

**Метод привязки координат небесных радиоисточников к оптической
астрометрической системе координат.
Липовка-Костко-Липовка (ЛКЛ, *англ.* LKL)**

© Липовка А.А., Липовка Н.М., 2010

Главная астрономическая обсерватория. РАН,
Санкт-Петербург, РОССИЯ

E-mail: nila_lip@mail.ru

Отправлена в печать в журнал «Геодезия и Картография» . 25.03.2010

Опубликовано №12, 2010г

Ключевые слова: галактики-звезды-оптические отождествления

Абстракт.

Обнаружено, что используемый в настоящее время метод привязки небесных радиоисточников по немногочисленному списку опорных радиоисточников часто приводит к неверной привязке отдельных участков радионеба и к неверному оптическому отождествлению.

Предложен метод привязки радионеба непосредственно к оптической астрометрической системе координат, что в десятки раз увеличивает количество радиоисточников отождествленных с оптическими объектами.

При выполнении оптических отождествлений была обнаружена радиорефракция в межзвездной и межгалактической средах среднестатистическая величина которой составила $\pm 3'$ по прямому восхождению и по склонению на галактических широтах $b > 20^\circ$ и которая должна учитываться при выполнении оптических отождествлений.

Key words: galaxies – stars - optical identifications.

Abstract.

It has been found out that currently used method of fitting celestial radio sources, using insufficient number of the reference radio sources, very often leads to the wrong fitting of certain areas of the radio sky and to the wrong optical identifications.

It has been suggested to use the method of fitting radio sky directly to the optical astrometrical coordinate system, which considerably increases the number of the radio sources identified with optical objects.

In course of fulfillment of optical identifications, there was discovered a radio refraction in the interstellar and intergalactic environments with a statistical average value of $\pm 3'$ at the right ascension and declination for the Galactic latitude of $b > 20^\circ$. The refraction must be taken into account in fulfillment of optical identifications.

Введение

При изучении радио и оптических свойств небесных объектов основополагающим является процесс отождествления радиоисточников с их оптическими аналогами. Привязка координат небесных радиоисточников к оптической астрометрической системе координат является важной и для решения задач, стоящих перед геодезией и картографией. Только после привязки координат радиоисточника к оптическому объекту мы можем получить достоверные сведения о координатах интересующего нас радиоисточника во всем диапазоне длин волн.

В работе [3] подробно анализируется вопрос о взаимодействии астрометрии и геодезии при изучении вращения Земли и не без основания высказываются сомнения по поводу использования Международной небесной опорной системы **ICRF2** [8] для геодезических целей.

По решению Международного астрономического союза в 1991 году системой координат, рекомендованной для всеобщего пользования, стала система **ICRF** (англ. *International Celestial Reference Frame*— «Международная небесная опорная система»), каталог которой насчитывал 608 радиоисточников. Координаты **ICRF** опорных объектов были получены по **РСДБ** наблюдениям и, как считается, совпадают с оптическими объектами с высокой точностью. В 2009 году на съезде Международного Астрономического союза была рекомендована система **ICRF2** [8], насчитывающая 3414 таких опорных радиоисточника. Значительная часть из этих опорных объектов представляет из себя радиоисточники, которые случайным образом совпали с оптическими объектами, то-есть не все опорные объекты этого каталога имеют достоверные оптические отождествления.

Поэтому используемый в настоящее время способ привязки координат радионеба к оптическому по немногочисленному списку опорных радиообъектов, расположенных неравномерно на небесной сфере, приводит к тому, что **подавляющее** большинство радиоисточников не отождествляется с их оптическими аналогами и попадает в оптическом изображении в пустое поле (Empty Field).

В настоящее время **ошибочной**, но общепризнанной точкой зрения является утверждение, что на галактических широтах $b > 2^\circ$ радиоизлучают **только** внегалактические объекты, которыми являются активные галактики и квазары. («Nearly all discrete radio sources more than 1° or 2° from the Galactic plane are extragalactic». p. 1694, [7])

Мы считаем, что эта точка зрения неверна.

Наши исследования, выполненные по оптическим отождествлениям радиоисточников, расположенных даже на галактических широтах $b > 20^\circ$, показали что часть радиоисточников на исследуемых площадках отождествляется с галактиками и квазарами, но **значительная** часть радиоисточников отождествляется со звездами от ярких до самых слабых [2]. Наиболее яркие из них принадлежат местному спиральному рукаву Галактики в котором расположена наша солнечная система.

Наш метод привязки **Липовка-Костко-Липовка, (ЛКЛ, англ. LKL)** радионеба к оптическому небу основан на использовании Фундаментальных каталогов звезд [1, 9, 13] и привязка радиоисточников производится непосредственно к звездам, плотность которых и точность измеренных координат достаточна для выполнения уверенной привязки координат радиоизлучающих небесных объектов.

Анализ возможных ошибок, влияющих на точность измерения координат радиоисточников.

Существует множество инструментальных факторов, влияющих в большей или меньшей степени на измеренные координаты объектов, как в радио, так и в оптическом диапазоне длин волн. Среди них в радиодиапазоне следует назвать люфты радиотелескопов, весовые нагрузки,

гнутия инструмента, абберация, ошибки в выборе опорных объектов, сложности в воссоздании изображения для радиоинтерферометра, радиорефракция в атмосфере и ионосфере Земли, и многие другие причины.

Для оптики это, в первую очередь, ошибки поля, ошибки опорных каталогов и оптическая рефракция в земной атмосфере. Все указанные факторы приводят к ощутимым, и часто неконтролируемым сдвигам координат небесных объектов. Эти ошибки затрудняют однозначное отождествление радиоисточников с оптическими объектами.

Длительное время в качестве опорных объектов, для получения экваториальных координат в радиодиапазоне, использовались яркие радиоисточники большого углового размера, такие как Кассиопея А, Дева А, туманности Омега, Орион, Краб, оптические отождествления которых не вызывали сомнения. Было обнаружено, что основной причиной несовпадения радиокоординат небесных объектов и оптических объектов является радиорефракция в атмосфере земли, которая значительна в сантиметровом диапазоне волн и особенно на малых высотах (вблизи горизонта). По этой причине и по сей день существуют две разные таблицы для учета атмосферной рефракции: таблицы рефракции для оптических измерений и для радиоизмерений. Именно по этой причине в радиодиапазоне появились свои таблицы опорных объектов, к которым и осуществляется привязка радионеба.

По мере совершенствования радиоприемников (повышение чувствительности) увеличивалось и разрешение радиотелескопов (бурное развитие интерферометрии) в результате чего появилась возможность фиксировать слабые, компактные и далекие радиоисточники, для привязки которых к оптическому объекту указанные выше опорные объекты уже не соответствовали астрометрическому критерию точности.

Поэтому возникла потребность в опорных объектах, положение которых на небе было бы известно с высокой точностью и количество которых было бы достаточно для уверенной привязки координат радионеба. Привязка радиоизображения неба, полученного на меридианных инструментах (типа РАТАН-600), на подвижных радиотелескопах (типа 100-метрового радиотелескопа в Эффельсберге) и на радиоинтерферометрах требует большой плотности опорных радиоисточников, имеющих уверенные оптические отождествления.

В качестве кандидатов в список опорных объектов стали включать далекие галактики и квазары, то-есть объекты малого углового размера, координаты которых в оптическом диапазоне известны с хорошей точностью.

Первые оптические отождествления радиоисточников, выполненные нами в 1985 году на блинк-компараторе по всем правилам астрометрии [4] показали, что большая часть радиоисточников не имеет оптической пары [5].

В настоящее время все острее встает вопрос о локальной привязке радионеба к оптическому, поскольку, по мере того как количество опорных объектов в радиодиапазоне увеличивается, проблема отсутствия оптической пары для большей части радиоисточников остается (проблема Empty Field- пустое поле).

Одним из основных методов наблюдений в современной радиоастрономии является радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), которая позволяет получать радиоизображение неба с высоким разрешением и высокой чувствительностью. База (расстояние между телескопами) может равняться нескольким тысячам километров, поэтому состояние атмосферы и ионосферы в местах размещения телескопов может

различаться от наблюдения к наблюдению, и радиорефракция в атмосфере и ионосфере Земли может приводить к значительным искажениям полученного изображения. Следует подчеркнуть также, что радиоизображение, как правило, строится для участка неба ограниченного размера, после чего многочисленные радиоизображения «сшиваются» для формирования карты радионеба.

При наблюдениях в азимутах площадка, угловой размер которой определяется расстоянием между лепестками диаграммы радиотелескопа, должна быть привязана по прямому восхождению, а для определения правильной ориентации площадки на небе, необходимо привязать площадку, как минимум, к трем опорным объектам, расположенным на **данной** площадке. Кроме того, должна быть учтена радиорефракция в атмосфере Земли, которая значительна в сантиметровом диапазоне волн.

Таким образом, чтобы правильно привязать радионебо к оптическому только на северном небе требуется порядка 10^5 – 10^6 опорных объектов равномерно расположенных на небе.

Такое количество опорных объектов могут обеспечить только Фундаментальные каталоги опорных звезд FK6 и UCAC [1, 13], поэтому радионебо должно быть привязано **непосредственно** к оптическому небу.

Учитывая выше приведенные факторы, следует предположить, что используемая в настоящее время привязка радионеба к оптическому по нескольким опорным радиоисточникам, плотность которых очень мала (система **ICRF2**, [8]), является не эффективной и приводит к значительным погрешностям при выполнении оптических отождествлений радиоисточников.

В процессе многолетних исследований нами было обнаружено, что значительная часть радионеба неверно привязана к оптическому небу.

Используемый нами и предлагаемый здесь способ привязки радионеба к оптическому (**ЛКЛ**, *англ. LKL*) показал очень хорошие результаты и в десятки раз увеличил количество радиоисточников, отождествленных с оптическими объектами.

Обратим внимание на то, что при использовании метода **ICRF2** [8] привязки радионеба к оптическому предполагается, что радиоволны распространяются в космическом пространстве прямолинейно. Это не соответствует действительности, так как при прохождении через межзвездное пространство радиоволны испытывают радиорефракцию [2, 10].

Обнаруженное нами и ранее неизвестное явление смещения радиокоординат галактик, квазаров, объектов типа звезд и газовых туманностей друг относительно друга не учитывается в **ICRF2** [8] системе привязки радионеба к оптическому небу, что приводит к малой степени достоверности отождествлений и, преимущественно, к ошибочным оптическим отождествлениям радиоисточников (проблема Empty Field-пустое поле).

Мы интерпретируем обнаруженное нами смещение координат радиоисточников разных морфологических типов друг относительно друга как факт наличия радиорефракции (РР) в космическом пространстве, которая зависит от характеристик Межзвездной и Межгалактической сред (МЗС, МГС), и от удаленности небесных объектов. Поэтому радиорефракция в МЗС и МГС должна учитываться при выполнении оптических отождествлений радиоисточников.

В связи с изложенным, для достоверной привязки координат небесных радиоисточников при выполнении оптических отождествлений, опорными объектами должны быть только оптические объекты с точно измеренными

координатами , преимущественно звезды [1, 9, 13] плотность которых высока для привязки координат радионеба к оптическому.

Привязка координат небесных радиоисточников к оптической астрометрической системе координат.

Метод Липовка-Костко-Липовка (ЛКЛ, *англ.* LKL)

Способ привязки радионеба к оптическому, предлагаемый нами (ЛКЛ, *англ.* LKL) , должен осуществляться по следующим правилам:

1. Привязка радионеба должна производиться непосредственно к оптическому небу с использованием координат Фундаментальных каталогов звезд [1, 9, 13].
2. Оптические отождествления должны выполняться на площадке размер которой не превышает расстояние между лепестками интерферометра.
3. Должна соблюдаться морфологическая принадлежность радиоисточников: галактики, квазары, туманности, звезды близкие и звезды далекие.
4. Следует учитывать соответствие характеристик исследуемых объектов в оптическом и радиодиапазонах свойственных данному типу объектов.
5. Должен выполняться принцип конфигурационного совпадения более чем трех объектов на площадке размер которой определен в пункте 2).
6. Должен соблюдаться принцип яркостного соответствия радио-оптика; характерного для данного морфологического типа объекта.
7. При выполнении оптических отождествлений следует учитывать наличие радиорефракции. обнаруженной нами в Межзвездной и Межгалактической средах (МЗС, МГС) [2, 10].

Примером использования предлагаемого (ЛКЛ) метода привязки может служить отождествление радиоизлучения участка неба в окрестности скопления галактик A1716.

Выполнив оптические отождествления в окрестности скопления галактик A1716 по нашей методике, **мы обнаружили, что звезды тоже радиоизлучают**, но система их радиокоординат сдвинута относительно системы радиокоординат для объектов, связанных со скоплением галактик [2].

Эти исследования проводились по обзору NRAO обсерватории (National Radio Astronomy Observatory VLA Sky Survey, NVSS) , выполненному на волне 21 см, помещенному в интернете для общего пользования на сервере (<http://www.cv.nrao.edu/NVSS/postage.html>) и по пластинам Паломарского обзора, (<http://cadwww.dao.nrc.ca/cadcbn/getdss/>), POSS_1, DSS, [11].

Обзор [7] является высокоинформационным, однако необходимы тщательные исследования, связанные с привязкой его к оптическому небу.

В случае скопления галактик A1716 привязка участка радионеба, ответственного за радиоизлучение этой области, к оптическому небу, выполненная по 419 опорным радиоисточникам для северного неба [7], оказалась неверной. В предложенном варианте отождествления [7] отождествился один радиоисточник с оптическим объектом на площадке размером в один квадратный градус.

В результате выполненного нами оптического отождествления по методике (ЛКЛ) на площадке неба в окрестности скопления галактик A1716 совпало 90% радиоисточников с оптическими объектами.

Оптические отождествления скопления галактик A0039.

Обнаружение радиоизлучения звезд.

В настоящей работе мы приводим оптические отождествления еще одной площадки неба, выполненные по методике (ЛКЛ). Исследуемая оптическая область неба расположена в направлении на скопление галактик A0039 [6].

На рис 1 приведено оптическое изображение исследуемой площадки, полученное по Паломарскому обзору неба [11]. Цифрами 1-8 отмечены звезды, которые были нами отождествлены с радиоисточниками.

По предложенной привязке радионеба к оптическому небу [7] на площадке размером в один квадратный градус ни один радиоисточник не совпал с оптическим объектом на небе.

Истинное радиоизображение, связанное с этим оптическим изображением (рис 1), отстояло от него по прямому восхождению на величину $RA = 01^m 9.3^s$ и по склонению $\Delta DEC = -27' 25''$ для звездной составляющей радиообъектов (NN1-8, рис 1) и на величину $\Delta RA = 01^m 13^s$ и $\Delta DEC = -24'$ для объектов, радиоизлучение которых связано с радиоизлучением галактик IC0018 (ga) и IC0019 (gb), (рис 1).

Эти поправки необходимо добавить к радиокоординатам с учетом знака поправки, чтобы получить координаты оптических объектов с которыми мы отождествили радиоисточники.

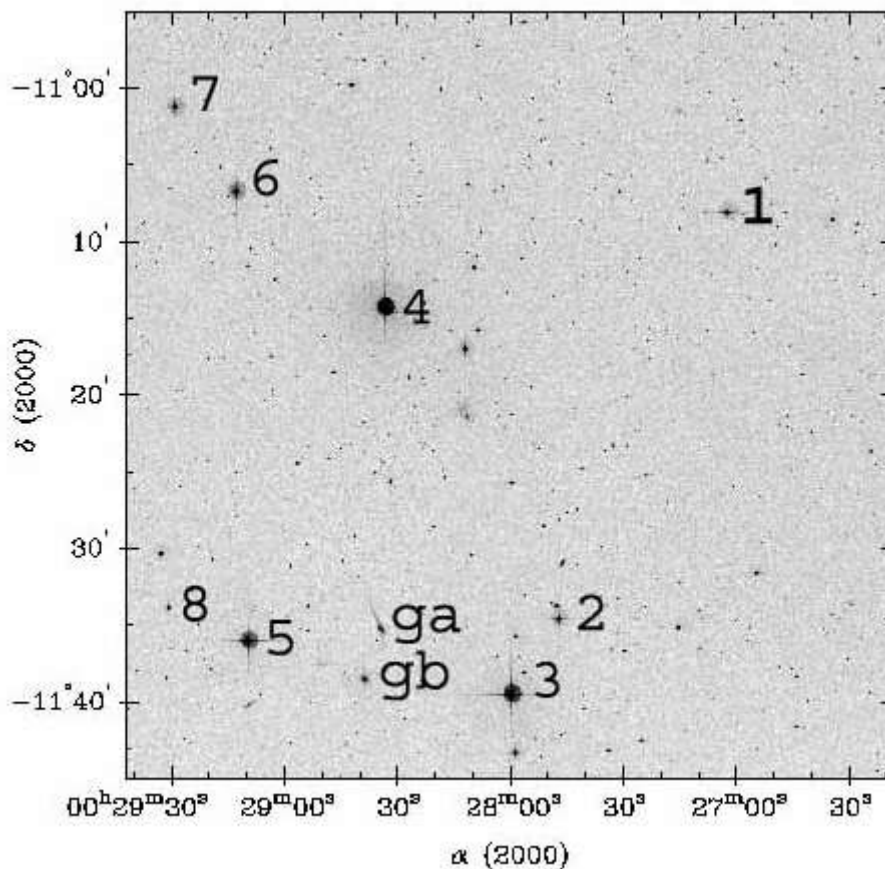


Рис 1. Изображение участка неба в скоплении A0039. Паломарский атлас [11].

В таблице 1 приводятся радиокоординаты отождествленных нами радиоисточников.

столбец 1 -порядковый номер ,
 столбец 2 -прямое восхождение радиообъекта по данным [7, 12]
 столбец 3 -склонение радиообъекта по данным [7, 12]
 столбцы 4 - измеренная плотность потока по данным [7, 12]
 столбец 5-прямое восхождение радиообъектов, исправленное с учетом вышеуказанных поправок для радиозвезд (NN1-8, рис 1) и для галактик (ga и gb, рис 1).
 столбец 6- склонение радиообъекта, исправленное с учетом вышеуказанных поправок для радиозвезд (NN1-8, рис 1) и для галактик (ga и gb, рис 1).

Таблица 1

N	RA(J)	DEC(J)	Поток	RA(J)	DEC(J)
1	2	3	4	5	6
	h m s	o ' "	Ян	h m s	o ' "
1	00 25 54.238	-10 41 10.05	0.0427	00 27 03.538	-11 8 35.
2	00 26 32.513	-11 06 45.09	0.0146	00 27 41.813	-11 34 10.
3	00 26 51.453	-11 12 52.56	0.1692	00 28 00.753	-11 40 17.5
4	00 27 22.858	-10 47 57.21	0.0135	00 28 32.158	-11 15 22.2
ga	00 27 20.771	-11 10 31.85	0.0085	00 28 33.671	-11 34 33.97
gb	00 27 28.000	-11 15 00.00	-	00 28 40.9	-11 39 02.1
5	00 28 05.020	-11 08 01.65	0.0033	00 29 14.32	-11 35 26.6
6	00 27 57.553	-10 38 57.39	0.00437	00 29 06.853	-11 06 22.33
7	00 28 23.109	-10 32 21.34	0.0016	00 29 32.409	-10 59 46.28
8	00 28 25.119	-11 06 05.47	0.0043	00 29 34.419	-11 33 15.42

В таблице 2 представлены координаты оптических объектов, полученные по АРМ [9] данным.

Таблица 2

N	RA(J)	DEC(J)	Rmag	Ellipse parms	Bmag	Ellipse parms
1	2	3	4	5	6	7
	h m s	o ' "	m		m	
1	00 27 2.13	-11 8 13.5	8.73	37.9 0.07	8.53	66.5 0.19
2	00 27 47.80	-11 34 38.4	9.24	32.8 0.01	9.87	37.8 0.20
3	00 28 0.54	-11 39 28.1	7.07	85.1 0.08	6.72	75.9 0.08
4	00 28 33.29	-11 14 10.0	7.19	74.6 0.08	5.87	86.1 0.05
ga	00 28 35.11	-11 35 8.9	9.61	73.7 0.65	10.30	81.4 0.75
gb	00 28 39.47	-11 38 27.2	10.79	33.5 0.22	10.87	35.5 0.20
5	00 29 10.27	-11 35 48.7	7.42	72.9 0.14	8.09	62.1 0.09
6	00 29 12.45	-11 6 32.0	8.86	36.0 0.07	8.54	53.1 0.10
7	00 29 28.41	-11 1 0.4	8.23	41.0 0.02	9.41	39.7 0.04
8	00 29 31.39	-11 33 39.2	10.13	27.8 0.05	10.83	30.7 0.06

Таблица 2.

столбец 1 -порядковый номер по таблице 1.
 столбец 2 -прямое восхождение оптического объекта,
 столбец 3 -склонение оптического объекта ,
 столбцы 4, 6 - звездная величина в голубых и красных лучах ,
 столбцы 5, 7 -размер в пикселях и эллиптичность оптического объекта .

Объекты NN 1- 8 отождествились со звездами 7^m - 10^m . Все восемь звезд отождествились с радиоисточниками с точностью по прямому восхождению $\pm 1.4^s$ и по склонению $\pm 16''$.

Точность привязки галактик IC0018 и IC0019 (ga и gb) составила по прямому восхождению $\pm 1.4^s$ и по склонению $\pm 36''$.

Галактика IC0018 (ga) имеет лучевую скорость $v=6071$ км/сек. Лучевая скорость галактики IC0019 (gb) $v=6362$ км/сек [14].

Величина погрешности вычисленных радиокоординат объясняется не только наличием РР в МЗС и МГС, но и точностью оцифровки полученного радиоизображения и оптического изображения неба. Однако это выходит за рамки проблем, обсуждаемых в данной статье.

Радиоисточники, отождествленные нами с галактиками IC0018 и IC0019, имеют однозначное оптическое отождествление, поскольку изображение галактики IC0018 в радиодиапазоне полностью соответствует ее изображению в оптическом диапазоне. Кроме того, в ближайшей окрестности галактик IC0018 и IC0019 имеется несколько слабых оптических объектов, с которыми по конфигурационному расположению совпадает еще несколько слабых радиоисточников, но эти отождествления мы не рассматриваем в данной статье.

Отметим, что на исследуемой площадке для областей, расположенных значительно дальше чем звезды представленные в таблице 2, плотность среды крайне неоднородна и значительна, поэтому оптические отождествления для слабых объектов следует выполнять только на площадках размером в несколько минут дуги. При этом, если учитывать неоднородность Межзвездной среды, значительная часть радиоисточников отождествляется с оптическими объектами.

Разность между системой координат для объектов, отождествленных с яркими звездами (NN1-8, рис 1) и системой координат для объектов, отождествленных с галактиками IC0018 и IC0019 (ga и gb) составила 4^s ($59''$) по прямому восхождению и $3^m24''$ по склонению. Эту разность мы интерпретируем как радиорефракцию в Межзвездной и в Межгалактической средах в направлении на скопление галактик A0039 [6].

Аналогичным образом нами было обследовано еще 92 площадки (размером по одному квадратному. градусу) и факт сдвига системы радиокоординат звезд относительно системы радиокоординат галактик подтвердился. На галактических широтах $b > 20^\circ$ среднестатистическая величина этого сдвига составила $\pm 3'$ по прямому восхождению и по склонению.

Вблизи плоскости Галактики, в газовых туманностях, в оболочках сверхновых обнаружено смещение радиокоординат объектов различного морфологического типа друг относительно друга значительно больше. Из физических соображений следует, что наиболее интересными с точки зрения сильной радиорефракции могут быть сферически-симметричные образования типа оболочек звезд и остатков сверхновых.

Обнаруженная нами радиорефракция в межзвездной среде открывает новые возможности для исследования характеристик межзвездной среды, для изучения распределения газа и его плотности в оболочках звезд и сверхновых, а также для определения удаленности небесных объектов.

В дальнейшем предполагается создание Фундаментального каталога (ЛКЛ) оптических объектов: галактик, квазаров, звезд, туманностей, отождествленных с небесными радиоисточниками, в который будут включены

координаты отождествленных радиоисточников и их характеристики в радиодиапазоне, величина радиорефракции в МЗС и МГС в исследуемом направлении, а также вычисленные по радиорефракции в МЗС и МГС характеристики космического пространства и удаленность светил по лучу зрения. Все это важно для понимания эволюции Вселенной.

Литература

1. Кандаурова К. А., Хруцкая Е. В., Кинематика и физика небесных тел, 8, N 1, (1992).
2. Липовка А.А., Липовка Н. М., стр. 339. «Радиорефракция в Галактике. Конец кризиса в оптических отождествлениях», Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2007, КАЗАНЬ-2007.
3. Толчельникова С.А., стр 2, « О взаимодействии астрометрии и геодезии в области изучения вращения Земли», Геодезия и картография, N8, 2009.
4. Чавира – Наваррете Э, Кияева Е. В., Липовка Н. М., Липовка А. А., Препринт N81 СПб, (1992), «Методика проведения оптических отождествлений на приборах типа блинк-компаратора».
5. Чавира-Наваррете Э, Липовка Н. М, Липовка А. А., «Оптические положения 748 слабых диффузных объектов и галактик в окрестности радиоисточников RC-каталога», Препринт N88 СПб, Специальной астрофизической обсерватории РАН, 1993 год
6. Abell George O. et al «A Catalog of rich Clusters of Galaxies», The Astrophysical Journal Supplement series , v 70, N 1, p 1-138, 1989, May.
7. Condon J. J, Cotton W. D., et al, «The NRAO VLA SKY SURVEY», The Astronomical Journal, **115**, 1693-1716, 1998 May,
<http://www.cv.nrao.edu/NVSS/>
8. ICRF2, **<http://rorf.usno.navy.mil/>**
9. Irvin M. , 1998, (**<http://www.ast.cam.ac.uk/~mike/apmcat/>**)
10. Lipovka A.A., Lipovka N.M. «The end of the "Empty Field" epoch in optical identifications». "Molecules in Space and Laboratory", the meeting held in Paris, France, May 14–18, 2007. Editors: J.L. Lemaire, F. Combes. Publisher: S. Diana., p. 26.
11. POSS_1, DSS, **<http://cadwww.dao.nrc.ca/cadcbn/getdss/>**
12. Verkhodanov O. V., et al, «The CATS database to operate with astrophysical catalogs». In "Astronomical Data Analysis Software and Systems VI". Editors: Gareth Hunt and H. E. Payne ASP Conference Series, 125, P.322-325, (1997).
13. UCAC, **<http://ad.usno.navy.mil/ucac/>**
14. NED, **<http://nedwww.ipac.caltech.edu>**