: массах, светимостях, радиусах, и пр. [3, 8].

В настоящее время в базовой версии BDB доступны пользователю поиск по широкому набору идентификаторов (включая WDS, ADS, ОКПЗ, DM, HD, HIP, и др.) и поиск по параметрам (включая наблюдательный тип; эволюционный класс системы — разделенная, полуразделенная, контактная; координаты системы, угловое разделение между компонентами, большая полуось, орбитальный период, отношение масс, блески компонентов, параллакс системы, и др.). Подготавливается вывод режима пакетных запросов из тестовой в пользовательскую версию базы данных.

Устанавливаются связи BDB с внешними онлайн-ресурсами астрономических данных — SIMBAD³, ASAS variable stars⁴, OGLE variable stars⁵, VizieR⁶, ADS⁷ и некоторыми другими.

На рис. 1 отображается расположение части звезд из BDB на небесной сфере, значками выделены двойные некоторых наблюдательных типов (визуально-двойных, затменно-двойных и рентгеновских двойных).

²<http://www.google.com/sky/>

³<http://simbad.u-strasbg.fr>

⁴<http://www.astrouw.edu.pl/asas/?page=acvs>

⁵<http://ogledb.astrouw.edu.pl/~ogle/OCVS/>

⁶<http://vizier.u-strasbg.fr/>

⁷<http://adsabs.harvard.edu/>

На момент написания этой статьи BDB содержит данные о сущностях в рамках 122628 двойных и кратных систем. Этим сущностям соответствуют 542130 уникальных идентификаторов BSDB. Каждой двойной звезде сопоставлены четыре сущности (система, пара, два компонента), кратные системы содержат большее их число. Одновременно 54 таблицы из 35 каталогов содержат 5435966 строк с данными, относящимися к этим сущностям.

4. Заключение

База данных двойных и кратных звезд BDB создана (в сотрудничестве с Безансонской обсерваторией), развивается и поддерживается в ИНАСАН для повышения эффективности доступа пользователей к данным о таких объектах. Развитие BDB происходит в нескольких направлениях одновременно: повышение корректности связей данных с объектами, наполнение базы каталогами, развитие и введение в действие новых пользовательских сервисов.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 16-07-1162).

Список литературы

1. O. Malkov, D. Kovaleva, and P. Kaygorodov, in Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin, eds., *Stars: From Collapse to Collapse*, *ASP Conf. Ser.*, volume 510, 360 (2017).
2. D. Kovaleva, P. Kaygorodov, O. Malkov, B. Debray, and E. Oblak, *Astronomy and Computing*, **11**, 119, 2015.
3. P. Kaygorodov, B. Debray, N. Kolesnikov, D. Kovaleva, and O. Malkov, *Balt. Astron.*, **21**, 309, 2012.
4. N. A. Skvortsov, E. A. Avvakumova, D. O. Bryukhov, A. E. Vovchenko, et al., *Astron. Bull.*, **71**, 114, 2016.
5. O. Malkov, A. Karchevsky, P. Kaygorodov, and D. Kovaleva, *Balt. Astron.*, **25**, 49, 2016.
6. D. A. Kovaleva, O. Y. Malkov, P. V. Kaygorodov, A. V. Karchevsky, and N. N. Samus, *Balt. Astron.*, **24**, 185, 2015.
7. D. Kovaleva, *Balt. Astron.*, **24**, 446, 2015.
8. O. Malkov, E. Oblak, and B. Debray, in J. A. Docobo, V. S. Tamazian, and Y. Y. Balega, eds., *AIP Conf. Ser.*, *AIP Conf. Ser.*, volume 1346, 134–141 (2011).

Определение спектрального типа звезд по WBVR фотометрии

Сичевский С.Г.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Одним из актуальных направлений в астрофизических исследованиях является разработка и применение способов интеллектуального анализа и извлечения информации из обзоров неба разных диапазонов, в частности извлечение информации о характеристиках звезд. В работе рассмотрен способ определения спектрального типа звезды по ее широкополосной фотометрии, а именно по WBVR-фотометрии.

Spectral type determination by WBVR photometry

Sichevsky S.G.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The development and application of new methods for intelligent analysis and extraction of information from sky surveys carried out in various spectral domains have now become a popular field in astrophysical research and, in particular, in stellar studies. The method for determining spectral types of stars from broadband WBVR-photometry is described.

1. Введение

Существенную информацию об атмосфере звезды получают из анализа ее спектральных линий. Однако, чтобы получить спектр с достаточно высокой дисперсией и точностью, звезда должна быть яркой или нужно использовать телескоп с большой апертурой. Зная как меняется спектр звезды при изменении ее атмосферных характеристик и выделяя участки наиболее чувствительные к изменениям определенных характеристик, были разработаны альтернативные способы, использующие фотометрию. Анализ фотометрии осложняется наличием межзвездной среды, которая ослабляет свет звезд и искажает распределение энергии в их спектре. Следовательно, определение характеристик звезд и межзвездного поглощения — задачи взаимосвязанные и сопутствующие друг другу.

Одним из способов определения температуры и углового размера звезды является метод инфракрасных потоков [1, 2]. Этот метод известен не одно десятилетие и обладает важными особенностями. Он

слабо чувствителен к межзвездному поглощению. В силу того, что эффект бланкетирования слабо выражен в инфракрасной области, он также слабо чувствителен к таким параметрам модели атмосферы звезды, как химический состав и поверхностное ускорение. Иной способ оценки температуры — использование калибровок. Опубликованы различные калибровки, которые позволяют оценить температуру по показателю цвета [3, 4, 5, 6]. Однако использовать подобные калибровки нужно с осторожностью из-за влияния межзвездного поглощения на показатель цвета. Обычно подобные калибровки относятся либо к карликам, либо к гигантам, что осложняет их применение.

Интерес представляют исследования звезд по их широкополосным фотометрическим наблюдениям, так как современные фотометрические каталоги предоставляют результаты наблюдений миллионов объектов и неявным образом содержат информацию о характеристиках звезд и межзвездной среды. Настоящая работа посвящена исследованию применимости широкополосной многоцветной WBVR-фотометрии для определения спектрального типа звезд.

2. Определение спектрального типа звезды

В отсутствие межзвездного поглощения наблюдаемый блеск m_i звезды в i -й полосе с кривой реакции S_λ^i определяется выражением:

$$m_i = -2.5 \lg \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_\lambda S_\lambda^i \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_\lambda^0 S_\lambda^i \lambda d\lambda} + m_0^i, \quad (1)$$

где E_λ — освещенность от звезды в месте ее наблюдения, E_λ^0 — освещенность от стандартного источника, а m_0^i — нуль-пункт, равный наблюдаемому в i -й полосе блеску стандартного источника.

Согласно Карделли [7], значения монохроматического межзвездного поглощения A_λ можно выразить следующим образом:

$$A_\lambda = A_0 \left(a_\lambda + \frac{b_\lambda}{R_0} \right), \quad (2)$$

где a_λ и b_λ — известные коэффициенты, зависящие только от λ , а A_0 и R_0 — свободные параметры, которые не зависят от λ . Расчеты показывают, что величина R_0 — отношение полного поглощения A_V к избытку цвета $E(B - V)$ — пропорциональна размеру пылинок, а величина A_0 характеризует степень непрозрачности среды для проходящего сквозь нее излучения.

Используя соотношения (1) и (2), получим, что наблюдаемый блеск m_i звезды с учетом межзвездного поглощения определяется выражением:

$$m_i = -2.5 \lg \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_{\lambda} S_{\lambda}^i 10^{-0.4A_{\lambda}} \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_{\lambda}^0 S_{\lambda}^i \lambda d\lambda} + m_0^i. \quad (3)$$

Для определения спектрального типа звезды был выбран способ, основанный на методе наименьших квадратов, но без использования численных методов оптимизации. Решение, которое наилучшим образом соответствует наблюдаемым значениям WBVR-фотометрии, выбирается из множества предварительно вычисленных теоретических значений фотометрии, соответствующих как звездам разных спектральных типов и классов светимости, так и разным значениям межзвездного поглощения. Для расчета, согласно (3), теоретических значений блеска в полосах WBVR использовалась эмпирическая библиотека Пиклса [8], которая в общей сложности содержит более 130 нормированных спектров. Из всего множества спектров в библиотеке было выбрано 75, соответствующих I, III и V классам светимости, солнечной металличности, для которых, согласно Страйжису [9], известны абсолютные звездные величины.

Надежность определения спектрального типа была проверена на выборке размером более 1500 звезд из «Bright Star Catalogue» [10]. Выборка включала звезды I, III и V классов светимости с известной спектральной классификацией и WBVR-фотометрией [11]. В соответствии с методом наименьших квадратов, для каждой звезды в выборке и для каждого из 75 спектров, выбранных из библиотеки Пиклса, определены такие значения расстояния и избытка цвета, которые минимизируют сумму квадратов невязок между наблюдаемой и расчетной WBVR-фотометрией. Далее, чтобы отбросить нереалистичные решения, использовалась фильтрация по избытку цвета, которая основана на статистическом методе Паренаго [12] учета поглощения света. Фильтрация заключается в том, что избыток цвета не должен отличаться больше, чем на 80% от величины, определенной по формуле Паренаго:

$$A(r, b) = \frac{\alpha_0 \beta}{|\sin(b)|} \left[1 - e^{-\frac{r |\sin(b)|}{\beta}} \right], \quad (4)$$

которая определяет поглощение $A(r, b)$ на всем луче зрения на галактической широте b до расстояния r . Также отбрасывались решения,

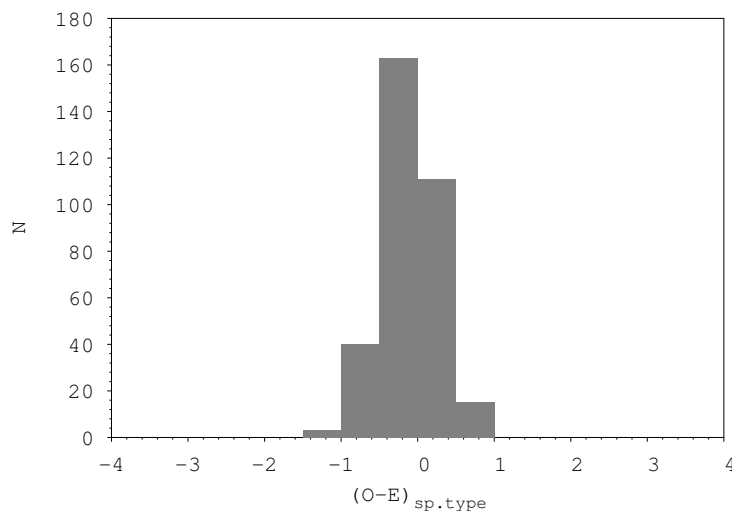


Рис. 1. Распределение разницы между исходными и определенными по WBVR-фотометрии спектральными типами.

для которых вычисленное расстояние заведомо не соответствовало размерам Галактики.

В результате для каждой звезды в выборке по WBVR фотометрии был определен ее спектральный тип и выполнено его прямое сравнение с исходным заранее известным значением, указанным в «Bright Star Catalogue». Распределение отклонений вычисленных спектральных типов от их исходных значений показано на рис. 1, на котором отклонение на один спектральный тип соответствует изменению на одну единицу по оси абсцисс. Видно, что надежность определения составляет около половины спектрального типа, а в большинстве случаев отклонение не превышает один спектральный тип. Дополнительно выполнена оценка надежности определения конкретного спектрального типа. С этой целью проанализированы спектральные типы звезд, которые по анализу их WBVR-фотометрии имеют один и тот же спектральный тип. Результат показан на рис. 2, на котором также показан какой процент от общего количества звезд конкретного спектрального типа «превратился» в другой спектральных тип. Например, если по WBVR-фотометрии определен спектральный тип F5, то это означало

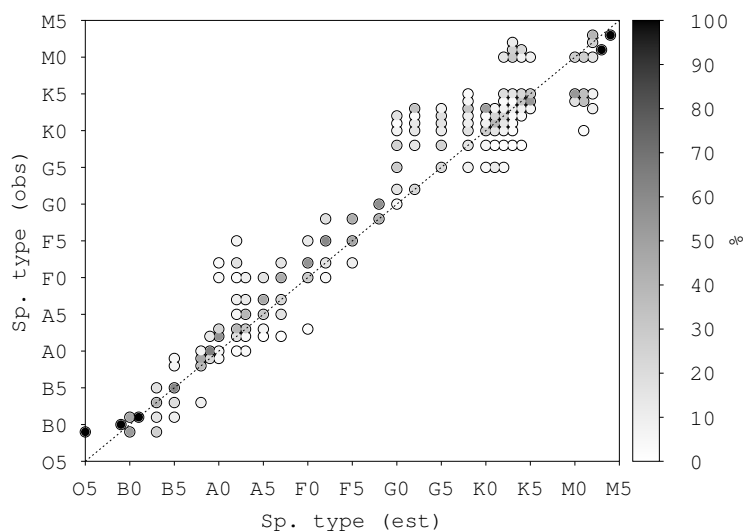


Рис. 2. Процент звезд конкретного спектрального типа (obs), которые «превратились» в другие спектральные типы (est). Чем темнее цвет, тем процент ближе к 100%.

следующее. В F5 «превратились» 47% звезд спектрального типа F5, около 43% F8-звезд и около 9% F2-звезд.

3. Заключение

В работе рассмотрен способ определения спектрального типа звезды на основе WBVR-фотометрии. Широкополосные фотометрические не оптимизированы для задачи определения характеристик звезд и межзвездного поглощения. Кроме того считается, что широкополосная фотометрия сама по себе плохо пригодна для проведения спектральной классификации фотометрическими методами. Тем не менее в работе показана возможность такой классификации и проверка на звездах с известными спектральными типами и WBVR-фотометрией показала, что в большинстве случаев возможно определить спектральный тип звезды без использования дополнительных данных о ее классе светимости и избытке цвета. При этом точность определения составляет около половины спектрального типа.

Автор выражает О.Ю. Малкову и А.В. Миронову искреннюю благодарность за ценные указания и замечания.

Список литературы

1. D. E. Blackwell, A. D. Petford, and M. J. Shallis, *A&A*, **82**, 249, 1980.
2. D. E. Blackwell, A. D. Petford, S. Arribas, D. J. Haddock, and M. J. Selby, *A&A*, **232**, 396, 1990.
3. A. Alonso, S. Arribas, and C. Martinez-Roger, *A&A*, **313**, 873, 1996.
4. T. Kinman and F. Castelli, *A&A*, **391**, 1039, 2002.
5. I. Ramírez and J. Meléndez, *ApJ*, **626**, 465, 2005.
6. J. I. González Hernández and P. Bonifacio, *A&A*, **497**, 497, 2009.
7. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *ApJ*, **345**, 245, 1989.
8. A. J. Pickles, *PASP*, **110**, 863, 1998.
9. V. Straižys, *Multicolor stellar photometry* (1992).
10. D. Hoffleit and W. H. Warren, Jr., *VizieR Online Data Catalog*, **5050**, 1995.
11. V. Kornilov, A. Mironov, and A. Zakharov, *Balt. Astron.*, **5**, 379, 1996.
12. P. Parenago, *Astron. Ah.*, **17**, 3, 1940.

Российская виртуальная обсерватория

Длужневская О.Б., Малков О.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье описана реализация международного астрономического проекта, который открывает новые горизонты и предоставляет новые возможности для решения научных задач. Основная цель Виртуальной обсерватории — предоставить удобный для пользователя доступ к астрономическим данным с любого компьютера.

Russian Virtual Observatory

Dluznevskaya O.B., Malkov O.Yu.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The article deals with the implementation of an international project in the field of astronomy, which offers us new opportunities to solve the scientific problems. The principal idea of the Virtual Observatory is to achieve real transparency for astronomical data and to make all the world's astronomical data available from one's desktop.

1. Введение

В последние десятилетия объем наблюдательных данных в астрономии лавинообразно увеличивается. Это привело к созданию ряда крупных коллекций и архивов астрономических данных, что потребовало, в свою очередь, разработки общего подхода к хранению, беспшовному объединению, распространению и использованию данных. Эту задачу решает Альянс «Международная виртуальная обсерватория» [1]. Российская виртуальная обсерватория (РВО) [2] является национальным членом Альянса, и ее основная цель — внесение вклада в международный проект, в частности, путем предоставления и улучшения доступа к астрономическим данным, предоставляемым российскими проектами и исследователями. С этой целью РВО регулярно проводит обзоры российских астрономических источников данных [3]. Цель настоящей статьи — предоставить краткую историю создания РВО (раздел 2) и описать современное состояние дел (раздел 3). Заключение представлено в разделе 4.

2. История создания Международной и Российской виртуальных обсерваторий

Учреждение Страсбургского центра звездных данных (CDS) в 1972 г. можно считать неофициальным первым этапом создания Международной виртуальной обсерватории. После визита одного из авторов (О.Д.) и А.А. Памятных в CDS в 1976 г. состоялся визит директора CDS проф. Карлоса Яшека в Москву.

С К. Яшеком в Москве было подписано соглашение о сотрудничестве, в котором Центр астрономических данных (ЦАД, отдел Астрономического совета АН СССР) получил статус регионального филиала CDS для СССР и социалистических стран. На основании этого соглашения ЦАД стал безвозмездно получать из Страсбурга имеющиеся в его фондах звездные каталоги, но трудность вхождения СССР в мировое компьютеризированное научное сообщество состояла в несовместимости используемых нами в то время ЭВМ с западными. Приходилось привозить из Страсбурга магнитные ленты с записью каталогов и перекодировать их для работы с нашими ЭВМ. Эти поездки, как правило, приурочивались к заседаниям Международного научного совета Страсбургского центра звездных данных, членом которого руководитель ЦАД, один из авторов (О.Д.) была в течение шести лет (два срока).

ЦАД был первой в Академии наук СССР организацией такого рода и исключительного значения для науки, поскольку теперь все астрономические учреждения нашей страны и стран социалистического содружества получили неограниченный и бесплатный доступ ко всем накопленным в мире астрономическим данным. Информация о создании и функционировании ЦАД была доведена до руководства АН СССР, и на заседании Президиума Академии был заслушан отчет руководителя ЦАД о деятельности Центра. Президент Академии придавал этой инициативе большое значение, и создание Центра астрономических данных на правах отдела Астросовета было документально оформлено на академическом уровне.

В 1984 г. ЦАД в сотрудничестве с коллегами из других астрономических учреждений СССР провел в Тбилиси первое международное совещание «Сбор данных, анализ, научные результаты», оказавшееся весьма представительным и прошедшее с большим успехом. В 1996 г. по инициативе ЦАД в рамках Комиссии 5 МАС в Пулковской обсерватории был проведен коллоквиум «Международное сотрудничество в распространении астрономических данных». В нем, в частности,

приняли участие президент Комиссии 5 МАС Бернард Хок (Швейцария), директор Страсбургского центра звездных данных Франсуаза Женова (Франция), директора других филиалов CDS: Джили Мид (Астрономический центр НАСА, США), Куоши Накаджима (Центр астрономических данных, Япония), директора и ведущие сотрудники астрономических учреждений СССР и зарубежных стран.

К концу 1990-х гг. был завершен совместный проект INTAS «Integration of the fSU observatories into international astronomical data network». Его участниками были CDS, OAT (Триест), ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ГАО (Пулково), ИТА, ГАО НАНУ (Киев), КраО, САО, Астрофизический институт (Алма-Ата). Кроме того, были выполнены некоторые совместные с французскими и итальянскими коллегами исследования в рамках планируемого проекта MASCOT. Примерно в то же время американские коллеги готовили проект создания Национальной виртуальной обсерватории, целью которого было объединение всех баз наблюдательных данных и других ресурсов США в единую систему. Таким образом, к XXIV Генеральной ассамблее МАС (Великобритания, Манчестер, 2000 г.) появились все предпосылки для создания Международной виртуальной обсерватории (МВО). Разработка МВО велась под эгидой Комиссии 5 МАС.

Очевидно, что Россия должна была войти в число соучредителей МВО. В противном случае могло случиться так, что у российских пользователей возникнут трудности с доступом к некоторым типам астрономических данных (которыми смогут пользоваться только члены МВО). После XXIV Генеральной ассамблеи МАС вопрос о создании Российской виртуальной обсерватории сначала обсуждался с руководством ИНАСАН, а затем (осенью 2001 г.) был поставлен на заседании Бюро Научного совета по астрономии. Было принято решение об организации проекта Российской виртуальной обсерватории (РВО), как национальной части МВО, и включении этого проекта в число важнейших международных проектов Российской академии наук. Руководство проектом было возложено на ИНАСАН. О создании проекта были извещены и приглашены к сотрудничеству все астрономические учреждения России.

Желание участвовать в разработке РВО изъявили САО РАН, ИПИ РАН и ГАИШ МГУ, позднее присоединилась ПРАО АКЦ ФИАН. В феврале 2002 г. в ИНАСАН было созвано совещание участников проекта, на котором была утверждена структура РВО, создан Совет РВО, распределены обязанности между институтами и назначены руководители структурных подразделений. Председателем совета РВО

была назначена один из авторов (О.Д.). ЦАД в настоящее время является членом Всемирной системы данных (World Data System, WDS) Международного совета по науке (International Council for Science, ICS).

В процессе организации работы МВО было принято решение создать Альянс МВО (IVOA, <http://www.ivoa.net>), в который в качестве членов вошли представители всех национальных частей МВО, число которых в настоящее время достигло 21. Представителем РВО в Альянсе является один из авторов (О.М.). Альянс МВО — административная организация, ответственная за разработку и внедрение стандартов обмена различными видами информации между сторонами — участниками соответствующих процессов. Дважды в год проводятся очные совещания Альянса (в 2008 г. очередное совещание проходило в Москве); кроме того, 4–5 раз в год проводятся телеконференции.

3. Российская виртуальная обсерватория сегодня

Актуальность создания РВО определялась в первую очередь тем, что с распадом СССР российская астрономия практически лишилась инструментальной базы — обсерваторий на юге СССР. Оптимальным выходом из сложившейся ситуации представлялась интеграция российского астрономического сообщества в мировую информационную сеть астрономических данных, прежде всего в западные наблюдательные архивы. Вклад РВО в объединение мировых астрономических ресурсов весьма значителен. В России действуют около 30 астрономических институтов и организаций, многие из которых располагают обширными архивами данных и сотрудничают в создании МВО.

Основные цели проекта РВО заключаются в предоставлении российскому астрономическому сообществу удобного и эффективного механизма доступа к зарубежным источникам данных и объединении российских астрономических информационных ресурсов как важного компонента для интеграции в МВО.

В течение 15 лет со времени начала создания РВО в этом направлении была проделана большая работа. В ИНАСАН размещен ряд зеркал известных зарубежных баз данных (ADS, VizieR, VALD) и поддерживается их функционирование, планируется также зеркалировать и другие популярные зарубежные астрономические информационные ресурсы. Разработана и установлена База данных двойных звезд (BDB, bdb.inasan.ru), содержащая сведения о физических и позиционных параметрах примерно 260 тыс. компонентов систем кратности от 2 до более чем 20 [4, 5]. Поддерживается функционирование

уникального источника данных о переменных звездах — Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ, www.sai.msu.ru/groups/cluster/gcvs/), содержащего проверенную информацию о более чем 52 тыс. надежно выявленных переменных [6]. Создан ряд каталогов двойных систем различных наблюдательных типов [7, 8, 9]. Продолжаются работы по кросс-отождествлению объектов в больших современных фотометрических обзорах [10, 11] и базирующейся на этом параметризации звезд и межзвездной среды [12, 13]

В Институте проблем информатики (ИПИ) РАН реализована архитектура промежуточного слоя предметных посредников для решения научных задач по множеству интегрируемых неоднородных распределенных информационных ресурсов в гибридной грид-инфраструктуре. Это сделано путем объединения системы поддержки виртуальных обсерваторий АстроГрид, разработанной в Великобритании, и средств поддержки предметных посредников, созданных в ИПИ РАН. Проблема эффективного комплексного использования нескольких астрономических ресурсов с помощью создания посредников, которые поддерживают взаимодействие между исследователем и соответствующими источниками данных и сервисов для данного класса задач, решалась в Специальной астрофизической обсерватории РАН. Основная цель проекта «Большое Трио» заключается в анализе источников радиоизлучения в области неба, исследованной в глубоком обзоре с телескопом РАТАН-600, для получения максимальной информации об источниках [14].

По тематике виртуальных обсерваторий было проведено большое количество совещаний, в том числе, в рамках Всероссийских астрономических конференций (ВАК) и конференций-съездов Астрономического общества. На совещаниях заслушивались доклады о выполненных в последнее время исследованиях, а также принимались решения, касающиеся организационной структуры РВО. Проект РВО является определяющим в работе секции 13 Научного совета по Астрономии РАН. Результаты деятельности по проекту РВО отражены на постоянно обновляющемся вебсайте РВО¹.

4. Заключение

В статье кратко описаны история создания и современное состояние дел Российской виртуальной обсерватории — члена Международной виртуальной обсерватории (МВО). На сегодняшний день инструмен-

¹<http://www.inasan.ru/organizational-activity/rvo/>

ты МВО достаточно эффективно применяются для получения передовых научных результатов с использованием многоволновых астрономических данных. Более 2400 публикаций, связанных с виртуальными обсерваториями, цитирует база данных ADS на середину 2018 г., около 400 из них опубликованы в рецензируемых журналах.

Мы благодарим наших коллег по проекту «Российская виртуальная обсерватория» за постоянную помощь и сотрудничество. Работа поддержана грантами РФФИ 16-07-01162 и 17-52-45076.

Список литературы

1. P. J. Quinn, D. G. Barnes, I. Csabai, C. Cui, et al., in P. J. Quinn and A. Bridger, eds., *Optimizing Scientific Return for Astronomy through Information Technologies, Proc. SPIE*, volume 5493, 137–145 (2004).
2. O. B. Dluzhnevskaya and O. Y. Malkov, *Astron. Rep.*, **49**, 1028, 2005.
3. O. Malkov, O. Dluzhnevskaya, E. Bakanas, E. Kilpio, et al., *Balt. Astron.*, **25**, 107, 2016.
4. P. Kaygorodov, B. Debray, N. Kolesnikov, D. Kovaleva, and O. Malkov, *Balt. Astron.*, **21**, 309, 2012.
5. D. Kovaleva, P. Kaygorodov, O. Malkov, B. Debray, and E. Oblak, *Astronomy and Computing*, **11**, 119, 2015.
6. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.
7. E. A. Avvakumova, O. Y. Malkov, and A. Y. Kniazev, *Astron. Nachr.*, **334**, 860, 2013.
8. A. A. Isaeva, D. A. Kovaleva, and O. Y. Malkov, *Balt. Astron.*, **24**, 157, 2015.
9. O. Y. Malkov, E. Oblak, E. A. Avvakumova, and J. Torra, *A&A*, **465**, 549, 2007.
10. O. Malkov, O. Dluzhnevskaya, S. Karpov, E. Kilpio, A. Kniazev, A. Mironov, and S. Sichevskij, *Balt. Astron.*, **21**, 319, 2012.
11. S. V. Karpov, O. Y. Malkov, and A. V. Mironov, *Astron. Bull.*, **67**, 82, 2012.
12. S. G. Sichevskiy, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astron. Nachr.*, **334**, 832, 2013.
13. S. G. Sichevskij, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astron. Bull.*, **69**, 160, 2014.
14. O. Zhelenkova, V. V. Vitkovskij, D. Briukhov, and L. A. Kalinichenko, in C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, and S. Enrique, eds., *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ASP Conf. Ser.*, volume 351, 244 (2006).

Каталог идентификаций двойных звезд ILB

Ковалева Д.А.¹, Карчевский А.В.², Скворцов Н.А.³, Малков О.Ю.¹

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Физический факультет МГУ, Москва, Россия*

³*ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия*

Задача перекрестной идентификации двойных звезд различных наблюдательных типов, а также обзоров неба нетривиальна и связана с разрешением разного рода конфликтов. Она требует не просто объединения списков существующих идентификаторов для конкретных звезд, а отождествления компонентов кратных систем по астрометрическим и астрофизическим параметрам для дальнейшего соотнесения идентификаторов определенным компонентам и друг другу. В данной статье описано создание каталога идентификаторов двойных звезд ILB, включающего процедуру перекрестного отождествления систем, их компонентов и пар всех наблюдательных типов.

Catalogue of identifications of binary stars, ILB

Kovaleva D.A.¹, Karchevsky A.V.², Skvortsov N.A.³, Malkov O.Yu.¹

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*Physical faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Moscow, Russia*

The problem of cross-identification of binary stars of different observational types as well as sky surveys is non-trivial and related to resolution of various kinds of conflicts. It requires not only combining lists of existing identifiers of specific stars, but matching components of multiple systems according to astrometric and astrophysical parameters for further referring of identifiers to matched components and to each other. This paper describes development of the Identification List of Binaries (ILB) including cross-matching of systems, their components and pairs of all observational types.

1. Введение

База данных о двойных звездах BDB (<http://bdb.inasan.ru>) создана как основная база данных о двойных и кратных системах всех наблюдательных типов [1, 2]. Основная цель BDB — обеспечить удобный для исследователей доступ к полной информации, содержащейся

в каталогах двойных звезд всех наблюдательных типов. BDB включает в себя информацию о позиционных и астрофизических характеристиках для более чем 120000 систем кратностью 2 и более, визуальных, интерферометрических, спектроскопических, затменных, рентгеновских, и др. BDB представляет собой результат систематической интеграции данных из десятков астрономических каталогов, обзоров и баз данных. Такая интеграция требует аккуратной кросс-идентификации объектов в разных источниках данных. Важная проблема, возникающая при извлечении информации из каталогов, состоит в том, что один объект может иметь несколько (иногда десятки) различных наименований. Для одиночных звезд проблема кросс-идентификации была в основном решена в Страсбургском Центре данных (<http://cds.u-strasbg.fr/>) еще в 1970-е гг., в рамках Каталога звездных идентификаций CSI [3], а затем — базы данных SIMBAD [4].

Кросс-идентификация двойных и кратных звездных систем представляет собой отдельную, значительно более сложную проблему. На ее решение нацелено создание и развитие каталога идентификаций двойных и кратных звезд, ILB (Identification List of Binaries) [5], которому посвящена настоящая статья.

2. Задачи, решаемые в ходе создания ILB

Для корректной кросс-идентификации и установления правильных связей между данными и объектами, к которым они относятся, необходимо различать, описываются ли в данном каталоге компоненты по отдельности или вместе. Так, например, для некоей тройной систем в каталоге I (астрометрическом) возможно представление компонентов A, B, C по отдельности; в каталоге II, содержащем информацию об орбитах, записи могут относиться к парам AB, AC, тогда как в каталоге III (фотометрическом, с более низким пространственным разрешением) система ABC может быть представлена как целое. Проблема тем более актуальна для перекрестного отождествления двойных звезд и кратных систем в каталогах различных наблюдательных типов. В связи с этим была разработана модель данных для предметной области двойных и кратных звезд [6], включающая три категории сущностей: Система, Пара и Компонент.

Оказалось, что опираться только на идентификаторы сущностей, приводимые в каталогах данных, недостаточно, в связи со значительным количеством разночтений и ошибок, в особенности для кратных систем сложной структуры. При создании ILB отождествление сущностей осуществляется с использованием всей доступной из каталогов

позиционной и астрофизической информации об объектах в системе. Разработан алгоритм отождествления многокомпонентных сущностей, позволяющий корректно соотносить данные различных наблюдений кратных звездных систем [7]. Результат его работы используется для разрешения конфликтов между идентификаторами разных систем идентификации.

Каталог ILB является мастер-каталогом для действующей версии базы данных BDB.

3. Система идентификации объектов в двойных и кратных звездах BSDB

Для создания уникальных идентификаторов сущностей в каталоге ILB (и, соответственно, в базе данных BDB), была разработана самоогласованная схема обозначений BSDB. Идентификатор всех объектов в системе формируется на базе экваториальных координат системы на эпоху равноденствия J2000.0 из каталогов в виде HHMMSS.ss + DDMSS.s или HHMMSS.ss – DDMSS.s. Затем добавляется флаг для различения категории сущности (s, p или c соответственно для Системы, Пары или Компонента) [2], и номер пары или компонента, состоящий из цифры (в первой позиции) и заглавных латинских букв. Отметим, что в кратной системе компонентами пары могут быть не только компоненты, но и другие пары.

Пример того, как присваиваются идентификаторы BSDB и как выглядят (частично) строки каталога ILB, приводится в табл. 1 для системы высокой кратности, включающей звезду Кастор. Отметим, что компонент «1» в системе J073436.00+315319.1 отсутствует, поскольку в паре 1–2 первой составляющей является пара звезд (1A–1B). Координатная часть идентификатора BSDB внутри системы не изменяется, хотя координаты составляющих системы могут быть различны.

Принципы формирования идентификатора BSDB удовлетворяют требованиям IAU («IAU Specifications concerning designations for astronomical radiation sources outside the solar system», <http://cdsweb.u-strasbg.fr/Dic/iau-spec.htm>). Акроним BSDB был внесен в регистр IAU в 2015 г., и входит в Dictionary of Nomenclature of Celestial Objects (<http://cds.u-strasbg.fr/cgi-bin/Dic-Simbad>).

Таблица 1. Пример ПЛВ: Кастор. Некоторые столбцы пусты и здесь не показаны.

BSDB	Type	Bayer	Flamsteed	ADS	WDS	DD
J073436.00+315319.1:s						
J073436.00+315319.1:p1-2	vio	α Gem	66 Gem	6175	07346+3153 AB	STF1110
J073436.00+315319.1:p1A-1B	s	α^1 Gem			07346+3153 A	
J073436.00+315319.1:c1A						
J073436.00+315319.1:c1B						
J073436.00+315319.1:p2A-2B	s	α^2 Gem			07346+3153 B	
J073436.00+315319.1:c2A						
J073436.00+315319.1:c2B						
J073436.00+315319.1:p1-3	vi			6175	07346+3153 AC	STF1110
J073436.00+315319.1:p3A-3B	se				07346+3153 C	
J073436.00+315319.1:c3A						
J073436.00+315319.1:c3B						
J073436.00+315319.1:p1-4	vi			6175	07346+3153 AD	STF1110
J073436.00+315319.1:c4					07346+3153 D	
J073436.00+315319.1:p2-3	vi			6175	07346+3153 BC	STF1110
J073436.00+315319.1:p3-4	vi			6175	07346+3153 CD	STF1110

BSDB	CCDM	HIP	HD	DM	TDSC	SBC9
J073436.00+315319.1:s						
J073436.00+315319.1:p1-2	07346+3153 AB	36850		+32 1581	20046 AB	
J073436.00+315319.1:p1A-1B	07346+3153 A		60179		20046 A	462
J073436.00+315319.1:c1A						462A
J073436.00+315319.1:c1B						462B
J073436.00+315319.1:p2A-2B	07346+3153 B		60178		20046 B	461
J073436.00+315319.1:c2A						461A
J073436.00+315319.1:c2B						461B
J073436.00+315319.1:p1-3	07346+3153 AC				20046 AC	
J073436.00+315319.1:p3A-3B	07346+3153 C			+32 1582	20046 C	463
J073436.00+315319.1:c3A						463A
J073436.00+315319.1:c3B						463B
J073436.00+315319.1:p1-4	07346+3153 AD				20046 AD	
J073436.00+315319.1:c4	07346+3153 D			+32 1580	20046 D	
J073436.00+315319.1:p2-3						
J073436.00+315319.1:p3-4						

BSDB	GCVS	KI	coordinates
J073436.00+315319.1:s			
J073436.00+315319.1:p1-2		α Gem	
J073436.00+315319.1:p1A-1B		α^1 Gem	
J073436.00+315319.1:c1A		SBC9 462A	073436.00+315319.1 (WDS)
J073436.00+315319.1:c1B		SBC9 462B	073436.00+315319.1 (WDS)
J073436.00+315319.1:p2A-2B		α^2 Gem	
J073436.00+315319.1:c2A		SBC9 461A	073436.10+315318.5 (WDS)
J073436.00+315319.1:c2B		SBC9 461B	073436.10+315318.5 (WDS)
J073436.00+315319.1:p1-3		WDS 07346+3153 AC	
J073436.00+315319.1:p3A-3B	YY Gem	YY Gem	
J073436.00+315319.1:c3A	YY Gem A	YY Gem A	073437.45+315210.2 (WDS)
J073436.00+315319.1:c3B	YY Gem B	YY Gem B	073437.45+315210.2 (WDS)
J073436.00+315319.1:p1-4		WDS 07346+3153 AD	
J073436.00+315319.1:c4		WDS 07346+3153 D	073426.32+315100.1 (TDSC)
J073436.00+315319.1:p2-3		WDS 07346+3153 BC	
J073436.00+315319.1:p3-4		WDS 07346+3153 CD	

4. Заключение

Проблема сопоставления идентификаторов, используемых для обозначения двойных и кратных звезд различных наблюдательных типов, решается составлением каталога идентификации ПЛВ. Каталог ПЛВ содержит перекрестную идентификацию кратных звезд, содержащихся в каталогах двойных всех основных наблюдательных типов.

ИЛВ обеспечивает все необходимые идентификации для базы данных двойных звезд BDB и формирует используемые в ней идентификаторы двойных и кратных звезд в системе идентификации BSDB.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 16-07-1162).

Список литературы

1. P. Kaygorodov, B. Debray, N. Kolesnikov, D. Kovaleva, and O. Malkov, *Balt. Astron.*, **21**, 309, 2012.
2. D. Kovaleva, P. Kaygorodov, O. Malkov, B. Debray, and E. Oblak, *Astronomy and Computing*, **11**, 119, 2015.
3. F. Ochsenbein, D. Egret, and M. Bischoff, in C. Jaschek and G. A. Wilkins, eds., *IAU Colloq. 35: Compilation, Critical Evaluation, and Distribution of Stellar Data, Astrophysics and Space Science Library*, volume 64, 31 (1977).
4. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, P. Dubois, et al., *A&A Sup.*, **143**, 9, 2000.
5. O. Malkov, A. Karchevsky, P. Kaygorodov, and D. Kovaleva, *Balt. Astron.*, **25**, 49, 2016.
6. N. A. Skvortsov, E. A. Avvakumova, D. O. Bryukhov, A. E. Vovchenko, et al., *Astron. Bull.*, **71**, 114, 2016.
7. N. A. Skvortsov, L. A. Kalinichenko, A. V. Karchevsky, D. A. Kovaleva, and O. Y. Malkov, in L. Kalinichenko and Y. Manolopoulos, eds., *Selected Papers of the XIX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains, CEUR Workshop Proceedings*, volume 2022, 43–49 (2017).

Виртуальный центр атомных и молекулярных данных VAMDC

Пахомов Ю.В., Рябчикова Т.А.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье описана структура Виртуального центра атомных и молекулярных данных VAMDC, в работе которого задействован ИНАСАН с базой данных параметров спектральных линий VALD.

Virtual atomic and molecular data centre VAMDC

Pakhomov Yu.V., Ryabchikova T.A.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The article describes the structure of the Virtual Atomic and Molecular Data Center VAMDC, in which INASAN is involved with a database of spectral line parameters VALD.

1. Введение

Бурное развитие техники современных спектральных наблюдений привело к тому, что теоретические расчеты и лабораторные измерения параметров атомных и молекулярных линий, необходимых для интерпретации звездных спектров, не обеспечивают нужной точности при анализе химического состава или при измерении положений спектральных линий. Разумеется, большой вклад в неопределенность спектрального анализа вносит несовершенство современных моделей, однако даже в случае анализа спектра Солнца, где используются самые современные трехмерные (3D) модели атмосфер, ошибка в определении содержания химических элементов составляет 10% (0.04 dex) (см., например, [1, 2, 3]), тогда как точность измерения интенсивности линий во многих случаях существенно лучше 1% (0.004 dex). Кроме того, расширился волновой диапазон спектральных наблюдений высокой точности, и теперь мы можем получать спектры с разрешающей силой $R \geq 50000$ в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах. Но не только качество измерений атомных параметров, но и количество спектральных линий существенно определяют моделирование звездных атмосфер через расчет коэффициентов поглощения. Доступ к атомным и молекулярным данным, которые обычно собирают в специальные базы данных атомных и (или) молекулярных линий

(A&M), очень важен для спектроскопических исследований в астрономии. Однако многие базы A&M данных организованы для специфических исследований, например, отдельно атомарные линии (NIST¹) или молекулярные линии (HITRAN²). Только две базы предоставляют параметры атомарных и молекулярных линий: списки линий Роберта Куруца³ и Венская база атомных параметров спектральных линий (VALD)⁴. Однако практически все A&M базы данных имеют собственную структуру организации этих данных, различные пользовательские интерфейсы, что порой затрудняет поиск и доступ к ним и усложняет для пользователя работу с этими базами. Поэтому в 2009 г. стартовал международный проект создания Виртуального центра атомных и молекулярных данных (VAMDC), основной целью которого является создание электронной инфраструктуры единого доступа к различным, в основном, европейским базам спектроскопических данных. Проект входил в седьмую рамочную программу FP7 и финансировался Европейским Союзом. Проект был рассчитан на 3.5 года [4].

2. Консорциум VAMDC

В конце 2014 г. после окончания проекта был образован консорциум VAMDC, который состоит из трех групп учреждений. В первую группу вошли научные учреждения и университеты, которые подписали Меморандум о взаимопонимании (MoU, Memorandum of Understanding) и интегрировали свои базы данных (действительные члены):

- Франция⁵:

1. Institute of Research in Astrophysics and Planetology (IRAP, Université Paul Sabatier, Toulouse)
2. Laboratoire de Planetologie Grenoble (Université Joseph Fourier)
3. Groupe de Spectroscopie Moléculaire et Atmosphérique de Reims (Université de Champagne-Ardenne)
4. Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (Université de Bourgogne)

¹<https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/>

²<https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>

³<http://kurucz.harvard.edu/>

⁴<http://vald.inasan.ru/~vald3/php/vald.php>

⁵<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-france/>

5. Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (Université de Bordeaux)

6. Observatoire de Paris

• **Германия**⁶:

1. Universität zu Köln

• **Италия**⁷:

1. Osservatorio Astronomico di Cagliari (INAF-ОАС)

2. The Catania Astrophysical Observatory (INAF-ОАСТ)

• **Россия**⁸:

1. Институт астрономии РАН (Москва)

2. Институт атмосферной оптики РАН (Томск)

• **Сербия**⁹:

1. Astronomical Observatory Belgrade

• **Швеция**¹⁰:

1. Uppsala Universitet

• **Великобритания**¹¹:

1. Queen's University Belfast

2. The Open University

3. University College London

4. University of Cambridge

Во вторую группу вошли научные учреждения, интегрировавшие свои ресурсы в VAMDC, но не подписавшие MoU (ассоциированные члены):

• **Россия**¹²:

1. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)

⁶<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-germany/>

⁷<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-italy/>

⁸<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-russia/>

⁹<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-serbia/>

¹⁰<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-sweden/>

¹¹<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-uk/>

¹²<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-russia/>

- **США**¹³:

1. National Institute of Standards and Technology (NIST)
2. The Harvard Smithsonian Center for Astrophysics
3. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

В третью группу входят учреждения, которые имеют ресурсы и с которыми ведутся переговоры об интеграции в VAMDC:

- **Индия**¹⁴:

1. Tata Institute of Fundamental Research

- **Япония**

1. National Institute for Fusion Science (NIFS)

- **Международное агентство по атомной энергии (ИАЕА)**

1. Atomic And Molecular Data Unit

Всего в настоящее время в VAMDC входят 33 базы данных, из которых 9 представляют параметры линий атомов, остальные содержат молекулярные данные. В обязанность членов консорциума входит поддержка соответствующих узлов VAMDC путем финансирования из собственных ресурсов. Описание и структура консорциума VAMDC приведены в работе [5].

ИНАСАН с самого начала участвовал в проекте VAMDC. Институт поддерживает работу узла базы данных параметров спектральных линий VALD, одной из самых востребованных баз данных в спектроскопии. Московский узел VALD-VAMDC содержит экспериментально определенные параметры более 2 млн. наблюдаемых спектральных линий, необходимых для точного расчета синтетических спектров. На базе зеркала VALD в Уппсальском университете (Швеция) создан узел VAMDC, содержащий параметры более 250 млн. теоретически предсказанных и рассчитанных спектральных линий, необходимых для вычисления поглощения в широком диапазоне длин волн.

3. Портал VAMDC

Во время работы проекта была разработана концепция взаимодействия подключенных баз данных с центральным узлом и пользователями, а также написано программное обеспечение и создан Пор-

¹³<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-usa/>

¹⁴<http://www.vamdc.org/structure/partners/partners-india>

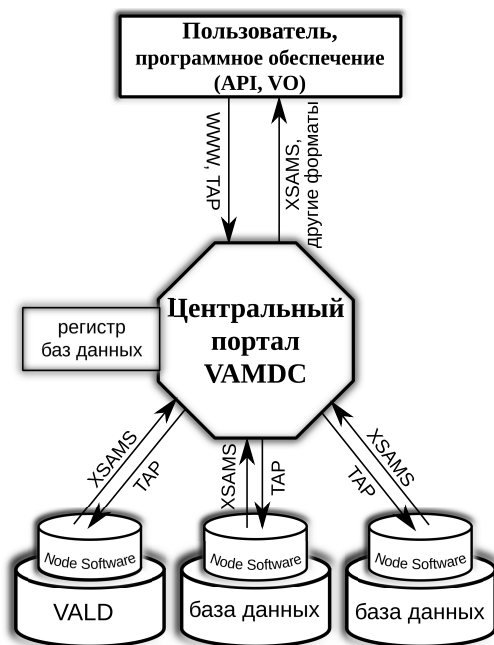


Рис. 1. Схема работы VAMDC

тал VAMDC (<http://portal.vamdc.eu>). Основой описания разрозненных данных выбран стандарт XSAMS (XML Schema for Atoms, Molecules and Solids), принятый в МАГАТЭ в качестве стандарта описания различных частиц и их взаимодействий. XSAMS в проекте был значительно доработан в соответствии со всеми видами данных, представленных участниками проекта, включая возможное расширение в будущем. Формат XSAMS состоит из основных объектов: библиографический блок ссылок на используемые данные, описание методов, описание параметров среды (температура, давление и т.д.), параметры атомов, молекул или частиц, параметры процессов (взаимодействия, переходы и т.д.):

```
<XSAMSData xsi:schemaLocation="http://vamdc.org/xml/xsams/1.0">
  <Sources></Sources>
  <Methods></Methods>
  <Environments></Environments>
  <Species></Species>
```

```
<Processes></Processes>  
</XSAMSData>
```

Каждая база данных в схеме VAMDC (рис. 1) является узлом. Новый узел проходит регистрацию на Портале, и при этом создается запись в регистре о всех видах данных (например, энергия уровня, длина волны, сила осциллятора, сечение взаимодействия и др.), содержащихся в подключаемой базе. В дальнейшем это позволяет Порталу направлять запрос только в том случае, если база содержит эти данные. На узле установлено программное обеспечение Node Software, выполняющее несколько функций. Во-первых, это подготовительная функция, в результате работы которой все представленные данные преобразуются в виде SQL-таблицы и заполняется система управления базами данных (СУБД) SQL типа (например, MySQL, PostgreSQL, MariaDB, SQLite, Oracle и др.). Во-вторых, Node Software выполняет функцию посредника между базой данных и Порталом или пользователем. Центральный Портал посылает системные и пользовательские запросы по протоколу TAP (Transport Access Protocol), лексически совместимому с SQL языком. Например, TAP запрос на выборку параметров спектральных линий нейтрального железа в диапазоне от 5000 Å до 5001 Å будет выглядеть следующим образом: `select * where (RadTransWavelength >=5000.0 AND RadTransWavelength <= 5001.0) AND ((AtomSymbol = 'Fe'))`. Системные запросы регулярно отслеживают работоспособность каждого узла и соответствие ответа узла на стандарт схемы XSAMS. Пользовательские запросы обрабатываются Порталом и распространяются на все узлы, содержащие запрашиваемую информацию. Ответ узла на запрос от Портала состоит из двух частей. Первая часть содержит информацию о наличии данных по запросу и их объем. Вторая часть — это непосредственно данные в формате XSAMS. Пользователь также имеет возможность самостоятельно направлять запрос по протоколу TAP на любой узел, но в этом случае вопросы преобразования XSAMS в другие форматы он решает самостоятельно. Портал же содержит ряд функций, облегчающих работу с XSAMS, а также отвечает за надежность всей инфраструктуры.

4. Заключение

В настоящее время VAMDC играет важную роль в обеспечении атомными и молекулярными данными исследователей из разных областей науки и техники.

Список литературы

1. P. Scott, N. Grevesse, M. Asplund, A. J. Sauval, et al., *A&A*, **573**, A25, 2015.
2. P. Scott, M. Asplund, N. Grevesse, M. Bergemann, and A. J. Sauval, *A&A*, **573**, A26, 2015.
3. N. Grevesse, P. Scott, M. Asplund, and A. J. Sauval, *A&A*, **573**, A27, 2015.
4. M. L. Dubernet, V. Boudon, J. L. Culhane, M. S. Dimitrijevic, et al., *JQSRT*, **111**, 2151, 2010.
5. M. L. Dubernet, B. K. Antony, Y. A. Ba, Y. L. Babikov, et al., *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*, **49**, 074003, 2016.

Теоретико-вероятностное построение трехмерной карты поглощения в Галактике

Сичевский С.Г.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Галактика Млечный Путь является единственной галактикой, которую можно наблюдать в мельчайших деталях, но большая часть плоскости Галактики закрыта межзвездной пылью, которая является частью межзвездной среды. Знание пространственного распределения межзвездной пыли имеет решающее значение для УФ, оптической астрономии, а также для звездообразования. В работе рассмотрен теоретико-вероятностный подход к построению карты поглощения в Галактике на основе анализа данных современных фотометрических обзоров.

Theoretical-probabilistic building of a 3D extinction map in the Galaxy

Sichevsky S.G.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The Milky Way is the only galaxy that can be observed in detail. However most of the plane of the Galaxy contains interstellar dust, which is the part of the interstellar medium. Knowledge of the spatial distribution of interstellar dust is crucial for UV and optical astronomy, and also for star formation study. In this paper, we consider the theoretical-probabilistic approach to the construction of 3D extinction map based on the data of modern photometric surveys.

1. Введение

Млечный Путь является единственной галактикой, которую можно наблюдать в мельчайших деталях, но большая часть плоскости Галактики закрыта межзвездной пылью. Ключевая структура межзвездной среды обуславливает большую трудоемкость при выяснении распределения поглощающего вещества на луче зрения. Знание пространственного распределения межзвездной пыли имеет решающее значение для УФ, оптической астрономии, где пыль является поглощающей преградой, а также для звездообразования, где межзвездная пыль является объектом исследования. Распределение межзвездной пыли можно получить, исследуя излучение, проходящее через пылевые облака, а также измеряя собственное излучение пыли.

Существуют плоские карты межзвездного поглощения в нашей Галактике [1]. Однако им присущи некоторые ограничения:

- отсутствие зависимости поглощения от расстояния;
- некорректная оценка поглощения для близких объектов и объектов в плоскости Галактики;
- возможные систематические ошибки при переходе от излучения пыли к поглощению (для карт, построенных на основе наблюдения собственного излучения пыли).

В настоящей работе рассмотрен теоретико-вероятностный подход к построению пространственной карты поглощения в Галактике на основе анализа данных фотометрических обзоров.

2. Построение пространственной карты поглощения

Наблюдаемое излучение звезд проходит через межзвездную пылевую среду, которая ослабляет и изменяет излучение звезд. Суммарный эффект ослабления света связан с рассеянием и истинным поглощением на пылевых частицах межзвездной среды. Современные теории звездных атмосфер, строения и эволюции звезд позволяют рассчитывать то, как должны излучать звезды. Таким образом каждая звезда является «инструментом», который позволяет изучить пылевую среду между наблюдателем и звездой. Определение характеристик межзвездного поглощения между наблюдателем и миллионами звезд по всему небу позволит построить карту пространственно распределения межзвездного поглощения в Галактике. Исходными данными для изучения пылевой среды Галактики являются современные фотометрические каталоги с результатами наблюдений сотен миллионов объектов:

- обзор 2MASS — JHK_s фотометрия $\sim 5 \cdot 10^8$ точечных источников;
- обзор Pan-STARRS — $grizy$ фотометрия $\sim 8 \cdot 10^8$ источников;
- обзор SDSS — $ugriz$ фотометрия $\sim 3 \cdot 10^8$ источников;
- обзор IPHAS — $H_{\alpha}ri$ фотометрия $2 \cdot 10^8$ источников.

Результатом подготовки исходных каталогов должна стать база данных, которая обеспечит для любых направлений на небе получение

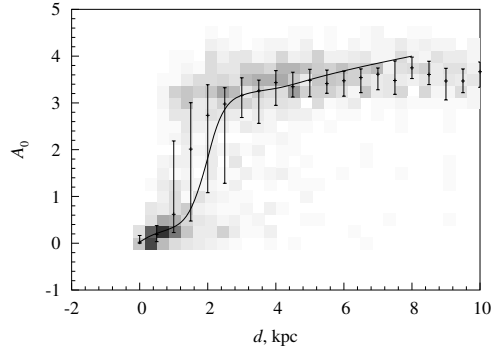


Рис. 1. Восстановление зависимости межзвездного поглощения от расстояния. Сплошная линия — исходная зависимость. Цветом показана гистограмма распределения количества полученных оценок с соответствующими значениями расстояния и поглощения.

координат центра соответствующей области (~ 10 кв. минут) и для всех звезд ($\sim 10^6$ шт.) в ней получение всей многоцветной фотометрии и всех оценок атмосферных характеристик. Для каждой выделенной области необходимо оценить характеристики закона межзвездного поглощения и звезд — восстановить зависимость межзвездного поглощения от расстояния. На рис. 1 показан пример такого восстановления, выполненного в работе [2], применяя упрощенную теоретико-вероятностную модель, обобщение которой рассмотрено ниже в настоящей работе.

2.1. Теоретико-вероятностная модель. Одна звезда

Пусть для i звезды имеются результаты наблюдений \mathbf{X}_i — случайные величины с нормальным распределением. Согласно теореме Байеса, функция плотности вероятностей (ф.п.в.) того, что звезда имеет характеристики \mathbf{Y}_i , а зависимость межзвездного поглощения от расстояния соответствует \mathbf{A} , определяется

$$p_i(\mathbf{Y}_i, \mathbf{A} | \mathbf{X}_i) \propto p_i(\mathbf{X}_i | \mathbf{Y}_i, \mathbf{A}) p(\mathbf{Y}_i, \mathbf{A}), \quad (1)$$

где $p_i(\mathbf{Y}_i, \mathbf{A} | \mathbf{X}_i)$ — апостериорная ф.п.в., $p_i(\mathbf{X}_i | \mathbf{Y}_i, \mathbf{A})$ — функция правдоподобия, а $p(\mathbf{Y}_i, \mathbf{A})$ — априорная ф.п.в.

2.2. Функция правдоподобия

Для разных звезд вектор \mathbf{X}_i может отличаться. Например, содержать разный набор фотометрических измерений:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_i &= \{ugriz, JHK_s\} \\ \mathbf{X}_j &= \{NUV, griy\} \\ \mathbf{X}_k &= \{FUV, NUV, griz\}\end{aligned}\quad (2)$$

Можно считать, что результаты наблюдений независимы. Тогда функция правдоподобия в соотношении (1) равна

$$p_i(\mathbf{X}_i|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A}) = \prod_{j=1}^n p_i(x_j|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A}), \quad (3)$$

где $\mathbf{X}_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Вычисление $p_i(x_j|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A})$ требует наличия возможности для заданных значений \mathbf{Y}_i и \mathbf{A} вычислять x_j .

Современные расчеты в рамках теории звездных атмосфер (например, расчеты Кастелли и Куруца [3]) позволяют получать распределение энергии в спектре звезды при разных значениях ее атмосферных характеристик: температуры ($T_{\text{эф}}$), поверхностном ускорении (g), химического состава ($[M/H]$). Пусть звезда имеет характеристики

$$\mathbf{Y}_i = \{T_{\text{эф}}, g, [M/H], \theta_d, d\}, \quad (4)$$

где θ_d — видимый угловой диаметр звезды, d — расстояние до нее. Тогда используя расчеты в рамках теории звездных атмосфер можно вычислить функцию правдоподобия $p_i(\mathbf{X}_i|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A})$, т.е. по смоделированному спектру звезды вычислить ее блеск в необходимых фотометрических полосах.

2.3. Априорная функция плотности вероятностей

Разумно полагать, что характеристики звезд не зависят от характеристик закона межзвездного поглощения. Тогда априорная ф.п.в примет следующий вид:

$$p(\mathbf{Y}_i, \mathbf{A}) = p(\mathbf{Y}_i)p(\mathbf{A}), \quad (5)$$

при этом

$$p(\mathbf{Y}_i) = p(T_{\text{эф}}, g, [M/H], \theta_d)p(d) \propto p(T_{\text{эф}}, g, [M/H], R)p(d)d,$$

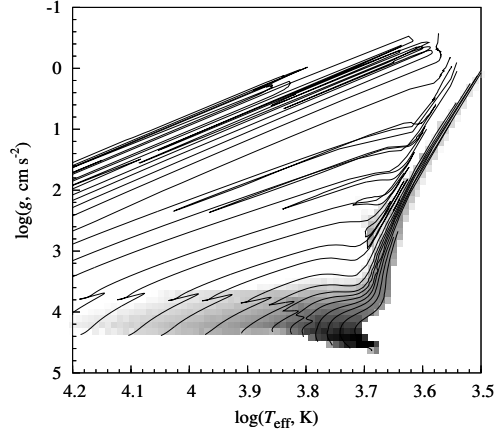


Рис. 2. Рассчитанная априорная плотность вероятности того, что звезда имеет соответствующие значения величин T_{eff} и $\lg g$. Темнее цвет — больше вероятность.

где R — это радиус звезды и учтено, что характеристики звезды не зависят от расстояния до нее. Если имеются оценки атмосферных характеристик звезды (например из спектральных наблюдений обзора LAMOST [4]), то это тоже можно учесть:

$$p(\mathbf{Y}_i) \propto p(T_{\text{eff}}, g, [\text{M}/\text{H}], R)p(d)p(T_{\text{eff}})p(g)d. \quad (6)$$

Компонент $p(T_{\text{eff}}, g, [\text{M}/\text{H}], R)$ априорной ф.п.в определяет вероятность того, что звезда имеет заданные физические характеристики. Рассчитать этот компонент можно на основе расчетов теории строения звезд и их эволюции [5, 6] с учетом темпа эволюции и начальной функции масс [7]. Пример такого расчета показан на рис. 2

2.4. Теоретико-вероятностная модель. N звезд

Рассмотрим N звезд из выбранной области на небе. Пусть

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}, \mathbf{Y} = \{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_N\}. \quad (7)$$

Наблюдение одной звезды не зависит от другой, поэтому и по аналогии с (1), учитывая (3) и (5), апостериорная ф.п.в

$$p(\mathbf{Y}, \mathbf{A}|\mathbf{X}) = p(\mathbf{A}) \prod_{i=1}^N p(\mathbf{X}_i|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A})p(\mathbf{Y}_i), \quad (8)$$

где

$$p(\mathbf{X}_i|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A}) = \prod_{j=1}^n p(x_{ij}|\mathbf{Y}_i, \mathbf{A}), \quad (9)$$

в которых учтено, что зависимость межзвездного поглощения от расстояния \mathbf{A} не зависит от характеристик звезд \mathbf{Y} и результатов наблюдений \mathbf{X} .

Качественным отличие соотношения (8) от случая, когда звезды рассматриваются независимо друг от друга, является возможность учесть информацию, присущую компактно расположенной выборке звезд — единая зависимости межзвездного поглощения от расстояния \mathbf{A} . Одним из общих способов оценки значения параметра по результатам наблюдений является метод максимального правдоподобия. В рассматриваемом случае оценкой максимального правдоподобия параметров \mathbf{Y} и \mathbf{A} будут такие их значения, которым соответствует максимум $p(\mathbf{Y}, \mathbf{A}|\mathbf{X})$, определенной соотношением (8). Учитывая большое количество параметров (~ 500), для поиска оценки максимального правдоподобия можно использовать метод Монте-Карло с цепями Маркова. Еще одна сложность заключается в том, что определить зависимость межзвездного поглощения от расстояния, которая соответствует максимуму $p(\mathbf{Y}, \mathbf{A}|\mathbf{X})$, необходимо для миллиона независимых областей на небе. Однако области можно обрабатывать независимо друг от друга, что потенциально позволяет использовать подходы и технологии параллельных вычислений.

3. Заключение

В работе рассмотрен байесовский подход к построению карты поглощения на основе фотометрических наблюдений. Его преимуществом является то, что анализируются не одиночные звезды, а вся совокупность звезд в рассматриваемой области. Это позволяет использовать дополнительную априорную информацию о том, что межзвездное поглощение не может убывать с увеличением расстояния от наблюдателя, что накладывает ограничения на вид зависимости межзвездного поглощения от расстояния \mathbf{A} . Один из возможных способов улуч-

шить теоретико-вероятную модель — учет дополнительных априорных данных. Например, в качестве таковых можно использовать не только результаты массовых спектральных наблюдений, но и параллаксы огромного числа звезд, которые должны быть измерены в рамках проекта Gaia.

Список литературы

1. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *ApJ*, **500**, 525, 1998.
2. S. G. Sichevskij, *Astron. Bull.*, **72**, 141, 2017.
3. F. Castelli and R. L. Kurucz, in N. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray, eds., *Modelling of Stellar Atmospheres, IAU Symposium*, volume 210, 20P (2003).
4. A.-L. Luo, Y.-H. Zhao, G. Zhao, L.-C. Deng, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics*, **15**, 1095, 2015.
5. S. Ekström, C. Georgy, P. Eggenberger, G. Meynet, et al., *A&A*, **537**, A146, 2012.
6. C. Georgy, S. Ekström, P. Eggenberger, G. Meynet, et al., *A&A*, **558**, A103, 2013.
7. E. E. Salpeter, *ApJ*, **121**, 161, 1955.

Исследование межзвездного поглощения

Малков О.Ю.¹, Длужневская О.Б.¹, Жао Г.²,
Жуков А.О.^{3,1,4}, Карпов С.В.^{5,6,7}, Кильпио Е.Ю.¹,
Князев А.Ю.^{8,4,5}, Ковалева Д.А.¹, Мерфи Д.⁹,
Микаелян А.М.¹⁰, Миронов А.В.⁴, Сичевский С.Г.¹,
Сытов А.Ю.¹, Чулков Д.А.¹

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Национальная астрономическая обсерватория, Пекин, КНР*

³*Российский технологический университет, Москва, Россия*

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

⁵*Институт физики Чешской академии наук, Прага, Чехия*

⁶*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, Россия*

⁷*Казанский (Приволжский) государственный университет, Казань, Россия*

⁸*Южноафриканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, ЮАР*

⁹*Индийский институт астрофизики, Бангалор, Индия*

¹⁰*Бюраканская астрофизическая обсерватория им. Амбарцумяна, Бюракан, Армения*

Современные карты межзвездного поглощения базируются на спектроскопических наблюдениях, доступных лишь для ярких звезд, следствием чего является низкое угловое разрешение. Параметризация на основе многоцветной фотометрии позволяет значительно расширить число объектов и улучшить разрешение. Нами представлены результаты оценки параметров межзвездного поглощения для четырех контрольных площадок на основе данных обзоров 2MASS, SDSS, GALEX и UKIDSS.

Study of interstellar extinction

Malkov O.Yu.¹, Dluzhnevskaya O.B.¹, Zhao G.², Zhukov A.O.^{3,1,4},
Karpov S.V.^{5,6,7}, Kilpio E.Yu.¹, Kniazev A.Yu.^{8,4,5}, Kovaleva D.A.¹,
Murthy J.⁹, Micaelian A.M.¹⁰, Mironov A.V.⁴, Sichevsky S.G.¹,
Syrov A.Yu.¹, Chulkov D.A.¹

¹*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

²*National Astronomical Observatories, Beijing, China*

³*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, Russia*

⁴*Sternberg Astronomical Institute of the MSU, Moscow, Russia*

⁵*Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic*

⁶*Special Astrophysical Observatory, Nizhnij Arkhyz, Russia*

⁷*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

⁸*South African Astronomical Observatory, Cape Town, South Africa*

⁹*Indian Institute of Astrophysics, Bengaluru, India*

¹⁰*Ambartsumian Byurakan Astrophysical Observatory, Byurakan, Armenia*

Contemporary 3D extinction maps are based on high-quality spectroscopic observations available only for bright stars and provide limited angular resolution. Parametrisation based on multicolor photometry drastically expands number of objects and improves resolution. We measure parameters of interstellar extinction for four control fields in high galactic latitudes applying data from 2MASS, SDSS, GALEX and UKIDSS surveys.

1. Введение

Одной из основных проблем астрофизики является изучение физических свойств звезд. Свет звезд проходит через межзвездную пыль, вследствие чего краснеет и ослабевает; этот факт усложняет параметризацию и классификацию звезд. Параметры звезды, а также межзвездного покраснения, могут быть получены из ее спектра. Такая работа выполнялась различными авторами, по ее результатам был создан ряд эмпирических атласов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]; в работе [12] был проведен их критический анализ. Сравнение данных по звездам, входящим в несколько атласов, показало наличие ряда значительных расхождений.

Существующие трехмерные карты межзвездного поглощения — зависимости поглощения от расстояния в различных направлениях — базируются, преимущественно, на спектральной классификации (сравнительно малочисленных и только относительно ярких) звезд. Сравнительный анализ самых известных карт был проведен в [13] и показал значительные расхождения между ними. В качестве временного решения проблемы была скомпилирована т.н. синтетическая карта поглощения [14, 15, 16].

Другим способом построения карты межзвездного поглощения является оценка поглощения (а также звездных параметров) из эволюционных треков. Соответствующие процедуры были разработаны в [17], [18], [19] и применены к данным LAMOST [20]. Однако для применения этой процедуры весьма желательно знание атмосферных параметров звезд, что существенно ограничивает количество звезд, используемых для такой параметризации. Распределение поглощающей материи может определяться также по данным о рассеянных скоплениях (Пискунов и Харченко, этот сборник), однако результирующие карты ограничены низкими галактическими широтами.

Таким образом, актуальна проблема параметризации звезд, основанная на фотометрии. Этот вопрос предварительно изучался в [21, 22, 23, 24]. Обилие существующих фотометрических систем (см., например, [25]), недавно созданные большие фотометрические обзоры, а также инструменты Виртуальной обсерватории, разработанные для кросс-отождествления объектов, дают возможность получить многоцветные фотометрические данные для миллионов объектов. Это позволяет пользователю параметризовать объекты и определять межзвездное поглощение в Галактике.

В данной статье представлены различные аспекты и пилотные результаты параметризации звезд, базирующейся на многоцветной фотометрии звезд из обзоров 2MASS, SDSS, GALEX и UKIDSS.

2. Моделирование

Чтобы получить всю доступную многоцветную фотометрию для исследуемых объектов нами был создан инструмент для кросс-отождествления объектов в известных и широко используемых обзорах. Для достижения главной цели — совместного использования данных из различных объектов — был разработан алгоритм быстрого позиционного сопоставления больших астрономических каталогов в небольших областях с фильтрацией ложных решений. Проверка инструмента осуществлялась на нескольких областях с радиусом 0.1 градуса в обзорах DENIS, 2MASS, SDSS, GALEX, UKIDSS [26, 27, 28].

В описываемом исследовании использовались фотометрические полосы $ugriz$ из SDSS [29], JHK_S из 2MASS [30], FUV, NUV из GALEX [31], YJHK из UKIDSS [32].

Для определения спектрального типа SpT , расстояния d и межзвездного поглощения A_V мы минимизируем функционал

$$D^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_{obs,i} - m_{calc,i}}{\Delta m_{obs,i}} \right)^2, \quad (1)$$

где суммирование происходит по всем доступным фотометрическим полосам (максимальное значение $N=13$) и где

$$m_{calc,i} = M_i(SpT) + 5 \lg d - 5 + A_i(A_V), \quad (2)$$

Здесь $m_{obs,i}$ и $\Delta m_{obs,i}$ — видимая величина объекта в i -й фотометрической полосе и ее наблюдательная ошибка, соответственно, взятые из используемых обзоров. $A_i(A_V)$ — закон межзвездного поглощения,

а $M_i(\text{SpT})$ — абсолютная звездная величина в i -й фотометрической полосе, взятая из калибровочных таблиц.

Чтобы предсказать цвета звезд в нашей модели, требуется знание коэффициентов поглощения для фотометрических полос использованных обзоров, перечисленных выше. В свою очередь, для вычисления этих коэффициентов необходимо знать кривые реакции соответствующих фильтров и закон межзвездного поглощения (дискуссию о законе межзвездного поглощения можно найти, например, в [33, 34, 35, 36]). Такие вычисления для классических и современных фотометрических систем проводились, в частности, в [37, 38, 39, 40, 41, 42, 43]. В настоящей работе мы использовали данные их последних двух статей. Нами использовалось фиксированное значение для отношения полного поглощения к селективному $R_0 = 3.1$, которое, на самом деле, является только средним значением для МЗС в Галактике (дискуссия о R_0 может быть найдена, например, в [42, 44, 45, 46, 47, 48, 49]; Вариации значения R_0 в некоторых конкретных направлениях изучались также в [50, 51]).

Данные о зависимости абсолютных звездных величин от спектрального типа для фотометрических полос исследуемых обзоров опубликованы в [52, 53, 54, 55, 56]. Дополнительно, данные по М-звездам могут быть найдены в [57, 58]. В настоящем исследовании для обзоров 2MASS, SDSS и GALEX использовались данные из [53] и [55]. Абсолютные величины UKIDSS вычислялись из величин 2MASS с помощью соотношений, опубликованных в [59]. В данном исследовании рассматриваются только звезды Главной последовательности.

Для оценки ошибок результирующих параметров предполагалось, что

$$\sigma_{A_v}^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta m_{\text{obs},i})^2, \quad \sigma_{\lg(d)} = 0.2\sigma_{A_v} \quad (3)$$

Очевидно, оцененные таким образом значения ошибок занижены. Для более адекватных оценок требуется учитывать также ошибки калибровочных таблиц и соотношений.

3. Результаты

Далее описанная модель применялась для оценки межзвездного поглощения для нескольких площадок на небе (с радиусом 5 угловых минут), где ранее были сделаны индивидуальные оценки [39], и которые использовались для расчета поглощения до шести сверхновых в

Таблица 1. Параметры межзвездного поглощения

N	SN name	l	b	Ob	MS	a_0	β	$A_{V,\infty}$	$A_{V,SN}$
1	SN 1997ap	334	+61.9	44	6	0.08	1800	0.16	0.17
2	SN 1996cl	257	+48.7	49	6	0.16	1720	0.36	0.24
5	SN 1996ck	301	+62.1	58	10	0.25	480	0.14	0.17
6	SN 1995at	129	-58.1	100	4	0.25	240	0.07	0.09

Таблица содержит номер области, имя сверхновой, ее галактические координаты, число отождествленных объектов (Ob) и число звезд Главной последовательности среди них (MS), параметры a_0 и β (см. (4)), оцененные из аппроксимации, значения $A_{V,\infty}$, определенные из (5). Кроме того, здесь даны значения поглощения в полосе V до сверхновых $A_{V,SN}$, оцененные из значений в полосе R с использованием соотношения $A_V = A_R/0.751$ (см., например, [38, 34]); при этом значения в полосе R были взяты из [60].

исследовании ускоренного расширения Вселенной [60]. Данные представлены в табл. 1. Площадки 3 и 4 были исключены из рассмотрения, поскольку они не покрыты обзором UKIDSS. Для четырех оставшихся областей была выполнена параметризация.

Всего в исследуемых областях был найден 251 объект, но только 26 из них были успешно параметризованы. Остальные по разным причинам (двойная звезда, незвездный/протяженный объект, наблюдение низкого качества, чересчур яркий объект, большая наблюдательная ошибка и др.) были исключены из рассмотрения. Таким образом, в каждой из исследованных областей было параметризовано от 4 до 10 звезд. Отметим, что в предыдущих моделях межзвездного поглощения на область такой площади ($5'$) приходилось в среднем около 0.0025 объекта, и это — убедительное свидетельство в пользу преимущества описываемого здесь подхода, комбинирующего многоцветную фотометрию из современных больших фотометрических обзоров.

После параметризации индивидуальных звезд в каждой области конструируется зависимость межзвездного поглощения от расстояния ($A_V(d)$). Для этого данные по индивидуальным звездам аппроксимируются законом косеканса [61], удовлетворительно описывающем ход межзвездного поглощения для достаточно высоких галактических широт b , характерных для данного исследования:

$$A_V(d, b) = \frac{a_0 \beta}{\sin |b|} \left(1 - e^{-\frac{d \sin |b|}{\beta}} \right). \quad (4)$$

Здесь a_0 (величина поглощения на килопарсек в плоскости Галактики) и β (вертикальная шкала распределения поглощающей материи) являются параметрами, оцениваемыми для каждой площадки. Отметим, что при $d \rightarrow \infty$

$$A_V(b) \rightarrow \frac{a_0 \beta}{\sin |b|}. \quad (5)$$

Результирующие значения a_0 и β представлены в табл. 1. Здесь же наши оценки поглощения ($A_{V,\infty}$) для внегалактических объектов (5) сравниваются со значениями поглощения до сверхновых ($A_{V,SN}$).

Для одной из областей [39] предсказывает меньшее значение поглощения, чем наше. Тому может быть несколько причин: одна из них та, что некоторые звезды являются фотометрически неразрешенными двойными. Мы исследовали эту проблему в [62]. Существует ряд других возможных причин: наблюдательные ошибки и опечатки в обзорах, ошибки кросс-идентификаций, переменность звезды, не звездная природа объектов, нестандартное поведение закон межзвездного поглощения в данной области и т.д.

Добавим, что для шести звезд из нашего набора оказалось возможным провести сравнение наших результатов с данными спектроскопического обзора LAMOST DR4. Результаты сравнения оказались вполне удовлетворительными. С другой стороны, сравнение с результатами, предсказываемыми другими, более ранними картами поглощения [63, 64], противоречат нашим.

Работа поддержана РФФИ (17-52-45076, INT/RUS/RFBR/P-265). А.К. благодарит Национальный исследовательский фонд (NRF) ЮАР. С.К. благодарит Программу повышения конкурентоспособности Казанского государственного университета, РФФИ (17-52-45048) и РФФИ (14-50-00043).

Список литературы

1. V. Straizys and Z. Sviderskiene, *Vilnius Astronomijos Observatorijos Biuletenis*, **35**, 3, 1972.
2. I. N. Glushneva, A. V. Kharitonov, L. N. Kniazeva, and V. I. Shenavrin, *A&A Sup.*, **92**, 1, 1992.
3. G. A. Alekseeva, A. A. Arkharov, V. D. Galkin, E. I. Hagen-Thorn, et al., *Balt. Astron.*, **5**, 603, 1996.
4. G. A. Alekseeva, A. A. Arkharov, V. D. Galkin, E. I. Hagen-Thorn, et al., *Balt. Astron.*, **6**, 481, 1997.
5. A. J. Pickles, *PASP*, **110**, 863, 1998.
6. S. Bagnulo, E. Jehin, C. Ledoux, R. Cabanac, C. Melo, R. Gilmozzi, and ESO Paranal Science Operations Team, *The Messenger*, **114**, 10, 2003.

7. J.-F. Le Borgne, G. Bruzual, R. Pelló, A. Lançon, et al., *A&A*, **402**, 433, 2003.
8. F. Valdes, R. Gupta, J. A. Rose, H. P. Singh, and D. J. Bell, *ApJS*, **152**, 251, 2004.
9. S. R. Heap and D. J. Lindler, in A. Vallenari, R. Tantaló, L. Portinari, and A. Moretti, eds., *From Stars to Galaxies: Building the Pieces to Build Up the Universe*, *ASP Conf. Ser.*, volume 374, 409 (2007).
10. J. Falcón-Barroso, P. Sánchez-Blázquez, A. Vazdekis, E. Ricciardelli, N. Cardiel, A. J. Cenarro, J. Gorgas, and R. F. Peletier, *A&A*, **532**, A95, 2011.
11. Y. Wu, H. P. Singh, P. Prugniel, R. Gupta, and M. Koleva, *A&A*, **525**, A71, 2011.
12. A. V. Mironov, A. I. Zakharov, V. G. Moshkalev, O. Y. Malkov, and E. Y. Kilpio, *Balt. Astron.*, **23**, 286, 2014.
13. E. Y. Kilpio and O. Y. Malkov, *Astron. Rep.*, **41**, 10, 1997.
14. E. Y. Kilpio and O. Y. Malkov, *Balt. Astron.*, **6**, 358, 1997.
15. J. Hakkila, J. M. Myers, B. J. Stidham, and D. H. Hartmann, *AJ*, **114**, 2043, 1997.
16. O. Malkov and E. Kilpio, *Ap&SS*, **280**, 115, 2002.
17. S. Sichevsky and O. Malkov, *Balt. Astron.*, **25**, 67, 2016.
18. S. G. Sichevskij, *Astron. Rep.*, **60**, 816, 2016.
19. S. G. Sichevskij, *Astron. Rep.*, **61**, 193, 2017.
20. S. G. Sichevskij, *Astron. Bull.*, **72**, 51, 2017.
21. O. Y. Malkov, *Balt. Astron.*, **12**, 514, 2003.
22. O. Y. Malkov, S. G. Sichevskij, and D. A. Kovaleva, *MNRAS*, **401**, 695, 2010.
23. S. G. Sichevskiy, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astron. Nachr.*, **334**, 832, 2013.
24. S. G. Sichevskij, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astron. Bull.*, **69**, 160, 2014.
25. V. Straižys, *Multicolor stellar photometry* (1992).
26. O. Malkov and S. Karpov, in I. N. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink, and A. H. Rots, eds., *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*, *ASP Conf. Ser.*, volume 442, 583 (2011).
27. S. V. Karpov, O. Y. Malkov, and A. V. Mironov, *Astron. Bull.*, **67**, 82, 2012.
28. O. Malkov, O. Dluzhnevskaya, S. Karpov, E. Kilpio, A. Kniazev, A. Mironov, and S. Sichevskij, *Balt. Astron.*, **21**, 319, 2012.
29. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, S. F. Anderson, et al., *ApJS*, **193**, 29, 2011.
30. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al., *AJ*, **131**, 1163, 2006.
31. D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, P. Morrissey, et al., *ApJL*, **619**, L1, 2005.

32. A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, A. C. Edge, et al., *MNRAS*, **379**, 1599, 2007.
33. M. A. Fluks, B. Plez, P. S. The, D. de Winter, B. E. Westerlund, and H. C. Steenman, *A&A Sup.*, **105**, 311, 1994.
34. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *ApJ*, **345**, 245, 1989.
35. E. L. Fitzpatrick, *PASP*, **111**, 63, 1999.
36. E. L. Fitzpatrick and D. Massa, *ApJ*, **663**, 320, 2007.
37. A. M. Heiser, *AJ*, **82**, 973, 1977.
38. G. H. Rieke and M. J. Lebofsky, *ApJ*, **288**, 618, 1985.
39. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *ApJ*, **500**, 525, 1998.
40. B. T. Draine, *ARA&A*, **41**, 241, 2003.
41. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, et al., *AJ*, **140**, 1868-1881, 2010.
42. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *ApJ*, **737**, 103, 2011.
43. H. B. Yuan, X. W. Liu, and M. S. Xiang, *MNRAS*, **430**, 2188, 2013.
44. B. D. Savage and J. S. Mathis, *ARA&A*, **17**, 73, 1979.
45. M. J. Seaton, *MNRAS*, **187**, 73P, 1979.
46. W. Wegner, *Astron. Nachr.*, **310**, 295, 1989.
47. L. N. Berdnikov and E. D. Pavlovskaya, *Sov. Astron. Lett.*, **17**, 215, 1991.
48. G. Stasińska, R. Tylenda, A. Acker, and B. Stenholm, *A&A*, **266**, 486, 1992.
49. G. Zasowski, S. R. Majewski, R. Indebetouw, M. R. Meade, et al., *ApJ*, **707**, 510, 2009.
50. H. M. Tovmassian, R. K. Hovhannessian, and R. A. Epremian, *Ap&SS*, **213**, 175, 1994.
51. A. I. Gómez de Castro, J. López-Santiago, F. López-Martínez, N. Sánchez, E. de Castro, and M. Cornide, *MNRAS*, **449**, 3867, 2015.
52. K. R. Covey, Ž. Ivezić, D. Schlegel, D. Finkbeiner, et al., *AJ*, **134**, 2398, 2007.
53. A. L. Kraus and L. A. Hillenbrand, *AJ*, **134**, 2340, 2007.
54. K. Findeisen and L. Hillenbrand, *AJ*, **139**, 1338, 2010.
55. K. Findeisen, L. Hillenbrand, and D. Soderblom, *AJ*, **142**, 23, 2011.
56. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, *ApJS*, **208**, 9, 2013.
57. J. J. Bochanski, A. A. West, S. L. Hawley, and K. R. Covey, *AJ*, **133**, 531, 2007.
58. A. A. West, D. P. Morgan, J. J. Bochanski, J. M. Andersen, et al., *AJ*, **141**, 97, 2011.
59. S. T. Hodgkin, M. J. Irwin, P. C. Hewett, and S. J. Warren, *MNRAS*, **394**, 675, 2009.
60. S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, et al., *ApJ*, **517**, 565, 1999.
61. P. P. Parenago, *Sov. Astron.*, **13**, 3, 1940.
62. O. Malkov, A. Mironov, and S. Sichevskij, *Ap&SS*, **335**, 105, 2011.
63. A. S. Sharov, *Sov. Astron.*, **7**, 689, 1964.
64. F. Arenou, M. Grenon, and A. Gomez, *A&A*, **258**, 104, 1992.

Классификация и параметризация полуразделенных затменных двойных

Малков О.Ю.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье кратко описаны принципы параметризации полуразделенных систем, апробированные на ансамбле затменных двойных.

Classification and parameterisation of semi-detached eclipsing binaries

Malkov O.Yu.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In the present study we briefly discuss a procedure for parameterization of components of semi-detached binaries. To check its usability, the procedure is applied to eclipsing binaries with known dynamical masses.

1. Введение

Затменные двойные системы — самый многочисленный тип двойных, у которых определяется орбитальный период. Независимое определение массы и светимости звезды возможно только для компонентов затменных двойных, у которых в спектре наблюдаются линии обоих компонентов. Однако такие системы составляют всего около 2% всех известных затменных двойных. Поэтому для статистических исследований представляется целесообразным иметь возможность оценить фундаментальные параметры (такие как масса и радиус компонентов) затменных двойных с неизвестными спектроскопическими элементами. Вопросы параметризации одиночных и некоторых типов двойных звезд обсуждались в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], а в данной статье кратко описывается процедура определения астрофизических параметров компонентов полуразделенных систем из ограниченного набора наблюдательных данных и представлены результаты применения процедуры к затменным двойным.

2. Общие положения для затменных систем

Для затменных систем и их компонентов могут быть записаны следующие соотношения. Звезды (компоненты) должны удовлетворять закону Стефана-Больцмана

$$L = R^2 T^4, \quad (1)$$

а системы — третьему закону Кеплера

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi} (m_1 + m_2). \quad (2)$$

Здесь L, R, T, m — светимости, радиусы (называемые также абсолютными радиусами), эффективные температуры и массы компонентов, соответственно, выраженные в солнечных единицах; a — большая полуось системы в солнечных радиусах, а P — орбитальный период в годах. Абсолютный радиус компонента связан с относительным радиусом r (определяемым из кривой блеска):

$$R = ar. \quad (3)$$

Если известен не только температурный класс, но и класс светимости (LC) компонента, значения L, T, m могут быть оценены из этой двумерной спектральной классификации Sp :

$$L = L(Sp), \quad T = T(Sp), \quad m = m(Sp). \quad (4)$$

Для оценки T и L в данной работе используются детальные соотношения «спектр-температура» и «спектр-светимость» из [9]. Что касается последней зависимости в (4), то здесь использовались данные из работ [10, 11, 12, 13, 14]. Ошибки получаемых значений оценивались из наклона соответствующих соотношений в предположении, что точность спектральной классификации составляет один подкласс.

Отметим, что в случае отсутствия спектральной классификации одного из компонентов отношение эффективных температур может быть оценено из величин глубин минимумов A_1, A_2 , если пренебречь эффектом потемнения к краю:

$$\frac{T_2}{T_1} = \sqrt[4]{\frac{J_2}{J_1}} = \sqrt[4]{\frac{1 + 0.4A_2}{1 + 0.4A_1}}. \quad (5)$$

Здесь J — поверхностная яркость компонента.

3. Полуразделенные системы

Самой представительной группой полуразделенных систем являются т.н. классические алголи: системы, в которых первичный компонент имеет спектральный тип от средних В до ранних F, а вторичный — тип F или позднее. При определении параметров таких систем обычно делаются два обоснованных предположения. Во-первых, первичный (с большей массой, светимостью и температурой) компонент имеет типичную для своего спектрального класса массу и может рассматриваться как звезда ГП [15]. Отметим, что первичный компонент может быть больше или меньше вторичного; статистика полуразделенных систем в каталогах [16] и [17] показывает, что такие системы встречаются в отношении 3:7. Во-вторых, вторичный компонент заполняет свою полость Роша и, согласно [18], его относительный радиус r_2 связан с отношением масс компонентов $q \equiv m_2/m_1$ (для $q \geq 0.1$):

$$\lg q = 3.6456 \lg r_2 + 1.5443. \quad (6)$$

Первое из этих предположений позволяет оценить массу, светимость и температуру первичного компонента и его спектрального типа. Соответственно, используется следующая процедура.

- L_1, T_1, m_1 определяются из (4), с соответствующими ошибками $\sigma L_1, \sigma T_1, \sigma m_1$. В случае, когда наличествует только одномерная спектральная классификация, предполагается, что класс светимости LC=V.
- R_1 вычисляется из (1), затем большая полуось системы a вычисляется из (3).
- Отношение масс q вычисляется из (6), a вычисляется из (2), используя полученное выше m_1 и учитывая, что $m_2 = qm_1$.
- Сравниваются два значения a , вычисленные на двух предыдущих этапах. Требуется минимизировать функционал

$$D = \sqrt{\left(\frac{m_1 - m_1^s}{\sigma m_1}\right)^2 + \left(\frac{L_1 - L_1^s}{\sigma L_1}\right)^2 + \left(\frac{q - q^r}{\sigma q}\right)^2}, \quad (7)$$

где m_1, L_1, q — подбираемые параметры, m_1^s, L_1^s — параметры, оцениваемые из спектрального типа (см. первый шаг процедуры), а q^r вычисляется из r_2 с помощью (6).

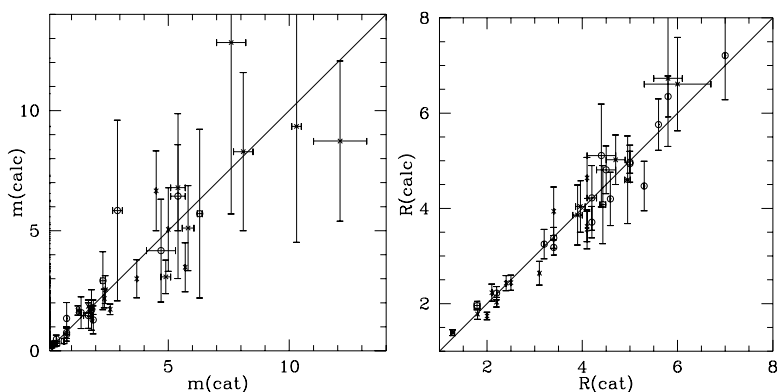


Рис. 1. Сравнение каталогизированных [16] и вычисленных масс (слева) и радиусов (справа) полуразделенных систем. Первичные и вторичные компоненты обозначены крестиками и кружками, соответственно.

- R_2 вычисляется из (3).
- При наличии сведений о спектре вторичного компонента может быть сделана оценка T_2 и, следовательно, L_2 из (1). Эффективная температура звезд разных классов светимости отличается незначительно (при фиксированном спектральном типе), поэтому, при неизвестном классе светимости, в качестве первого приближения можно использовать значения T для субгигантов — типичная стадия вторичных компонентов алголей. Кроме того, при наличии информации о глубинах обоих минимумов на кривой блеска, T_2 можно оценить из (5).

Эта процедура была применена к звездам Каталога затменных переменных CEV [19]. Предварительно системы в CEV были классифицированы в соответствии с методикой, описанной в [20], [21]. В CEV содержатся значения периода и спектральная классификация, а необходимые для параметризации значения относительных радиусов компонентов брались, преимущественно, из [17] и [22].

Для проверки результатов процедуры из каталога [16] были выбраны 18 полуразделенных систем с известными динамическими массами и радиусами. Результаты сравнения наших оценок с эмпирическими значениями представлены на рис. 1.

Помимо классических алголей существует еще несколько групп полуразделенных систем, весьма малочисленных, содержащих всего несколько систем каждая. Так, в [23] были введены т.н. горячие (в которых горячий компонент — ранняя В-звезда, а холодный — В или ранняя А-звезда) и холодные (с поздним субгигантом или гигантом) полуразделенные системы, а позднее в [24] обсуждалась их эволюция. Кроме того, согласно [25] существует группа т.н. дважды контактных систем, представителем (возможно, единственным известным) которой является β Лyg. В т.н. системах с пониженной массой (или R CMa системах) оба компонента демонстрируют чересчур высокие для их масс светимости, размеры и температуры и ни один из компонентов не может рассматриваться как звезда ГП [26]. Представителями другой, также маргинальной, группы, являются системы на стадии быстрого обмена масс: BF Aur [27], TT Her [28], AB Cru [29]. Наконец, к т.н. системам с неустойчивым контактом относятся тесные двойные с недостаточно эффективным переносом энергии, в результате чего продолжительные периоды контакта сменяются кратковременными полуразделенными и разделенными фазами [30] (одна из таких систем, CN And наблюдается как раз на полуразделенной фазе [31]). Эти шесть групп весьма малочисленны (а представители последних двух зачастую классифицируются в Общем каталоге переменных звезд [32] как контактные или разделенные).

Необходимо заметить также, что описанная выше процедура не может применяться к системам с компактными объектами (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры). Такие проэволюционировавшие, находящиеся на стадии второго обмена системы включают в себя, в частности, рентгеновские и катаклизмические двойные.

Список литературы

1. A. E. Piskunov and O. Y. Malkov, *A&A*, **247**, 87, 1991.
2. O. Y. Malkov, A. E. Piskunov, and D. A. Shpilkina, *A&A*, **320**, 79, 1997.
3. O. Malkov, A. Piskunov, and H. Zinnecker, *A&A*, **338**, 452, 1998.
4. O. Y. Malkov, *A&A*, **402**, 1055, 2003.
5. O. Y. Malkov, *MNRAS*, **382**, 1073, 2007.
6. O. Y. Malkov, S. G. Sichevskij, and D. A. Kovaleva, *MNRAS*, **401**, 695, 2010.
7. O. Y. Malkov, V. S. Tamazian, J. A. Docobo, and D. A. Chulkov, *A&A*, **546**, A69, 2012.
8. S. G. Sichevskij, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Astron. Bull.*, **69**, 160, 2014.
9. C. de Jager and H. Nieuwenhuijzen, *A&A*, **177**, 217, 1987.

10. T. Z. Dworak, *Acta Astronom.*, **25**, 383, 1975.
11. A. N. Belikov, *Bulletin d'Information du CDS*, **47**, 9, 1995.
12. O. Y. Malkov, *Bulletin d'Information du CDS*, **42**, 27, 1993.
13. Z. Kratichova, E. Popova, A. Tutukov, and L. Yungelson, *Bulletin d'Information du CDS*, **19**, 71, 1980.
14. M. A. Svechnikov and T. A. Taidakova, *Sov. Astron.*, **28**, 84, 1984.
15. G. Giuricin, F. Mardirossian, and M. Mezzetti, *A&A Sup.*, **54**, 211, 1983.
16. L. P. Surkova and M. A. Svechnikov, *VizieR Online Data Catalog*, **5115**, 2004.
17. E. Budding, A. Erdem, C. Çiçek, I. Bulut, F. Soydugan, E. Soydugan, V. Bakış, and O. Demircan, *A&A*, **417**, 263, 2004.
18. M. Plavec and P. Kratochvíl, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, **15**, 165, 1964.
19. O. Y. Malkov, E. Oblak, E. A. Snegireva, and J. Torra, *A&A*, **446**, 785, 2006.
20. O. Y. Malkov, E. Oblak, E. A. Avvakumova, and J. Torra, *A&A*, **465**, 549, 2007.
21. E. A. Avvakumova, O. Y. Malkov, and A. Y. Kniazev, *Astron. Nachr.*, **334**, 860, 2013.
22. M. A. Svechnikov and E. F. Kuznetsova, *Katalog priblizhennykh fotometricheskikh i absolutnykh elementov zatmennykh peremennykh zvezd* (1990).
23. D. M. Popper, *ARA&A*, **18**, 115, 1980.
24. C. A. Nelson and P. P. Eggleton, *ApJ*, **552**, 664, 2001.
25. R. E. Wilson, *ApJ*, **234**, 1054, 1979.
26. M. B. K. Sarma, P. V. Rao, and K. D. Abhyankar, *ApJ*, **458**, 371, 1996.
27. J. Kallrath and K. G. Strassmeier, *A&A*, **362**, 673, 2000.
28. L. Milano, F. Barone, S. Mancuso, G. Russo, and A. A. Vittone, *A&A*, **210**, 181, 1989.
29. R. Lorenz, P. Mayer, and H. Drechsel, *A&A*, **291**, 1994.
30. H. Kähler, *A&A*, **395**, 907, 2002.
31. W. Van Hamme, R. G. Samec, N. W. Gothard, R. E. Wilson, D. R. Faulkner, and R. M. Branly, *AJ*, **122**, 3436, 2001.
32. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.

Содержание

<i>Шустов Б.М., Длужневская О.Б., Рыжлова Л.В., Тутуков А.В.</i>	
Лидеры отечественной астрономии: проф. А.Г. Масевич	3
Космические астрометрия, геодезия, геодинамика	13
<i>Шематович В.И.</i> О верхней атмосфере Земли	14
<i>Клюйков А.А.</i> Новая эра в изучении гравитационного поля Земли	20
<i>Клюйков А.А.</i> Определение параметров гравитационного поля Земли по градиентометрическим измерениям	26
<i>Эбауэр К.В.</i> Изучение вариаций положения центра масс Земли с применением данных лазерной локации ИСЗ и данных межспутниковых измерений проекта GRACE . . .	32
<i>Эбауэр К.В.</i> Методика определения низкочастотной составляющей гравитационного поля Земли из комбинированного анализа низкоорбитальных ИСЗ и спутников LAGEOS	37
<i>Кузин С.П.</i> Обработка измерений спутниковой системы ДОРИС в ИНАСАН	43
<i>Кузин С.П.</i> Анализ движения геоцентра по измерениям спутниковых радиотехнических систем ГНСС и ДОРИС . .	49
Космический мусор	55
<i>Левкина П.А.</i> Исследования движения ИСЗ и космического мусора в ИНАСАН	56
<i>Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Карпов Н.В., Чазов В.В.</i> Наблюдения неизвестных фрагментов космического мусора в Терскольской обсерватории	62
<i>Леонов В.А.</i> Возможности метеорной астрономии для исследования темпов очистки ОКП от космического мусора	68
<i>Кохирова Г.И., Бахтигараев Н.С., Хамроев У.Х., Мулло-Абдоллов А.Ш., Чазов В.В.</i> Исследования космического мусора в международной астрономической обсерватории Санглох	72
Метеорная астрономия	79
<i>Барабанов С.И.</i> Крупные тела в метеороидных потоках: обзор работ по их поиску	80
<i>Карташова А.П., Болгова Г.Т.</i> Телевизионные наблюдения метеоров в Институте астрономии РАН	87

<i>Леонов В.А., Багров А.В.</i> Фотометрический каталог для обработки метеорных наблюдений	93
<i>Терентьева А.К., Барабанов С.И.</i> Яркий болид над Чехией и его метеорные потоки	100
<i>Карташова А.П., Болгова Г.Т.</i> Исследования метеорных потоков по наблюдениям в ИНАСАН. Метеорный поток Персеид	106
Астероиды и кометы	113
<i>Шустов Б.М., Нароенков С.А.</i> Проблема астероидно-кометной опасности: российские подходы	114
<i>Сергеев А.В., Шустов Б.М., Тарадий В.К., Андреев М.В.</i> Наблюдения астероида 2012 ТС4 в Терскольской обсерватории в рамках международной кампании, организованной IAWN	123
<i>Емельяненко Н.Ю.</i> Реверсии линии апсид в сближениях малых тел с планетами	129
<i>Емельяненко Н.Ю.</i> Открытие, утеря и переоткрытие кометы 205P/1896 R2 Джакобини	135
<i>Емельяненко В.В.</i> Разложение возмущающей функции для кометных орбит во внутреннем варианте ограниченной задачи трех тел	140
<i>Емельяненко В.В.</i> Определение орбит малых тел Солнечной системы по коротким дугам наблюдений методом перебора топоцентрических расстояний	145
Эволюция звезд	151
<i>Фадеев Ю.А.</i> Вековое изменение периода цефеиды U Sgr и теория звездной эволюции	152
<i>Юнгельсон Л.Р.</i> Ультракompактные катаклизмические переменные, богатые водородом?	157
<i>Ибрагимов М.А.</i> Эруптивные явления на ранних стадиях звездной эволюции: новый класс вспышек типа IX Ori	163
<i>Чулков Д.А., Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Сытов А.Ю., Тутуков А.В., Юнгельсон Л.Р.</i> Популяционный синтез визуальных двойных звезд	169
<i>Юнгельсон Л.Р., Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Сытов А.Ю., Тутуков А.В., Чулков Д.А.</i> Функция звездообразования визуально-двойных систем	175

<i>Малков О.Ю., Сытов А.Ю., Юнгельсон Л.Р., Ковалева Д.А., Тутуков А.В., Чулков Д.А.</i> Моделирование функции звездообразования двойных систем	181
<i>Тутуков А.В., Ковалева Д.А.</i> Роль магнитного звездного ветра в эволюции тесных двойных звезд	191
<i>Саванов И.С.</i> Переменность блеска звезды ROTD КIC 6222381	197
<i>Сичевский С.Г.</i> SPI — инструмент для определения характеристик звезд	202
Структура, динамика, кинематика и эволюция звездных систем	209
<i>Пискунов А.Э., Харченко Н.В.</i> Глобальный обзор звездных скоплений в Млечном Пути I: трехмерная карта поглощающей материи	210
<i>Пискунов А.Э., Харченко Н.В.</i> Глобальный обзор звездных скоплений в Млечном Пути II: пространственные пределы полноты.	216
<i>Харченко Н.В., Пискунов А.Э.</i> Глобальный обзор звездных скоплений в Млечном Пути III: Кинематика и фундаментальные параметры шаровых скоплений	222
<i>Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В.</i> Изучение кинематики звезд в скоплении Гиады методом AD-диаграмм	228
<i>Постникова Е.С., Верещагин С.В., Чупина Н.В.</i> Параметры 19 рассеянных звездных скоплений по данным каталога Gaia DR1	235
<i>Омурканов Т.З., Поляченко Е.В.</i> Гравитационная неустойчивость газового и звездного дисков галактики M81	241
<i>Поляченко Е.В., Шухман И.Г.</i> К резонансному поглощению волн плотности в спиральных галактиках	246
<i>Поляченко Е.В., Банньярд П.</i> Метод конечных элементов в задаче о неустойчивости звездных дисков	254
<i>Поляченко Е.В.</i> Исследование неустойчивости методом конечных элементов на примере одной точно решаемой модели газового диска	259
<i>Поляченко Е.В., Шухман И.Г., Берцик П.П.</i> Аномальная релаксация в звездных системах с почти гармоническим потенциалом	264

<i>Хоперсков С.А., Храпов С.С., Вениченко Ю.А.</i> Динамика газа и структура магнитного поля в галактиках с баром	269
<i>Хоперсков С.А.</i> Гравитационная неустойчивость в неоднородном галактическом диске: влияние магнитного поля	276
<i>Торгашин Ю.М.</i> Гидродинамические моды в газовых дисках галактик с «двугорбой» кривой вращения	282
<i>Федорова А.В., Тутуков А.В.</i> Один из механизмов формирования кольцевых структур в галактических и протопланетных дисках	289
Наблюдательные инструменты, приборы, методики	295
<i>Багров А.В., Леонов В.А.</i> Принципы глобальной навигации аппаратов на поверхности Луны	296
<i>Багров А.В., Леонов В.А.</i> Оптические маяки на Луне для решения задач уточнения теории движений Луны . . .	301
<i>Крючков С.В., Николенко И.В., Баканас Е.С.</i> Симеизская обсерватория. История и перспективы развития	308
<i>Нароенков С.А., Наливкин М.А.</i> Оценка астроклиматических условий для создания совместной Российско-Кубинской обсерватории	314
<i>Наливкин М.А., Шугаров А.С.</i> INF: проект высокопроизводительного обзора сети ИНАСАН	320
<i>Штирберг Л.С., Мазуров В.А.</i> Перспективы развития лазерного спутникового дальномера Simeiz-1873 для решения задач космической геодезии и геодинамики	327
<i>Мошнеев А.А., Власенко О.В., Сичевский С.Г.</i> Комплексный контрольно-измерительный стенд телескопа Т-170М . .	334
<i>Нароенков С.А., Наливкин М.А.</i> Робот-телескоп Звенигородской обсерватории ИНАСАН	339
<i>Шугаров А.С., Шустов Б.М., Нароенков С.А.</i> Система обнаружения дневных астероидов (СОДА)	345
Астрономические данные и виртуальные обсерватории	351
<i>Казаровец Е.В.</i> Каталоги звезд, заподозренных в переменности блеска, — взгляд в прошлое и перспективы	352
<i>Самусь Н.Н., Казаровец Е.В., Киреева Н.Н., Пастухова Е.Н., Дурлевич О.В.</i> Общий каталог переменных звезд на этапе электронного пятого издания	358
<i>Казаровец Е.В., Пастухова Е.Н.</i> Проблемы исследований переменных звезд по архивам наблюдений	362

<i>Самусь Н.Н., Зубарева А.М., Колесникова Д.М., Антипин С.В.</i> Новые переменные звезды в программе сканирования московской фототеки	368
<i>Пахомов Ю.В.</i> Метод калибровки спектров по длинам волн с помощью базы данных VALD	374
<i>Ковалева Д.А., Малков О.Ю., Кайгородов П.В.</i> База данных двойных звезд BDB	380
<i>Сичевский С.Г.</i> Определение спектрального типа звезд по WBVR фотометрии	385
<i>Длужневская О.Б., Малков О.Ю.</i> Российская виртуальная обсерватория	391
<i>Ковалева Д.А., Карчевский А.В., Скворцов Н.А., Малков О.Ю.</i> Каталог идентификаций двойных звезд ILB	397
<i>Пахомов Ю.В., Рябчикова Т.А.</i> Виртуальный центр атомных и молекулярных данных VAMDC	402
<i>Сичевский С.Г.</i> Теоретико-вероятностное построение трехмерной карты поглощения в Галактике	409
<i>Малков О.Ю., Длужневская О.Б., Жао Г., Жуков А.О., Карпов С.В., Кильпио Е.Ю., Князев А.Ю., Ковалева Д.А., Мерфи Д., Микаэлян А.М., Миронов А.В., Сичевский С.Г., Сытов А.Ю., Чулков Д.А.</i> Исследование межзвездного поглощения	416
<i>Малков О.Ю.</i> Классификация и параметризация полуразделенных затменных двойных	424

Contents

<i>Shustov B.M., Duzhnevskaya O.B., Rykhlova L.V., Tutukov A.V.</i> Leaders of Russian astronomy: Prof. A.G. Masevich	3
Space astrometry, geodesy, geodynamics	13
<i>Shematovich V.I.</i> Earth's upper atmosphere	14
<i>Kluykov A.A.</i> New era in studies of gravity field of Earth	20
<i>Kluykov A.A.</i> The determination of gravity field Earth parameters by gradiometry observations	26
<i>Ebauer K.V.</i> Studying of Earth's center of mass variations with Satellite Laser Ranging and GRACE project data	32
<i>Ebauer K.V.</i> Method for determination of the low-frequency component of the Earth's gravitational field from the combined analysis of the low-orbit and LAGEOS satellites	37
<i>Kuzin S.P.</i> DORIS data processing in the INASAN Analysis Center	43
<i>Kuzin S.P.</i> Geocenter motion analysis using GNSS and DORIS radio satellite system measurements	49
Space debris	55
<i>Levkina P.A.</i> Research of the motion of artificial satellites and space debris at the INASAN	56
<i>Bakhtigaraev N.S., Levkina P.A., Karpov N.V., Chazov V.V.</i> Observations of unknown space debris objects at the Terskol observatory	62
<i>Leonov V.A.</i> Possibilities of meteor astronomy for study of the rate of cleaning of the near-earth space from space debris	68
<i>Kokhirova G.I., Bakhtigaraev N.S., Khamroev U.Kh., Mullo-Abdolov A.Sh., Chazov V.V.</i> Investigations of space debris at the International Astronomical Observatory Sanglokh	72
Meteor astronomy	79
<i>Barabanov S.I.</i> Large bodies in meteoroid streams: review of activity for their searching	80
<i>Kartashova A.P., Bolgova G.T.</i> Television meteor observations at the Institute of Astronomy of the RAS	87
<i>Leonov V.A., Bagrov A.V.</i> Photometric catalogue for processing of meteor observations	93

<i>Terentjeva A.K., Barabanov S.I.</i> Bright fireball over Czech Republic and its meteor streams	100
<i>Kartashova A.P., Bolgova G.T.</i> Investigation of the meteor showers by INASAN observations. Perseids	106
Asteroids and comets	113
<i>Shustov B.M., Naroenkov S.A.</i> The NEO problem: Russian approaches	114
<i>Sergeev A.V., Shustov B.M., Taradii V.K., Andreev M.V.</i> Observations of the asteroid 2012 TC4 at the Terskol Observatory in the framework of the international campaign organized by IAWN	123
<i>Emel'yanenko N.Yu.</i> Reversion of the apsides lines in the encounters of small bodies with the planets.	129
<i>Emel'yanenko N.Yu.</i> The discovery, loss and rediscovery of comet 205P/1896 R2 Giacobini	135
<i>Emel'yanenko V.V.</i> Expansion of the disturbing function for cometary orbits in the inner variant of the restricted three-body problem	140
<i>Emel'yanenko V.V.</i> Determination of orbits of small Solar System bodies with short observation arcs by an exhaustive search of topocentric distances	145
Stellar evolution	151
<i>Fadeyev Yu.A.</i> Secular period change in the cepheid U Sgr and the theory of stellar evolution	152
<i>Yungelson L.R.</i> Hydrogen-rich ultra-compact cataclysmic variables?	157
<i>Ibrahimov M.A.</i> Eruptive Phenomena in Early Stellar Evolution: New Class of IX Oph Type Eruptions	163
<i>Chulkov D.A., Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Sytov A.Yu., Tutukov A.V., Yungelson L.R.</i> Population synthesis of visual binary stars	169
<i>Yungelson L.R., Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Sytov A.Yu., Tutukov A.V., Chulkov D.A.</i> Star formation function of visual binary systems	175
<i>Malkov O.Yu., Sytov A.Yu., Yungelson L.R., Kovaleva D.A., Tutukov A.V., Chulkov D.A.</i> Modeling star formation function of binary systems	181

<i>Tutukov A.V., Kovaleva D.A.</i> Role of magnetic stellar wind in evolution of close binary stars	191
<i>Savanov I.S.</i> Light variability of the ROTD star KIC 6222381 .	197
<i>Sichevsky S.G.</i> SPI tool to determine characteristics of stars . .	202
Structure, dynamics, kinematics, and evolution of stellar systems	209
<i>Piskunov A.E., Kharchenko N.V.</i> The Global survey of open clusters in the Milky Way I: 3D map of absorbing matter	210
<i>Piskunov A.E., Kharchenko N.V.</i> The Global survey of open clusters in the Milky Way II: limits of the spatial completeness	216
<i>Kharchenko N.V., Piskunov A.E.</i> Global survey of star clusters in the Milky Way III: kinematics and fundamental parameters of globular clusters	222
<i>Postnikova E.S., Vereshchagin S.V., Chupina N.V.</i> Study of the kinematics of stars in the Hyades cluster by the AD-diagram method	228
<i>Postnikova E.S., Vereshchagin S.V., Chupina N.V.</i> The parameters of 19 open star clusters from Gaia DR1	235
<i>Omurkanov T.Z., Polyachenko E.V.</i> Gravitational instability of the gaseous and stellar discs of the galaxy M81	241
<i>Polyachenko E.V., Shukhman I.G.</i> To the resonance decay of the density waves in spiral galaxies	246
<i>Polyachenko E.V., Banniard P.</i> Finite element method in stability problem for stellar discs	254
<i>Polyachenko E.V.</i> Investigation of instability by the finite element method on the example of one exactly solvable model of the fluid disc	259
<i>Polyachenko E.V., Shukhman I. G., Berczik P.P.</i> Anomalous relaxation in stellar systems with near-harmonic potential	264
<i>Khoperskov S.A., Khrapov S.S., Venichenko Yu.A.</i> Gas flows and magnetic field structure in barred galaxies	269
<i>Khoperskov S.A.</i> Gravitational instability in galactic disk: the role of inhomogeneous and magnetic field	276
<i>Torgashin Yu.M.</i> Hydrodynamic modes in the gaseous galactic disks with a “two-humped” rotation curves	282
<i>Fedorova A.V., Tutukov A.V.</i> One more mechanism of formation of ring structures in galactic and protoplanetary disks . .	289

Observational facilities, tools, methods	295
<i>Bagrov A.V., Leonov V.A.</i> The principles of global navigation of spacecrafts on the surface of the Moon	296
<i>Bagrov A.V., Leonov V.A.</i> Optical beacons on lunar surface for improvement of the Moon Motion Theory	301
<i>Kryuchkov S.V., Nikolenko I.V., Bakanas E.S.</i> Simeiz Observatory. The history and development prospects	308
<i>Naroenkov S.A., Nalivkin M.A.</i> Assessment of astroclimatic conditions for creation of joint Russian-Cuban observatory . .	314
<i>Nalivkin M.A., Shugarov A.S.</i> INF project: a high-performance sky survey for INASAN network	320
<i>Shtirberg L.S., Mazurov V.A.</i> The prospects of development of a laser satellite range finder (LSR) of Simeiz-1873 for the solution of problems of space geodesy and geodynamics .	327
<i>Moisheev A.A., Vlasenko O.V., Sichevsky S.G.</i> Assembly Integration and Verification stand of the T-170M telescope . .	334
<i>Naroenkov S.A., Nalivkin M.A.</i> Robotic telescope of Zvenigorod observatory INASAN	339
<i>Shugarov A.S., Shustov B.M., Naroenkov S.A.</i> System of observation of day-time asteroids (SODA)	345
Astronomical data and virtual observatories	351
<i>Kazarovets E.V.</i> Catalogues of Suspected Variable Stars — Retrospect and Prospects	352
<i>Samus N.N., Kazarovets E.V., Kireeva N.N., Pastukhova E.N., Durlevich O.V.</i> General Catalogue of Variable Stars at the Stage of its Electronic Fifth Edition	358
<i>Kazarovets E.V., Pastukhova E.N.</i> Problems of variable star studies from archives of observations	362
<i>Samus N.N., Zubareva A.M., Kolesnikova D.M., Antipin S.V.</i> New variable stars in the program of scanning the Moscow astronomical plate collection	368
<i>Pakhomov Yu.V.</i> Method of spectral wavelength calibration using the VALD database	374
<i>Kovaleva D.A., Malkov O.Yu., Kaygorodov P.V.</i> Binary star DataBase, BDB	380
<i>Sichevsky S.G.</i> Spectral type determination by WBVR photometry	385
<i>Dluhznevsckaya O.B., Malkov O.Yu.</i> Russian Virtual Observatory	391

<i>Kovaleva D.A., Karchevsky A.V., Skvortsov N.A., Malkov O.Yu.</i> Catalogue of identifications of binary stars, ILB	397
<i>Pakhomov Yu.V., Ryabchikova T.A.</i> Virtual atomic and molecular data centre VAMDC	402
<i>Sichevsky S.G.</i> Theoretical-probabilistic building of a 3D extinction map in the Galaxy	409
<i>Malkov O.Yu., Dluzhnevskaya O.B., Zhao G., Zhukov A.O., Karpov S.V., Kilpio E.Yu., Kniazev A.Yu., Kovaleva D.A., Murthy J., Mickaelian A.M., Mironov A.V., Sichevsky S.G., Sytov A.Yu., Chulkov D.A.</i> Study of interstellar extinction	416
<i>Malkov O.Yu.</i> Classification and parameterisation of semi-detached eclipsing binaries	424

Научное издание

**Сборник трудов конференции «Звезды и спутники»,
посвященной 100-летию со дня рождения А.Г. Масевич,
проведенной в Москве 15–16 октября 2018 г.**

Под редакцией *Б.М. Шустова* и *Д.З. Вибе*

Сдано в набор 04.06.2018. Подписано в печать 27.08.2018
Формат 60x90/16. Бумага офсетная
Уч.-изд. п.л. 30. Физ. п.л. 27.5. Тираж 150. Заказ N 3291

Издательство «Янус-К»
127411, Москва, Учинская ул., д. 1
Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»
119034, Москва, Еропкинский пер., д. 16

