

**Федеральное государственное научное учреждение
“Научно-исследовательский радиофизический институт”
ФГНУ “НИРФИ”**

Федеральное агентство по науке и инновациям

Препринт № 505

**ТРЕХМЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАММА
И ВНЕОРБИТАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ
В ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДНОЙ СИСТЕМЕ
U CrB**

**Агафонов М.И.,
Шарова О.И.,
Richards M.T.**

Нижний Новгород - 2006

Агафонов М.И.,¹ Шарова О.И.,¹ Richards M.T.²

ТРЕХМЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАММА И ВНЕОРБИТАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В ТЕСНОЙ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДНОЙ СИСТЕМЕ U CrB

Препринт № 505 – Нижний Новгород: ФГНУ «НИРФИ», 2006, 23с.

УДК 524.387

Впервые проведена реконструкция трехмерной доплеровской томограммы. По 47 спектрограммам линии H_{α} построено распределение интенсивности излучения тесной двойной звездной системы U Coropae Borealis в трехмерном пространстве скоростей $I(V_x, V_y, V_z)$ с разрешением $(30 \times 30 \times 110)$ км/с. Реконструкция выполнена на основе разработанного радиоастрономического подхода (РП) к решению задач малоракурсной томографии. Сопоставление с полученной ранее двумерной томограммой показало сходство основных структурных особенностей движений потоков в орбитальной плоскости. Характерные элементы изображения: вторичная звезда-донор, поток по баллистической траектории, «колечко» аккректора – выделяются на трехмерной доплеровской томограмме более контрастно. Обнаружен высокоскоростной поток с большой интенсивностью излучения, направленный почти перпендикулярно орбитальной плоскости системы ($V_z \sim (200 \div 300)$ км/с).

Ключевые слова: малоракурсная астротомография, трехмерная доплеровская томограмма, радиоастрономический подход к реконструкции, тесные двойные звездные системы, спектрограммы, линия H_{α} , алголи, U coropae Borealis, внеорбитальные движения потоков, анализ и распознавание изображений.

¹ ФГНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт»

² Pennsylvania State University

Введение. В общем случае томограмма может служить удобным способом отображения прямой и косвенной информации об объекте. При регистрации профилей, соответствующих интегральным параметрам объекта, таким, как его распределение яркости или плотности, то есть при прямых измерениях, томограмма соответствует внутренней структуре объекта в пространственных координатах. При регистрации косвенных измерениях томограмма может отображать распределение каких-либо иных, свойственных объекту, характеристик в соответствующем этим данным координатном пространстве. Проекция такого распределения регистрируются аналогично прямым методам измерений с различных направлений, либо с использованием вращения объекта. Когда прямые измерения по каким-либо причинам недоступны, второй способ может представлять особый интерес. Как правило, он требует введения некоторых предположений и дополнительной обработки томограммы для извлечения информации, относящейся к пространству координат.

Метод доплеровской томографии основан на косвенном способе получения информации о космических объектах, структура которых не разрешается прямыми измерениями. Он предложен в конце восьмидесятых годов Маршем и Хорном [1] и лучше всего подходит для анализа последовательных спектрограмм. В качестве проекций используется набор одномерных профилей эмиссионных линий, полученных с помощью спектрографа высокого разрешения для разных ракурсов с использованием эффекта вращения объекта. Томограмма является более удобным представлением по сравнению с простым набором профилей. Она соответствует распределению интенсивности излучения в частотах некоторой эмиссионной линии в пространстве скоростей. При знании эфемерид, преобразованных к значениям орбитальных фаз $\phi(t)$, одномерные профили спектров эмиссионных линий пересчитываются в кривые лучевых скоростей $V_R(\phi)$. Доплеровские томограммы соответствуют распределению интенсивности излучения $I(V_x, V_y)$ в пространстве скоростей на частотах некоторой эмиссионной линии. Они легче поддаются интерпретации, чем исходные спектрограммы и могут указывать на характерные особенности течения вещества. Компоненты двойной системы, которые не разрешаются непосредственно из наблюдений, разрешаются в пространстве скоростей $I(V_x, V_y)$.

Задача реконструкции пространственного распределения интенсивности эмиссионной линии $I(x, y)$ на основе интенсивностей доплеровской карты $I(V_x, V_y)$ в общем случае не имеет решения, поскольку точки, разнесенные в пространстве и имеющие одинаковые скорости, могут вносить вклад в одно и то же место доплеровской карты. Однако при некоторых предположениях возможно ее решение – преобразование распределения интенсивности из пространства скоростей $I(V_x, V_y) \rightarrow I(x, y)$ в пространство координат. Требуется вводить некоторые априорные предположения о структуре поля скоростей. В свою очередь, использование газодинамических расчетов [2-6] дает возможность построить синтетическую доплеровскую томограмму [2] посредством расчета распределения интенсивности определенной эмиссионной линии, исходя из распределений плотности и температуры $\rho(x, y)$, $T(x, y)$. Сравнение синтетических доплеровских томограмм с результатами наблюдений позволяет лучше понять структуру течений вещества в двойных системах, а также уточнить имеющиеся модели. Метод доплеровской томографии является мощным инструментом изучения тесных двойных систем (ТДС). Исследованиям в области астротомографии посвящен тематический выпуск журнала [7] за 2004 год.

Целью работы являлись реконструкция трехмерной доплеровской томограммы двойной звездной системы U Coronae Borealis и получение данных о внеорбитальных движениях потоков в этой системе на основе разработанного радиоастрономического подхода (РП) к малоракурсной томографии.

1. Приложение радиоастрономического подхода (РП) к реконструкции доплеровских томограмм. В доплеровской томографии принято использовать для реконструкции метод суммирования обратных фильтрованных проекций (ОФП). Менее распространен метод с введением максимальной энтропии (МЭ) в качестве регуляризирующей функции [1]. Для доплеровской томографии метод ОФП начал применяться, начиная с работы Хорна 1991 года [8]. Он получил широкое распространение и использован для построения подавляющего большинства доплеровских томограмм (см., например, [9]). Метод ОФП является традиционным, основан на преобразовании Радона. Практическую реализацию он получил благодаря классической работе Брейсуэлла и Риддла 1967 года [10] и стал широко

использоваться в медицинской реконструктивной вычислительной томографии. Модификации метода ОФП, появившиеся позднее (Рэма-Лака, Шеппа-Логана и т.д. [11]), различаются формой фильтрующей функции (линейной, косинусной и др.) в пределах установленной частоты усечения. Заметим, что все перечисленные варианты метода ОФП основаны на фильтрации. Такие методы неэффективны при ограничениях количества ракурсов и их неравномерном распределении в пространстве. Более привлекательными являются методы, обладающие нелинейными свойствами [12], такие, как метод максимальной энтропии (МЭ) и итерационные алгоритмы с нелинейными ограничениями (ИАНО). Метод МЭ использует статистический подход и эффективен в случае больших массивов данных. В случае ограничений числа ракурсов и их неравномерного распределения в пространстве более привлекательны ИАНО. Они являются хорошей альтернативой традиционным методам томографической реконструкции, основанным на фильтрации. В разработанном нами подходе [13-17] к реконструкции двумерных и трехмерных томографических изображений использованы алгоритмы чистки: стандартной (ST-CLEAN) [18], и чистки по контуру (TC-CLEAN) [19], - являющиеся радиоастрономическими реализациями ИАНО. Радиоастрономический подход (РП) позволяет в несколько раз сократить число необходимых проекций по сравнению с традиционно используемым для реконструкции методом ОФП. В силу ряда обстоятельств астрономические наблюдения часто имеют существенные ограничения количества наблюдаемых орбитальных фаз и значительную неравномерность их распределения. Обладая нелинейными свойствами, РП успешно работает при неравномерном распределении ракурсов, что позволяет в итоге проводить построение томограмм того же качества при меньшем числе орбитальных фаз. Он весьма полезен также в связи с возможностью экономии наблюдательного времени.

Отличительные признаки радиоастрономического подхода: решение задачи деконволюции в пространстве изображений с введением суммарного изображения и эквивалентной суммарной передаточной функции (СПФ), которая строится на основе передаточных функций для разных ракурсов; отклики от боковых лепестков СПФ на суммарном изображении минимизируются с использованием чистки. Основы РП заложены в конце 80-х годов [21-

20]. Введение метода двух чисток [15] для определения области допустимых решений расширяет возможности РП в сложных случаях.

В настоящее время для реконструкции доплеровских томограмм используется двумерный вариант доплеровской томографии с учетом лишь V_x и V_y компонент скорости. Предполагается отсутствие движений вне орбитальной плоскости ($V_z = 0$). Последнее упрощение во многих случаях не соответствует реальности. Движения вещества могут быть значительны для целого ряда двойных систем, среди которых взрывные переменные, рентгеновские двойные, поляры. Существенное влияние на формирование потоков может оказать магнитное поле объектов. При наклоне плоскости вращения системы по отношению к лучу зрения ракурсы наблюдения располагаются на конусе. Поэтому их распределение в пространстве заведомо неравномерно. Целесообразно введение третьей координаты V_z . Реконструкция в трехмерном варианте доплеровской томографии должна проводиться в пространстве скоростей, ограниченном сторонами куба. Слабая эффективность метода суммирования обратных фильтрованных проекций, как и других методов томографической реконструкции, основанных на фильтрации, при неравномерном распределении ракурсов в пространстве в значительной степени сдерживала использование трехмерного варианта доплеровской томографии. В наших работах [16-17] радиоастрономический подход получил развитие для реконструкции трехмерных томограмм, показаны особенности его приложения при наличии ограниченного числа одномерных (вариант $3D_{1D}$), либо двумерных (вариант $3D_{2D}$) проекций.

Для построения трехмерных доплеровских томограмм необходимо использовать разработанный [16-17] трехмерный вариант реконструкции на основе одномерных профилей $3D_{1D}$. Он эффективен при ограничениях числа проекций и неравномерном распределении ракурсов в пространстве. Последнее обстоятельство является определяющим для успешного развития построения трехмерных доплеровских томограмм, поскольку расположение ракурсов наблюдения для любого фиксированного угла наклона орбиты системы i ограничено радиальными лучами, расположенными на поверхности соответствующего конуса. В этой связи полезно также обратить внимание на критичные для проведения трехмерной реконструкции обстоятельства. Они возникают как при значениях углов наклона орбиты системы i , близких к 90° (плоскость орбиты близка к лучу

зрения), так и при стремлении значений i к 0° . В первом случае теряется разрешение по координате V_z , во втором – в плоскости (V_x, V_y) . Ситуация в первом случае характеризуется также периодическими затмениями компонентов.

Метод доплеровской томографии может быть применен к различным типам тесных двойных систем. В течение последних 10-15 лет получены доплеровские томограммы алголей, катаклизмических переменных, рентгеновских двойных. На рис.1 показано условное изображение тесной двойной звездной системы, вращающейся вокруг центра масс и имеющей в данном случае наклонение орбиты $i=60$ градусов. На рис.2 в качестве примеров приведены две иллюстрации двойных систем различных типов, первая из которых является алголем, а вторая представляет собой систему, включающую звезду-донор, источник рентгеновского излучения и аккреционный диск.

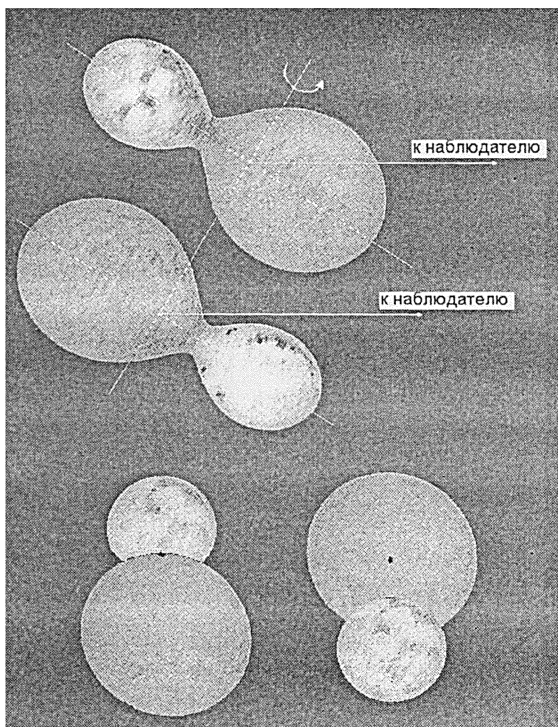


Рис.1. Условное изображение двойной системы, имеющей наклонение орбиты $i=60$ градусов; в нижней части рисунка показан вид приведенных вариантов расположения системы со стороны наблюдателя.

В настоящее время весьма актуальной задачей является проведение исследований с учетом течений вещества в направлениях, отличных от орбитальной плоскости, на что указано, например, в конце работы Стигса [22] при обсуждении перспектив исследования двойных систем. Целесообразность развития трехмерного варианта метода построения доплеровским томограмм отмечалась в последнее время неоднократно в работах ведущих специалистов в этой области [22, 23]. Пример несложного моделирования построения трехмерных доплеровских томограмм для отображения внеорбитальных движений в ТДС приводится в одной из последних работ Марша [23].

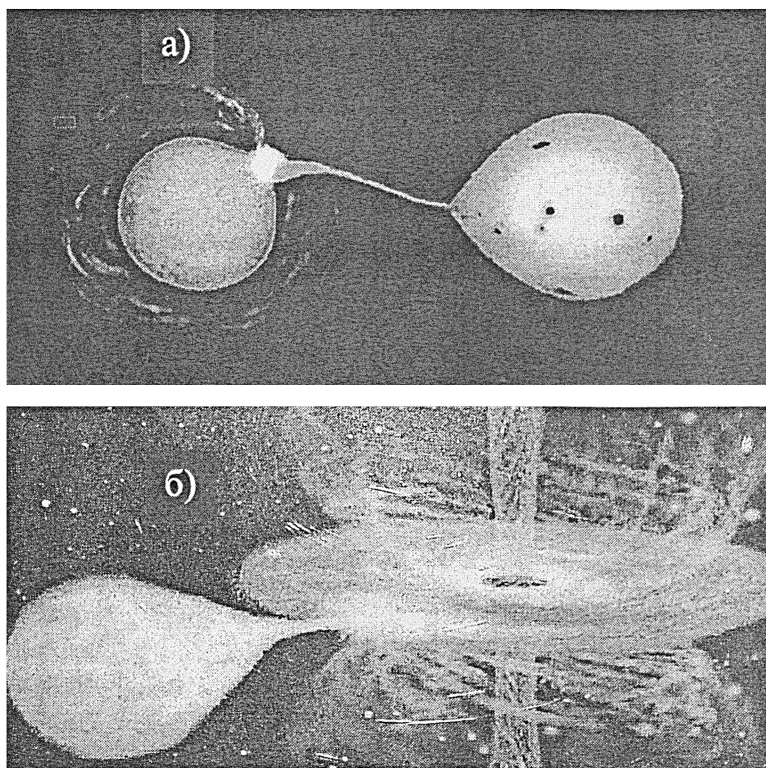


Рис.2. Примеры пространственного представления тесных двойных систем различных типов: изображение алголя в картинной плоскости (а); рентгеновская двойная (б).

Проведенное сравнение результатов построения доплеровских томограмм на основе РП с применяющимся в настоящее время методом суммирования обратных фильтрованных проекций (ОФП), показало, что при использовании РП достигается существенное улучшение качества построения томограмм по ограниченным данным. Эксперименты указали на реальную возможность сокращения при использовании РП количества используемых ракурсов при построении двумерных доплеровских томограмм в 3-8 раз. Метод позволяет проводить реконструкцию доплеровских томограмм при сильном дефиците орбитальных фаз. Его использование существенно снижает отрицательное воздействие неблагоприятных обстоятельств, возникающих при проведении экспериментов. Он позволяет экономить наблюдательное время, а также проводить анализ с использованием нескольких томограмм, построенных с исключением орбитальных фаз, соответствующих затмениям компонентов системы. Как будет показано далее, трехмерный вариант метода $3D_{ID}$ дал возможность впервые выполнить реконструкцию трехмерной доплеровской томограммы по экспериментальным данным. Построена доплеровская томограмма тесной двойной системы *U Coronae Borealis* (*U CrB*) и проведен анализ движений в направлениях, отличных от ее орбитальной плоскости.

2. Построение и анализ трехмерной доплеровской томограммы двойной системы *U Coronae Borealis*. Двойная система *U Coronae Borealis* (*U CrB*) является алголем [24] и состоит из двух звезд, первичная компонента относится к классу *B6* главной последовательности, вторичная компонента – к классу *G0*. Система имеет малый период вращения, равный 3.4522 дням, наклонение орбиты (угол между картинной плоскостью и плоскостью орбиты) $i=79.1^\circ$, отношение масс компонентов $q=0.29$.

На рис.3. приведена доплеровская томограмма двойной системы *U CrB* из работы [24], построенная на основе спектрограмм наблюдений 1994 года. Реконструкция выполнялась методом суммирования обратных фильтрованных проекций (ОФП) в предположении постоянства третьей компоненты скорости V_z . Такое упрощение позволяет не сталкиваться с трудностями, связанными с реконструкцией трехмерного изображения. Томограмма отображает интенсивность на частоте эмиссионной линии в пространстве скоростей в орбитальной плоскости системы. Для построения томограммы были использованы профили спектрограмм в линии H_α , измеренные при 47 орбитальных фазах. На рис.4 показан пример типичной спектрограммы.

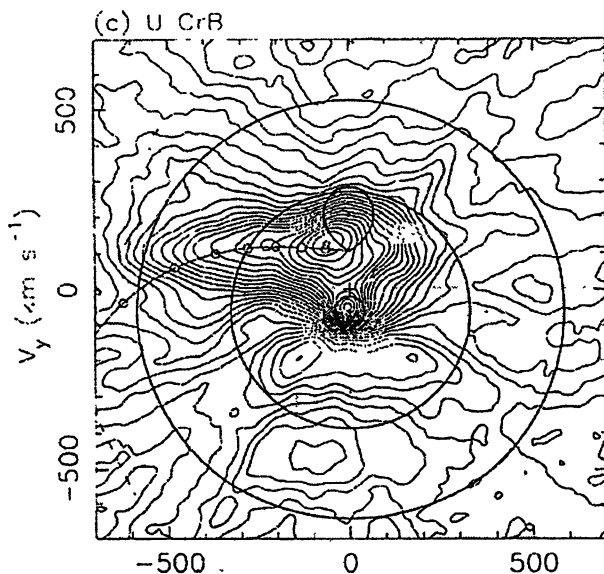


Рис.3. Доплеровская томограмма двойной системы U Coranae Borealis (U CrB) из работы [24], построенная по 47 профилям методом суммирования фильтрованных обратных проекций на основании данных 1994 года.

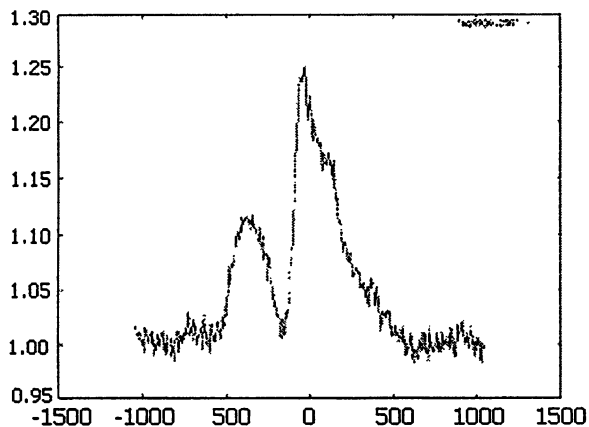


Рис.4. Пример одного из профилей спектрограмм в линии H_{α} , использованных для построения доплеровской томограммы двойной системы U CrB (значения по горизонтальной оси в км/с)

Для построения реконструкции трехмерной доплеровской томограммы нами были использованы цифровые данные профилей интенсивности в линии H_{α} , измеренные при 47 орбитальных фазах при наблюдениях 1994 года [24]. Реконструкция выполнена на основе радиоастрономического подхода (РП). В работах [16-17] был показан принцип построения суммарной передаточной функции для трехмерного варианта задачи ($3D_{1D}$) с использованием обратного проецирования одномерных профилей, соответствующих разрешению аппаратных функций. Построение трехмерного суммарного изображения проводится также на основе обратного проецирования, исходя из одномерных профилей спектрограмм, расположенных в соответствии с ракурсами орбитальных фаз. Учитывается наклонение орбиты.

Ракурсы наблюдения в нашей задаче располагаются на поверхности конуса, которая образует с осью вращения системы угол 79.1° . Соответственно угол между плоскостью орбиты и направлением на наблюдателя составляет 10.9° . Такое расположение всех 47 ракурсов позволяет получить достаточно высокое разрешение в двумерной задаче. Однако пространственное распределение ракурсов в трехмерной задаче характеризуется сильной неравномерностью, при которой использование метода ОФП не позволяет получить удовлетворительный результат. Разрешение по третьей координате V_z оказывается в несколько раз ниже. Указанные обстоятельства приводят при использовании метода ОФП либо к очень существенным искажениям томограммы, либо (в случае введения требуемого усечения верхней пространственной частоты) к значительной потере разрешения.

Полученная в ходе реконструкции трехмерная доплеровская томограмма представляет собой четырехмерный массив значений. Три измерения соответствуют координатам в пространстве скоростей (V_x , V_y , V_z), четвертое содержит значения интенсивности излучения. Максимальная интенсивность нормирована на единицу. Трехмерную томограмму можно представить в виде семейства сечений в плоскости (V_x , V_y). Расположение сечений в пространстве иллюстрирует условная схема на рис.5. Полученные в результате реконструкции трехмерной доплеровской томограммы изображения показаны на рисунках 6-12.

Разрешение трехмерной томограммы (V_x , V_y , V_z) составляет приблизительно ($30 \times 30 \times 110$) км/с. Построенные для отображения трехмерного массива 15 сечений представлены на рис.6. Использована область пространства скоростей в виде куба в пределах от -700 до +700

км/с по трем координатам (V_x , V_y , V_z). Шаг между сечениями по оси V_z составляет 100 км/с. Максимальный уровень интенсивности для каждого из сечений показан в верхнем левом углу изображений. Интерес для дальнейшего анализа представляют сечения, обладающие наибольшей интенсивностью. Как можно видеть из рис.6, это 6 наиболее информативных сечений при значениях скорости V_z , которые равны -300, -200, -100, 0, 100, 200 км/с. Выделенные сечения показаны крупным планом на рис.7. Вблизи изолиний нанесены значения уровней, которые характеризуют их величину по сравнению с нормированным на единицу максимумом трехмерного массива, положение которого соответствует точке в зоне аккректора с координатами ($V_x=0$, $V_y=-70$, $V_z=80$ км/с). Пересечение осей координат совпадает с центром масс системы. На сечения нанесены также аналогично показанным ранее на двумерной томограмме (см. рис.3) полость Роша звезды-донора, положение аккректора (крестик, расположенный ниже центра координат), баллистическая траектория из точки Лагранжа (берет начало в носике полости Роша звезды-донора).

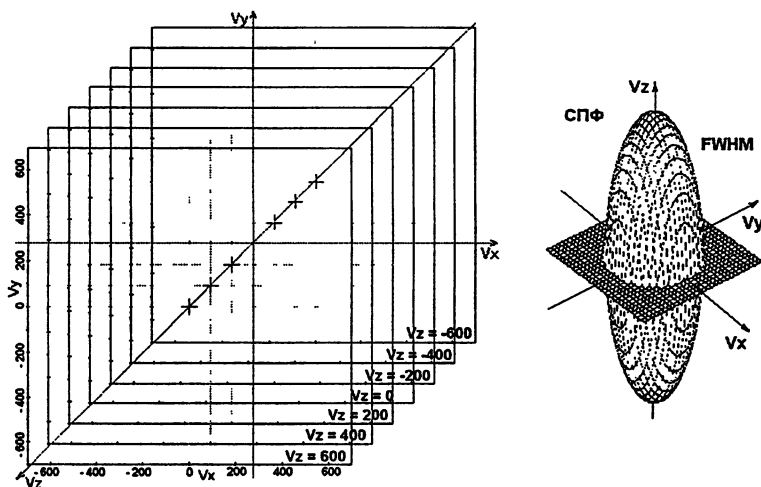
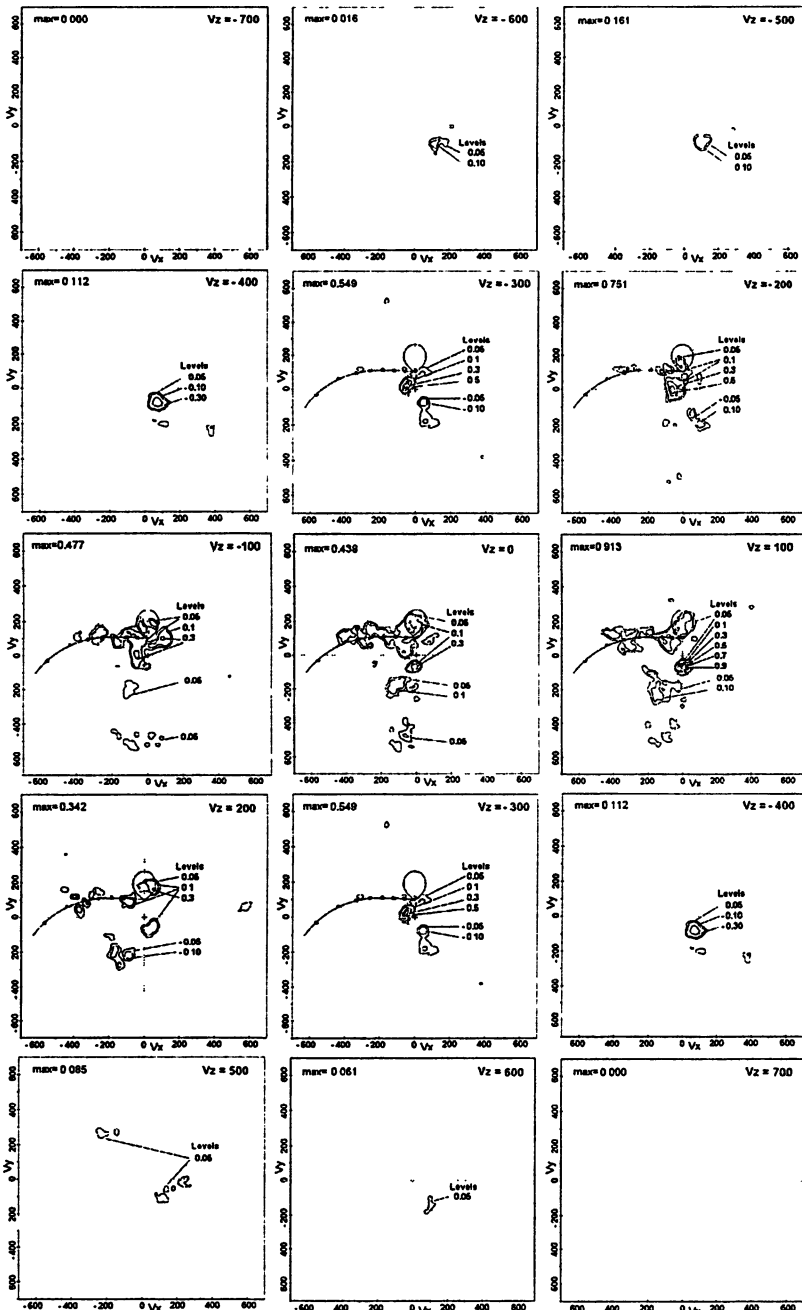


Рис.5. Условная схема расположения сечений трехмерной томограммы в пространстве скоростей V_x, V_y, V_z (км/с) и вид эквивалентной суммарной передаточной функции (СПФ) на уровне половины интенсивности (FWHM).

Рис.6 (с.13). Набор из 15 сечений с шагом по оси V_z 100 км/с, представляющий трехмерную доплеровскую томограмму системы U СтВ (для реконструкции использованы 47 профилей спектрограмм в линии H_{α} наблюдений 1994 года [24], значения скоростей по осям V_x, V_y, V_z – в км/с).



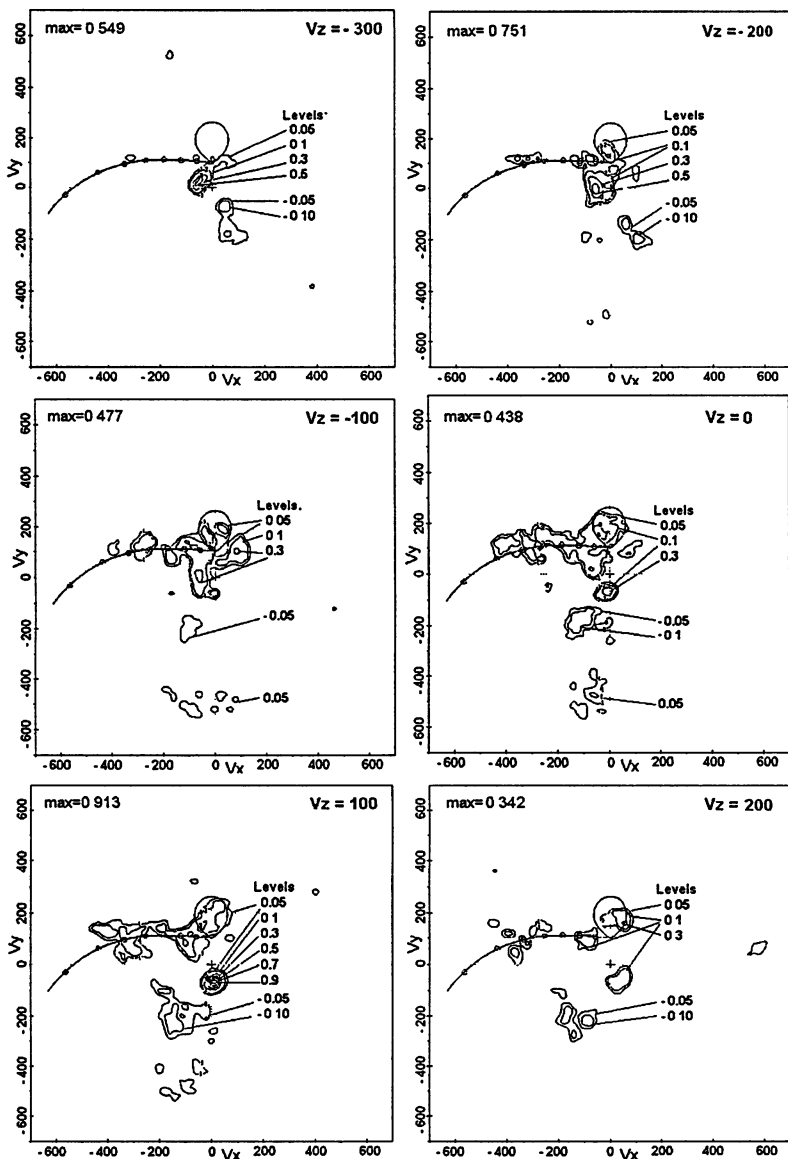


Рис.7. Шесть центральных наиболее информативных сечений трехмерной доплеровской томограммы системы U Coronae Borealis (U CrB), показанные крупным планом (значения скоростей по осям V_x, V_y, V_z – в км/с).

На рис.8 центральное сечение ($V_z=0$) представлено крупным планом вместе с двумерной томограммой из работы [24]. Как следует из рисунка, положение баллистической траектории хорошо согласуется с имеющейся на рисунке зоной струи, крестик, соответствующий аккретору, расположен точно в центре зоны, ограниченной несколькими концентрическими изолиниями. Указанные области просматриваются на сечениях построенной трехмерной доплеровской томограммы намного контрастнее, чем на двумерной томограмме из [24]. На рис.9 крупным планом показано сечение при $V_z=80\text{км/с}$, в котором расположен максимум трехмерной томограммы, нормированный предварительно на единицу. Зоны с отрицательной интенсивностью выделены ломаной жирной линией. Область с максимальной интенсивностью ассоциируется с аккретором.

Хорошее представление о структуре трехмерной доплеровской томограммы дает представление каскадом, то есть последовательное размещение сечений в картинной плоскости с небольшим сдвигом по оси V_z . На рис.10 таким образом изображены пять наиболее информативных сечений. Удобное зрительное восприятие позволяет проследить динамику изменений структуры в пространстве скоростей при изменении координаты V_z от сечения к сечению. Плоскость $V_z=0$ является экваториальной.

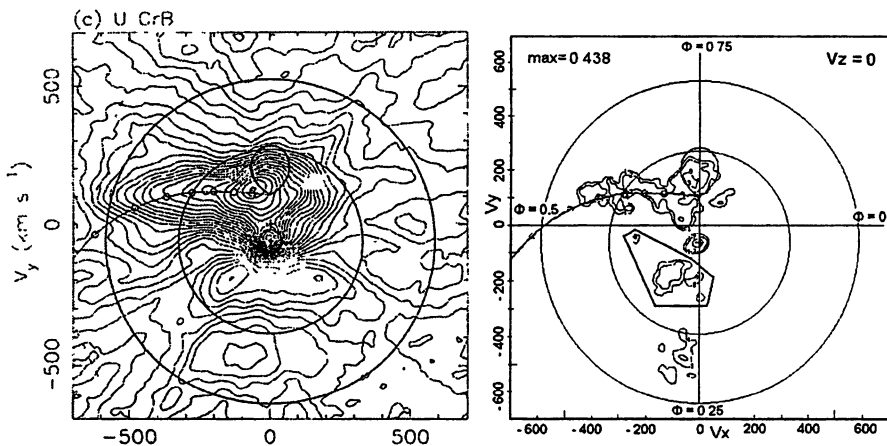


Рис.8. Двумерная доплеровская томограмма из [24] и центральное сечение ($V_z=0$) построенной трехмерной доплеровской томограммы; на рисунки нанесены: полость Роша звезды-донора, точка аккретора, баллистическая траектория из точки Лагранжа; ломаной линией обведены области поглощения с отрицательной интенсивностью.

Цифрами 1-3 на рис.10 обозначены три характерных особенности, структура которых явно носит “организованный” характер.

Рассмотрим подробнее зоны, представляющие наибольший интерес:

1 – Зона, ассоциирующаяся с аккректором (первичной звездой), центр которой имеет координаты ($V_x=0$, $V_y=-70$, $V_z=80$) км/с; по оси V_z центр совпадает с максимумом интенсивности трехмерной карты, нормированным на единицу; см. также рис.12;

2 – Область, характерная для баллистической траектории, то есть движущейся с ускорением струи между двумя звездами (см. двумерную томограмму на рис.3 и 8 из работы [24]), ее скоростные координаты лежат в области значений ($V_x=0\div 450$, $V_y=100\div 150$) км/с, направление движения в основном соответствует орбитальной плоскости;

3 – Область, имеющая при больших значениях скорости $V_z= - (200\div 300$ км/с) очень высокую интенсивность (0.751; 0.549), представляющая, по всей видимости, струю, направленную практически перпендикулярно орбитальной плоскости системы, наибольшая интенсивность которой на трехмерной томограмме соответствует координатам $V_x=-60$, $V_y=0$, $V_z=-(100\div 300)$ км/с; она проявилась лишь благодаря построению трехмерной томограммы.

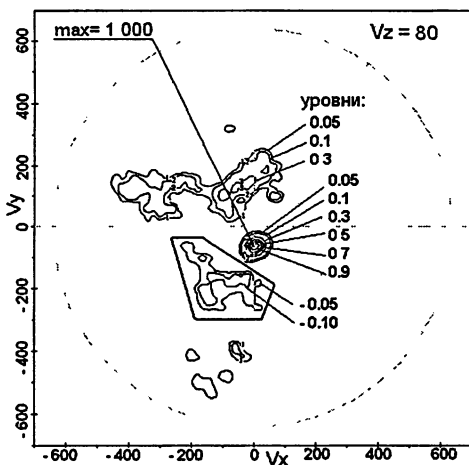


Рис.9. Сечение $V_z=80$ км/с, соответствующее максимуму трехмерной функции, нормированному на единицу и ассоциирующемуся с аккректором; ломаной линией обведены зоны поглощения с отрицательной интенсивностью.

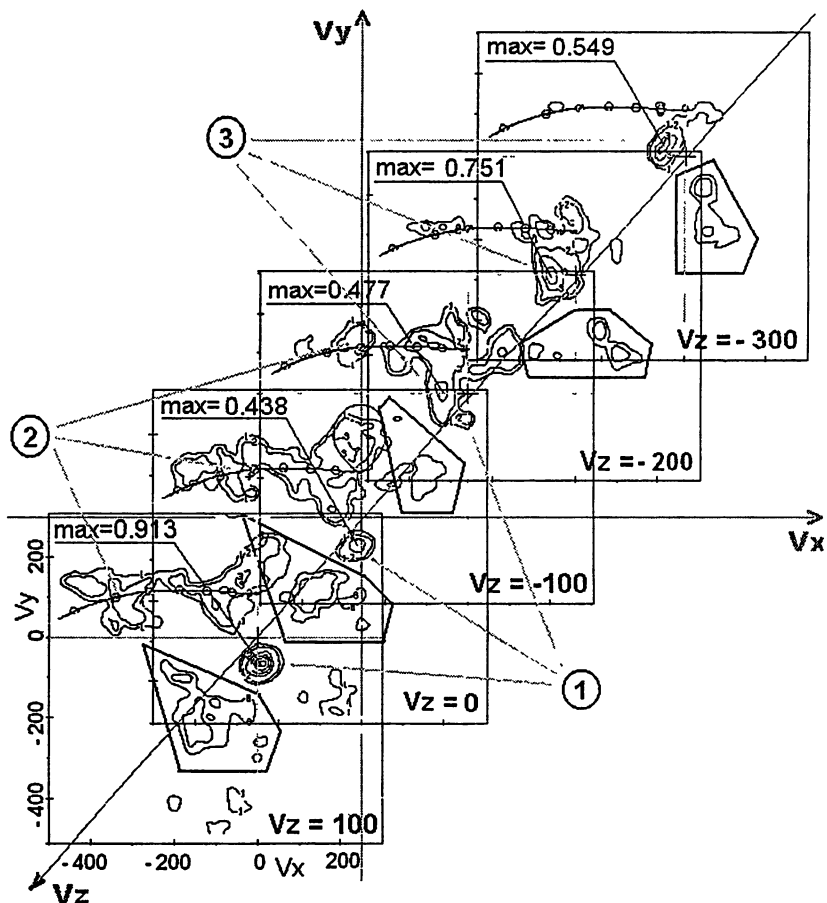


Рис.10. Трехмерная доплеровская томограмма U CrB, представленная пятью наиболее информативными сечениями по оси V_z . Цифрами на карте обозначены три выделенных зоны: 1 – зона, ассоциирующаяся с аккректором, центр которой имеет координаты ($V_x=0$, $V_y=-70$, $V_z=80$) км/с; 2 – область, характерная для потока по баллистической траектории (см. двумерную томограмму на рис.3 из работы [24]), значения скоростей лежат в области ($V_x=0\div 450$, $V_y=100\div 150$) км/с, направление движения в основном соответствует орбитальной плоскости; 3 – область, имеющая при больших значениях скорости $V_z=-(200\div 300)$ км/с очень высокую интенсивность ($0.549\div 0.751$), и представляющая, по всей видимости, струю, направленную почти перпендикулярно орбитальной плоскости системы; ломаной линией обведены зоны поглощения с отрицательной интенсивностью, значения скоростей по осям V_x, V_y, V_z – в км/с.

Две первые из этих областей выявлены при анализе двумерной томограммы в работе [24]. Обнаружение третьей области стало возможно лишь благодаря выполненной реконструкции трехмерной доплеровской томограммы и проведенному анализу.

На рис.11 показано сечение в плоскости (V_y , V_z) при значении скорости $V_x = -60$ км/с. Как можно заметить из приведенного ранее на рис.10 изображения трехмерной доплеровской томограммы с использованием каскада сечений, эта плоскость соответствует максимумам интенсивности выделенной области 3 на сечениях ($V_z = -300, -200, -100$ км/с). Для нее характерны высокие скорости в направлении перпендикулярном орбитальной плоскости. Сечение, приведенное на рис.11, позволяет детальнее рассмотреть эту особенность с высокими скоростями по V_z . Интенсивность в максимуме, расположенном вблизи сечения $V_z = -200$ км/с, весьма высока и достигает значения 0.805. Для выделенной области, которая вытянута по направлению V_z , можно определить характерный интервал скоростей по уровню половины интенсивности. Он охватывает значения скоростей по V_z от -100 до -300 км/с.

На рис.12 показано сечение в плоскости (V_z , V_y) при значении $V_x = 0$. В этом сечении находится максимум области, называемой “Колечко”, которая ассоциируется с первичной звездой. Корректное сопоставление размеров этой области в направлении V_z с размерами в плоскости (V_x , V_y) может быть сделано только при учете поправки на эквивалентное разрешение трехмерной карты, которое в нашем случае в направлении V_z в 3-4 раза ниже и для пространства скоростей (V_x , V_y , V_z) соответствует $30 \times 30 \times 110$ км/с.

Проведенный анализ трехмерной томограммы представляет убедительные доказательства и позволяет в итоге сделать вывод о существовании высокоскоростной струи, обладающей значительной интенсивностью излучения и направленной почти перпендикулярно орбитальной плоскости системы U Coronae Borealis (U CrB). Скорости движений в ней достигают значений $V_z \sim -(200 \div 300)$ км/с. Они сравнимы по величине со скоростями движения вещества в ранее обнаруженной [24] газодинамической струе, помеченной на рис.10 цифрой 2, находящейся в орбитальной плоскости системы (V_x, V_y). Этот поток соответствует баллистической траектории. Он отчетливо выделяется и на трех центральных сечениях трехмерной ДТ, причем более

контрастно. Заметим однако, что максимальная интенсивность излучения внеорбитальной струи, для которой наиболее характерна скорость $V_z \sim -200$ км/с, в несколько раз превосходит интенсивность излучения струи, расположенной в орбитальной плоскости.

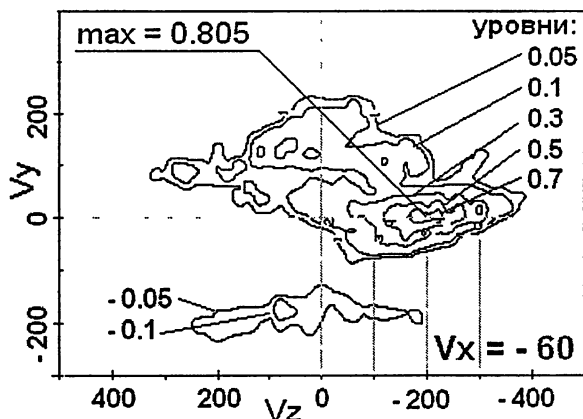


Рис.11. Сечение в плоскости V_z, V_y (при $V_x = -60$ км/с), в котором расположен максимум интенсивности области потока, направленного почти перпендикулярно орбитальной плоскости; максимальное значение интенсивности в указанной области составляет 0.805 от максимума трехмерной томограммы и расположено вблизи сечения $V_z \sim -200$ км/с; характерный интервал скоростей V_z от -100 до -300 км/с.

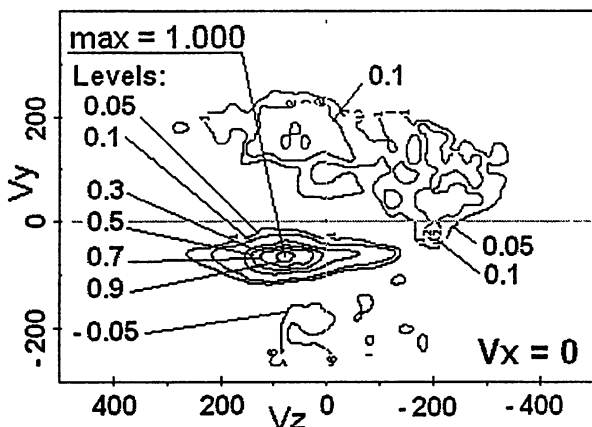


Рис.12. Сечение в плоскости V_z, V_y (при $V_x = 0$ км/с), в которой расположена зона с максимумом интенсивности трехмерного массива, ассоциирующаяся с первичной звездой и называемая "Колечко".

Заключение и выводы.

1. *Впервые проведена реконструкция трехмерной доплеровской томограммы. По 47 одномерным профилям спектрограмм линии H_{α} построено распределение интенсивности излучения тесной двойной системы U Sogonae Borealis в трехмерном пространстве скоростей $I(V_x, V_y, V_z)$ с разрешением $(30 \times 30 \times 110)$ км/с. Сопоставление с полученной ранее двумерной томограммой показало сходство всех основных структурных особенностей движений потоков, зарегистрированных ранее в орбитальной плоскости. Характерные элементы изображения (вторичная звезда-донор, поток по баллистической траектории из точки Лагранжа, «колечко» звезды аккретора) выделяются на трехмерной томограмме более контрастно.*
2. *Проведен анализ движений в направлениях отличных от орбитальной плоскости системы. Обнаружен высокоскоростной поток с большой интенсивностью излучения, направленный почти перпендикулярно орбитальной плоскости системы $V_z = -(200 \div 300)$ км/с. Ранее, на основе стандартного варианта метода двумерной доплеровской томографии движения вещества в направлениях, отличных от орбитальной плоскости системы, зарегистрировать было невозможно.*
3. *Реконструкция трехмерной доплеровской томограммы выполнена на основе разработанного радиоастрономического подхода (РП) к решению задач малоракурсной томографии, который реализован в задаче реконструкции трехмерных доплеровских томограмм с целью исследования движений в тесных двойных звездных системах. В отличие от традиционно применяемого метода суммирования фильтрованных обратных проекций (ОФП) радиоастрономический подход позволил получить качественное решение в условии неравномерного распределения ракурсов наблюдения в пространстве. Томограмма имеет высокий динамический диапазон и малые искажения, типичные для реконструкции методом ОФП. На экспериментальных данных показано, что разработанный на основе РП метод реконструкции доплеровских томограмм позволяет регистрировать движения вещества, направленные вне орбитальной плоскости системы.*
4. *Разработана методика обработки и анализа цифрового массива данных трехмерной ДТ, которая позволяет провести необходимый*

начальный этап распознавания элементов томограммы; процесс обработки иллюстрирован графическим материалом.

Полученные результаты указывают на высокий потенциал разработанного радиоастрономического подхода (РП) к решению задач малоразмерной астротомографии. Его развитие и успешное приложение в доплеровской томографии тесных двойных систем позволяет надеяться на получение новых интересных данных при исследовании удаленных космических объектов методом трехмерной доплеровской томографии. Расширены возможности получения информации о космических объектах косвенными методами – методами астротомографии.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-02-16234).

ЛИТЕРАТУРА

1. Marsh T.R., Horne K. Images of accretion discs –II. Doppler tomography. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1988. V.235. P.269-286.
2. 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.
3. Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А., Четчин В.М. Влияние вязкости на морфологию течения вещества в полуразделенных двойных системах. Результаты трехмерного численного моделирования. // *Астрон. ж.* 2000. Т.77, №1. С.31-41.
4. Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кайгородов П.В., Кузнецов О.А., Матсуда Т. Структура холодного аккреционного диска в полуразделенных двойных системах. // *Астрон. ж.* 2004. Т.81, №6. С.494-502.
5. Митсумото.М., Джаханара Б., Матсуда Т., Ока К, Бисикало Д.В., Кальпио Е.Ю., Боффин Г.М.Дж, Боярчук А.А., Кузнецов О.А. Трехмерное газодинамическое моделирование изменения структуры течения при переходе от спокойного к активному состоянию в симбиотических звездах. // *Астрон. ж.* 2005. Т.82, №11. С.990-999.
6. Хрузина Т.С., Черепашук А.М., Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кузнецов О.А. Интерпретация кривой блеска «спокойной» рентгеновской новой в модели безударного взаимодействия струи и диска. // *Астрон. ж.* 2005. Т.82, №2. С.99-109.
7. *Astronomische Nachrichten.* 2004. V.325. No.3. P.177-264 (Papers, which were presented at JD 09, Astrotomography of the XXV General Assembly of the IAU in Sydney, 2003).
8. Horn K. // *In Fundamental Properties of Cataclysmic Variable Stars / Ed. by A.W.Shafter. San Diego State University, 1991. P.53*

9. Richards M.T. Doppler tomography of Algols. // *Astronomische Nachrichten*. 2004. V.325. No.3. P.229-232.
10. Bracewell, R.N., Riddle A.C. Inversion of fan-beam scans in radioastronomy. // *Astrophys.J.* 1967. V.150. P.427-434.
11. Shepp L.A., Logan B.F. The Fourier reconstruction of a head section. // *IEEE Trans. Nuclear Science*, 1974. V.21, P.21-43.
12. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
13. Agafonov M.I. Few projections astrotomography: 2-CLEAN DSA reconstruction. // *Astron. Nachrichten*. 2004. V.325, N3. P.259-262.
14. Agafonov M.I. Radioastronomical approach to few projections tomography. // *Astron. Nachrichten*. 2004. V.325, N3. P.263.
15. Агафонов М.И. Томография при ограниченном числе проекций. I. Радиоастрономический подход к проблеме и метод 2-CLEAN DSA. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004. Т.47, №2. С.94-110.
16. Agafonov M.I., Sharova O.I. Few projections astrotomography: radio astronomical approach to 3D reconstruction. // *Astronomische Nachrichten*. 2005. V.326. No.2. P.143-149.
17. 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.
18. Hogbom J.A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. // *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* 1974. V.15, N3. P.417-426.
19. Steer D.G., Dewdney P.E., Ito M.R. Enhancements to the deconvolution algorithm "CLEAN". // *Astron. Astrophys.* 1984. V.137, N2. P.159-165.
20. Агафонов М.И., Подвойская О.А. Восстановление двумерного распределения яркости итерационными алгоритмами при ограниченном количестве сканов ножевым лучом. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1989. Т.32, N6. С.742-752.
21. Агафонов М.И., Подвойская О.А. Восстановление двумерного распределения яркости с использованием двух вариантов алгоритма CLEAN при ограниченном числе проекций в радиоастрономии и томографии. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1990. Т.33, N10. С.1185-1187.
22. Steeghs D. Doppler tomography of accretion in binaries. // *Astron. Nachrichten*. 2004. V.325, No 3. P.185-188.
23. Marsh T.R. Doppler tomography. // *Astrophysics and Space Science*. 2005. V.296. P.403-415.
24. Mercedes T.R., Albright G.E., Bowles L.M. Doppler tomography of the gas stream in short-period algal binaries. // *Astrophys. J.* 1995. V.438. P.L103-L106.
25. Агафонов М.И., Шарова О.И. О реконструкции доплеровских томограмм. // *Труды Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга*. 2005. Т.78. С.61.

Agafonov M.I.¹, Sharova O.I.¹, Richards M.T.²

3D DOPPLER TOMOGRAM AND REGISTRATION OF THE OUT-OF-ORBITAL MOTIONS IN CLOSE BINARY SYSTEM U CrB

Preprint № 505 – Nizhny Novgorod: NIRFI, 2006, 23p.

The reconstruction of 3D Doppler tomogram has been made for the first time. The distribution of the H_{α} emission intensity $I(V_x, V_y, V_z)$ of the close binary star system U Coronae Borealis has been built in 3D velocity space with the resolution (30x30x110) km/s based on 47 spectra at the different orbital phases. The reconstruction is made on the base of the developed radioastronomical approach (RA) to the solution of few projections tomography problems. The comparison with the two-dimensional tomogram received earlier has showed similarity of the basic structural features of the gas flow motions in the orbital plane. The typical elements of the image which are the following: the feature of the secondary star-donor, a stream along the ballistic trajectory, accretion annulus (low velocity emission of the primary)– stand out on 3D Doppler tomogram more contrastingly. A high-velocity stream with strong emission intensity has been discovered moving in the direction disposed almost perpendicularly to the orbital plane of the system ($V_z \sim (200 \div 300) \text{ km/c}$).

Key Words: Few Projections Astrotomography, 3D Doppler tomogram, Radioastronomical Approach (RA) to the reconstruction, close binary star systems, spectra, H_{α} line, algol binaries, U coronae Borealis (U CrB), to the orbital plane motions of the streams, images analysis and recognition.

¹ Radiophysical Research Institute (NIRFI)

² Pennsylvania State University

Агафонов Михаил Игоревич
Шарова Ольга Иосифовна
Richards Mercedes

Трехмерная доплеровская томограмма и внеорбитальные
движения в тесной двойной звездной системе U CrB

Подписано в печать 27.03.2006 г. Формат 60 x 84/16.

Бумага писчая. Объем 1,43 усл. п. л.

Тираж 100. Заказ 5557.

Отпечатано в ФГНУ «НИРФИ»

Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25