

Разработка каталога идентификации двойных звёзд ILB

© Н.А. Скворцов

© Л.А. Калиниченко

ФИЦ «Информатика и управление» РАН

Москва, Россия

© А.В. Карчевский

© Д.А. Ковалева

© О.Ю. Малков

Институт астрономии РАН

Москва, Россия

nskv@mail.ru

leonidandk@gmail.com

geisterkirche@gmail.com

dana@inasan.ru

malkov@inasan.ru

Аннотация. Двойные и кратные системы звёзд наблюдают с использованием разных методов и инструментов. Каталоги двойных звёзд определённых наблюдательных типов независимы друг от друга и используют свои системы идентификации звёзд. Также компоненты двойных соотнесены с идентификаторами обзоров и каталогов одиночных звёзд. Задача перекрёстной идентификации двойных звёзд различных наблюдательных типов, а также обзоров неба нетривиальна и связана с разрешением разного рода конфликтов. Она требует не просто объединения списков существующих идентификаторов для конкретных звёзд, а отождествления компонентов кратных систем по астрометрическим и астрофизическим параметрам для дальнейшего соотнесения идентификаторов определённым компонентам и друг другу. В данной статье описана разработка средств для создания каталога идентификаторов двойных звёзд ILB, включающая процедуру перекрёстного отождествления систем, их компонентов и пар всех наблюдательных типов. Работа является продолжением исследований методов отождествления двойных и кратных систем.

Ключевые слова: система идентификации, двойные звёзды, разрешение сущностей.

Development of Identification List of Binaries ILB

© N.A. Skvortsov

© L.A. Kalinichenko

FRC «Computer Science and Control» RAS,

Moscow, Russia

© A.V. Karchevsky

D.A. Kovaleva

© O.Yu. Malkov

Institute of Astronomy RAS,

Moscow, Russia

nskv@mail.ru

leonidandk@gmail.com

geisterkirche@gmail.com

dana@inasan.ru

malkov@inasan.ru

Abstract. Binary and multiple stellar systems have been observed using various methods and tools. Catalogs of binaries of different observational types are independent and use inherent star identification systems. Moreover, components of stellar systems refer identifiers of surveys and catalogs of single stars. The problem of cross-identification of binary stars of different observational types as well as sky surveys is non-trivial and related to resolution of various kinds of conflicts. It requires not only combining lists of existing identifiers of specific stars, but matching components of multiple systems according to astrometric and astrophysical parameters for further referring of identifiers to matched components and to each other. This paper describes development of tools for creating the Identification List of Binaries (ILB) including cross-matching of systems, their components and pairs of all observational types. This work continues research of binary and multiple systems matching methods.

Keywords: identification systems, binary stars, entity resolution.

1 Введение

Двойные звезды довольно многочисленны и

Труды XIX Международной конференции «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных» (DAMDID/ RCDL'2017), Москва, Россия, 10–13 октября 2017 года

составляют значительную часть звездной популяции галактики (от 20% до 90%, по разным оценкам для разных выборок). Значительная часть двойных звезд на самом деле являются системами большей кратности. Самый большой каталог визуальных двойных звезд WDS [1] содержит более 100 000 пар, из которых 25000 в системах с кратностью три и больше.

Есть веские основания считать, что компоненты двойной звезды формируются одновременно и в дальнейшем эволюционируют параллельно, оставаясь в системе. Фактором, определяющим ход эволюции, является распределение первоначальной массы между компонентами. Поэтому для определения принадлежности компонентов системе необходимо оценивать общность их эволюции.

Двойные звезды подразделяют на несколько типов в зависимости от способа их наблюдения. Для каждого типа наблюдений формировались отдельные каталоги с собственными наборами наблюдаемых параметров. Основные наблюдательные типы составляют визуальные, астрометрические, орбитальные, интерферометрические, затменно-переменные, спектральные двойные.

Среди визуальных пар различают оптические и физические двойные. И те, и другие пары можно найти в каталогах визуальных двойных, в частности, в WDS. Оптические пары состоят из весьма далеких и несвязанных в пространстве звезд, проецирующихся на небесную сферу близко друг к другу в направлении наблюдения. Физические пары представляют собой близко расположенные в пространстве компоненты, связанные силами тяготения, обращающиеся вокруг общего центра масс по законам Кеплера. Если наблюдения продолжаются достаточно долго, может проследиваться полное обращение звезды. В результате их наблюдений определяют взаимное угловое расстояние компонентов и позиционный угол. Это самая многочисленная группа известных двойных звёзд. Основными каталогами визуальных двойных являются WDS, CCDM [2], Tycho [3].

Если один из двух компонентов не виден по тем или иным причинам, двойственность можно обнаружить по изменению положения на небе второго компонента. В таком случае говорят об астрометрических двойных звёздах. Основными каталогами таких звёзд являются два каталога Makarov and Kaplan. Затменно-переменные двойные звезды представляют собой пары, радиус обращения которых сравним с размерами самих звезд, а плоскости орбит этих звезд и луч зрения наблюдателя практически совмещаются. Эти звезды обнаруживаются явлениями затмений, проявляющимися периодическим падением яркости наблюдаемой звезды. В результате наблюдений определяются параметры кривых блеска, отражающие закономерности изменения яркости звезды со временем. Основными каталогами затменных являются ОКПЗ [4] и CEV2. Интерферометрические двойные звезды наблюдаются при помощи Фурье-анализа изображений телескопов, увеличивающего разрешающую способность до дифракционного предела. Обнаруженные таким образом двойные представлены в каталоге INT4. Спектральные

двойные звезды представляют собой пары, обращающиеся в плоскости, слабо наклоненной к направлению луча зрения наблюдателя. Они обнаруживаются при спектроскопических наблюдениях лучевых скоростей. Линии в спектрах таких звезд регулярно смещаются или раздвигаются из-за эффекта Доплера, что свидетельствует о двойственности звезды. В результате наблюдений определяют кривые лучевой скорости, амплитуду и период колебаний. Основным источником данных о спектральных двойных является каталог SB9 [5]. Существуют и другие наблюдательные типы двойных и специализированные каталоги.

В разных сообществах исследователи специализировались на различных способах наблюдения двойных, поэтому принципы построения каталогов разных наблюдательных типов двойных никоим образом не согласовывались. В дополнение к существенной неоднородности, рождающей конфликты, проявляющиеся при интеграции каталогов, в большинстве каталогов созданы собственные системы идентификации двойных. Некоторые из каталогов также содержат ссылки на идентификаторы соответствующих наблюдений в обзорах одиночных звёзд.

База данных двойных (BDB) [6], созданная авторами данной статьи, включает данные о двойных и кратных системах всех наблюдательных типов, собранные из разных каталогов, с некоторыми общими параметрами и отсылкой на оригинальные каталоги по идентификаторам. При создании базы была осознана необходимость разработки специализированной системы идентификации (BSDB) [7], учитывающей идентификацию компонентов, пар внутри систем и кратных систем в целом. Однако эта система сама по себе не решает изначальную неоднородность идентификаторов и требует аккуратного отождествления с идентификаторами разных систем идентификации.

С этой целью отдельно создаётся каталог идентификации двойных ILB, объединяющий в себе перекрёстные значения целого ряда систем идентификации. Для создания этого каталога недостаточно просто свести в таблицу необходимые идентификаторы, исходя из совпадения уже присутствующих в оригинальных каталогах перекрёстных идентификаций, так как эта работа сталкивается с множеством конфликтных ситуаций. Разрешение возникающих конфликтов основано на астрометрическом и астрофизическом подходах к отождествлению компонентов, пар и систем звёзд.

Разработан алгоритм отождествления многокомпонентных суцностей, позволяющий корректно соотносить данные различных наблюдений кратных звёздных систем. Результат его работы используется для разрешения

конфликтов между идентификаторами разных систем идентификации.

Основной целью данной работы является описание реализации каталога идентификаторов двойных звезд ILB (Identification List of Binaries), который объединяет идентификаторы двойных и кратных звезд всех наблюдательных типов. Формирование каталога потребовало создания инструментария, предназначенного для заполнения и поддержки базы идентификаторов в актуальном состоянии, а также расширения её по мере необходимости. Некоторые каталоги двойных и обзоры являются периодически обновляемыми, соответственно база идентификаторов должна обновляться вместе с ними.

Основные принципы алгоритма, лежащего в основе инструментов создания ILB, приведены в разделах 2 и 3. Раздел 4 посвящён вопросам реализации программных инструментов и результатам создания каталога.

2 Каркас для отождествления двойных и кратных звёзд

Общий подход к отождествлению одиночных и многокомпонентных сущностей включает построение множеств кандидатов на идентификацию для каждой сущности или её компонента и применение набора критериев отождествления, ограничивающих такие множества кандидатов. Критерии отождествления формируются на основании знаний предметной области, ограничивающих интерпретацию объектов, и определяются унифицированным образом, принимая в качестве аргументов отождествляемые сущности, а не отдельные параметры.

Первыми применяются критерии, которые обычно наиболее сильно ограничивают начальное множество кандидатов, для этой цели критериям может присваиваться приоритет. В остальном, они применяются в произвольном порядке тогда, когда присутствуют все требуемые данные о сущностях для их применения. В случае несоответствия применяемому критерию отождествляемая сущность исключается из списка кандидатов на идентификацию с текущей сущностью.

Если данные о сущности, необходимые для применения критерия, отсутствуют, по нему не может быть ограничено множество кандидатов. Таким образом, присутствие данных о специфических атрибутах даже для небольшой части сущностях предметной области позволяет применять связанные с этими атрибутами дополнительные критерии отождествления, а отсутствие определённых данных влияет только на применимость связанных с ними критериев, но не на возможность отождествления сущностей в целом.

Подходы, используемые для разрешения

сущностей, включают в себя различные критерии сходства для подмножеств значений атрибутов и структур графов, которые позволяют оценивать тождественность многокомпонентных сущностей. Критерии, основанные на знаниях о сущностях предметной области, могут ограничивать возможные значения атрибутов или их сочетание у одной сущности или вводить ограничения на изменчивость значений атрибутов отождествляемых объектов. Атрибуты могут иметь константные значения для определённой сущности, либо менять значения в рамках определённых ограничений, выход за которые будет означать, что объекты описывают разные сущности.

Графовые критерии могут включать правила отождествления, основанные на ограничениях структуры многокомпонентных сущностей, или делать выводы об отождествлении многокомпонентных сущностей или компонентов на основе уже установленных идентификаций других компонентов.

2.1 Унификация данных в предметной области

Типы сущностей задаются концептуальной схемой предметной области. Она определяет абстрактные типы данных, описывающие структурированное представление информации о сущностях, их ограничениях, а также спецификации поведения сущностей.

Для каждого типа сущности X в концептуальной схеме создается абстрактный тип данных $T_X[a_1, \dots, a_i, \dots]$, содержащий атрибуты a_i для описания характеристик, которые сущность может иметь в данной предметной области. В предметной области двойных и кратных систем звёзд все астрономические объекты и связь их друг с другом рассматриваются в терминах трёх основных типов сущностей: кратных систем звёзд в целом, их отдельных компонентов и пар компонентов. Особым типом является также тип идентификатора, который связывается с одним из типов объектов: компонентом, парой или системой.

Набор источников данных D_j (обзоров и каталогов) хранит данные о сущностях определённого типа, структурированных как кортежи $X_j[a_{1j}, \dots, a_{ij}, \dots]$, содержащие атрибуты a_{ij} , относящиеся к характеристикам сущности X в типе T_X . В разных астрономических каталогах представления X_j могут быть разными. В частности, записи каталога WDS описывают данные о парах компонентов систем, в то время как каталог CCDM рассматривает в качестве записей данные о визуальных компонентах систем. Поэтому сбор данных из нескольких источников производится с одновременным преобразованием данных в унифицированное представление в терминах концептуальной схемы предметной области, в котором и происходит дальнейший

анализ, в частности перекрестное отождествление сущностей. Преобразование данных требует построения отображения M исходных данных X_j в соответствующее значение типа T_X :

$$M_{jX}: X_j \rightarrow T_X$$

Функция отображения представляет собой набор правил преобразования подмножеств атрибутов из исходного представления в источниках данных в атрибуты типа концептуальной схемы. Для унификации представления данных и повышения его качества отображение также включает функции стандартизации в качестве правил очистки и унификации, применяемые к атрибутам типов X_j . Например, параметр прямого восхождения в каталоге WDS представлен в формате HHMMSS.ss, в каталоге SB9 – HHMMSSSSS, а в TDSC – и вовсе в градусной мере. Поэтому реализуется преобразование их к общему виду в концептуальной схеме. Записи каталога INT4 в целом нетривиально построены, и в качестве функций отображения требуют непростых преобразований, формирующих унифицированное представление данных в терминах концептуальной схемы.

С применением функций отображения данные из неоднородных источников преобразуются к унифицированному представлению, соответствующему концептуальной схеме предметной области, и в дальнейшем обрабатываются только в нём. Соответственно алгоритмы анализа данных разрабатываются над концептуальной схемой предметной области.

2.2 Организация работы с критериями отождествления сущностей

После унификации представления данных в концептуальной схеме начинается процесс отождествления сущностей. Для каждого объекта формируется множество кандидатов на идентификацию $C: \{T_X\}$. К каждому кандидату прикрепляется множество флагов (F), используемых в ходе работы алгоритмов.

Множество кандидатов на идентификацию для конкретного объекта строится с использованием набора критериев, построенных на ограничениях предметной области, относящихся к сущности X . Применение определённого критерия отождествления производится с помощью функции:

$$T_X \times \{T_X\} \rightarrow \{T_X\}$$

Рассматривается объект типа T_X , одиночный или многокомпонентный, представляемый в первом аргументе функции. Также доступно множество возможных кандидатов на идентификацию $C: \{T_X\}$ в качестве второго аргумента. Функция отождествляет каждый объект из множества кандидатов с рассматриваемым объектом по данному определённому критерию. В результате функция

возвращает уменьшенный набор кандидатов, которые отвечают критерию.

Критерий k , ограничивающий множество кандидатов C на идентификацию с объектом X , определяется предикатом R_{kX} , содержащим определённое ограничение предметной области над рассматриваемым (x) и отождествляемым (c) объектами:

$$\{c \in C | R_{kX}(x, c)\}$$

Предикат может использовать значения атрибутов и флаги самих объектов, а также атрибуты и флаги их компонентов в случае, если объекты многокомпонентные. Так, для отождествления пары звёзд могут сравниваться как значения атрибутов самих пар, так и атрибутов каждого из компонентов пары. Например, в тождественных парах должны быть близкие значения собственных движений компонентов. Функция, определяющая данный критерий, сравнивает значения атрибутов собственного движения рассматриваемой пары и пары-кандидата, либо при отсутствии значений у пар может получать данные о собственном движении из атрибутов компонентов пар и сравнивать их.

Уникальная идентификация – особая ситуация, когда множество C после применения всех возможных критериев содержит единственный объект из определённого источника данных в качестве кандидата на идентификацию. В большинстве случаев это означает, что наиболее вероятный кандидат найден. С таким объектом связывается специальный флаг. При этом возникают условия для применения критериев, использующих этот флаг. Они применяются к элементам графа, связанного с данным объектом, для идентификации других компонентов в многокомпонентном объекте.

3 Критерии отождествления кратных систем

Процесс отождествления многокомпонентных сущностей разделяется на несколько взаимодействующих этапов по типам сущностей, а также по вложенности структуры. При отождествлении двойных и кратных звёздных систем процесс начинается с отождествления отдельных компонентов систем как одиночных сущностей. При этом используются данные каталогов визуальных двойных звёзд и обзоры одиночных звёзд, ссылки на идентификаторы которых приводятся в каталогах двойных. Затем на основании результатов первого этапа отождествляются визуальные пары звёзд. На следующем этапе рассмотрение дополняется более тесными парами других наблюдательных типов. Отождествление систем в целом является следствием отождествления всех их компонентов и пар. Наконец, существующие идентификаторы систем, пар и компонентов сопоставляются с использованием результатов предыдущих этапов.

В [8] был кратко описан состав знаний, используемых для формирования критериев отождествления, используемых на каждом этапе.

Для составления критериев отождествления компонентов систем как одиночных объектов рассмотрены следующие ограничения предметной области, связанные одиночными звёздными объектами:

- близость отождествляемых компонентов по координатам;
- учёт изменения координат в разные наблюдательные эпохи по причине прецессии земной оси и собственного движения компонентов;
- близость направления и скорости собственного движения звёзд;
- близость тригонометрического параллакса компонентов, говорящего об их расстоянии от наблюдателя;
- близость значений блеска или разницы показателей цвета при условии известных фотометрических полос пропускания и с учетом чувствительности к низким и высоким пределам величины;
- учет возможной переменности звёзд при сравнении блесков;
- сходство эволюционных статусов звёзд;
- сходство спектральной классификации звёзд.

На основе выборки кандидатов на идентификацию компонентов систем составляется граф, содержащий пары из различных каталогов двойных. Для составления критериев отождествления широких визуальных пар в полученном графе рассматривались следующие ограничения:

- если в парах выделены компоненты, кандидаты на идентификацию пар формируются на основе множеств кандидатов на идентификацию компонентов, сформированных с применением вышеописанных критериев;
- проверяется близость значений позиционного угла и углового расстояния;
- предельная разность позиционных углов с учётом углового расстояния для оценки возможного вращения компонентов в паре;
- учёт минимальной оценки периода вращения пары;
- учёт данных орбитального движения;
- близость направления и скорости собственного движения пары в целом или компонентов в паре;
- возможность существенного различия собственных движений компонентов в оптических парах;
- близость разницы блесков компонентов в паре;
- учёт эффективного углового разрешения (расстояние в паре меньше предела различения объектов в каталоге);
- сходство химического состава и

эволюционного статуса компонентов в физических парах;

- учёт известного наблюдательного типа пары.

Идентификация многокомпонентных объектов зависит от идентификации их компонентов. Уникальная идентификация всех компонентов означает идентификацию всего объекта. Уникальная идентификация пар (дуг в графах) означает идентификацию обратных пар. Уникальная идентификация многокомпонентных объектов как целого означает, что идентификация всех компонентов должна быть разрешена среди кандидатов, принадлежащих идентифицированному объекту.

В действительности, наиболее сильные ограничения дают критерии отождествления компонентов на основании координат, а пар – на основании расстояния между компонентами и позиционных углов. При разработке каталога ILB для отождествления кратных систем использовался сокращённый набор критериев. В подавляющем большинстве случаев для идентификации отдельных компонентов достаточно применения критериев отождествления, связанных с координатами и взаимном положении компонентов. Остальные критерии не дают существенного эффекта при решении данной задачи, хотя могут быть использованы для проверки качества данных. Задача поиска ошибок в оригинальных каталогах на данный момент не ставилась.

Для отождествления компонентов, в первую очередь, ограничивается область координат отождествляемых объектов для наибольшего ограничения количества кандидатов на идентификацию компонентов. Отождествление пар также проводится с применением наиболее сильных критериев. Используется критерий близости позиционных углов и угловых расстояний. На данный момент упомянутые критерии реализованы совместно в виде функционала.

$$f1 = (r1 - r2) * (r1 - r2) / \max(r1, r2) / \max(r1, r2) + (t1 - t2) * (t1 - t2) / \max(t1, t2) / \max(t1, t2);$$

$$f2 = (r1 - r2) * (r1 - r2) / \max(r1, r2) / \max(r1, r2) + (t1 - t2 - 180) * (t1 - t2 - 180) / \max(t1, t2) / \max(t1, t2);$$

$$x1 = \text{Math.min}(func1, func2) / 2;$$

Здесь $r1, r2$ – угловые расстояния между компонентами в отождествляемых парах, $t1, t2$ – соответствующие позиционные углы. Метрика $x1$ не должна превышать некоторого предела для ограничения множества кандидатов на идентификацию. Для малых расстояний между компонентами используется метрика, игнорирующая значения позиционных углов и оценивающая только координаты. Для однозначной идентификации не должно присутствовать других звёзд в окрестности,

удовлетворяющих этому критерию. Алгоритмы отождествления имеют сложность порядка $O(n^2 \log n)$.

Реализация критериев для формирования ILB сегодня ещё претерпевает изменения. В случае, если есть данные об эпохах наблюдения и собственных движениях, должен использоваться критерий сравнения координат, скорректированных по прецессии и собственному движению, что повышает качество автоматической идентификации [9]. Помимо этого, планируется проверять разность позиционных углов с учётом возможного вращения компонентов в паре [10].

Идентификаторы отождествляются по принадлежности одним и тем же компонентам, парам и системам. Зачастую один и тот же идентификатор в одном каталоге должен соответствовать компоненту (или одиночной звезде), а в другом – паре звёзд, так как угловое разрешение каталога позволяет различать эту пару визуально. Разрешение таких конфликтов происходит за счёт качественного отождествления компонентов и пар и существенно влияет на результат сопоставления идентификаторов в ILB.

Например, одним из критериев отождествления пар звёзд является требование близких значений их собственных движений.

4 Система идентификации и состав идентификаторов

Основной системой идентификации в ILB является BSDB [7], разработанная и зарегистрированная авторами статьи. Она позволяет описывать кратные системы в целом, составляющие их пары звёзд, компоненты, учитывает возможность корректировки систем при открытии новых компонентов. Она используется для обозначения кратных систем всех наблюдательных типов.

При разработке инструментов построения каталога идентификаторов двойных и кратных звёзд ILB учитывались необходимость модификации и повторного использования программ. В архитектуре инструментов учтены возможности подключения произвольных каталогов, изменения правил отождествления для разных типов сущностей. Использовался язык Java и шаблон проектирования IoC (Inversion of Control), в котором управление остаётся за каркасом, а логика работы с объектами сосредоточена в независимых и взаимозаменяемых модулях. При этом подключение каталогов или модификация алгоритмов для работы с разными наблюдательными типами астрономических объектов становятся простыми задачами. Инструмент содержит необходимый на сегодня набор методов отождествления и вспомогательные методы для работы с данными из каталогов,

кэширования объектов небольшой части неба, очистки данных, сбора статистики.

ILB в настоящий момент является каталогом-основой (или мастер-каталогом) для BDB и содержит все данные BDB по кросс-идентификации более 130000 двойных и кратных систем. ILB содержит координаты и перекрёстные ссылки на следующие идентификаторы: Bayer/Flamsteed, DM (BD/CD/CPD), HD, HIP, ADS, WDS, CCDM, TDSC, GCVS, SBC9. На данный момент в списке идентификаторов ILB находится:

- Систем :136885;
- Записей о парах :313811;
- Записей о компонентах :627460.

И идентификаторов:

- HIP:36560, из которых 20701 уникальных;
- HD:29882, из которых 27917 уникальных;
- DM:121067, уникальных 105569;
- ADS:49067, уникальных 15389;
- FLAMSTEED:1622, уникальных 1529;
- BAYER:600, уникальных 548.

Заключение

Проблема сопоставления идентификаторов, используемых для обозначения двойных и кратных звёзд различных наблюдательных типов решается составлением каталога идентификации ILB.

В работе описана проблема перекрёстной идентификации кратных звёздных систем. Приводятся принципы и каркас системы разрешения многокомпонентных сущностей, и применение этих принципов для перекрёстного отождествления кратных звёздных систем, включая отождествление компонентов и пар с привлечением всех имеющихся астрометрических и астрофизических параметров объектах. Рассказано о реализации инструментария для создания и поддержки каталога ILB.

Каталог ILB содержит перекрёстную идентификацию кратных звёзд, содержащихся в каталогах двойных всех основных наблюдательных типов. База идентификаций используется обеспечивает все необходимые идентификации для базы данных двойных звёзд BDB и формирует используемые в ней идентификаторы двойных и кратных звёзд в системе идентификации BSDB.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 16-07-01162, 16-07-01028).

Литература

- [1] Mason, B.D., et al. The Washington Visual Double Star Catalog. VizieR on-line data catalog:

- B/wds (2016). <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/wds>
- [2] Dommagnet, J., Nys, O. Catalogue of the Components of Double and Multiple Stars (CCDM). VizieR on-line data catalog: I/274 (2002). <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/274>
- [3] Fabricius, C., Hog, E., Makarov, V.V., et al. The Tycho double star catalogue. In: *Astronomy & Astrophysics*, vol. 384, iss 1, pp. 180-189 (2002).
- [4] Samus N. N., Durlevich O. V., Kazarovets E. V. et al. General Catalogue of Variable Stars. VizieR On-line Data Catalog: B/gcvs. (2013) <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/gcvs>
- [5] Pourbaix, D., Tokovinin, A.A, Batten, A.H, et al. SB9: 9th Catalogue of Spectroscopic Binary Orbits. VizieR On-line Data Catalog: B/sb9 (2014) <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?B/sb9>
- [6] Malkov O., Kaygorodov P., Kovaleva D. et al. Binary star database BDB: datasets and services. In: *Astronomical and Astrophysical Transactions (AApTr)*, Vol. 28, Issue 3, pp. 235-244.(2014)
- [7] D.A. Kovaleva, O.Yu. Malkov, P.V. Kaygorodov, et al. BsdB: a new consistent designation scheme for identifying objects in binary and multiple stars *Open Astronomy*, vol. 24, Issue 2, pp. 185–193. (2015). doi: 10.1515/astro-2017-0218
- [8] Skvortsov, N.A., Kalinichenko, L.A., Kovaleva, D.A., Malkov, O.Y. Hierarchical Multiple Stellar Systems. In: Kalinichenko L.A., Kuznetsov S.O., Manolopoulos Y. (eds) *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. DAMDID/RCDL 2016. Communications in Computer and Information Science*, vol. 706. pp 119-129. Springer, Cham (2017). doi: 10.1007/978-3-319-57135-5_9
- [9] Жаров, В.Е. Сферическая астрономия. Москва (2002). <http://www.astronet.ru/db/msg/1190817/node49.html>
- [10] Isaeva, A.A., Kovaleva, D.A., Malkov, O.Y. Visual binaries: cross-matching and compiling of a comprehensive list. *Open Astronomy*, vol. 24, pp. 157–165. (2015)