

УДК 520.86; 524.3

## **АСТРОТОМОГРАФИЯ: ИССЛЕДОВАНИЯ, МЕТОДЫ, РАЗВИТИЕ МАЛОРАКУРСНОЙ АСТРОТОМОГРАФИИ**

**М.И. Агафонов**

## **ASTROTOMOGRAPHY: PROGRESS AND METHODS, DEVELOPMENT OF FEW PROJECTIONS ASTROTOMOGRAPHY**

**M.I. Agafonov**

Использование томографических методов в астрофизике перспективно для решения целого ряда задач. Предметом исследований могут быть объекты ближнего и дальнего космоса. Методы астротомографии позволяют получить данные о космических объектах, которые пространственно не разрешаются существующими инструментами. Томограммы, построенные по профилям для различных ракурсов, предоставляют уникальную информацию о фундаментальных процессах, лежащих в основе эволюции звезд и галактик, таких как аккреция или генерация магнитных полей. Дается краткий обзор результатов и методов астротомографии, представленных на XXV Генеральной ассамблее Международного астрономического союза. Уделено внимание развитию малоракурсной астротомографии на основе разработанного радиоастрономического подхода к реконструкции. Показана возможность построения трехмерных доплеровских томограмм, которые позволяют регистрировать потоки в двойных звездных системах в направлениях, отличных от орбитальной плоскости. Рассмотрены первые результаты таких исследований.

The application of the tomographical techniques in astrophysics are very attractive for the solution of the wide set of the different problems. The near and too far away from the Earth space objects may be as the subjects of such scientific research. The astrotomographical methods allow us to obtain the indirect images of the objects cannot be resolved spatially with any available telescope. The valuable information based on the tomographical images may be obtained about fundamental physical processes that drive the evolution of stars and galaxies, such as accretion and magnetic-field generation. There are the survey of the recent results and the methods of astrotomography presented at the XXV General Assembly of International Astronomical Union. The development of the few projections astrotomography problems are into consideration. The three-dimensional Doppler tomogram is presented used recently for the study of flow motion in binaries.

### **Введение**

Повышенный интерес к томографическим методам исследований в астрофизике отчетливо обозначился в последние пятнадцать лет [1]. Работы в данном направлении объединены общим названием – астротомография. Применение томографической реконструкции позволяет получать важные данные о космических объектах, недоступных для пространственного разрешения с использованием существующих инструментов.

Следует отметить, что задача построения изображений по проекциям в радиоастрономии возникла давно, начиная с середины 50-х г. XX века. За истекший период радиоастрономия внесла значительный вклад в развитие методов, которые оказались весьма полезны для решения томографических задач. В работе перечислены важные моменты томографической реконструкции, приведен краткий обзор объектов и методов астротомографии. Уделено внимание принципам реконструкции в задачах малоракурсной томографии. Представлена серия результатов, полученных при непосредственном участии автора. Рассмотрена возможность построения доплеровских томограмм по ограниченному числу ракурсов для исследований движений потоков вещества в двойных звездных системах. Показана возможность построения трехмерных доплеровских томограмм на основе разработанного радиоастрономического подхода к реконструкции. Рассмотрены первые результаты таких исследований, которые позволяют регистрировать движения потоков вещества в направлениях, отличных от орбитальной плоскости двойных систем.

### **1. Реконструкция изображений по проекциям: этапы развития**

Математически возможность реконструкции изображения с использованием проекций доказана Радоном в 1917 г. [2]. В свою очередь, восстановление по стрип-сканам, а также по интерферометрическим данным является фундаментальным для построения изображений в радиоастрономии. Данной проблеме с середины 50-х г. стало уделяться большое внимание. Развитие томографической реконструкции связано с этими работами. В радиоастрономической работе Брейсуэлла и Риддла 1967 г. [3] обосновано использование конечного числа ракурсов для построения изображения по проекциям и приведены необходимые соотношения. Полученные в [3] результаты стали основой широко применяемого в настоящее время метода суммирования обратных фильтрованных проекций (ОФП). Отметим, что первые практические томограммы были реализованы в 1972 г. с использованием созданного фирмой ЕМІ медицинского сканера для рентгеновских исследований. Томографические исследования получили значительный импульс к развитию, начинается интенсивное движение вперед. В 1978 г. в докладе Гордона [4] на астрономическом симпозиуме изложены важные принципы, которые были сформированы к этому времени. Исследования показали, что повышение качества томографической реконструкции не следует связывать лишь с увеличением числа проекций. Целесообразно использовать различную априорную информацию для ограничения области решений конкретной задачи. В 1977 г. была доказана теорема индетерминатности [5] – фунда-

ментальное ограничение, которое свидетельствует о невозможности точного восстановления изображения в некоторых случаях вне зависимости от увеличения числа проекций. Этот результат подтвердил необходимость использования априорной информации для ограничения области решений конкретной задачи восстановления. Методика введения ограничений достаточно подробно описана в монографии [6]. Авторами сделан вывод, что лучшие результаты восстановления можно получить при помощи методов, обладающих нелинейными свойствами. Указано, в частности, на привлекательность использования итерационных алгоритмов с нелинейными ограничениями (ИАНО) [7]. В работах [8–14] разработан и получил развитие так называемый радиоастрономический подход (РП) к реконструкции томограмм, в котором использованы радиоастрономические реализации ИАНО, называемые чисткой (CLEAN). Заметим, что способы реконструкции не ограничиваются лишь методами ОФП и РП. Широко известен метод максимальной энтропии (ММЭ), основанный на статистических принципах и обладающий нелинейными свойствами. Приложение ММЭ целесообразно при наличии больших массивов данных. Мы остановимся подробнее на методе суммирования ОФП, который является наиболее распространенным из методов, основанных на фильтрации, а также на радиоастрономическом подходе к реконструкции, для которого приведем примеры приложения. Обладая нелинейными свойствами, РП позволяет существенно сократить необходимое число проекций и дает возможность использовать неравномерное расположение ракурсов в пространстве.

## 2. Томографическая реконструкция: метод суммирования обратных фильтрованных проекций (ОФП) и радиоастрономический подход (РП)

Метод ОФП, в том числе модификации Рэма–Лака, Шеппа–Логана и др., отличающиеся лишь формой фильтрующих функций (линейной, косинусной и т.д.), широко используется для построения томограмм [15, 16]. Он предусматривает фильтрацию проекций в соответствии с линейной зависимостью от пространственной частоты  $|\omega|$  и обрезание частотных составляющих, расположенных выше установленной частоты усечения  $\omega_c$ , после чего проводится обратное проецирование для получения томограммы.

Радиоастрономический подход, разработанный в [10–12], имеет следующие отличительные признаки: решение задачи деконволюции в пространстве изображений с введением суммарного изображения и эквивалентной суммарной передаточной функции (СПФ) с последующим исключением откликов от боковых лепестков этой функции при помощи алгоритмов чистки. Проблема предполагает решение уравнения свертки, которое для двумерного варианта задачи имеет вид:  $g(x, y) = f(x, y) ** h(x, y) + n(x, y)$ , где  $g(x, y)$  – суммарное изображение, или «грязная карта», которая строится на основе имеющихся профилей,  $h(x, y)$  – суммарная передаточная функция,  $f(x, y)$  – искомое распределение яркости объекта и  $n(x, y)$  – случайный шум. Аналогично может быть

записано уравнение свертки для трехмерной задачи. Однако существует отличие, которое заключается в том, что трехмерная реконструкция может выполняться в двух вариантах: на основании двумерных либо одномерных проекций. Оба случая рассмотрены в работах [13–14]. В качестве компонентов суммарной передаточной функции используются отдельные аппаратные функции, которые в зависимости от характера решаемой задачи могут являться либо приемными диаграммами направленности, либо другими передаточными функциями, соответствующими регистрирующим устройствам. В случае доплеровской томографии – это передаточная функция спектрографа, в локационной задаче – функция временного разрешения, пересчитанная в пространственные координаты.

На рис. 1 представлен пример сопоставления результатов реконструкции, полученных с использованием метода ОФП, а также при приложении радиоастрономического подхода [17, 36]. На нижнем левом фрагменте (ОФП 100) приведен результат реконструкции модели с использованием метода ОФП по 100 проекциям с расположением ракурсов в диапазоне углов от 0 до 180°. Правый верхний фрагмент (ОФП 10) отображает результат, полученный также методом ОФП, но при 10 ракурсах без среза верхних пространственных частот. Введение усечения приводит практически к полному исчезновению мелкомасштабных структур, что делает изображение неинформативным. На правом нижнем фрагменте (РП 10) представлен результат реконструкции с использованием РП при 10 ракурсах, полученный также без усечения. Как видно из рисунка, при десятикратном сокращении ракурсов применение метода на основе фильтрации (ОФП 10) приводит к сильным искажениям томограммы, однако радиоастрономический подход (РП 10) дает хороший результат.

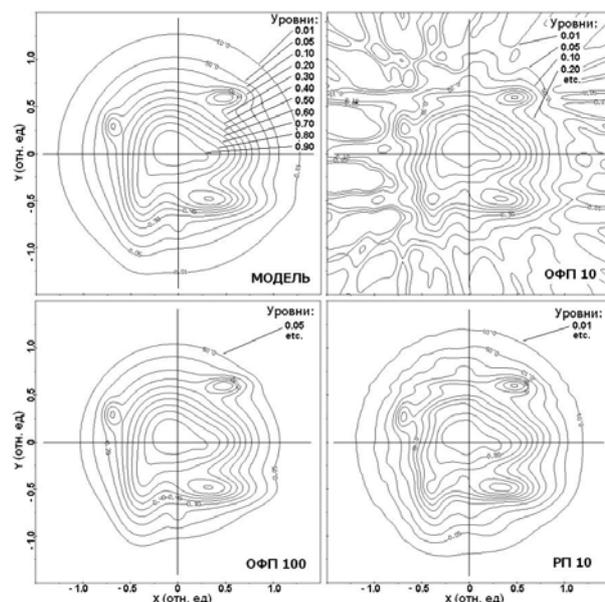


Рис. 1. Результаты реконструкции модели, полученные методом ОФП при 100 и 10 ракурсах, а также при 10 ракурсах с использованием РП [17, 36].

### 3. Методы и объекты исследований астротомографии

Косвенные методы получения изображений с применением томографической реконструкции могут быть приложены к широкому кругу астрофизических объектов, который охватывает планеты и звезды, двойные системы и ядра активных Галактик. Используются данные, регистрируемые от излучения как в эмиссионных линиях, так и в непрерывном спектре. Отличительным признаком астротомографии является возможность получения пространственной картины распределения яркости объектов конечных размеров, которая осуществляется благодаря компьютерной обработке набора наблюдательных профилей при разных ракурсах. В большинстве случаев такая возможность реализуется вследствие вращения объектов, однако существуют и другие возможности.

○ Метод покрытий Луной. Исследования распределения радиояркости по Крабовидной туманности с использованием покрытий Луной начали проводиться более полувека назад. Метод позволяет получить достаточно высокое разрешение, определяемое зоной Френеля, которое в течение многих лет превосходило возможности систем апертурного синтеза на частотах  $< 1$  Гц. Затмение туманности Луной можно представить как движение края плоского экрана. При дифференцировании кривой изменения яркости получается профиль, эквивалентный движению щели по источнику, что соответствует проекции для одного из ракурсов. Заход и выход при покрытии позволяют при благоприятных обстоятельствах получить профили на разных углах. Повторное наблюдение покрытия при других углах позволяет увеличить число ракурсов. Появляется возможность построения двумерной яркостной карты. Проблема соответствует томографической задаче, однако малое число профилей не позволяет получить приемлемое разрешение при использовании традиционных методов реконструкции, основанных на фильтрации. В работах [8–10] описан метод, названный радиоастрономическим подходом (РП), разработанный для реконструкции при неравномерном распределении ракурсов в пространстве и позволяющий сократить в несколько раз число профилей. Изображения Крабовидной туманности на частоте 750 МГц, полученные при его использовании, представлены в [18]. Условная схема регистрации профилей при покрытиях и карты распределения яркости, полученные на основе РП с использованием метода двух чисток, показаны на рис. 2.

○ Метод затменного картографирования (Eclipse mapping) предложен в 1985 г. [21] и также использует обстоятельства покрытий. Однако он предназначен для изучения двойных звезд – взрывных переменных (CVs – Cataclysmic Variables). Затмения возникают при вращении систем, когда углы наклонов находятся вблизи  $90^\circ$ . В качестве экрана используется более холодная вторичная звезда-донор. Она поставляет вещество более массивному, но компактному объекту – белому карлику. Термин «катаклизмический» обозначает сильные, но не разрушающие звезду вспышки различной амплитуды,

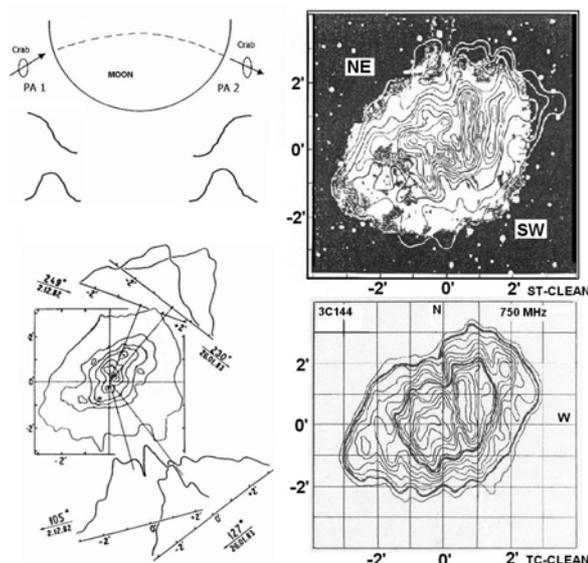


Рис. 2. Условная схема получения профилей стрип-распределений яркости Крабовидной туманности при покрытиях Луной и карты радиояркости на частоте 750 МГц [18], построенные на основе радиоастрономического подхода к реконструкции [8–10] по четырем профилям с использованием двух вариантов чистки: стандартной (ST-CLEAN) [19] и чистки по контуру (TC-CLEAN) [20]; разрешение  $20 \times 35$  сек дуги.

которые проявляются время от времени. В немагнитных CVs вещество в виде газового потока поступает на первичную звезду и образует аккреционный диск. В месте ударного взаимодействия струи и диска происходит нагрев, появляется так называемое горячее пятно с повышенной эмиссией. При наличии у первичной звезды сильных магнитных полей природа аккреционных процессов существенно изменяется. В этих условиях первичная звезда аккрецирует вещество вдоль линий поля либо непосредственно от струи через усеченный диск. Такие системы называют полярами, они образуют класс магнитных CVs. Обычно разделение компонентов в CVs составляет  $\sim 1R_s$ , а период обращения системы равен нескольким часам. Компоненты CVs не могут быть пространственно разрешены, так как при наблюдениях с Земли их угловой размер составляет только несколько десятков микросекунд дуги, однако они являются уникальными объектами для изучения аккреционной физики. Применение метода затменного картографирования позволяет в результате обработки спектрофотометрических записей, полученных при различных положениях системы, выделить излучение аккреционного диска и построить его изображение [22, 33]. В результате таких исследований показано, что в действительности диски имеют более сложную структуру, чем простая осесимметричная модель.

○ Для получения изображений в астротомографии, кроме метода затмений, используется целая серия косвенных методов: Stokes mapping [45, 46], Roche tomography [31, 32], Stellar surface Imaging [42, 43], Echo-mapping of Active Galactic Nuclei [44], Doppler tomography [23, 25–30, 33, 35, 48–50]. Объектами исследований являются не только взрывные переменные, но и другие типы тесных двойных сис-

тем (ТДС): алголи [26, 29], рентгеновские двойные звезды [28, 34], а также активные ядра галактик [44] и т.д. Поляриметрические измерения используются для картографирования (Stokes mapping) циклотронного излучения (определение формы, размера, положения пятна) на поверхности белых карликов [45, 46]. Метод Roche tomography позволяет получить изображение поверхности полости Роша вторичной звезды-донора, которая является ключом к пониманию происхождения, эволюции и поведения взрывных переменных. В данной работе мы не будем рассматривать детально особенности каждого из перечисленных методов. Подробно остановимся лишь на методе доплеровской томографии, поскольку этот метод является наиболее мощным инструментом исследования ТДС и в наибольшей степени соответствует томографической задаче в том смысле, как принято понимать реконструкцию в медицине.

○ Метод доплеровской томографии (Doppler tomography), предложенный Маршем и Хорном в 1988 г. [23], активно используется для исследований тесных двойных систем, таких как взрывные переменные, рентгеновские двойные звезды, алголи. Основой служат одномерные профили эмиссионных линий. При знании эфемерид, преобразованных к значениям орбитальных фаз  $\Phi(t)$ , они пересчитываются в кривые лучевых скоростей  $V_R(\Phi)$ . На основе набора профилей, которые записаны с высоким разрешением в течение одного или нескольких полных орбитальных циклов, выполняется реконструкция доплеровской томограммы. Томограмма соответствует распределению интенсивности излучения  $I(V_x, V_y)$  на частотах некоторой эмиссионной линии в пространстве скоростей. Она суммирует излучение отдельных излучающих элементов в связную картину и может указывать на характерные особенности течения вещества. При некоторых предположениях возможно решение второй задачи – преобразование распределения интенсивности из пространства скоростей  $I(V_x, V_y) \rightarrow I(x, y)$  в пространство координат. В работе [24] представлены синтетические доплеровские томограммы, построенные по результатам трехмерных газодинамических расчетов. Сопоставление таких томограмм с полученными на основе эксперимента обеспечивает наилучший контроль корректности распознавания характерных особенностей структуры.

Несмотря на то, что общий принцип доплеровской томографии [23] допускает введение третьей координаты  $V_z$ , в настоящее время получил распространение лишь двумерный вариант метода (см., например, работы [25–30, 49–50]), при котором результат реконструкции соответствует карте распределения интенсивности  $I(V_x, V_y)$ . Недавно в работе [25] указано на перспективность применения трехмерного варианта  $I(V_x, V_y, V_z)$  с целью получения более адекватной физической картины. В 2005 г. Т. Марш [30] представил пример реконструкции трехмерной доплеровской томограммы с использованием простой двухкомпонентной модели. Трехмерная доплеровская томограмма позволяет отобразить движение потоков вещества в направлениях, отлич-

ных от орбитальной плоскости двойных систем. Однако вследствие слабой эффективности метода ОФП, применяемого для реконструкции томограмм, трехмерный вариант до сих пор не получил развития. Для развития трехмерного варианта оказался весьма перспективен разработанный трехмерный вариант радиоастрономического подхода  $3D_{1D}$  [13, 14]. Далее в разделе 5 представлена впервые выполненная благодаря его приложению реконструкция трехмерной доплеровской томограммы по экспериментальным данным. Результат использования РП для построения двумерных доплеровских томограмм при ограниченном числе профилей спектрограмм приведен в разделе 4.

#### 4. Малоракурсная астротомография: приложение РП к реконструкции доплеровских томограмм

Как было указано ранее, РП позволяет проводить реконструкцию томограмм при неравномерном распределении ракурсов в пространстве, а также сократить в несколько раз необходимое число профилей. В случае доплеровской томографии суммарная передаточная функция (см. рис. 4) строится на основе передаточных функций спектрографа, пересчитанных к значениям лучевых скоростей. На рис. 3 показана двумерная доплеровская томограмма двойной рентгеновской системы Лебедь X1, реконструкция которой выполнена на основе лишь 9 профилей спектрограмм линии He II [ $\lambda$  4686 Å] в «мягком» состоянии системы [34]. Томограмма, построенная также для «жесткого» состояния системы [34], позволила проследить характерные временные изменения.

#### 5. Развитие трехмерного варианта доплеровской томографии

На рис. 4 показана схема получения проекций в двумерной и трехмерной (два варианта) томографических задачах, для которых разработан принцип реконструкции на основе РП [10, 13]. В нижней части рисунка изображены примеры соответствующих суммарных передаточных функций: левый фрагмент

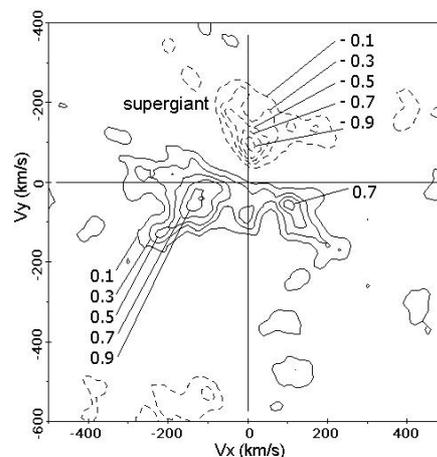


Рис. 3. Пример реконструкции двумерной доплеровской томограммы двойной рентгеновской системы Лебедь X1 при ограниченном числе профилей [34]; использовано девять спектрограмм линии He II ( $\lambda$  4686 Å)

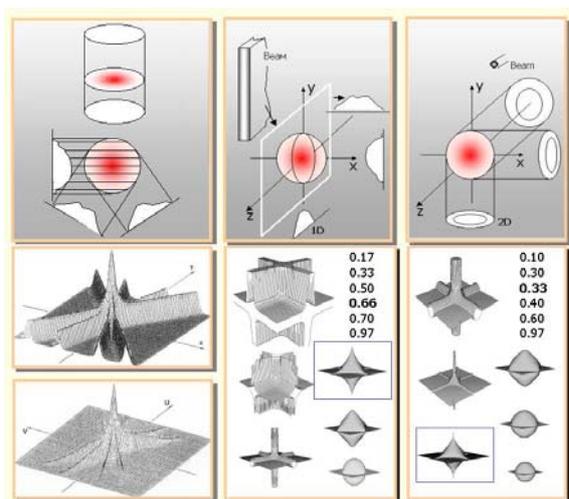


Рис. 4. Примеры суммарных передаточных функций: слева – для двумерной задачи при четырех ракурсах; в центре и справа – для двух вариантов трехмерной задачи при реконструкции по одномерным  $3D_{1D}$  (в центре) и по двумерным  $3D_{2D}$  (справа) профилям (три ракурса по главным осям). В трехмерных вариантах построение выполнено в виде семейства изоповерхностей, рядом показаны соответствующие уровни интенсивности, максимальные значения были предварительно нормированы на единицу.



Рис. 5. Представление каскадом трехмерной доплеровской томограммы алголя U CrB [36, 37].

– для двумерной задачи при четырех ракурсах, в центре и справа – для двух трехмерных вариантов ( $3D_{1D}$  и  $3D_{2D}$  соответственно) при трех ракурсах в направлении главных осей (подробнее см. [9–14]).

Реализация трехмерного варианта реконструкции  $3D_{1D}$  на основе РП с использованием одномерных профилей открыла новые перспективы исследований тесных двойных систем с учетом движений потоков в направлениях, отличных от орбитальной плоскости [36, 37]. На рис. 5 изображена трехмерная доплеровская томограмма, впервые построенная по экспериментальным данным. Двойная система U Coronae Borealis (U CrB) принадлежит к алголям и имеет в составе первичную звезду класса В6 и вторичную звезду-донор класса G0. Наклонение орбиты составляет  $79.0^\circ$ . Реконструкция выполнена в пространстве скоростей по 47 профилям спектрограмм линии  $H_\alpha$  ( $\lambda$  6563 Å). Разрешение составило  $30 \times 30 \times 110$  км/с в направлениях

осей  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  соответственно. Характерные особенности (1 – колечко аккретора и 2 – поток вдоль баллистической траектории) выделяются на трехмерной томограмме более контрастно по сравнению изображением на двумерной томограмме, полученной ранее [26]. Обнаружен поток (3), направленный почти перпендикулярно орбитальной плоскости, имеющий высокую интенсивность и большую скорость  $\sim 200 \div 300$  км/с. С использованием двумерного варианта регистрация таких потоков была невозможна.

### Заключение

В работе представлены методы и объекты исследований, используемые в астротомографии. Сделан акцент на развитие перспективного направления – малоракурсной томографии. Представлена серия результатов, выполненных при непосредственном участии автора. Приведены примеры успешного приложения разработанного радиоастрономического подхода к реконструкции в доплеровской томографии, в том числе проведенная впервые по экспериментальным данным реконструкция трехмерной доплеровской томограммы. Подход может быть также перспективен для построения высокоинформативных изображений объектов ближнего космоса в радиолокационных задачах [13, 17, 39–40].

В краткой статье не представлялось возможным сделать исчерпывающий обзор всех применяемых в астротомографии методов и выполненных научных исследований. Необходимо отметить, что интересные результаты с использованием многочастотной томографии получены при изучении Солнца [41], новые возможности исследований открывает использование стереонаблюдений с космических обсерваторий [38].

Автор выражает благодарность РФФИ за поддержку исследований (гранты 06-02-16234 и 04-02-16924), а также оргкомитету БШФФ за частичную компенсацию расходов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cameron A.C., Schwobe A., Vrielman S. Astrotomography // Astron. Nachrichten. 2004. V. 325, N 3. P. 179–180.
2. Radon J. Uber die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten // Ber. Saechs.Akad. Wiss. Leipzig, 1917. V. 69. P. 261.
3. Bracewell R.N., Riddle A.C. Inversion of fan-beam scans in radioastronomy // Astrophys. J. 1967. V. 150. P. 427–434.
4. Гордон Р. // Построение изображений в астрономии по функциям когерентности / Под ред. К. Ван Схонвелда; рус. текст под ред. Л.И. Матвеевко. М.: Мир, 1982. С. 306–313.
5. Smith K.T., Solmon D.C., Wagner S.L. Practical and mathematical aspect of reconstructing objects from radiographs // Bull. Amer. Math. Soc. 1977. V. 83. P. 1227.
6. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
7. Schafer R.W., Mersereau R.M., Richards M.A. Constrained iterative restoration algorithms // Proc. IEEE. 1981. V. 69. P. 432–450.
8. Агафонов М.И., Подвойская О.А. Восстановление двумерного распределения яркости итерационными алгоритмами при ограниченном количестве сканов ножевым лучом // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 6. С. 742–752.

9. Агафонов М.И., Подвойская О.А. Восстановление двумерного распределения яркости с использованием двух вариантов алгоритма CLEAN при ограниченном числе проекций в радиоастрономии и томографии // Там же. 1990. Т. 33, № 10. С. 1185–1187.
10. Агафонов М.И. Томография при ограниченном числе проекций. I. Радиоастрономический подход к проблеме и метод 2-CLEAN DSA // Там же. 2004. Т. 47, № 2. С. 94–110.
11. Agafonov M.I. Radioastronomical approach to few projections tomography // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 263.
12. Agafonov M.I. Few projections astrotomography: 2-CLEAN DSA reconstruction // *Ibid.* 2004. V. 325, N 3. P. 259–262.
13. Агафонов М.И., Шарова О.И. Томография при ограниченном числе проекций. II. Радиоастрономический метод CLEAN в приложении к трехмерным задачам // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2005. Т. 48, № 5. С. 367–381.
14. Agafonov M.I., Sharova O.I. Few projections astrotomography: radio astronomical approach to 3D reconstruction // *Astron. Nachr.* 2005. V. 326, N 2. P. 143–149.
15. Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
16. Albright G.E., Richards M.T. Doppler tomography of accretion disks in algol binaries // *Astrophys. J.* 1996. V. 459. P. L99–L102.
17. Агафонов М.И., Шарова О.И. Томографическая реконструкция высокоинформативных изображений при ограниченном числе ракурсов зондирования // Сб. докладов Второй Всероссийской научной конференции-семинара «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром, 2006. С. 313–317.
18. Агафонов М.И., Иванов В.П., Подвойская О.А. Радиоизображения Крабовидной туманности по данным лунных покрытий // *Астрон. журн.* 1990. Т. 67, № 3. С. 549–560.
19. Hogbom J.A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines // *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* 1974. V. 15, N 3. P. 417–426.
20. Steer D.G., Dewdney P.E., Ito M.R. Enhancements to the deconvolution algorithm “CLEAN” // *Astron. Astrophys.* 1984. V. 137, N 2. P. 159–165.
21. Horn K. Images of accretion discs – I. The eclipse mapping method // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1985. V. 213. P. 129–141.
22. Baptista R. What can we learn from accretion disc eclipse mapping experiments? // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 181–184.
23. Marsh T.R., Horne K. Images of accretion discs –II. Doppler tomography // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1988. V. 235. P. 269–286.
24. Кузнецов О.А., Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Хрузина Т.С., Черепашук А.М. Синтетические доплеровские томограммы газовых потоков в двойной системе IP Peg // *Астрон. журн.* 2001. Т. 78, № 11. С. 997–1007.
25. Steeghs D. Doppler tomography of accretion in binaries // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 185–188.
26. Richards M.T., Albright G.E., Bowles L.M. Doppler tomography of the gas stream in short-period algol binaries // *Astrophys. J.* 1995. V. 438. P. L103–L106.
27. Morales-Rueda L. Doppler tomography of cataclysmic variables // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 193–196.
28. Vrtilik S.D., Quaintrell H., Boroson B., Shields M. Doppler tomography of X-ray binaries // *Ibid.* 2004. V. 325, N 3. P. 209–212.
29. Richards M.T. Doppler tomography of Algols // *Ibid.* 2004. V. 325, N 3. P. 229–232.
30. Marsh T.R. Doppler tomography // *Astrophys. Space Sci.* 2005. V. 296. P. 403–415.
31. Rutten R.G.M., Dhillon V.S. Roche tomography: imaging the stars in interacting binaries // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 288. P. 773–781.
32. Watson C.A., Dhillon V.S. Roche tomography of the secondary stars in CVs // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 189–192.
33. Marsh T.R. Observations of Cataclysmic Variable and Double Degenerate stars // *Lecture Notes in Physics (LNP)* / Eds. F.C.Lazarro, M.J.Arevalo. Springer, 2001. V. 5563. P. 151–202.
34. Karitskaya E.A., Agafonov M.I., Bochkarev N.G., et al. CYG X-1 = V1357 CYG investigation based on high-resolution optical spectroscopy of 2002-2004. // *Astron. Astrophys. Trans.* 2005. V. 24, N 6. P. 383–390.
35. Marsh T.R. Doppler tomography // *Lecture Notes in Physics (LNP): Astrotomography, Indirect Imaging Methods in Observational Astronomy* / Eds. H.M.J. Boffin, D. Steegs, J. Cuipers. 2001. V. 573. P. 1–26.
36. Agafonov M.I., Richards M.T., Sharova O.I. Three-dimensional Doppler tomogram of gas flows in the Algol-type binary U Coronae Borealis // *Astrophys. J.* 2006. V. 652, N 2. P. 1547.
37. Агафонов М.И., Шарова О.И., Richards M.T. Трехмерные доплеровские томограммы и регистрация внеорбитальных движений в ТДС // Тез. докл. Всероссийской астрон. конф. «Тесные двойные звезды в современной астрофизике». М.: ГАИШ МГУ, 2006. С. 26.
38. Chubey M.S., Grigoriev V.M., Eroshkin G.I., et al. Stereoscopic principle in space observatory // *Kinematika I Fizika Nebesnykh Tel. Suppl.* 2005. V. 5, N 6. P. 172–175.
39. Кононов А.Ф. Применение томографических методов для получения радиолокационных изображений объектов с помощью сверхширокополосных сигналов // *Зарубежная радиоэлектроника.* 1991. № 1. С. 35–49.
40. Вопросы перспективной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А.В.Соколова. М.: Радиотехника, 2003.
41. Grebinskij A., Bogod V.M., Gelfreikh G.B. et al. Microwave tomography of solar magnetic fields // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 144. P. 169–180.
42. Barnes J.R., Lister T.A., Hilditch R.W., Collier Cameron A. Surface images of the short period contact binary AE Phe // *Ibid.* 2004. V. 235, N 3. P. 233–236.
43. Berdyugina S.V. Tomography of stellar non-radial pulsations. // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 237–240.
44. Peterson B.M., Horne K. Echo mapping of active galactic nuclei // *Ibid.* 2004. V. 325, N 3. P. 248–251.
45. Potter S.B., Hakala P.J., Cropper M.S. Stokes imaging of the accretion region in magnetic cataclysmic variables. I. Conception and realization // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1998. V. 297. P. 1261–1268.
46. Potter S., Romero-Colmenero E., Buckley D.A.H. Stokes imaging and Doppler mapping of the magnetic cataclysmic variable V834 Cen. // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325, N 3. P. 201–204.
47. Schwöpe A.D., Staude A., Vogel J., Schwarz R. Indirect imaging of polars // *Ibid.* 2004. V. 325, N 3. P. 197–200.
48. Horn K. Doppler tomography: It’s easy, it’s fun, and everybody should try it // *Fundamental Properties of Cataclysmic Variable Stars.* San Diego State University. 1991. P. 1–9.
49. Neustroev V.V. Time-resolved spectroscopy and photometry of the dwarf nova FS Aurigae in quiescence // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 382. P. 974–983.
50. Neustroev V.V., Borisov N.N., Barwig H., Bobinger A., Mantel K.H., Simic D., Wolf S. IP Pegasi: Investigation of the accretion disk structure. Searching evidence for spiral shocks in the quiescent accretion disk // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 393. P. 239–250.

