

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

*УДК 524.33*

**КОЛБИН Александр Иванович**

**КАРТИРОВАНИЕ ХОЛОДНЫХ ЗАПЯТНЕННЫХ ЗВЕЗД НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛОСНЫХ  
ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

**Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**пос. Нижний Архыз - 2015**

Работа выполнена на кафедре астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук, доцент КФУ

**Шиманский Владислав Владимирович**

Научный консультант: доктор физ.-мат. наук, академик АН РТ, профессор КФУ

**Сахибуллин Наиль Абдулович**

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, академик РАН, Дир. ГАИШ МГУ

**Черепашук Анатолий Михайлович;**

кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. САО РАН

**Кудрявцев Дмитрий Олегович**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория  
Российской академии наук

Защита состоится 17 апреля 2015 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 при Специальной астрофизической обсерватории РАН по адресу: 369167, Карачаево-Черкесская рес., пос. Нижний Архыз, САО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 002.203.01

кандидат физ.-мат. наук,

О.Н. Шолухова

Согласно современным представлениям все звезды с внешней конвективной оболочкой должны иметь холодные фотосферные пятна, аналогичные солнечным. Эти пятна представляют собой области выхода магнитных трубок, формируемых в недрах звезды. Усиленное магнитное поле трубок уменьшает эффективность конвективного переноса энергии, охлаждая плазму, в которой они находятся, и, уменьшая яркость областей его выхода на поверхность.

В большинстве случаев звездные пятна довольно малы и не могут быть наблюдаемы при помощи обычной астрономической аппаратуры. Однако существует несколько классов объектов с сильной запятненностью поверхности, которая легко проявляет себя в современных фотометрических и спектральных наблюдениях. Отличительной особенностью этих объектов является быстрое вращение, которое, по-видимому, усиливает темпы генерации магнитных полей, обуславливающих появление крупных пятен на поверхности. К таким запятненным объектам относятся компоненты тесных двойных систем, сильное вращение которых обусловлено приливной синхронизацией вращательного периода с коротким орбитальным периодом. Среди таких систем выделяются старые системы типа RS CVn, двойные из карликов главной последовательности BY Dra, тесные двойные типа W UMa, а также Алголи с запятненной холодной компонентой. Повышенная запятненность наблюдается и у некоторых одиночных звезд, к которым относятся молодые звезды типа T Tau, быстровращающиеся гиганты типа FK Com, а также многие молодые звезды главной последовательности. Исследование запятненности этих объектов имеет важное значение для понимания природы генерации звездных магнитных полей. Обзор пятненно-активных объектов дан Бердюгиной (2005). Результаты исследования звездной запятненности были обобщены Ланзой и Родоно (1999), а также Бердюгиной (2005).

Запятненность звезд проявляется во вращательных модуляциях блеска и профилей фотосферных спектральных линий. Эти модуляции несут информацию о распределении пятен на поверхности, которое не может быть исследовано прямыми методами ввиду малого пространственного разрешения. По виду используемого наблюдательного материала методы картирования запятненности можно разделить на две группы: фотометрические и спектроскопические.

В настоящее время наиболее перспективным методом исследования звездной поверхности считается спектроскопическая методика доплеровского картирования, впервые использованная Фогтом и Пенродом (1983) для холодной звезды. Методика основана на подборе температурного распределения, описывающего наблюдаемые изменения профилей спектральных линий. Численные симуляции восстановления поверхности показали высокую надежность получаемых широтных и долготных распределений пятен. Однако обнаружение искажений спектрального профиля, вызванного пятнами, требует получения спектрального материала с разрешением  $R > 40000$  и  $S/N > 200$ , что налагает серьезные ограничения на наблюдательную аппаратуру и яркость исследуемых объектов. Кроме того, метод является ограниченным по скорости вращения звезды. Так, вращательное уширение профиля линии должно преобладать над другими видами уширения, что ставит нижнюю границу применимости метода на  $V \sin(i) = 20$  км/с. С другой стороны, быстрое вращение звезды приводит к уменьшению глубины линий и, как следствие, уменьшению амплитуды

искажений профиля, обусловленного пятнами. Достижение необходимого S/N для этого случая может потребовать длинных экспозиций, сравнимых с периодом вращения звезды, что является недопустимым для применения доплеровского картирования. Список картированных при помощи данной методики объектов, а также обзор полученных результатов представлен Штрассмайером (2009).

Фотометрические методы исследования не налагают жестких ограничений на наблюдательную аппаратуру и выбор программных звезд, что дает возможность исследования большой выборки объектов с широким набором фундаментальных параметров. В отличие от спектроскопического материала, кривые блеска звезды не несут столь детальной информации о распределении пятен по поверхности звезды, в особенности о широтном распределении. Тем не менее, легкость получения наблюдательного материала, методическая простота, возможность получения информации о пятнах быстрых и медленных ротаторов, в том числе и слабых по блеску, делает фотометрические методы актуальными и по сегодняшний день.

В рамках данной диссертационной работы были реализованы методы фотометрического картирования, наиболее точно учитывающие физику формирования излучения, а также извлекающие информацию о распределении пятен по многополосному набору данных.

### **Цель и задачи работы.**

Целью работы является разработка методов картирования запятненных звезд, которые извлекают наиболее детальную информацию о распределении пятен, содержащуюся в данных фотометрических наблюдений. Реализуемые методы предполагают анализ многополосного фотометрического материала и учет современных представлений о физике формирования излучения, исходящих из теории звездных атмосфер.

Выполнение диссертационной работы заключалось в решении следующих задач.

- (1) Разработка и реализация метода многополосного фотометрического картирования звездной поверхности круглыми температурно-однородными пятнами. Метод базируется на использовании современных результатов теории звездных атмосфер. Метод учитывает пересечения между пятнами для моделирования запятненности со сложной геометрией.
- (2) Разработка и реализация метода многополосного фотометрического картирования, основанной на разбиении поверхности звезды на элементарные площадки. При моделировании кривых блеска используются результаты теории звездных атмосфер. Поиск решения осуществляется при помощи метода регуляризации Тихонова, требующего гладкости искомого температурного распределения.
- (3) Тестирование реализованных методов на моделях запятненных звезд, а также на звезде HD 12545, фотометрическое картирование которой уже проводилось другими авторами.

- (4) Получение и обработка фотометрического материала быстро вращающихся и слабых по блеску пятенно-активных звезд DE CVn, HIP 1883, AP 86 и AP 226, исследование которых спектральными методами является проблематичным. Определение параметров этих объектов, необходимых для выполнения процедуры фотометрического картирования.
- (5) Применение разработанных методов картирования к анализу многополосных фотометрических данных звезд DE CVn, HIP 1883, AP 86 и AP 226. Анализ полученных карт запятненности.

#### **Научная и методическая новизна.**

- (1) Впервые реализован метод многополосного фотометрического картирования поверхности звезды круглыми пятнами, основанная на моделировании излучения звезды по данным теории звездных атмосфер, а также учитывающая перекрытия между пятнами для моделирования запятненности со сложной структурой.
- (2) Впервые реализован метод многополосного фотометрического картирования, основанная на разбиении поверхности звезды на элементарные площадки и поиске непрерывного температурного распределения, использующая данные теории звездных атмосфер.
- (3) Впервые проведено фотометрическое картирование поверхности первичной компоненты системы типа RS CVn HD 12545 непрерывным температурным распределением с одновременным анализом данных в полосах B, V, R, I.
- (4) Впервые выполнен анализ запятненности вторичной компоненты предкатаклизмической переменной DE CVn.
- (5) Впервые выполнен многополосный фотометрический анализ запятненности быстро вращающегося K-карлика скопления Плеяд HIP 1883 на основе картирования непрерывным температурным распределением. Впервые проведено картирование запятненности быстро вращающихся карликов AP 86 и AP 226, принадлежащих рассеянному звездному скоплению  $\alpha$  Персея.

#### **Научная, методическая и практическая значимость работы.**

Научную значимость представляют:

- карты температурного распределения по поверхностям вторичной компоненты DE CVn, HIP 1883, AP 86 и AP 226, а также найденные параметры запятненности (температура пятен, их размеры, координаты);
- параметры исследованных звезд (температуры незапятненной фотосферы, радиусы, углы наклона осей вращения к лучу зрения).

Методическую значимость имеют:

- метод многополосного фотометрического картирования круглыми температурно-однородными пятнами, основанный на использовании современных результатов теории звездных атмосфер;

- метод многополосного фотометрического картирования поверхности звезд непрерывным температурным распределением, основанный на использовании данных теории звездных атмосфер и применении метода регуляризации Тихонова для поиска решения.

Практическую значимость имеют полученные кривые блеска звезд DE CVn, ПП 1883, AP 86 и AP 226. Они представляют ценный материал для анализа магнитной активности быстровращающихся звезд. Их использование с последующими наблюдениями даст возможность выявления признаков эволюции распределения пятен, циклов-активности и флип-флоп эффектов.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

- (1) Метод многополосного фотометрического картирования поверхности звезды круглыми пятнами с учетом данных теории звездных атмосфер.
- (2) Метод многополосного фотометрического картирования непрерывным температурным распределением с использованием данных теории звездных атмосфер и возможностью усиления контраста пятен. Результаты тестирования метода на моделях запятненных звезд.
- (3) Карты распределения пятен на поверхности первичной компоненты системы типа RS CVn HD 12545, построенные на основе анализа многополосной фотометрии звезды.
- (4) Карты распределения пятен на поверхности вторичной компоненты предкатаклизмической переменной DE CVn.
- (5) Карты распределения пятен на поверхности быстровращающихся холодных карликов ПП 1883, AP 86 и AP 226, полученные на основе многополосного фотометрического материала с использованием двух разных методов картирования.

#### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Надежность разработанных методов картирования была проверена их тестированием на зашумленных кривых блеска моделей запятненных звезд. Применение методов к исследованию структуры поверхности первичной компоненты HD 12545 дало результаты, согласующиеся с картами ее поверхности, полученными другими авторами на основе анализа тех же фотометрических данных. Достоверность результатов подкрепляется многочисленной апробацией на научных конференциях.

Апробация результатов работы была проведена на X международных и российских конференциях:

- (1) Международная конференция “Physics and evolution of magnetic and related stars”, пос. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 25-31 августа 2014 г.;

(2) Молодежная конференция “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, Москва, Институт космических исследований РАН, 3-5 апреля 2014 г.;

(3) Всероссийская Астрономическая Конференция ВАК-2013 “Многоликая Вселенная”, Санкт-Петербург, 23-27 сентября 2013 г.;

(4) COSPAR симпозиум “Cosmic magnetic fields: legacy of A.V. Severny”, пос. Научный, Крымская астрофизическая обсерватория, 2-6 сентября 2013 г.;

(5) Всероссийская молодежная астрономическая конференция “Наблюдаемые проявления эволюции звезд”, пос. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 15 - 19 октября 2012 г.;

(6) Международная конференция “Звёздные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля”, пос. Научный Крымская астрофизическая обсерватория, 10-14 июня 2012 г.;

(7) Конференция “Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы”, Москва, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, 28 мая - 1 июня 2012 г.;

(8) Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010 “От эпохи Галилея до наших дней”, пос. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 13 - 18 сентября 2010 г.;

(9) Международная астрофизическая конференция “Новейшие методы исследования космических объектов”, Казань, Казанский федеральный университет, 7-10 октября 2010 г.;

(10) Международная студенческая конференция “Физика Космоса”, Коуровская астрономическая обсерватория, 31 января - 4 февраля 2011 г.

Результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в пяти статьях в реферируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также в VI публикациях в сборниках трудов конференций.

(1) А.И. Колбин, В.В. Шиманский, Н.А. Сахибуллин. “О восстановлении структуры поверхности запятненных звезд” // Астрономический Журнал. 2013. Т.90. С.598-612.

(2) А.И. Колбин, В.В. Шиманский. “Методика численного моделирования кривых блеска запятненных звезд и ее применение к картированию поверхности звезды III1883” // Астрофизический Бюллетень. 2014. Т.69. С.190-202.

(3) A.I. Kolbin, N.A. Sakhbullin, M.M. Gabdeev. “Multipassband photometric mapping of three fast rotating stars: III 1883, AP 86 and AP 226” // Advances in Space Research. 2014. V.55. P.808-816.

(4) A.I. Kolbin, V.V. Shimansky. "Spotted Star Mapping by Light Curve Inversion: Tests and Application to HD 12545" // Bulletin Of the Crimean Astrophysical Observatory. 2013. V.109. P.35-37.

(5) А.И. Колбин, Н.А. Сахибуллин. "Анализ температурной структуры поверхности запятненных звезд" // Ученые записки Казанского университета. 2011. Т.153, С.74-81.

(6) А.И. Колбин, В.В. Шиманский, Н.А. Сахибуллин. "Фотометрическое картирование поверхности запятненных звезд" // Сборник трудов Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013 "Многоликая Вселенная". Санкт-Петербург. 2013. С.117.

(7) А.И. Колбин. "Восстановление структуры поверхности запятненных звезд на основе анализа их кривых блеска" // Научная конференция "Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы". Сборник тезисов. Москва, 2012, С.31.

(9) А.И. Колбин. "Анализ температурной структуры поверхности запятненных звезд" // Физика Космоса: труды 40-ой Международной студенческой конференции. 2011. С.267.

(10) А.И. Колбин, В.В. Шиманский, А.И. Галеев. "Картирование поверхностей запятненных звезд" // Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференция ВАК-2010 "От эпохи Галилея до наших дней". 2010. С.96.

(11) А.И. Колбин, Н.А. Сахибуллин. "Картирование запятненных звезд" // Итоговая научно-образовательная конференция студентов Казанского университета 2010 года: сборник статей. 2010. С.105.

#### **Личный вклад автора.**

Автор принимал активное участие постановке и решении задач диссертационной работы. Им были разработаны алгоритмы фотометрического картирования запятненных звезд, выполнена их программная реализация, а также проведено тестирование методов на моделях звезд и звезде HD 12545. Автору принадлежит выбор объектов исследования; участие в наблюдениях двух исследованных объектов (HIP 1883 и AP 86); обработка наблюдательного материала для DE CVn, HIP 1883, AP 86 и AP 226; а также основной вклад в определении параметров этих звезд и анализе их запятненности. Автором был подготовлен текст всех указанных выше публикаций.

#### **Основное содержание работы.**

Работа состоит из 118 страниц, содержит семь глав, введение, заключительную часть. Диссертация имеет 155 ссылок на литературу, 50 рисунков, 64 формулы.

Во введении сформулирована актуальность выбранной темы диссертационной работы, изложены цели и решаемые задачи. Описывается научная и методическая новизна работы; дана научная, методическая и практическая значимость работы; перечисляются положения, выносимые на защиту; доказываемая достоверность полученных результатов,

приводится список конференций, на которых проводилась апробация работы; перечисляется список публикаций, в которых опубликованы основные результаты работы. В конце главы описывается структура диссертации.

В первой главе диссертационной работы дан краткий обзор современного понимания запятненности холодных звезд. Описаны наблюдаемые фотометрические и спектральные проявления фотосферных пятен, методы исследований, а также результаты исследования пятенной активности, касающиеся физических характеристик пятен, долготного и широтного распределения и эволюции. В конце главы сформулированы существующие проблемы, решаемые в данной диссертации.

Во второй главе описан метод картирования поверхности набором круглых температурно-однородных пятен. Сначала рассмотрена модель однопятенной звезды и разобран метод моделирования ее кривой блеска (первый параграф главы). Определение блеска звезды основано на современных зависимостях между температурой и интенсивностью излучения, даваемых теорией звездных атмосфер. Учитываются эффекты потемнения диска к краю, а также заход части пятна за видимый диск звезды. В следующем параграфе метод расширен на случай многопятенной поверхности. Включена возможность перекрытия между частями пятен для моделирования запятненности сложной структуры. В третьем параграфе главы даны результаты тестирования метода моделирования кривых блеска. Решение задачи картирования, заключающееся в поиске параметров пятен, описывающих наблюдаемые данные, описано в параграфе 4. Определение параметров пятен основано на минимизации квадратов невязок между теоретическими и наблюдаемыми потоками звезды в различных фотометрических полосах.

Третья глава диссертации посвящена разработке метода картирования звездной поверхности непрерывным температурным распределением. Идея метода заключается в разбиении поверхности звезды на малые площадки, которым задаются индивидуальные значения температуры. Задача картирования сводится к поиску температур площадок, описывающего наблюдаемые потоки излучения звезды. В первом параграфе излагается метод моделирования кривых блеска, основанный на интегрировании интенсивности излучения по видимой поверхности звезды. Учитываются эффекты потемнения диска к краю, заход элементов разбиения за видимый диск звезды, используются данные теории звездных атмосфер для связи температуры площадок с интенсивностью ее излучения. В следующих двух параграфах описываются алгоритмы решения задачи восстановления температурной структуры поверхности, основанные на методах Тихонова и максимума энтропии. Особое внимание уделено выбору параметра регуляризации. В четвертом параграфе представлены результаты симуляции восстановления поверхности звезд по однополосным фотометрическим данным. Сделан вывод о существенном сглаживании температурных профилей пятен, получаемых обоими методами. В пятом параграфе вводится методика усиления контраста пятен, заключающаяся в задании каждой площадке специальных весовых коэффициентов. Получаемое с использованием данного метода решение имеет вид однородного фона незапятненной фотосферы с резкими темными пятнами. Показаны эффекты занижения широты и искажения профиля высокоширотных пятен, связанные с плохой чувстви-

тельностью кривых блеска к широтному распределению пятен и выбором наиболее гладкого решения. Расширение метода к анализу многополосного фотометрического материала разобрано в параграфе 6. Приведены основные формулы метода, описан алгоритм решения задачи. Результаты тестирования метода многополосного картирования собраны в последнем параграфе главы. Сделан вывод об уточнении широтного распределения пятен при увеличении количества используемых фотометрических полос.

Тестирование разработанных методов на звезде HD 12545 описано в третьей главе. Картирование звезды проводилось на основе анализа кривых блеска в фильтрах В, V, R, I, данных Штрассмайером и Олой (1992). Оба метода дали описание наблюдательных данных в пределах их точности, а результаты картирования имеют хорошее согласие с параметрами запятненности, найденными Штрассмайером и Олой (1992). Полученные карты распределения пятен показаны на рис. 1.

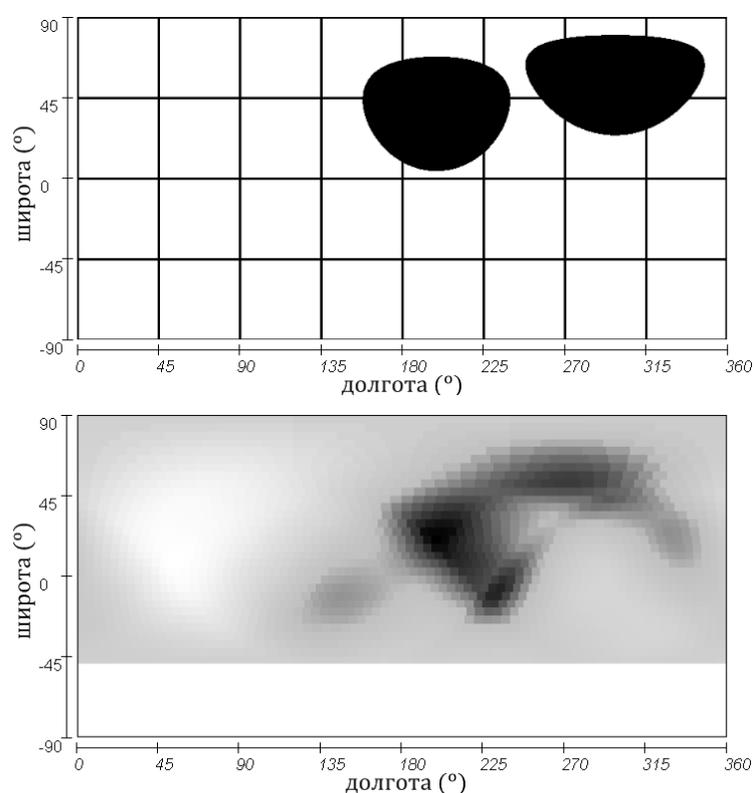


Рис. 1. Восстановленные карты распределения пятен на поверхности вторичной компоненты HD 12545. Верхняя карта получена методом картирования круглыми пятнами, нижняя карта получена при помощи метода разбиения поверхности на элементарные площадки.

Следующая глава посвящена фотометрическому анализу запятненности вторичной компоненты предкатаклизмической системы DE CVn. В первом параграфе перечисляются существующие результаты исследований системы. В следующих параграфах описывается процедура обработки фотометрического материала, полученного на Российско-Турецком телескопе РТТ-150, методика вычета из кривых блеска света белого карлика и определение температуры незапятненной фотосферы холодной компоненты. Найденная оценка температуры равна  $T_{ph} = 3900$  К. В конце главы обсуждаются результаты применения

обоих методов картирования к анализу кривых блеска холодной компоненты в фильтрах V и Rc. Была выявлена обширная область запятненности, обращенная к первичной компоненте. Анализ данных в двух фотометрических полосах не позволил сделать однозначных оценок температуры и площади запятненности.

Шестая глава диссертации посвящена фотометрическому анализу запятненности быстрого ротатора скопления Плеяд НП 1883. Первый параграф главы посвящен краткому изложению представленных в литературе результатов исследования звезды. Во втором параграфе описываются фотометрические наблюдения на телескопе Цейсс-1000 САО РАН и обработка наблюдательного материала. В следующем параграфе определяются параметры звезды, необходимые для ее картирования. Сделана оценка температуры незапятненной фотосферы по показателям цвета. Радиус и угол наклона оси вращения звезды оценены с использованием теоретических зависимостей яркости от эффективной температуры, теоретических изохрон, а также эмпирических соотношений между поверхностной яркостью и показателем цвета. Полученные оценки температуры и угла наклона равны  $T_{ph}=4660$  К и  $i = 65^\circ$ . Последний параграф главы посвящен картированию поверхности звезды разработанными в диссертации методами, а также анализу полученных карт распределения пятен. Полученные карты демонстрируют наличие вытянутой по долготе области запятненности, расположенной на средних широтах. Найденная запятненность составляет 7% наблюдаемой поверхности, а средняя температура запятненности оказалась на 650 К ниже температуры незапятненной фотосферы. Найденные модели распределения пятен показаны на рис. 2.

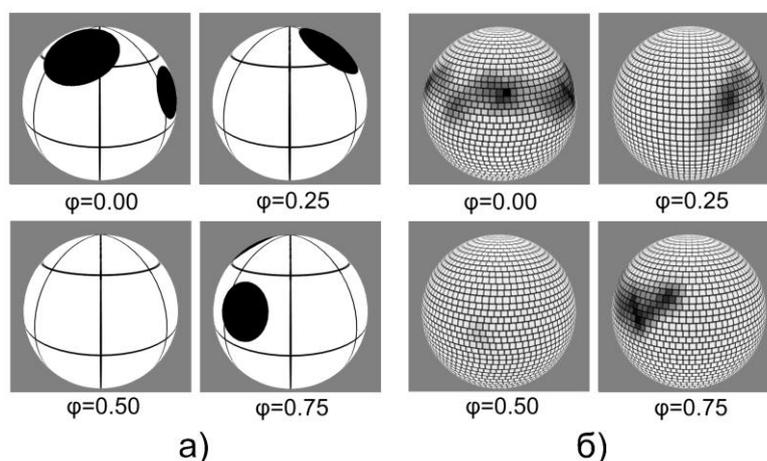


Рис. 2. Модели поверхности НП 1883 в разные фазы вращения. а) Модель распределения пятен, полученная методом моделирования запятненности круглыми пятнами. б) Модель непрерывного распределения температуры, полученная методом разбиения поверхности на элементарные площадки.

В последней главе проводится анализ запятненности двух быстровращающихся звезд скопления  $\alpha$  Персея AP 86 и AP 226. Кривые блеска этих звезд были получены на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. Определены температуры незапятненной фотосферы этих звезд ( $T_{ph} = 4230$  К для AP 86 и  $T_{ph} = 5320$  К для AP 226). Оценивание радиусов звезд и углов наклона осей вращения проводилось с использованием эмпирических зависимостей "цвет" - "поверхностная яркость". Выполнено картирование поверхности AP 86 и AP

226 на основе одновременного анализа кривых блеска в фильтрах В, V, Rc. Проведен анализ полученных температурных карт с целью выявления общих характеристик запятненности. Найденные оценки разности температур незапятнанной фотосферы и пятен равны 400 и 500 К для AP 86 и AP 226 соответственно. Восстановленные пятна покрывают 11% наблюдаемой поверхности AP 86 и 12% поверхности AP 226.

В заключении обобщены основные результаты и выводы выполненной работы.

### **Список литературы.**

Berdyugina S.V. Living Rev. Solar Phys. 2, 8 (2005).

Lanza A.F., Rodono M. ASP Conference Series, 158, 121 (1999).

Strassmeier K.G., Olah K. Astron. Astrophys., 259, 595 (1992).

Strassmeier K.G. Astron. Astrophys. Rev., 17, 251, (2009).

Vogt S.S., Penrod G.D. Pub. Astron. Soc. Pacific. 95, 565 (1983).