

На правах рукописи

Сичевский Сергей Григорьевич

**Межзвёздное поглощение и характеристики звёзд:  
использование больших обзоров неба**

Специальность 01.03.02 —  
Астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент  
**Малков Олег Юрьевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Бобылев Вадим Вадимович**, заведующий лабораторией динамики Галактики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН)

доктор физико-математических наук  
**Дамбис Андрей Карлович**, заведующий отделом астрометрии и службы времени Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 ноября 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНАСАН и на сайте <http://www.inasan.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.280.01.

Автореферат разослан « » 2021 года.

Телефон для справок: +7 (495) 951-54-61.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.280.01,  
кандидат физ.-мат. наук

Чупина Наталия Викторовна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Галактика Млечный Путь — единственная галактика, которую можно наблюдать в мельчайших деталях, но большая часть плоскости Галактики закрыта межзвездной пылью, которая является частью межзвездной среды — вещества и поля, заполняющих пространство между звездами. Масса межзвездной среды составляет только малую часть полной массы Галактики. Тем не менее, она играет важную роль во многих физических и химических процессах, происходящих в экосистеме нашей Галактики. Изучение Галактики невозможно без знания основных характеристик ее звездной составляющей. Теория эволюции звезд позволяет вычислять эволюционные треки звезд, в то время как модели звездных атмосфер являются своеобразным связующим звеном между характеристиками звезды и ее наблюдаемым спектром. Это дает основу для разработки методов вычисления значений одних характеристик (радиуса, массы, светимости) звезды по ее другим (эффективной температуре, ускорению силы тяжести), которые могут быть получены из ее спектра. Однако задача усложняется наличием межзвездной среды, которая ослабляет свет звезд и искажает распределение энергии в их спектре. Знание пространственного распределения межзвездной пыли имеет решающее значение для УФ и оптической астрономии, где пыль является поглощающей преградой, внегалактической астрономии и космологии, где она является излучающим фоном, и для звездообразования, где сама межзвездная пыль выступает объектом исследования.

Детальные исследования звездных популяций и пространственных структур в Галактике требуют поправок за поглощение и покраснение из-за влияния межзвездной пыли. Так, галактическая плоскость, содержащая большую часть звездного населения, является областью, в которой излучение звезд наиболее сильно ослаблено межзвездной пылью. Но пыль — это не только проблема для астрономов. Распределение межзвездной пыли имеет тенденцию к повторению распределения межзвездного газа, поэтому детальная карта пространственного распределения пыли помогла бы в понимании процессов, формирующих Галактику: от звездообразования до сверхновых звезд и звездных ветров, формирующих межзвездную среду нашей Галактики.

Межзвездное поглощение из-за пылевых частиц изменяет распределение энергии в спектре звезды так, что это приводит к покраснению наблюдаемого блеска звезды. Это обуславливает взаимосвязанность процесса исследования звезд и межзвездного поглощения. Однако измерить спектр звезды с достаточно высокой точностью непросто. В связи с этим для исследования излучения звезд обычно применяют многополосную (многоцветную) фотометрию, то есть измерение потока излучения в определенных спектральных диапазонах (полосах). В многополосных

фотометрических обзорах (GALEX, Gaia, Pan-STARRS, SDSS, IPHAS, 2MASS) накоплены результаты наблюдений миллионов звезд, и неявным образом содержится информация о межзвездной среде. В связи с этим создание на основе фотометрических наблюдений с использованием априорных данных трехмерной карты межзвездного поглощения и распределения пыли в Галактике, используя теоретико-вероятностный подход, является актуальной задачей. Теоретико-вероятностный подход позволяет использовать любые предварительные знания: область возможных значений оцениваемых характеристик или степень доверия к тому, что некоторые их оценки более реалистичны, чем другие. В частности, такой подход позволяет не применять усредненный по всем направлениям в Галактике закон межзвездного поглощения, а варьировать его в области вероятных значений  $R_V$ .

До недавнего времени абсолютные спектрофотометрические измерения производились с земной поверхности в ограниченном спектральном интервале, причем применявшаяся аппаратура, как правило, обладала невысокой проникающей способностью. Поэтому речь шла о близких и ярких объектах, и зачастую достаточно было использовать средний закон межзвездного поглощения, полученный еще Уитфордом в 1958 году. Для многих целей указанная поправка обеспечивала достаточную точность.

С развитием фотоприемной аппаратуры и освоением новых спектральных диапазонов появилась необходимость получения достаточно простого способа учета межзвездного поглощения в широком диапазоне — от вакуумного УФ до далекой ИК области.

Распределение межзвездной пыли, следовательно и межзвездного поглощения, можно получить, исследуя излучение, проходящее через пылевые облака, или измеряя собственное излучение пыли. Существуют двумерные (плоские) карты межзвездного поглощения в нашей Галактике. Однако такие карты обладают ограничениями: отсутствием зависимости поглощения от расстояния, невозможностью оценки поглощения для близких объектов и объектов в плоскости Галактики. Кроме того, для плоских карт, построенных на основе наблюдения собственного излучения пыли, возможны систематические ошибки при переходе от излучения пыли к поглощению.

Клочковатая структура межзвездной среды обуславливает большую трудоемкость при выяснении распределения поглощающего вещества на луче зрения. Поэтому, несмотря на то что изучению распределения поглощающего вещества в Галактике посвящены сотни статей, работа до сих пор далека до завершения.

Целью данной работы является решение важной с практической точки зрения задачи: создание способа построения трехмерной карты межзвездного поглощения в Галактике на основе байесовского вероятностного

подхода к оценке характеристик звезд и закона межзвездного поглощения на основе фотометрических наблюдений с использованием априорных знаний.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать возможность вычисления интервальных и точечных оценок радиуса звезды по ее температуре и поверхностному ускорению на основе результатов расчетов теории строения звезд и их эволюции.
2. Разработать способ, позволяющий за приемлемое время выполнять массовый поиск наиболее вероятных интервальных и точечных оценок характеристик (радиус, масса, светимость) звезд по значениям их температуры и поверхностного ускорения, используя результаты расчетов теории строения звезд и их эволюции.
3. Исследовать возможность определения физических условий в атмосфере звезды по многоцветным фотометрическим наблюдениям, изначально не оптимизированным для решения такой задачи.
4. Исследовать особенности фотометрических систем обзоров (основные обзоры: GALEX, SDSS, Pan-STARRS, Gaia, 2MASS, IPHAS) для вычисления блеска звезды с учетом межзвездного поглощения на основе моделей звездных атмосфер.
5. Разработать способ вычисления блеска звезды с учетом межзвездного поглощения, позволяющий сократить время поиска оптимальной оценки характеристик звезд и межзвездного поглощения.
6. Исследовать возможность применения байесовского подхода к оценке характеристик звезд и параметров кривой межзвездного поглощения по широкополосным многоцветным фотометрическим наблюдениям.
7. Разработать способ оценки межзвездного поглощения по многоцветной фотометрии звезд и априорному знанию их характеристик.
8. Исследовать возможность применения байесовского подхода к созданию способа построения пространственной карты межзвездного поглощения в Галактике.
9. Разработать способ исследования зависимости межзвездного поглощения от расстояния по многоцветной фотометрии звезд и априорному знанию их характеристик и вида зависимости поглощения от расстояния.
10. Вычислить зависимость межзвездного поглощения от расстояния для выбранных направлений, используя многоцветную фотометрию звезд и априорные данные: значения температуры, поверхностного ускорения из LAMOST, значения параллакса из Gaia и

ограничение в виде не убывания поглощения с увеличением расстояния.

11. Сравнить вычисленные зависимости межзвездного поглощения от расстояния с существующими оценками максимального покраснения в Галактике.

### **Научная новизна:**

1. Разработан эффективный способ оценок радиуса, массы, светимости звезд по значениям их температуры, ускорению силы тяжести и металличности. Способ основан на анализе эволюционных треков звезд; применение эволюционных расчетов звезд двух типов — с учетом и без учета вращения звезды — позволяет учесть неопределенность, связанную с отсутствием данных о скорости вращения исследуемых звезд. В отличие от методов других авторов этот метод свободен от предположений о геометрическом подобии эволюционных треков.
2. Разработан новый способ оценки межзвездного поглощения по многоцветной фотометрии звезд и априорному знанию их характеристик и вида зависимости поглощения от расстояния, который позволяет совместно использовать многоцветную фотометрию из обзоров разных диапазонов длин волн (основные обзоры: GALEX, SDSS, Pan-STARRS, Gaia, 2MASS, IPHAS), что приводит к уменьшению неопределенности оценки поглощения.
3. Не используется обычное упрощение — использование усредненного закона межзвездного поглощения, так как хорошо известно, что значение параметра  $R_V$  может меняться в больших пределах, и, следовательно, использование усредненного закона межзвездного поглощения может привести к непредсказуемым ошибкам в значениях определяемых характеристик звезд и межзвездной среды. Поэтому в отличие от работ, в которых принимается  $R_V = 3.1$ , в проводимом исследовании его значение не фиксируется, а допускается изменение в широком диапазоне.
4. Впервые определена зависимость межзвездного поглощения от расстояния для двух областей, используя многоцветную фотометрию звезд (Pan-STARRS, Gaia, 2MASS) и априорные данные: значения температуры, ускорения силы тяжести из LAMOST и значения параллакса из Gaia.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что знание межзвездного поглощения важно в астрономических исследованиях на разных масштабах, от внегалактической астрономии, где требуется учитывать вклад поглощения всей Галактики вдоль луча зрения, и исследований структуры Галактики, в которых корректность определения поглощения связана с точностью шкалы расстояний, до исследований звезд, где она обуславливает правильность оценки энерговыделения, и поиска экзопланет, в

котором межзвездное поглощение — один из факторов, накладывающих ограничения на вероятность обнаружения таких объектов. Кроме того, знание межзвездного поглощения может быть использовано для изучения уже найденных экзопланет и их связи с родительскими звездами, а исследования экзопланет являются наиболее актуальным и востребованным направлением современной астрономии и астрофизики.

Результаты диссертационного исследования могут быть применены в построении трехмерной карты межзвездного поглощения в Галактике, угловая детализация которой будет определяться только возможностью разбиения небесной сферы на неравные области, зависимость поглощения от расстояния в которых считается одинаковой для всех звезд. При этом допустимо, чтобы в каждой такой области содержалось небольшое количество звезд — порядка десятка штук. В зависимости от детализации карта может быть полезной для выделения пространственных структур в Галактике — струи, спиральные рукава и т.п., а также может позволить определить систематические ошибки в двумерных картах, построенных на основе наблюдения собственного излучения пыли.

В ближайшее время угловое разрешение будет ограничиваться спектроскопическими обзорами. При этом доступные данные из современных спектроскопических обзоров (LAMOST, RAVE) обеспечивают достаточное (один-два десятка) количество звезд для получения зависимости поглощения от расстояния в областях неба размером  $\sim 10'$ , что заметно превышает разрешение (градусы), используемое в современных трехмерных картах межзвездного поглощения, особенно для высоких и средних галактических широт.

**Методология и методы исследования.** Современные теории звездных атмосфер, строения и эволюции звезд позволяют оценивать то, как должны излучать звезды. Межзвездные пылевые облака изменяют проходящее сквозь них излучение звезд. Таким образом, каждая звезда является инструментом, который позволяет изучить пылевую среду между наблюдателем и звездой. Определение межзвездного поглощения между наблюдателем и миллионами звезд по всему небу позволит построить карту пространственного распределения межзвездного поглощения в Галактике. При этом, чем больше наблюдений звезд доступно, тем более детальную карту можно построить.

Определить межзвездное поглощение, как и характеристики звезды, можно по анализу ее спектра. Однако измерить спектр с достаточно высокой точностью непросто — необходимо использовать телескоп с большой апертурой, или наблюдаемый объект должен быть достаточно ярким. По этой причине для исследования распределения энергии в спектре звезд обычно применяют фотометрию — измерение потока излучения в определенных участках спектра (полосах). Современные фотометрические каталоги содержат результаты наблюдений сотен миллионов объектов.

Так, в обзоре 2MASS — JHKs фотометрия  $\sim 5 \cdot 10^8$  точечных источников, в Pan-STARRS — grizy фотометрия  $\sim 8 \cdot 10^8$  источников, в SDSS — ugriz фотометрия  $\sim 3 \cdot 10^8$  источников и в IPHAS —  $H_{\alpha}gi$  фотометрия  $2 \cdot 10^8$  источников.

С другой стороны, недавно появились спектроскопические обзоры SEGUE (содержит около  $2 \cdot 10^5$  спектров), и LEGUE (содержит более  $10^6$  спектров). Для звезд, входящих в эти обзоры, определены значения параметров их атмосфер (эффективная температура, ускорение силы тяжести, химический состав). Однако ценность указанных обзоров не в сверхточной оценке атмосферных параметров звезд, а в том, что они обеспечивают такие оценки для большого числа объектов. Исследование зависимости межзвездного поглощения от расстояния предлагается проводить по совместной оценке межзвездного поглощения и расстояния для всех звезд в выбранном направлении, поэтому невысокая точность исходных данных для отдельных звезд может быть скомпенсирована их количеством.

На первом этапе необходимо подготовить исходные данные — провести взаимное отождествление одних и тех же объектов во всех используемых фотометрических и спектроскопических обзорах. Для этого подходит алгоритм быстрого позиционного отождествления больших астрономических каталогов в площадках малого (до градуса) размера с фильтрацией ложных сопоставлений.

Далее, на основе результатов отождествления объектов, необходимо провести разбиение небесной сферы на неравные области. В каждой такой области закон межзвездного поглощения считается одинаковым для всех звезд. Особенность в том, что размер области должен соответствовать угловым изменениям межзвездного поглощения, при этом содержать достаточное количество звезд.

После подготовки исходных данных для каждой выделенной области, применяя теоретико-вероятностный подход на основе теоремы Байеса, необходимо провести оптимальную оценку параметров кривой межзвездного поглощения и характеристик звезд — восстановить зависимость межзвездного поглощения от расстояния. В отличие от классического подхода, в байесовском, посредством априорной плотности вероятности, выражается степень доверия к различным возможным значениям определяемых характеристик звезд и параметров кривой межзвездного поглощения. Одним из преимуществ такого подхода 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.

Одним из общих способов оценки значения исследуемого параметра по результатам наблюдений является метод максимального правдоподобия. В рассматриваемом случае оценкой максимального правдоподобия

характеристик звезд и параметров кривой межзвездного поглощения будут такие их значения, которым соответствует максимум апостериорной функции плотности вероятностей. Как правило, оптимальный способ оценки представляет собой некоторую итеративную процедуру, требующую расчета теоретического значения измеренной величины, т.е. блеска звезды. Вычисления теоретического блеска звезд выполнено на основе моделей звездных атмосфер с использованием предложенного Карделли и др. аналитического выражения для кривой межзвездного поглощения, в котором в качестве параметра принята величина  $R_V = A_V/E(B - V)$ . При этом в вычислениях не применяется усредненная по всем направлениям в Галактике кривая межзвездного поглощения, а допускаются ее вариации в области допустимых значений  $R_V$ .

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработан эффективный метод, реализованный с доступом через веб-интерфейс<sup>1</sup>, для вычисления наиболее вероятных с учетом эффектов эволюции звезд оценок характеристик звезды (радиуса, массы и светимости) по значениям ее эффективной температуры, ускорения силы тяжести и металличности. Метод основан на эволюционных треках звезд, но независим от предположений об их геометрическом подобии, и использует алгоритмы быстрого поиска. Это позволяет его применять в задачах массового вычисления интервальных и точечных оценок характеристик звезд.
2. Разработан метод, основанный на принципе максимального правдоподобия и построении индекса для быстрого поиска — специальным образом упорядоченной структуры данных по типу k-d дерева, позволяющий быстро и массово получать предварительные оценки температуры звезд и полного поглощения исключительно по фотометрическим наблюдениям обзоров SDSS и 2MASS. Метод не зависит от предположения о первоначальных значениях определяемых характеристик и попадания в локальные экстремумы. Это позволяет его применять в задачах оптимального оценивания для определения первоначальных значений температуры звезды и полного поглощения.
3. Сделан вывод, что при исследовании звезд, как отдельных объектов, знание значений их температуры и ускорения силы тяжести с погрешностью  $\Delta_{lg g} = 1.5$  и  $\Delta_{T_{\text{эф}}} = 450$  К позволяет исключительно по данным SDSS и 2MASS достичь оценки полного поглощения с погрешностью  $0^{\text{m}}3$ , а углового диаметра звезды с относительной погрешностью 10 %. При определенных подходах к методам исследования эти обзоры могут служить источником данных для массового определения зависимости поглощения от расстояния.

---

<sup>1</sup>Адрес в сети Интернет <http://spi.inasan.ru/>

4. Разработан метод определения зависимости межзвездного поглощения от расстояния по анализу совокупности звезд, не требующий точных данных о расстояниях до звезд, их температурах и ускорениях силы тяжести и учитывающий не убывание поглощения с увеличением расстояния. Применение данного метода к двум выбранным направлениям на небе позволило для них впервые определить зависимость покраснения от расстояния.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов исследования способов получения оценок межзвездного поглощения и характеристик звезд подтверждается их сравнением с результатами, полученными другими авторами. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на:

1. Всероссийской конференции «Современная звездная астрономия – 2018» (ГАИШ МГУ, Москва, 22-26 октября 2018 года).
2. Всероссийской конференции «Современная звездная астрономия – 2015» (ГАИШ МГУ, Москва, 29-30 мая 2015 года).
3. ВАК-2013. «Многоликая Вселенная» (Санкт-Петербург, 23-27 сентября 2013 года).
4. Всероссийской конференции «Современная звездная астрономия –2013» (ГАО РАН, Санкт-Петербург, Пулковое, 10-12 июня 2013 года).
5. Joint European and National Astronomy Meeting (St. Petersburg, Russia, July 4-8, 2011)
6. Всероссийской конференции «Современная звездная астрономия – 2011» (ГАИШ МГУ, Москва, 15-16 июня 2011 года).

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в постановке задач, написании программного обеспечения, получении и обработке результатов численных экспериментов, совместно с соавторами участвовал в обсуждении результатов и формулировке выводов.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях, 10 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена определению основных характеристик звезд на основе современных знаний об их эволюции, популяции и физических процессах, имеющих место в их атмосферах и влияющих на формирование спектров. На основе эволюционных расчетов, получивших большую популярность, и современных представлений о звездообразовании с привлечением методов оптимального оценивания решена задача оценки значений радиуса, массы и светимости звезды по ее атмосферным характеристикам, которые могут быть определены по спектроскопическим наблюдениям.

В первой части первой главы приведено описание способа оценки радиуса звезды по ее эффективной температуре и ускорению силы тяжести. В основу способа положено предположение, что зависимость радиуса от эффективной температуры и ускорения силы тяжести, которую можно получить из расчета модели внутреннего строения звезды и ее эволюции, возможно приблизить удобной в применении функцией. Представлен конкретный вид такой функции и указана область ее применения. С этой целью были использованы эволюционные расчеты Женевско-Тулусской группы, описывающие эволюцию звезд с начальной массой от  $0.8 M_{\odot}$  до  $120 M_{\odot}$  и двух значений химического состава – солнечного и соответствующего 10–кратному дефициту тяжелых элементов.

Во второй части первой главы представлены результаты развития способа оценки основных физических характеристик звезды по ее эффективной температуре и ускорению силы тяжести. Используются эволюционные расчеты звезд двух типов – учитывающие и не учитывающие вращение звезды. Это позволило учесть неопределенность, связанную с отсутствием данных о скорости вращения звезды, для которой необходимо оценить радиус. Также предложен способ учета скорости эволюции и начальной функции масс, что позволяет проводить оценку массы, радиуса и светимости звезды более корректно.

В третьей части первой главы представлены результаты дальнейшего развития способа оценки основных физических характеристик звезды по ее эффективной температуре и ускорению силы тяжести как с учетом влияния скорости эволюции и начального распределения звезд по массам, так и химического состава. С целью учесть неопределенность, связанную с отсутствием данных о скорости вращения звезды, также использованы эволюционные расчеты звезд двух типов – учитывающие и не учитывающие вращение звезды. Проверка была выполнена по звездам, для которых оценки их физических характеристик, получены различными независимыми методами. Перечень таких звезд включал как двойные затменные с линиями обоих компонентом в спектре, так и хорошо изученные одиночные, включая звезды с оценкой характеристик методами астросейсмологии.

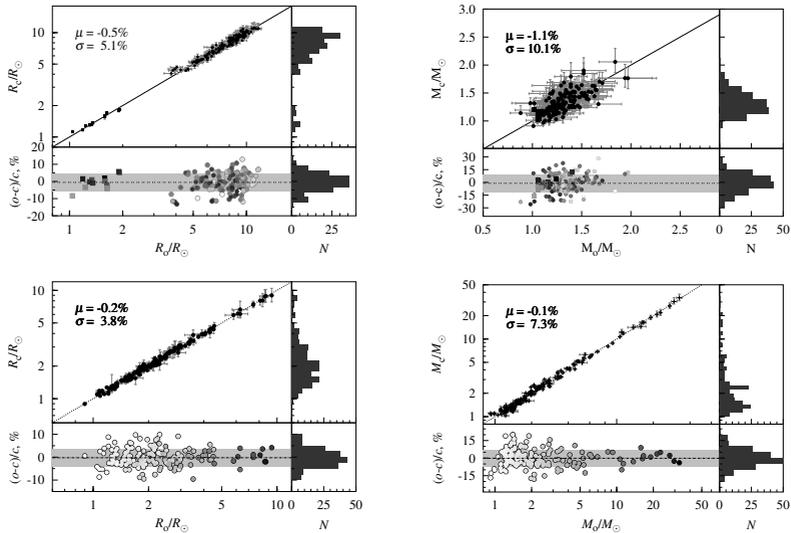


Рис. 1 — Сравнение значений радиуса и массы звезд с их оценками. *Вверху* — красные гиганты и кандидаты в обладатели собственных планет. *Внизу* — компоненты затменных двойных звезд.

Показано, что достигнуто хорошее согласие с наблюдениями: практически отсутствуют систематические отклонения точечных оценок фундаментальных характеристик как для звезд главной последовательности, так и красных гигантов (см. рисунок 1). Приведено описание программной реализации способа оценки физических характеристик звезд. Применялась так называемая идеология «тонкого клиента», в результате в сети Интернет доступна страница (web-интерфейс)<sup>2</sup>, на которой можно сформировать и отправить запрос для вычисления характеристик звезды (радиуса, массы и светимости).

В четвертой части первой главы приведены результаты оценки радиусов, масс и светимостей 700481 звезд спектральных классов A, F, G и K с металличностью от  $-0.845$  до  $0.0$  на основе их спектральных наблюдений обзора LAMOST. Спектроскопический обзор LAMOST изначально не предназначен для определения сверхточных значений атмосферных характеристик звезд, но содержит результаты наблюдений нескольких миллионов звезд. Полученные оценки физических характеристик почти миллиона звезд являются важным исходным материалом для решения астрофизических задач, для которых важна не столько высокая точность исходных данных, сколько их количество. Например, определение

<sup>2</sup>Доступ возможен по адресу <http://spi.inasan.ru>

зависимости межзвездного поглощения от расстояния по звездам, расположенным компактно в одной области на небе, с известными из фотометрии угловыми диаметрами и значениями межзвездного поглощения.

**Вторая глава** посвящена возможности определения физических условий в атмосферах звезд и их классификации по многоцветным фотометрическим наблюдениям, изначально не оптимизированным для решения такой задачи. Исследование проведено на примере современных фотометрических систем, которые применялись в таких известных обзорах, как WBVR, GALEX, SDSS и 2MASS.

Первая часть второй главы посвящена исследованию принципиальной возможности разделить звезды по эффективной температуре, ускорению силы тяжести на основе фотометрических наблюдений из обзоров 2MASS, SDSS и GALEX. Идея состоит в том, чтобы по вычисленным спектрам звезд для разных значений характеристик звезды и межзвездного поглощения вычислить блеск в фотометрических полосах используемых обзоров, а затем проанализировать, насколько отличается блеск для различных значений характеристик звезд и межзвездного поглощения.

Вторая часть второй главы посвящена исследованию возможности использовать с целью определения физических условий в атмосфере звезды и характеристик межзвездной среды современные фотометрические системы, которые специально не создавались для этой цели. На основе многополосной фотометрии современных каталогов 2MASS, SDSS и GALEX проведен анализ возможности одновременного определения температуры ( $T_{\text{eff}}$ ) звезд, их ускорения силы тяжести ( $\lg g$ ), а также полного поглощения ( $A_V$ ) и отношения полного поглощения к селективному ( $R_V$ ).

В третьей части второй главы приведены результаты исследования возможности определения наиболее вероятного спектрального типа звезд на основе их многополосной фотометрии. Исследование выполнено на примере фотометрической системы WBVR каталога ярких звезд северного неба. Предложен способ как определения наиболее вероятного спектрального типа звезд, так и оценки их избытков цвета и расстояний на основе фотометрии. Используя эмпирическую библиотеку звездных спектров Пиклса и закон межзвездного поглощения, сделана оценка надежности определения спектрального типа звезды на основе WBVR-фотометрии. Надежность оценивалась как вероятность корректно определить спектральный тип.

В четвертой части второй главы приведено описание способа определения физических условий в атмосфере звезды и характеристик межзвездной среды по многополосной фотометрии каталогов 2MASS, SDSS и GALEX. За основу взят принцип максимального правдоподобия, позволяющий находить такие значения атмосферных характеристик звезды и межзвездной среды, при которых фотометрия исследуемого объекта минимально отличается от расчетной.

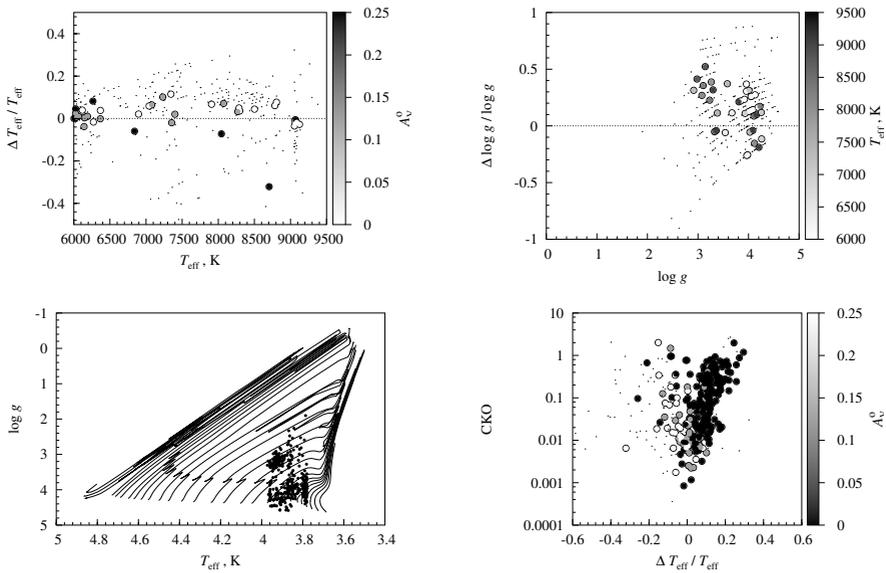


Рис. 2 — *Вверху* — отклонения температуры и ускорения силы тяжести от их исходных значений, случаи с значением суммы квадратов отклонений (СКО)  $> 0.01$  и  $A_V^0 > 0^m25$  показаны черными точками. *Внизу* — исходные значения температуры и ускорения силы тяжести; зависимость отклонения температуры от значения СКО, случаи с  $A_V^0 > 0^m25$  показаны черными точками.

Показано, что реализовать на практике точную оценку характеристики звезд и межзвездной среды только по многополосным фотометрическим наблюдениям обзоров SDSS и 2MASS не позволяет их точность. Тем не менее, по реальным данным из этих обзоров можно получить грубые оценки эффективной температуры и межзвездного поглощения, но другие характеристики — нельзя. Задача определения грубых оценок была решена способом, основанным на методе максимального правдоподобия, без применения численных алгоритмов оптимизации, но с построением и использованием поискового индекса — специальным образом упорядоченной структуры данных по типу  $k - d$  дерева. Способ проверен на выборке размером  $\sim 300$  звезд, для которых известны как значения блеска в полосах  $ugriz$  и  $JHK_S$ , так и значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести (см. рисунок 2). В целом, такой подход, в отличие от численных методов оптимизации, имеет ряд преимуществ: отсутствие необходимости первого приближения, исключение попадания в локальный минимум и высокая скорость работы. Хотя таким способом можно получить только грубые оценки температуры, тем не менее они могут быть использованы в качестве первого приближения в методах, где это необходимо.

**Третья глава** посвящена описанию больших обзоров неба – 2MASS, SDSS, GALEX, IPHAS, Pan-STARRS и Gaia, результаты фотометрических наблюдений которых возможно использовать для исследования межзвездного поглощения в Галактике. Рассмотрены особенности их фотометрических систем и приведены соотношения, включая необходимые калибровочные и нормировочные коэффициенты, для преобразования теоретически рассчитанного спектра звезды в ее блеск в фотометрических полосах указанных обзоров.

В первой части третьей главы кратко изложено описание современных каталогов фотометрических наблюдений, и представлены соотношения, необходимые для расчета теоретического блеска звезды в системах звездных величин обзоров: 2MASS, SDSS, GALEX, IPHAS, Pan-STARRS и Gaia.

Во второй части третьей главы рассмотрены особенности вычисления блеска звезды с учетом межзвездного поглощения на основе моделей звездных атмосфер. Как правило, оптимальный способ оценки представляет собой итеративную процедуру, требующую больших затрат времени на ЭВМ, например, метод Монте-Карло с цепями Маркова. С этой целью рассмотрен подход к вычислению блеска звезды с учетом межзвездного поглощения, позволяющий сократить время, затрачиваемое на поиск оптимальной оценки в рамках байесовского подхода или метода максимального правдоподобия.

**Четвертая глава** посвящена описанию построения пространственной карты межзвездного поглощения в Галактике на основе байесовского теоретико-вероятностного подхода к оценке характеристик звезд и закона межзвездного поглощения на основе фотометрических наблюдений с использованием априорной информации.

В первой части четвертой главы описывается байесовский теоретико-вероятностный подход к оценке характеристик звезд и закона межзвездного поглощения на основе фотометрических наблюдений с использованием априорных данных о характеристиках звезд. На примере фотометрии обзоров SDSS и 2MASS исследована точность получаемых оценок.

Показано, что при точности фотометрии, характерной для указанных обзоров, и погрешности априорных данных  $\Delta T_{\text{эф}} = \pm 450$  К и  $\Delta \lg g = \pm 1.5$ , оценки не имеют значимых систематических отклонений (см. рисунок 3). При этом погрешность оценки межзвездного поглощения  $A_V^0$  около  $0^m3$ , а погрешность оценки  $R_V$  зависит от поглощения и для умеренных значений  $A_V^0$  близка к 0.2. Относительная погрешность оценки углового диаметра звезд близка к 10 %. Важно отметить, что приведенные выводы относятся к случаю, когда звезды анализируются по отдельности и независимо друг от друга.

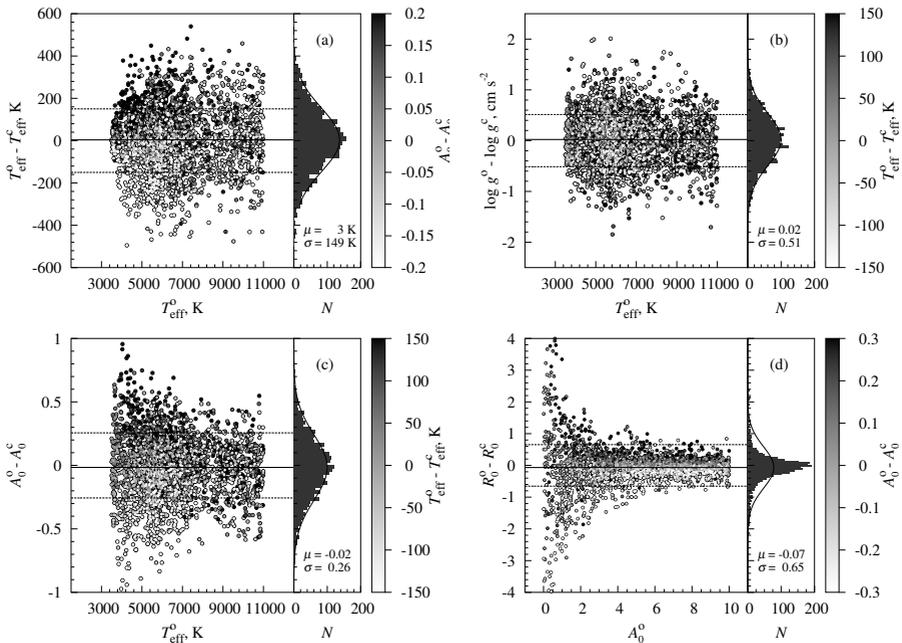


Рис. 3 — Сравнение исходных значений характеристик звезд и параметров кривой межзвездного поглощения с их оценками.

Во второй части четвертой главы описывается 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 должно убывать с увеличением расстояния от наблюдателя, что накладывает ограничения на вид зависимости поглощения от расстояния. Также в качестве априорных данных можно использовать не только результаты массовых спектральных наблюдений, но и паралаксы огромного числа звезд, которые должны быть измерены в рамках проекта Gaia. Пример возможности оценки зависимости межзвездного поглощения от расстояния показан на рисунке 4.

Применение рассмотренного подхода к проверочной выборке звезд показало, что для восстановления зависимости межзвездного поглощения от расстояния необходимо априорное знание значений температуры звезд и расстояния до них. Тем не менее, рассмотрение случая, когда для некоторого небольшого количества звезд из рассматриваемой области есть только априорная информация о расстоянии, показало, что для этих звезд можно ожидать «восстановление» изначально отсутствующих значений температуры, ускорения силы тяжести и радиуса.

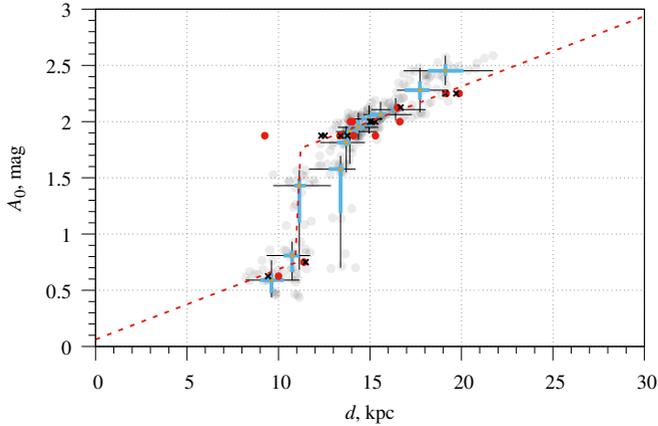


Рис. 4 — Пример возможности оценки зависимости межзвездного поглощения от расстояния. Красная пунктирная линия — исходная зависимость, красные кружки и черные кресты — входные (зашумленные) и исходные значения.

Вторая часть четвертой главы посвящена практическому применению наработанных способов определения характеристик звезд и межзвездной среды. Приведены результаты исследования зависимости закона межзвездного поглощения от расстояния для трех различных направлений на небе. В качестве многоцветной фотометрии использовался блеск в полосах обзоров Gaia, Pan-STARRS, 2MASS и априорные данные о значениях температуры, ускорения силы тяжести и параллакса из вышеупомянутых обзоров LAMOST (DR5) и Gaia (DR2).

В **заклЮчении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

Возможность расчета блеска звезды на основе современных моделей их звездных атмосфер позволяет оценивать характеристики звезд и межзвездной среды путем сравнения результатов наблюдений с расчетами. В настоящей работе изложен вероятностный подход, который по многоцветной фотометрии и априорным данным позволяет провести разделение звезд по их атмосферным характеристикам, а также вынести суждение о межзвездном поглощении. Подход основан на методе максимального правдоподобия и заключается в численном статистическом моделировании

На примере многоцветной фотометрии обзоров SDSS и 2MASS показано, что по ней, с привлечением априорных данных о значениях температуры и ускорения силы тяжести звезды, возможно определение ее характеристик и параметров кривой межзвездного поглощения. При точности фотометрии, соответствующей характерной точности указанных обзоров (от  $0^m01$  до  $0^m03$ ) и погрешности априорных данных  $\Delta_{T_{\text{эфф}}} =$

$\pm 450$  K и  $\Delta_{\lg g} = \pm 1.5$ , погрешность оценки полного поглощения  $A_V^0$  — около  $0^m 3$ , а относительная погрешность оценки углового диаметра  $\alpha_d$  — около 10 %. Погрешность оценки полного поглощения к селективному зависит от величины межзвездного поглощения и, начиная от умеренных значений последнего, близка к 0.2.

Проведено исследование применения байесовского подхода в построении 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 должно убывать с увеличением расстояния от наблюдателя, что накладывает ограничения на возможный вид зависимости поглощения от расстояния.

Поиск оценок максимального правдоподобия в рамках рассмотренной вероятностной модели был реализован методом Монте-Карло с цепями Маркова, который представляет собой итеративную процедуру, требующую расчета теоретического значения измеряемой величины — блеска звезды — для большого набора значений, характеризующих звезду и межзвездное поглощение. Поэтому для расчета значений блеска звезд, необходимых для вычисления функции правдоподобия, был реализован подход, представляющий компромисс между быстротой и точностью. Если имеются  $N$  различных значений характеристик звезды и  $K$  значений параметров кривой межзвездного поглощения, то предложенный подход позволяет уменьшить объем вычислений с  $N \times K$  до  $N + K$ . Дополнительная задача, которая была решена, — это поиск во множестве предварительно вычисленных значений, необходимых для расчета блеска звезды, тех, которые соответствуют конкретным значениям характеристик звезд и параметров кривой межзвездного поглощения. Поиск был реализован на основе специального алгоритма, позволяющего в большом объеме данных быстро находить ближайшего «соседа» к заданной точке в многомерном пространстве. Алгоритм основан на построении поискового индекса — специальным образом упорядоченной структуры данных по типу  $k-d$  дерево.

В настоящей работе показано, что в случае совместного анализа звезд из одной области и при предположении единой зависимости поглощения от расстояния для восстановления этой зависимости по многоцветной фотометрии звезд в полосах 2MASS, SDSS (Pan-STARRS) и Gaia необходимы априорные знания значений температуры звезды и расстояния до нее. Рассмотрение случая, когда для некоторого небольшого количества звезд из исследуемой области есть только априорная информация о расстоянии до них, показало, что для этих звезд можно ожидать «восстановление» изначально отсутствующих значений температуры, ускорения силы тяжести и радиуса. При этом допустимо, чтобы относительная погрешность априорных значений температуры звезды и расстояния до нее достигала значения

до 30 %, а погрешность значений логарифма ускорения силы тяжести — до 1.5.

Для выполнения поставленных задач был создан способ определения характеристик (радиуса, массы и светимости) звезд по ее значениям атмосферных параметров. Проверка на хорошо изученных звездах, которые покрывают две густонаселенные области — область главной последовательности и ветвь красных гигантов, — показала хорошее согласие с наблюдениями. Практически отсутствуют систематические отклонения точечных оценок характеристик как для звезд главной последовательности, так и красных гигантов. Способ был реализован по технологии тонкого клиента в виде комплекта программ для ЭВМ, названного SPI (Stellar Parameter Interface). При этом решены попутные задачи, связанные с созданием, обработкой и хранением запросов на вычисления. В результате в сети Интернет доступен инструмент с веб-интерфейсом<sup>3</sup>. Он позволяет пользователю быстро сформировать и отправить запрос для вычисления характеристик звезды (радиуса, массы и светимости). Обладая веб-интерфейсом, SPI является доступным и простым в использовании инструментом для определения характеристик звезд.

Были определены интервальные и точечные оценки значений радиуса, массы и светимости для 700481 звезд спектральных классов A, F, G и K из обзора LAMOST, металличность которых лежит в диапазоне от  $-0.845$  до  $0.0$ . Созданный каталог доступен в базе данных Vizier и наряду с оценками фундаментальных характеристик звезд содержит значения величин, которые позволяют охарактеризовать качество интервальных оценок: чем ближе значение к единице, тем больше достоверность интервальной оценки.<sup>4</sup>

Результаты настоящей диссертационной работы могут быть применены для дальнейшего исследования способов изучения межзвездного поглощения в Галактике. В частности, в решении важной с практической точки зрения задачи: построения трехмерной карты межзвездного поглощения в Галактике на основе фотометрических наблюдений с использованием априорных данных о звездах. Угловая детализация такой карты будет определяться только возможностью разбиения небесной сферы на неравные области, зависимость поглощения от расстояния в которых можно считать одинаковой для всех звезд. При этом в каждой такой области должно содержаться минимально необходимое количество звезд — порядка десятка штук. В ближайшее время угловое разрешение будут определять спектроскопические обзоры. Например, спектроскопический обзор

---

<sup>3</sup>Адрес в сети Интернет <http://spi.inasan.ru/en/index>

<sup>4</sup>Например, значение 0.5 означает, что только 50 % значений атмосферных характеристик звезды, сгенерированных для вычисления интервальной оценки, попадают в область значений эволюционных расчетов, а в случае значения 1.0 в указанную область попадают все 100 %.

LAMOST обеспечивает достаточное (один-два десятка) количество звезд для изучения областей неба размером  $\sim 10'$  на высоких и средних галактических широтах.

Перспективы дальнейшего развития темы диссертационного исследования связаны с продолжающимся ростом спектроскопических и астрометрических обзоров и тем самым с возможностью улучшать детализацию карты межзвездного поглощения. Развитие темы может быть продолжено по ряду направлений: рассмотрение дополнительных моделей звездных атмосфер и законов межзвездного поглощения, влияющих на точность вычисления блеска звезды; добавление новых эволюционных треков звезд для вычисления априорной функции плотности вероятностей; увеличение эффективности с целью уменьшения затрат на вычисления.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Сичевский С. Г.* Применимость широкополосной фотометрии для определения характеристик звезд и межзвездного поглощения // *Астрофизический бюллетень*. — 2018. — Т. 73, № 1. — С. 103–113.
2. *Сичевский С. Г.* Определение фундаментальных характеристик звезд на основе эволюционных расчетов // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 3. — С. 210–223.
3. *Сичевский С. Г.* Оценка радиусов, масс и светимостей звезд обзора LAMOST // *Астрофизический бюллетень*. — 2017. — Т. 72, № 1. — С. 55–62.
4. *Сичевский С. Г.* Байесовский подход к оценке характеристик звезд и закона межзвездного поглощения на основе фотометрии // *Астрофизический бюллетень*. — 2017. — Т. 72, № 2. — С. 156–165.
5. *Сичевский С. Г.* Оценка радиуса звезды по эффективной температуре и поверхностному ускорению с учетом эффектов звездной эволюции // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 9. — С. 804.
6. *Sichevsky S., Malkov O.* Estimating stellar parameters and interstellar extinction from evolutionary tracks // *Baltic Astronomy*. — 2016. — Vol. 25. — Pp. 67–74.
7. *Сичевский С. Г.* Оценка радиуса звезды по эффективной температуре и поверхностному ускорению // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 6. — С. 581.
8. *Сичевский С. Г., Миронов А. В., Малков О. Ю.* О точности определения параметров звезд, имеющих многоцветные фотометрические

- данные // *Астрофизический бюллетень*. — 2014. — Т. 69, № 2. — С. 170–179.
9. *Sichevskiy S. G., Mironov A. V., Malkov O. Y.* Classification of stars with WBVR photometry // *Astronomische Nachrichten*. — 2013. — Vol. 334. — P. 832.
  10. *Сичевский С. Г.* Метод определения параметров звезд на основе их многоцветной фотометрии // *Астрономический журнал*. — 2012. — Т. 89, № 9. — С. 787.
  11. *Malkov O.* Stellar and interstellar parameters from large photometric surveys // *Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory*. — 2020. — Vol. 67. — Pp. 272–280.
  12. Учет межзвездного поглощения при анализе фотометрических данных / О. Ю. Малков, О. Б. Длужневская, А. О. Жуков и др. // *Научные труды Института астрономии РАН*. — 2020. — Т. 5. — С. 322–326.
  13. *Сичевский С. Г.* Вычисление полного межзвездного поглощения на основе моделей звездных атмосфер // *Научные труды Института астрономии РАН*. — 2020. — Т. 5. — С. 258–264.
  14. *Сичевский С. Г., Малков О. Ю.* Применение современных обзоров для исследования межзвездного поглощения // *Научные труды Института астрономии РАН*. — 2019. — Т. 4. — С. 405–410.
  15. *Сичевский С. Г.* Расчет звездных величин в современных фотометрических системах // *Научные труды Института астрономии РАН*. — 2019. — Т. 4. — С. 366–373.
  16. *Сичевский С. Г., Малков О. Ю., Жао Г.* Соотношение между радиусом и атмосферными параметрами звезд // *Научные труды Института астрономии РАН*. — 2019. — Т. 4. — С. 272–276.
  17. *Сичевский С. Г.* SPI — инструмент для определения характеристик звезд // Сборник трудов конференции «Звезды и спутники», посвященной 100-летию со дня рождения А.Г. Масевич / Под ред. Д. В. Бисикало, Б. М. Шустов. — 2018. — С. 202–207.
  18. Cross Catalogue Matching with Virtual Observatory and Parametrization of Stars / O. Malkov, O. Dluzhnevskaya, S. Karpov et al. // *Baltic Astronomy*. — 2012. — Vol. 21. — Pp. 319–330.
  19. *Sichevsky S. G.* Theoretical-probabilistic building of a 3D extinction map in the Galaxy // Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference

Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary / Ed. by B. M. Shustov, D. S. Wiebe. — 2018. — Pp. 409–415.

20. On the parameterization of single and binary stars / O. Malkov, S. Sichevskij, D. Kovaleva, V. Myakutin // *Stellar Populations - Planning for the Next Decade* / Ed. by G. R. Bruzual, S. Charlot. — Vol. 262 of *IAU Symposium*. — 2010. — Pp. 379–380.

*Сичевский Сергей Григорьевич*

Межзвёздное поглощение и характеристики звёзд; использование больших  
обзоров неба

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

