

Проблема определения расстояния до центра Галактики (R_0)

Кандидат физ.-мат. наук И. И. Никифоров
НИАИ СПбГУ

1. Общий анализ исследований по проблеме R_0

Расстояние от Солнца до центра нашей Галактики (R_0) — одна из основных астрономических постоянных. Со времени пионерской работы Харлоу Шепли (1918) [122] и до наших дней задача определения R_0 остается актуальной. С одной стороны, это вызвано фундаментальностью проблемы — решение многих важных вопросов галактической и внегалактической астрономии и астрофизики требует знания R_0 . От величины этой постоянной зависят:

- Абсолютный размер Галактики и ее светимость.
- Величина линейной скорости вращения Галактики θ_0 ($= \omega_0 R_0$, где ω_0 — угловая скорость вращения на R_0).
- Кривая вращения Галактики (зависимость линейной скорости θ от галактоцентрического расстояния R). Эта кривая, в свою очередь, требуется для моделирования распределения масс в Галактике и для многих других приложений.
- Понимание природы галактического центра: размеры, светимость, масса центральной области и населяющих ее объектов.
- Кинематические гелиоцентрические расстояния до тех галактических объектов (например, планетарных туманностей, областей Н II и галактических радиоисточников), для которых другие способы определения расстояний неприменимы. В свою очередь, расстояния необходимы для астрофизических и звездно-астрономических исследований этих объектов.
- Калибровка шкал расстояний до галактических объектов, для которых калибровки абсолютными методами по близким объектам менее точны или невозможны (например, для планетарных туманностей балджа [135] и диска [98]). Если в будущем R_0 станет точно известно из абсолютных методов или по группе надежных шкал расстояний, это приведет к перекалибровке других шкал, к изменению принятых светимостей звезд многих классов, к уточнению возрастов звезд и к более точной оценке абсолютного возраста шаровых звездных скоплений, имеющего важное значение для космологии (см. пункт 1.12.2).
- Проблема совершенствования внегалактических шкал расстояний (через сопоставление оценок R_0 для существующих шкал и потенциальную перекалибровку по точному R_0), тогда и постоянная Хаббла H_0 , возраст Вселенной, размеры ее видимой части и другие космологические задачи (см. секцию 1.12).

Несмотря на приложение больших усилий проблему R_0 не удавалось решить в степени, удовлетворительной для большинства приложений. Это также обусловило сохранение высокой актуальности исследований по данному вопросу. Таблица 1 дает представление об „эволюции” со временем величины R_0 . До 80-х гг. XX ве-

Табл. 1. Эволюция „наилучших величин” и отдельных оценок R_0

Источник	Год	R_0 , кпк	Временной промежуток
Шепли [122]	1918	≈ 13	
Бааде [33]	1951	8.7	
Величина Оорта и Бааде [144]	1954	8.2	
Стандарт МАС	1964	10	
де Вокулёр [53]	1983	8.5 ± 0.5	1974–1982
Керр и Линден-Белл [83]	1986	8.54 ± 1.1	1974–1986
→ стандарт МАС	1986	8.5	
Фист [59]	1987	$7.8 \pm \sim 0.8$	1974–1986
Рид [112]	1989	7.7 ± 0.7	1972–1986
Рид [113]	1993	8.0 ± 0.5	1972–1993
Отдельные оценки (Рид, 1993)		6.2–10.4	1972–1993
Отдельные оценки (данный обзор)		6.5–8.7	1994–2004

ка даже „стандартные” („средние”, „наилучшие”) значения R_0 изменялись весьма сильно. Позднее эти вариации уменьшились (обзоры [53, 59, 83, 112, 113]), но точность средних величин R_0 оставалась низкой, а разброс отдельных оценок R_0 — высоким. Только в последние годы разброс уменьшился, но все же остался существенным. Такое разногласие результатов — во многом следствие больших систематических ошибок. Одним из их источников, часто обсуждаемым в обзорах, могут быть систематические погрешности шкал расстояний. Существенность же систематики самих методов определения R_0 осознана не до конца, поэтому ей не уделялось достаточное внимание. Последняя проблема усложнена тем, что каждая группа методов и даже отдельные методы имеют свои специфические источники смещений результата, которые требуют отдельного рассмотрения. М. Дж. Рид в обзорах 1989 и 1993 гг. [112, 113] показал, что оценки R_0 , даже будучи приведенными к единой системе калибровок шкал расстояний, обнаруживают статистически значимые и большие (до 1.5 кпк) систематические вариации со временем опубликования; такие вариации нельзя объяснить „эволюцией” калибровок. Этот результат демонстрирует масштаб влияния искажающих факторов, не связанных с калибровками. В комбинации с психологическим эффектом стремления к „правильному ответу” (bandwagon effect) систематические ошибки методов и могут приводить к обнаруженным М. Дж. Ридом временным вариациям оценок R_0 . В основном из-за систематических факторов даже первая цифра значения R_0 долгие годы не была общепризнанной.

Обобщение различных результатов и выведение текущего „наилучшего” значения R_0 лишь постепенно начинает рассматриваться как самостоятельная сложная задача. Каждая отдельная оценка R_0 может быть практически независимой от оценок R_0 одного класса и сильно коррелировать с оценками другого из-за сходства входных данных, калибровок шкал, примененных методов и, следовательно, систематик результатов. Подобные корреляции, а также различие случайных и систематических ошибок в разных оценках R_0 необходимо учитывать. Для этого нужна классификация методов определения R_0 , корректная в смысле соотнесенности с различными источниками ошибок и в смысле учета неоднозначности термина „центр

Галактики”. Соответственно, нужен новый сравнительный анализ исследований по проблеме R_0 и их результатов на основе корректной классификации методов.

После работы Рида (1993) [113], последнего специального обзора по проблеме R_0 , получено много новых существенных результатов: 1) благодаря публикации каталога Hipparcos и других новых данных были выполнены многочисленные работы по перекалибровке шкал для традиционных индикаторов расстояний и предложены новые индикаторы; 2) выведены новые абсолютные (не использующие шкалы расстояний) оценки R_0 , в основном, по новым данным о движении объектов в центре Галактики; 3) появились работы по совершенствованию методов определения R_0 ; 4) получены относительные (использующие шкалы расстояний) оценки R_0 по новым, более обширным и/или более надежным, базам данных. Значительный вклад в массив новых результатов был сделан отечественными исследователями при поддержке РФФИ. Наступило время разобраться, каково значение этих усилий для проблемы R_0 в целом, в какой степени удалось ее решить к настоящему моменту?

Указанные новации и фундаментальный характер проблемы расстояния до центра Галактики делает ее чрезвычайно актуальной и с точки зрения интересов РФФИ, стремящегося к поддержке новых решений фундаментальных задач.

Цель обзора — выполнить новый критический анализ исследований по проблеме R_0 на основе корректной классификации методов определения R_0 , уделяя особое внимание недавним результатам.

1.1. Основные термины. Источники ошибок измерений R_0

Проблема определения R_0 неоднократно освещалась в обзорных статьях [53, 59, 83, 112, 113] (табл. 1). Будучи важными этапными попытками изучения проблемы R_0 в целом, эти работы все же не дают, к сожалению, полного ее освещения, адекватного задаче выведения „наилучшей оценки” R_0 . Предложенные в них классификации методов определения R_0 противоречивы (в том числе и внутренне), неполны и односторонни; не устоялась окончательно и терминология. Это ведет к смешению понятий, к неоправданной иерархии методов, к искаженной или даже ошибочной интерпретации опубликованных оценок R_0 .

Поэтому определим некоторые термины. Практически всегда найденное значение R_0 опирается, в конечном итоге, на знание гелиоцентрических расстояний до некоторых галактических объектов. Условимся называть эти объекты и расстояния *опорными* для оценок R_0 , которые по ним получены. *Собственно методом определения R_0* будем называть метод пересчета, преобразования опорных расстояний (ОР) в значение R_0 на основе дополнительной информации — о положении опорных объектов (ОО) на небесной сфере, о их лучевых скоростях и др. Любая оценка R_0 выражена в масштабе принятых ОР до каких-то объектов. Введенные термины отражают необходимость различать в рамках проблемы R_0 две отдельные задачи: 1) нахождение ОР и 2) собственно определение R_0 по ОР и другим данным.

Неполное осознание последнего обстоятельства привело к тому, что в предыдущих обзорах не удалось предложить единого множества классификационных признаков для выделения групп методов. Например, Фист (1987) [59] и Рид (1993) [113] в своих классификациях фактически используют *разные* признаки для *разных* групп: либо способ нахождения ОР — „геометрические” и „первичные” методы; либо способ дальнейшего анализа этих расстояний (не важно, как полученных) вместе с

другими данными — „пространственные”, „кинематические”, „косвенные”; в одном же случае — „вторичные измерения” по пространственному распределению (Рид, 1993) — использованы оба признака сразу. Это произошло из-за частичного смешивания понятий метода определения ОР и метода определения R_0 по этим расстояниям. В результате эти классификации оказались неоднородными, и некоторые способы определения R_0 нельзя классифицировать по ним однозначно — например, кинематические определения по абсолютным ОР [75, 79, 94, 114], одну часть из которых Рид (1993) причислил к абсолютным методам, другую — к непрямым.

Наличие двух задач в проблеме R_0 позволяет подразделить объективные источники ошибок измерений R_0 на следующие категории:

I. Систематические ошибки.

I.1. Систематические ошибки расстояний до опорных объектов. Эти ошибки порождает либо

- а) систематика шкал расстояний (ошибки нуль-пунктов, наклонов и иная внутренняя неоднородность шкал, систематика учета поглощения света, несоответствие локальных „стандартных свечей” удаленным), либо
- б) систематика абсолютных оценок расстояний.

I.2. Систематические ошибки других наблюдательных данных, которые требует избранный метод, например, лучевых скоростей классических цефеид („гамма-скоростей”) [105], областей Н II по рекомбинационным линиям [64]) — в кинематических методах, металличностей шаровых скоплений [111] — в методе Сурдина [28, 125].

I.3. Систематические ошибки собственно метода определения R_0 по принятым опорным расстояниям и другим исходным данным.

II. Случайные ошибки.

II.1. Случайные ошибки наблюдательных данных.

II.2. Статистическая неопределенность собственно метода определения R_0 по принятым исходным данным.

Перспективы снижения ошибок разных видов связаны с усилиями в разных направлениях. Ошибки I.1a и II.1 уменьшаются, в основном, по мере прогресса наблюдательной техники, появления новых наблюдений, улучшения их редукции и методик работ по калибровке шкал расстояний. Ошибки I.1b, I.2 и, отчасти, I.1a зависят от успехов моделирования самих ОО. Устранение систематических (I.3) и, отчасти, случайных (II.2) ошибок собственно методов — задача совершенствования галактического моделирования, т.е. техник анализа данных об ОО и другой информации, что напрямую слабо связано с ростом количества и качества наблюдений. Так, в методе Шепли определения R_0 как расстояния до центра системы шаровых скоплений основную систематику доставляет сильный эффект селекции (за центром Галактики наблюдается много меньше скоплений, чем перед ним), и даже очень точное определение расстояний до отдельных скоплений его не устраним.

Ошибки П.2 в некоторой части принципиально неустранимы, т.к. они отражают существенные особенности галактических подсистем (их дискретность, ограниченное количество объектов в них, дисперсию скоростей).

Таким образом, прогресс в решении проблемы R_0 требует: 1) получения новых и более точных наблюдательных данных, выполнения по ним калибровочных работ, совершенствования методик последних; 2) астрофизических, кинематических и динамических исследований внутренней природы ОО; и, параллельно, 3) совершенствования традиционных и разработки новых методов анализа исходных данных с целью определения R_0 . При отсутствии адекватного продвижения в любом из этих направлений эффект от успехов в других может оказаться незначительным.

Для решения задач третьего направления, существенную часть которого составляет борьба с систематическими ошибками собственно методов, необходима такая классификация, которая по классу метода сразу бы указывала вероятные источники ошибок и, следовательно, направления его совершенствования. Классификация, корректная в смысле соотнесенности с различными источниками ошибок, важна и при выведении средней оценки R_0 с учетом систематической и статистической неопределенности отдельных результатов. Подобная классификация также способна показать какого рода наблюдения и исследования природы галактических объектов являются наиболее актуальными, если преобладают ошибки, зависящие от успехов в этих областях.

Кроме того, корректная классификация должна отражать неоднозначность самого понятия „центр Галактики”. Чаще всего он отождествляется либо с центральным объектом (нетепловым радиоисточником Sgr A*, ИК-комплексом IRS16, гигантским молекулярным облаком Sgr B2), либо с какой-то центральной особенностью пространственного распределения видимой материи, либо с динамическим центром (барицентром) Галактики. Существуют и другие определения. Вопрос о степени совпадения этих „центров” остается открытым. Различие может составлять всего ~ 0.1 кпк, если оно обусловлено только сложной динамикой центральной области радиусом несколько сотен парсек [39]. Однако пока нельзя исключить и более масштабных особенностей — осцилляций бара относительно барицентра диска и звездного сфероида [39], смещения массивного гало относительно центра масс видимой Галактики [83]. Потенциальное несовпадение по-разному определяемых „центров” может быть еще одним систематическим фактором, который следовало бы учитывать при сравнении результатов, полученных разными методами.

Перед описанием новой классификации вновь уточним термины. При сопоставлении подходов в разных исследованиях необходимо различать задачу нахождения ОР и задачу собственно оценивания R_0 по этим расстояниям, т.к. эти задачи связаны с существенно разными источниками ошибок (прежде всего систематических). Поэтому, чтобы избежать недоразумений, под *методом определения R_0* в дальнейшем будем понимать лишь собственно метод как принципиальный способ анализа ОР и других данных определенного физического типа. *Измерением R_0* будем называть реализацию метода для определенных видов ОО и способов получения входных данных нужного типа. В отличие от последнего понятия термин „оценка R_0 ” не предполагает какого-либо обобщения, обозначая лишь результат применения конкретной процедуры обработки к конкретной базе данных. Классификация, отвечающая, в основном, указанным требованиям должна быть *классификацией измерений R_0* , а не методов.

1.2. Классификация измерений R_0

Новая классификация была разработана автором настоящего обзора в рамках гранта РФФИ 04-02-17447-а. От других она отличается многомерностью. Очевидно, что неудачный опыт построения одномерных классификаций в предыдущих обзорах [59, 83, 112, 113] не является случайным — разнообразие и *независимость* источников ошибок принципиально не позволяют выделить какой-то один признак и выстроить по нему разновидности измерений R_0 в одну последовательность классов. Другая особенность новой классификации — максимальная неранжированность классов измерений по степени надежности. Последнюю характеристику во многих случаях нельзя рассматривать как заданную, „родовую”, для метода или измерения — она может меняться по мере успехов в разных направлениях исследований. Однако полностью избежать ранжирования не удастся: например, заведомо проигрышны методы, основанные на *дополнительных* предположениях и, следовательно, отягощенные *дополнительными* систематическими погрешностями.

В предлагаемой **трехмерной классификации измерений R_0** подразделение на категории производится независимо по трем признакам (направлениям): 1) по типу собственно метода определения R_0 , 2) по способу нахождения ОР и 3) по типу ОО. Разные признаки по-разному связаны с различными источниками ошибок. Ни один из признаков не считается определяющим; только их совокупность характеризует в целом круг проблем, задаваемый выбором конкретного метода и данных.

I. Классификацию методов определения R_0 удобнее всего провести по типу исходного наблюдательного материала, т.к. в этом случае сразу определяются принципиальные преимущества и недостатки (в том числе потенциальные систематические ошибки) метода анализа данных, а также подразумеваемый физический смысл термина „центр Галактики” (ЦГ). Этот признак позволяет выделить следующие классы.

1. *Пространственные методы.* Исследуется пространственное распределение объектов (светящейся материи). ЦГ отождествляется с точкой наибольшей плотности или с другой центральной особенностью, что обычно делает очень важным учет искажений истинного распределения из-за неполноты выявления и статистических эффектов. Сюда же относится подход, в котором „особенностью” считается один конкретный объект; в этом случае на первый план выходит проблема надежности его отождествления с ЦГ.
2. *Кинематические методы.* Анализируется кинематика галактических подсистем с целью локализации динамического ЦГ (барицентра). Требуются данные о положениях в пространстве и скоростях объектов, т.е. об их распределении в фазовом пространстве; ЦГ — особенность в этом пространстве. Основная проблема — выбор адекватной кинематической модели; с другой стороны, наблюдательная селекция не создает больших систематических ошибок.
3. *Динамические методы.* Сопоставляются две группы независимых данных: о пространственном распределении и фазовые. При этом конфигурационный ЦГ (особенность пространственного распределения) и барицентр считаются совпадающими; этот единый центр и ищется. Здесь объединяются недостатки как пространственных, так и кинематических подходов. Кроме того, появляется еще одна специфическая проблема — зависимость результата от много-

численных дополнительных предположений (о законе поверхностной плотности, о потенциале, о различных кинематических и структурных параметрах Галактики), которые требуются, чтобы связать два типа данных. Поэтому динамические методы при прочих равных условиях очевидно проигрывают в надежности двум предыдущим классам.

4. *Нефазовые методы.* Ищется расстояние до центральной особенности распределения галактической материи в пространствах, не являющихся подмножествами фазового пространства. Эти пространства объединяют конфигурационные координаты (данные о положениях) и некоторую характеристику, отличную от скорости (например, металличность [28]). Основная проблема — необходимость предположений о поведении этой характеристики в зависимости от положения в Галактике; эффекты селекции здесь вновь несущественны. Это напоминает систематику кинематических методов.

II. По способу определения опорных расстояний измерения R_0 можно подразделить на:

1. *Эмпирические*, включающие
 - а) *абсолютные* измерения, которые основаны на расстояниях, найденных абсолютными (геометрическими) способами, и
 - б) *относительные* измерения, в которых используются шкалы расстояний („стандартные свечи“), откалиброванные, в конечном итоге, по локальным объектам.
2. *Теоретические* измерения по шкалам, откалиброванным из некоторых астрофизических ограничений, диктуемых природой объектов.

Классы, выделенные по этому признаку, принципиально отличаются по характеру ошибок в ОР и их влиянию на неопределенность результата. Для относительных измерений очень серьезной проблемой являются систематические ошибки шкал, в особенности, вызванные неопределенностью нуль-пунктов. Последняя целиком переходит в неопределенность оценок R_0 . Результаты относительных измерений R_0 всегда выражены в масштабе принятых шкал расстояний и требуют для сравнения друг с другом согласования последних. Для абсолютных измерений этой проблемы, естественно, нет. Однако превосходство абсолютных оценок R_0 пока не столь однозначно из-за: 1) систематических ошибок моделирования индивидуальных ОО [113], 2) низкой точности абсолютных ОР (в большинстве случаев 10–25% по оценкам авторов) и 3) малого объема выборок ОО вследствие редкости случаев применения абсолютных методов определения расстояний [подавляющее большинство абсолютных измерений R_0 выполнено по единственному (!) опорному объекту]. Пока абсолютные измерения R_0 лишь в среднем систематически надежнее относительных измерений (т.к. вряд ли систематические ошибки абсолютных ОР для разных объектов коррелируют) и, за исключением оценки в [58], проигрывают им в статистической точности. Абсолютные измерения несомненно перспективны, но еще не обладают по крайней мере явным преимуществом. При определении R_0 следует опираться на оба эмпирических класса, т.к. ценность их сейчас сопоставима.

Теоретические измерения вместо локальных калибровок требуют принятия предположений о физической природе и характеристиках опорных объектов. Некорректность предположений определяет систематические и, отчасти, случайные ошибки результатов. Можно ожидать, что общая точность измерений этого класса в среднем ниже, чем относительных, поскольку первые не основаны на эмпирических определениях расстояний и пока выполняются по малым выборкам, в том числе по одиночным объектам. Дальнейшее развитие астрофизических теорий может несколько увеличить точность. Теоретические оценки R_0 остаются пока единичными.

III. Классификация измерений R_0 по типу опорных объектов. Хотя два предыдущих классификационных признака определяют принципиальные особенности систематики собственно метода и систематики ОР, полная детализация этих двух важнейших факторов обеспечивается лишь указанием типа ОО. Кроме того, от типа ОО зависят остальные виды ошибок, на которые сами по себе класс метода и способ нахождения ОР не влияют. Тип ОО определяет:

- 1) в случае относительных ОР — семейство соответствующих ему шкал расстояний, выбор которой управляет конкретной систематикой и уровнем случайных ошибок ОР; в случае абсолютных ОР — возможный метод их нахождения, зависящий от физической природы объектов, который и „отвечает” за возникающую систематику и случайные ошибки ОР;
- 2) уровень и характер неопределенности других наблюдательных данных, необходимых для избранного метода;
- 3) свойства галактической подсистемы опорных объектов: общую численность объектов, их пространственное распределение, кинематику, возраст, химический состав и др.; от этих свойств зависит эффективность и сама возможность применения того или иного метода, роль принципиальных и наличие специфических систематических погрешностей метода, а также статистическая неопределенность результата.

Таким образом, тип ОО влияет на все основные источники ошибок в этой задаче. Однако подразделить измерения R_0 только по типу ОО, отказавшись от двух других классификационных признаков, нельзя, т.к. он не определяет однозначно классы метода и ОР. Например, шаровые скопления могут быть использованы в методах и пространственном (метод Шепли), и в кинематическом [20], и в нефазовом (метод Сурдина [28, 125]), причем не только с относительными ОР, но в будущем и с абсолютными, например, из сопоставления данных о собственных движениях и лучевых скоростях звезд скоплений [109].

В классификации по типам ОО классов столько, сколько этих типов использовалось для определения R_0 . Большинство исследований традиционно выполняются по шаровым скоплениям, переменным типа RR Лиры, миридам, рассеянными скоплениями, ОВ-звездам, областям Н II, классическим цефеидам. Сравнительно недавно появились работы по ОН/ИК-звездам, мазерам в окрестностях молодых массивных звезд и молекулярным облакам (СО и ОН). Сделаны попытки использовать планетарные туманности [56, 106] и рентгеновские источники [57, 93]. Новые типы ОО продолжают появляться: центроид К- и М-гигантов в центре Галактики [81] (1995 г.);

звезды красного сгущения на диаграмме цвет-величина (red clump stars) [102], звезды типа δ Щита [95], красные сверхгиганты [72] (1998 г.), источник Sgr A* как фокус орбиты звезды S2 [58] (2003 г.).

В предложенной классификации измерение R_0 характеризуется комбинацией трех классов — метода, ОР и ОО. Не все возможные комбинации реализованы на практике, но все существующие измерения R_0 однозначно классифицируются по этой схеме, в которой есть место и для будущих видов измерений.

Рассмотрим подробнее отдельные классы измерений R_0 и приведем сводки опубликованных результатов.

1.3. Пространственные методы

1.3.1. Метод Шепли

Харлоу Шепли (1918) [122] вывел первую оценку $R_0 \approx 13$ кпк как расстояния до точки в созвездии Стрельца, где концентрация шаровых скоплений (ШС) наибольшая. Сейчас метод свелся к определению X -координаты этой точки („центроида распределения ШС“): $R_0 = X_{\text{ШС}}$, где ось X направлена на центр Галактики (ЦГ).

Поскольку пыль в Галактике концентрируется к ее плоскости и, возможно, к центру, то ШС с $X < R_0$ должно наблюдаться больше, чем ШС с $X > R_0$, где R_0 — „истинное“ значение в принятой шкале. Поэтому прямое нахождение геометрического центра системы ШС по известным скоплениям дает систематическую недооценку: $X_{\text{ШС}} < R_0$. Это является главным систематическим фактором собственно метода, поэтому дальнейшие усилия были направлены на нейтрализацию селекции.

Первый подход — уменьшить эффект селекции, исключив окрестности галактической плоскости. Оставшаяся выборка ШС считается свободной от селекции. Арп (1965) [32] использовал ограничение $|Z| > 2.5$ кпк, где Z — расстояние от плоскости Галактики. Харрис (1976) [77] ввел обобщение $|Z| > Z_{\text{lim}}$, предложив принимать за оценку R_0 уровень стабилизации среднего для ШС значения $\bar{X}(Z_{\text{lim}})$, когда оно перестает расти с ростом Z_{lim} . Ограничение на галактическую широту ШС $|b| > b_{\text{min}}$, также введенное Арпом (1965), более корректно по отношению к геометрии селекции, но требует более сложных вычислений, т.к. создает выборку асимметричную относительно ЦГ (Волтьер, 1975 [145]; Френк и Уайт, 1982 [68]). В [68, 145] параметр b_{min} не определялся, а принимался в качестве внешнего предположения, что сделало неочевидным преимущество этих работ по сравнению методом в модификации Харриса. Строго говоря, при ограничении на $|b|$ также нужно строить зависимость среднего X от b_{min} , но тогда вычисления стали бы еще более трудоемкими. Расин и Харрис (1989) [108] отказались от оценивания смещения при отбрасывании низкоширотных ШС, наложив дополнительное ограничение $|b'| > b'_{\text{min}}$, где „широта“ b' отсчитывается от точки симметричной Солнцу относительно ЦГ. Однако и в [108] граница b'_{min} не варьировалась.

Применение ограничений на выборку ШС сильно увеличивает статистическую неопределенность результата. Это стимулирует второй подход — моделирование селекции. В его рамках Расин и Харрис (1989) [108] предложили использовать, вопреки традиции, центральную выборку ШС (на угловых расстояниях от ЦГ $\varpi < 15^\circ$). Численное моделирование показало, что для этой выборки смещение \bar{X} за счет неполноты выявленности очень мало ($\pm \leq 1\%$), и основное искажение дает геометрия выборки. Однако этот результат был получен в предположении, что

поглощение света происходит лишь в диске Галактики, причем в плоском слое. В случае роста плотности с приближением к ЦГ полученное в [108] R_0 — занижено.

Наиболее последовательно и детально второй подход реализован в работе Расторгуева и др. (1994) [26], в которой было выполнено совместное моделирование пространственного распределения ШС и эффекта селекции методом наибольшего правдоподобия. В отличие от [108] дополнительно введена зависимость селекции от гелиоцентрического расстояния r и от галактической долготы l . Такая схема более реалистична, но, к сожалению, и она не соответствует осесимметричному распределению поглощающей материи: для последнего зависимость наблюдаемой пространственной плотности числа ШС от r не может иметь одинаковый вид для всех долгот, как в [26], и должна быть максимально различной для $l = 0^\circ$ и 180° .

Оригинальную процедуру восстановления осевой симметрии распределения ШС с применением элементов теории групп и аппарата случайных блужданий разработал Телло (1992) [128], не доказав, однако, ее действенности в устранении эффекта селекции.

Из сказанного приходится сделать вывод, что проблему учета селекции в методе Шепли пока еще нельзя признать решенной в нужной степени.

Измерение R_0 по планетарным туманностям [56, 106] является фактически применением к другому типу объектов метода Шепли. Тот же метод в модификации „центральная выборка” использован и в [57] при определении R_0 по вспыхивающим рентгеновским переменным с теоретическими опорными расстояниями.

1.3.2. Усечение X -распределения шаровых скоплений вблизи ЦГ

Борьба с селекцией в методе Шепли навела Харриса (1980) [78] на парадоксальную идею отождествления ЦГ с местом резкого усечения распределения по координате X ШС подсистемы G, имеющей сильную центральную концентрацию. Однако этот метод может дать надежную оценку R_0 , только если плотность поглощающего вещества *резко* возрастает к ЦГ. Отметим, что в более поздней работе Расина и Харриса (1989) принята плоско-параллельная модель поглощения света. Других случаев применения этого метода найти не удалось.

1.3.3. Конус избегания

Сасаки и Исизава (1978) [121] предложили использовать для определения R_0 конус избегания в системе ШС вдоль оси вращения Галактики, возникающий из-за неустойчивости орбит и разрушения ШС. За оценку величины R_0 принималось то ее значение, при котором формальный конус становится наибольшим. Тогда R_0 основывается на знании расстояний лишь до двух ШС, определяющих конус; численное моделирование в [121] лишь учитывало случайные ошибки расстояний до ШС.

Процедура [121] игнорирует дискретность пространственного распределения ШС, из-за которой зависимость угла полураствора формального конуса, α_0 , от R_0 имеет несколько минимумов с близкими α_0 , причем наименьшее значение α_0 не обязательно получается вблизи ЦГ [8]. Т.к. на $X > R_0$ дискретность системы ШС выше из-за селекции, процедура [121] должна завышать R_0 . Однако само по себе использование конуса избегания представляется весьма перспективным из-за низких селекции и поглощения света для ШС на больших $|b|$, определяющих конус. Ис-

пользуя все распределение ШС по галактоцентрическим широтам можно избежать неоднозначности и получить оценку R_0 с низкой статистической ошибкой ($\sim 5\%$) [8].

1.3.4. Метод Бааде

Вальтер Бааде (1951) [33] отождествил с ЦГ резкий пик плотности RR-лирид в поле NGC 6522 („окно Бааде”), что дало новый метод получения R_0 по расстояниям до точек наибольшей плотности в балдже в „окнах прозрачности”.

Т.к. для объектов балджа, в отличие от ШС, непосредственно наблюдается резкий пик численной плотности, селекция за счет поглощения света здесь несущественна. Есть небольшая селекция из-за зависимости вероятности выявления переменности звезд от видимой величины, а также смещение пика плотности из-за случайных ошибок расстояний. Приведение расстояния до максимума плотности к величине R_0 требует модели пространственного распределения звезд в балдже. Наиболее серьезная проблема моделирования — в невозможности независимого определения сжатия балджа и средней случайной ошибки видимых звездных величин (занижение последней дает завышение сжатия и величины R_0). Главная проблема метода Бааде — поглощение света, которое даже в окнах прозрачности остается большим (особенно в окне Бааде) и переменным в их пределах [59, 62, 83, 90]. Переход от оптических к ИК-наблюдениям примерно на порядок снижает остроту этой проблемы. Впервые метод Бааде был применен к ИК-данным Глассом и Фистом (1982) [71] (мириды) и Фёрнли и др. (1987) [62] (RR-лириды).

Иногда применяют упрощенную (менее надежную) версию метода, определяя положение не пика плотности, а среднее расстояние до выборки звезд [95, 102, 141].

Еще одна специфическая для метода Бааде проблема — сильная скученность объектов в ЦГ. Из-за этого лучше изучать окна прозрачности на некотором удалении от ЦГ по широте. Однако с ростом $|b|$ растет и влияние на R_0 ошибок моделирования балджа. Поэтому обычно предпочитают окна на промежуточных $|b| \sim 10^\circ$.

Табл. 2 представляет относительные пространственные оценки R_0 , как и в последующих сводках, из всех опубликованных с 1974 г. работ (кроме тезисов докладов). Для каждой указаны авторы и ссылка; метод; авторское значение R_0 и его среднеквадратичная ошибка, в скобках — случайная ошибка (четвертый столбец). Результаты, отвергнутые самими авторами или пересмотренные (не только из-за принятия другой калибровки), выделены курсивом. Исправленное значение R_0 и его случайная ошибка (жирный шрифт) — приведение к принятой системе калибровок (табл. 7). $M_V(\text{RR})$, $M_V(\text{HB})$ — средние абсолютные величины в фильтре V звезд типа RR Лиры и горизонтальной ветви. $\overline{M}_{\text{pg}}(\text{RR})$ — среднее из фотографических величин RR-лирид в максимуме и минимуме; P — фундаментальный период пульсаций (в сутках). d_{LMC} — модуль расстояния до БМО в зв. вел.

1.3.5. Расстояние до центрального объекта

В этом „методе” за оценку R_0 принимается абсолютное расстояние до объекта вблизи ЦГ. Это предельный вариант методов Шепли и Бааде, когда ОО — единственный. Какая-либо обработка этого ОР не выполняется по определению.

За центральные объекты принимались: источник Sgr A*, центроид звезд центрального скопления, скопления источников мазерного излучения H_2O в области

Табл. 2. Относительные оценки R_0 пространственными методами

Авторы	Год	Метод(ы) ¹	Оценки R_0 , кпк		Примечания
			Авторская	Скоррек.	
<i>Шаровые скопления</i>					
Волтгер [145]	1975	$S(b > b_{\min})$	7.9 ± 1.0	8.1 ± 1.0	Подсистема гало ШС: $M_V(RR) = 0.6$
Харрис [77]	1976	S(H)	$8.5 \pm 1.6(1.2)$		$M_V(HB) = 0.6$. Пересмотрено в [78]
де Вокулёр и Бюта [55]	1978	S(H)	$7.0 \pm 0.7(0.6)$	7.8 ± 0.7	$M_V(RR) = 0.38[m/H] + 1.32$
Сасаки и Исизава [121]	1978	Конус избегания	9.2 ± 1.3	8.8 ± 1.2	$M_V(HB) = 0.5$
			9.4 ± 1.2	9.4 ± 1.2	$M_V(HB) = 0.6$
Харрис [78]	1980	S(H)	8.0 ± 1.4	8.3 ± 1.5	ШС класса F: $M_V(HB) = 0.6$
		X	8.5 ± 1.5	9.2 ± 1.6	ШС класса G: $M_V(HB) = 0.9$
Френк и Уайт [68]	1982	$S(b > b_{\min})$	6.2 ± 0.9	6.4 ± 0.9	$[Fe/H] < -1.2$: $M_V(HB) = 0.6$
			7.2 ± 1.1	8.5 ± 1.3	$[Fe/H] \geq -1.2$: $M_V(HB) = 1.1$
Расин и Харрис [108]	1989	S(C), $S(b > b_{\min})$	$7.5 \pm 0.9(0.5)$	7.7 ± 0.5	$M_V(HB) = 0.15[m/H] + 0.84$
Телло [128]	1992	Осевая симметрия	7.02 ± 0.55	7.02 ± 0.55	$M_V(HB) = 0.6$
Масьель [87]	1993	S	$7.5 \pm 0.4(0.5)$	7.5 ± 0.5	$M_V(HB) = 0.6$. Эффект селекции не учитывался без обоснования
			$7.7 \pm 0.4(0.8)^2$	7.2 ± 0.75	
Расторгуев и др. [26]	1994	Моделирование пространст. распредел.	7.2 ± 0.5	7.8 ± 0.5	$M_V(RR) = 0.38[m/H] + 1.32$, $[Fe/H] < -0.85$
			7.0 ± 0.5	7.0 ± 0.5	$M_V(HB) = 0.6$
			6.9 ± 0.5	7.1 ± 0.5	$M_V(HB) = 0.6$, $[Fe/H] < -0.85$
<i>Переменные типа RR Лиры</i>					
Оорт и Плаут [100]	1975	B	$8.73 \pm 0.6(0.23)$	8.26 ± 0.22	$\overline{M}_{Pg}(RR) = 0.70 \pm \pm \sim 0.15$, $\langle B - V \rangle = +0.21$ [$\langle M_V(RR) \rangle = 0.63$]
Клуб и Уотсон [48]	1978	B	$6.7 \pm (0.4)$	7.5 ± 0.5	$M_B(RR) = 0.10 - [Ca/H] - \lg P$ [$\langle M_V(RR) \rangle = 1.0$]
Бланко и Бланко [38]	1985	B	$7.95 \pm 0.69(0.33)$	7.42 ± 0.31	$M_V(RR) = 0.6$
Уолкер и Мэж [140]	1986	B	8.1 ± 0.4		$M_V(RR) = 0.6$. Пересмотрено Лейденом и др. (1996)
Фёрнли и др. [62]	1987	B	$8.0 \pm 0.65(0.35)$	7.5 ± 0.3	$M_H(RR) = -0.53 - 2.0(\lg P + 0.2)$ [$\langle M_V(RR) \rangle \approx 0.6$]
Уолкер и Тёрндрап [141]	1991	B	8.2 ± 1.0	8.6 ± 1.1	$M_V(RR) = 0.85$, $[Fe/H] \approx -1$
Карни и др. [46]	1995	B	7.8 ± 0.4	8.1 ± 0.4	$M_K(RR) = -0.88 - 2.33 \lg P$ [$M_V(RR) = 0.15[Fe/H] + 1.01$]
Лейден и др. [85]	1996	B	7.6 ± 0.4	7.6 ± 0.4	$M_V(RR) = 0.15[Fe/H] + 0.95$. Пересмотр [140]
Удальски [133]	1998	B	$8.1 \pm 0.6(0.25)$	8.4 ± 0.3	$M_V(RR) = 0.18[Fe/H] + 1.06$
Макнамара и др. [90]	2000	B	7.79 ± 0.08	7.10 ± 0.07	$M_V(RR) = 0.55$ на $[Fe/H] = -1.46$ ($-0.29 < \lg P < -0.22$)
<i>Мириды</i>					
Гласс и Фист [71]	1982	B	$7.9(\pm 0.4)$	8.5 ± 0.4	$M_{bol} = 0.76 - 2.09 \lg P$
<i>Звезды типа δ Щита</i>					
Морган и др. [95]	1998	B	$7.6(\pm 0.35)$	7.7 ± 0.4	$M_V(\delta \text{ Sct}) = -3.73 \lg P - 1.91$
Макнамара и др. [90]	2000	B	7.86 ± 0.3		$M_V(\delta \text{ Sct}) = -3.725 \lg P - 1.933$
<i>Звезды главной последовательности вблизи точки поворота</i>					
ван ден Берг и Хербст [136, 137]	1974	B	$9.2 \pm 2.2(1.5)$	8.2 ± 1.3	$M_V(TO) = 3.85 \pm 0.30$ ($M_V(RR) = 0.5$ [112])
<i>Планетарные туманности</i>					
Потташ [106]	1990	S	$(7.5 \div 7.8) \pm 0.8$	8.2 ± 0.85	$r_{M31} = 710$ кпк, $r_{LMC} = 47$ кпк, $r_{SMC} = 57.5, 53$ кпк

Табл. 2. Продолжение

Авторы	Год	Метод(ы) ¹	Оценки R_0 , кпк		Примечания
			Авторская	Скоррек.	
<i>Звезды красного сгущения (red clump stars)</i>					
Пачыньски и Станек [102]	1998	В	$8.4 \pm 0.4 (0.2)$		$M_I(\text{RC}) = -0.279 \pm 0.088$. Пересмотрено Станеком и др. (2000)
Станек и др. [124]	2000	В	$8.67 \pm 0.4(0.1)$	8.72 ± 0.1	$M_I(\text{RC}) = -0.227 \pm 0.023$. Пересмотр [102]
Элвс [31]	2000	В	8.24 ± 0.42	8.28 ± 0.42	$M_K(\text{RC}) = -1.61$ [$M_I(\text{RC}) = -0.23$]
Гулд и др. [73]	2001	В	$8.63 \pm 0.16(0.12)$	8.60 ± 0.12	$M_I(\text{RC}) = -0.247 \pm 0.025$ на [Fe/H] = -0.15

¹S — метод Шепли, в скобках обозначена его модификация (Н — Харриса [77], С — центральная выборка); X — усечение X-распределения; В — метод Бааде.

²По ШС с [Fe/H] ≤ -1.2 .

Sgr B2, звезда ОН-ИК и центроид гигантов балджа (см. табл. 6). Основной источник систематики собственно метода — предположение о центральности объекта.

Центральное положение Sgr A* обосновывается его динамическим доминированием в близких окрестностях [58], но, отчасти, это дань традиции [39, 113]. „Центральное” скопление считается таковым, в основном, из-за близости к Sgr A*.

Для Sgr B2 центральное положение (в пределах 300 пк от динамического ЦГ) обосновывалось в [114] долготой объекта $l = 0.6^\circ$ и кинематическими аргументами, которые не являются бесспорными (ср. [39]). Здесь мы снова сталкиваемся с неоднозначностью понятия „центр Галактики”. Sgr B2 — одно из наиболее массивных и, видимо, самое плотное гигантское молекулярное облако в Галактике и может само претендовать на статус динамического ЦГ. С другой стороны, нельзя исключить, что и Sgr B2, и другие центральные концентрации масс, и даже весь бар целиком совершают осцилляции относительно точки минимума потенциала диска и сфероида Галактики (см. [39]). Отсутствие заметного движения Sgr A* вдоль луча зрения остается недоказанным, т.к. даже в прорывной работе Эйзенхауера и др. (2003) [58] не получено решения для лучевой скорости источника.

В отношении звезды ОН-ИК предположение о ее центральности в [49] основано только на долготном ограничении $l < 3^\circ$.

Центроид звезд-гигантов балджа в окне Бааде $(l, b) = (1.02^\circ, -3.93^\circ)$, строго говоря, не является центральным объектом, и расстояние до него необходимо привести к центру балджа/бара в предположении некоторой модели пространственного распределения звезд. Для оценки R_0 по этому центроиду [81] приведение к центру вообще не было сделано, что делает ее несколько заниженной.

1.4. Кинематические методы

Найти расстояние до ЦГ кинематическим способом впервые попытался, видимо, Камм (1938) [45]. Все кинематические методы представляют собой разнообразные способы решения задачи оптимизации принятой модели галактической кинематики относительно величины R_0 . Поэтому здесь на первый план выходит проблема зависимости результата от модельных и оптимизационных предположений, по которым, очевидно, эти методы и следует классифицировать.

I. **Состав модели.** Любая кинематическая модель должна описывать диффе-

ренциальное вращение Галактики, т.к. на этом явлении и основан кинематический подход к определению величины R_0 как расстояния до среднего центра кривизны линий равной скорости вращения. Центр может быть локализован и по сравнительно небольшой дуге окружности, поэтому неполнота выявленности не дает в этом случае существенной систематики. Кроме вращательной составляющей модель может включать также представления и других эффектов галактической кинематики:

1. *Пекулярное движение Солнца или Местного стандарта покоя (МСП)*. Если постоянные этого движения находились как параметры модели, а не принимались известными, в кодовое обозначение метода будем включать букву „p” (peculiar):

2. *Глобальное расширение/сжатие Галактики* — буква „e” (expansion) в коде метода: [34, 42].

3. *Влияние спиральной структуры* — буква „s” (spiral) в коде: [42].

4. *K-член* (член Кемпбелла) — буква „k” в коде: [16, 34, 43, 44, 92].

5. *Эллиптическая дисторсия галактического диска* — буква „d” (distortion) в коде: [92]. Дисторсия ожидается при наличии бара или трехосного гало.

II. Вид представления закона дифференциального вращения в модели, базовый эффект для кинематических методов, позволяет выделить следующие классы моделей вращения:

A. Рассмотрение вращения только на солнечном круге $R = R_0$ при нахождении R_0 как радиуса кривизны линии $V_r = 0$, где V_r — лучевая скорость, приведенная к МСП: метод Трамплера и Уивера [16, 40, 50, 131].

B. Фиксированная аналитическая форма и параметры модели закона вращения: B_1 — кривую вращения Галактики предполагают плоской и фиксируют линейную скорость вращения [40, 75, 76, 93, 94, 114]; B_2 — принимают закон вращения линейным и фиксируют постоянную Оорта A (метод Фоккера [16, 65] и [16, 50]); B_3 — принимают закон вращения, полученный по данным о нейтральном водороде (метод Мартина [5, 88] и [79, 80, 84, 91, 101, 107]).

B/C. Переходный случай — форма и параметры модели фиксированы, но при этом R_0 и параметры находятся по разным частям одного каталога данных об ОО: метод Фиста и Шаттлуорта [34, 60] и [7].

C. Фиксированная аналитическая форма закона вращения при свободных коэффициентах: C_1 — линейная модель (метод Уивера [2, 3, 7, 19, 142], а также [43, 44, 63, 92, 115]); C_2 — нелинейная модель (второго порядка и выше) [14, 30, 42, 72]; C_3 — использование для одного каталога данных разных моделей без выбора между ними или без его объективной мотивации [9, 20, 105].

D. Оптимизация аналитической формы и параметров закона вращения, т.е. объективно обоснованный выбор подмножества моделей (или одной наилучшей), для которых смещения R_0 из-за систематических ошибок аппроксимации — наименьшие: оптимизация порядка аппроксимирующего полинома [21, 22, 24, 96, 97].

При переходе от B к D и с увеличением номера подкласса можно ожидать снижения аппроксимационных ошибок, т.к. предположения становятся более общими, а модели — более „гибкими”. Класс A, не имея такой систематики, обладает другими недостатками: жесткие ограничения на выборку ОО, чувствительность к возмущениям поля скоростей, невозможность построения сложной модели. По внутренней надежности класс A уступает остальным. По внешней — остальным проигрывает класс B_1 , основанный на *дополнительном* предположении о величине линейной скорости вращения, которую нельзя считать независимой от R_0 .

III. Способ оптимизации модели относительно R_0 определяет наличие и характер дополнительных предположений о законе вращения. Три основных класса:

1. *Согласование с законом вращения подсистемы, отличной от подсистемы ОО.* В качестве „реперной” подсистемы обычно используют нейтральный водород с законом вращения как функцией R/R_0 . Стандартно предполагается, что этот закон совпадает с законом для подсистемы ОО. Назовем этот класс *внешней оптимизацией* — символ „E” (external) в коде метода. Примеры: [5, 63, 79, 80, 84, 88, 91, 101, 107].

2. *Согласование модельных решений для частей выборки ОО, представляющих разные области Галактики,* что предполагает совпадение какой-то характеристики вращения для обеих областей: в методе Уивера [142] — первой производной угловой скорости в областях $R \lesssim R_0$ и $R \gtrsim R_0$ [2, 3, 7, 19], кривых вращения за центром Галактики и перед ним — при их согласовании в [14, 30]. Назовем такие подходы *внутренней оптимизацией 2-ого рода*, обозначив его „I₂” (internal).

3. *Самосогласованное решение для всей выборки ОО в целом, или внутренняя оптимизация 1-ого рода* [9, 16, 20, 40, 42–44, 72, 91, 92, 105, 115] (класс I₁). Сюда отнесем и оценки R_0 как средние из величин R_0 для отдельных ОО (метод Фиста и Шаттлуорта [16, 34, 50, 60] и [40]) и как решения для одиночного ОО [75, 76, 93, 114].

Класс I₁ из-за отсутствия дополнительных предположений имеет однозначное преимущество перед двумя другими в отношении систематических ошибок.

Класс E превосходит внутреннюю оптимизацию по статистической точности результата и может быть более надежным в применении к малым выборкам ОО.

Класс I₂ должен проигрывать другим оптимизациям в статистической надежности, поскольку он предполагает дробление выборки ОО и/или сильные ограничения на нее. Преимущество этого класса по систематике перед внешней оптимизацией не очевидно. К тому же, он дает плохие перспективы для усложнения состава модели. По отношению к I₁ оптимизация I₂ проигрывает и по случайным, и по систематическим ошибкам, хотя во всех случаях применения второй применима и первая. Использование I₂, по-видимому, было осмысленно на начальных этапах моделирования Галактики, когда выявление качественной картины важнее строгости методов и точности результатов. Однако I₂-оптимизацию продолжают еще применять [7, 19].

Для собственно оптимизации систем условных уравнений обычно используют различные варианты метода наименьших квадратов (МНК).

IV. Учет неопределенности опорных расстояний. Стандартно минимизируют квадраты отклонений от модели лишь по скорости, предполагая, что причинами отклонений являются только дисперсия и случайные ошибки скоростей. Такая *одномерная оптимизация* реализует обычный МНК. Однако в реальности ОР также измеряются с ошибками, внося ошибки в предсказания модели. Если случайная неопределенность ОР не мала, одномерная оптимизация может дать смещенные оценки параметров, в том числе и R_0 . Способы учета неопределенности ОР:

1. *Одномерная оптимизация с введением* для уравнений *весов*, учитывающих „шум” модели из-за ошибок в ОР [43, 44, 92]; буква „w” (weights) в коде метода.

2. *Двумерная оптимизация* модели и по скорости, и по расстоянию (модулю расстояния) [63, 91, 105]; символ „2” в коде метода.

3. *Численное моделирование* влияния случайных ошибок в ОР на оценку R_0 , найденную одномерной оптимизацией [115]; буква „m” (modeling) в коде метода.

Отсутствие символов „w”, „2” и „m” в коде — одномерная оптимизация.

Двумерная оптимизация — наиболее корректна формально. Однако любой спо-

соб учета ошибок в ОР требует начального знания абсолютных значений этих ошибок и дисперсии скоростей, вводя зависимость от дополнительных предположений. Кроме того, учет ошибок ОР резко усложняет процедуру поиска решения.

В табл. 3 приводятся относительные оценки R_0 кинематическими методами. Код метода в третьем столбце представляет четыре классификационных признака, описанных выше. Для полиномиальных моделей закона вращения тип полинома указан в скобках после символа класса в виде F_n , где F — разлагаемая в ряд функция, а n — порядок разложения. Значения F : „ θ ” — линейная скорость вращения, „ ω ” — угловая скорость вращения, „ W ” $\equiv R[\omega(R) - \omega(R_0)]$, где R — галактоцентрическое расстояние. A — постоянная Оорта в км/с/кпк, K — K -член в км/с, θ_0 — линейная скорость Солнца в км/с. Для классических цефеид в последнем столбце указаны типы шкал, примененных в работе: PL_λ — шкала „период–светимость”, λ обозначает фильтр; PLC — шкала ”период–светимость–цвет” для фильтра V . $M_{V,0}$ — нуль-пункт шкалы цефеид для значений $\lg P = 0.9$ и $\langle B \rangle_0 - \langle V \rangle_0 = 0.7$ [44].

1.5. Динамические методы

В этом классе методов оценку R_0 получают из сопоставления локальной плотности, Σ_\odot , с кривой вращения Галактики, используя уравнение Пуассона, связывающее плотность и потенциал, о котором нужно принять предположения [51, 99, 130]. Требование стационарности Галактики, вытекающее из применения уравнения Пуассона, противоречит многим фактам — отклонению вертекса, проявлениям спиральной волны плотности, наличию центрального бара и Местной системы.

Ситуация с систематическими ошибками для динамических методов существенно хуже, чем для кинематических и пространственных. В случае оценки Σ_\odot по подсчетам звезд [99, 130] важным становится учет эффектов селекции, как в пространственных методах. Динамические оценки этой плотности [51, 130] требуют дополнительных предположений (о распределении остаточных скоростей, об изменении потенциала с Z и т.д.), что также является источником систематики. Кинематические модели, соответствующие принятому потенциалу, заведомо менее адекватны реальному закону вращения, чем аппроксимирующие модели в кинематических методах определения R_0 , т.к. первые имеют более специальный вид.

Многочисленность внешних предположений, неопределенность принимаемых величин галактических постоянных и возможная несогласованность предположений приводят к большой систематической неопределенности оценок R_0 . Так, например, уменьшение в [130] Σ_\odot с 75 до 50 $M_\odot/\text{пк}^2$ (современная оценка) приводит к снижению R_0 на 1–1.5 кпк. Неопределенность значения $A \pm 2.7$ км/с/кпк [83] дает для результата [51] внешнюю ошибку $\pm \sim 1.6$ кпк.

Динамические оценки R_0 , будучи очень ненадежными в систематическом смысле, вряд ли стоит учитывать при выведении „наилучшего” значения R_0 . Скорее, их следует рассматривать как тест на согласованность измерений характеристик Галактики друг с другом и с представлениями о ее динамике.

1.6. Нефазовые методы

В этих методах оценка R_0 получается в результате моделирования средней зависимости от R или вообще от положения в пространстве некоторого физического

Табл. 3. Относительные оценки R_0 кинематическими методами

Авторы	Год	Метод(ы) ¹	Оценки R_0 , кпк		Примечания
			Авторская	Скоррек.	
<i>Классические цефеиды</i>					
Колдуэлл и Коульсон [44]	1987	pkC ₁ (θ)I ₁ w	7.8 ± 0.7		PLC, PL _V , PL _I : $d_{LMC} = 18.45$, $d[Fe/H]/dR = -0.07$. Пересмотрено Колдуэллом и др. (1992)
Малышева и Пшеничникова [19]	1990	W: C ₁ (ω)I ₂	$9.1 \left(\begin{smallmatrix} +2.5 \\ -1.4 \end{smallmatrix} \right)$	8.7 ± 1.9	PL _V : $M_{V,0} = -3.79$ ($d_{LMC} \approx 18.6$)
Колдуэлл и др. [43]	1992	pkC ₁ (θ)I ₁ w [44]	8.5 ± 0.5	8.3 ± 0.5	PLC, PL _V : $d_{LMC} = 18.55$, $d[Fe/H]/dR = -0.07$. Пересмотр [44]
Пон и др. [105]	1994	pC ₃ (θ_3)I ₁ 2	8.09 ± 0.30	8.20 ± 0.30	PLC: $M_{V,0} = -3.80$ ($d_{LMC} = 18.47$)
Дамбис и др. [9]	1995	pC ₃ (ω_3)I ₁	7.1 ± 0.5	7.4 ± 0.5	PL _V : $d_{LMC} = 18.4$ [25]
Метцгер и др. [92]	1998	pkdC ₁ (θ)I ₁ w	7.66 ± 0.32	7.66 ± 0.32	PL _K : $d_{LMC} = 18.50$
<i>Звезды ранних спектральных классов</i>					
Балона и Фист [34]	1974	FS: pkeB/C ₁ (ω)I ₁	$9.0 \begin{smallmatrix} +1.9 \\ -1.3 \end{smallmatrix}$	8.4 ± 1.5	H β -калибровка
Крэмpton и др. [50]	1976	FS: B ₂ I ₁ , TW: A ₁ I ₁	$\sim 8(\pm 1)$	7.5 ± 0.9	H γ -калибровка, $A = 16.8$
Локтин [16]	1979	FS: kB ₂ I ₁ , F: kB ₂ I ₁ , TW: A ₁ I ₁	$8.1(\pm 1)$	7.6 ± 0.9	$A = 16$, $K = 1 \div 4$
Квируга [107]	1980	B ₃ E	8.5 ± 0.7	7.9 ± 0.7	
Бархатова и Блюм [2]	1986	W: C ₁ (ω)I ₂	$7.9 \left(\begin{smallmatrix} +1.2 \\ -0.8 \end{smallmatrix} \right)$	7.4 ± 0.9	Калибровка [4]
<i>Области H II и подобные объекты</i>					
Квируга [107]	1980	B ₃ E	8.4 ± 0.85		IV квадрант
Кнапп [84]	1983	B ₃ E	8 ± 2		I квадрант
Блицц и Брандт [40]	1988	B ₁ I ₁	8 ± 0.5		$\theta_0 = 220$
Фиш и др. [63]	1989	C ₁ (ω)E2	≈ 6.2		Дезавуировано авторами работы
Меррифилд [91]	1992	B ₃ E2	8.05(±0.6)		
Никифоров и Петровская [24]	1994	pD(W)Ew	7.5 ± 1.0		Пересмотрено Никифоровым (1999)
Хонма и Софу [80]	1996	B ₃ E	7.9 ± 1.0		
			7.2 ± 1.0		$R < 2R_0$. Градиент металличности
Никифоров [22, 96]	1999	pD(θ)I ₁ , pD(W)E	8.2 ± 0.7		[96] — пересмотр [24]
<i>Рассеянные скопления (РС)</i>					
Бархатова и др. [3]	1985	W: C ₁ (ω)I ₂	$8.4 \left(\begin{smallmatrix} +3.0 \\ -0.7 \end{smallmatrix} \right)$		НГП Холопова
Герасименко [7]	2004	W: pC ₁ (ω)I ₂	$8.3 \pm 0.3 \left(\begin{smallmatrix} +2.5 \\ -0.9 \end{smallmatrix} \right)$		
		F: pB/C ₁ (ω)I ₁	8.0		$A = 17.5$
<i>Облака OH</i>					
Юревич [30]	1985	C ₂ (θ_8)I ₂	$8.2 \begin{smallmatrix} +0.9 \\ -0.7 \end{smallmatrix}$		
Колесник и Юревич [14]	1987	pC ₂ (θ_8)I ₂ [30]	8.5(±0.8)		Пересмотр [30]
<i>Шаровые скопления</i>					
Никифоров [20]	1990	C ₃ (θ_3)I ₁	$7.0(\pm 1.4)$	6.8 ± 1.4	$M_V(\text{HB}) = 0.6$
<i>Комбинированные выборки ОО</i>					
Беликов и Сыровой [5]	1977	M: B ₃ E	8.3 ± 0.8		Звезды В и РС
Бил и Овенден [42]	1978	resC ₂ (ω_2)I ₁	10.4 ± 1.2		Звезды O7–A2, клас. цефеиды и РС
Овенден и Бил [101]	1983	B ₃ (W ₁)E	6.90 ± 0.35		Звезды OB, клас. цефеиды и РС.
			5.71 ± 0.55		Дезавуировано авторами работы
Рольфс и др. [115]	1986	C ₁ (θ)I ₁ m	7.9 ± 0.75		РС и области H II
Глушкова и др. [72]	1998	pC ₂ (ω_2)I ₁	7.3 ± 0.3		Клас. цефеиды (без Cs), РС и красных сверхгиганты. НГП Холопова

¹W — метод Уивера, FS — Фиста и Шаттлурта, TW — Трамплера и Уивера, F — Фоккера, M — Мартина.

параметра ОО: линейного диаметра (Беликов и Сыровой, 1977 [5]) или металличности (Сурдин, 1980 [28]) звездного скопления.

Из-за высокого отношения дисперсии параметра относительно его среднего тренда статистическая точность нефазовых методов не может быть большой, аналогично кинематическим методам в применении к высокодисперсионным подсистемам. Однако точность первых должна несколько повышаться в случае ОО, представляющих всю Галактику (шаровые скопления), а не только некоторый галактоцентрический сектор, как при кинематических измерениях R_0 по молодым ОО.

Поскольку в работе [5] многие важные детали не приведены, об эффективности использования градиента диаметров скоплений судить трудно. Для метода Сурдина [28] эффективность и систематика зависит от существования радиального градиента металличности по отдельности для двух подсистем ШС. Метод по неясной причине дает, по-видимому, завышенные оценки R_0 , так же как метод Шепли — несколько заниженные (среднее из оценок в табл. 2 $R_0 = 7.50 \pm 0.25$ кпк). Изучение систематики и совершенствование всех этих методов явно необходимы. Для нефазовых методов могут оказаться полезными некоторые приемы из арсенала кинематических методов.

Результаты оценивания R_0 нефазовыми методами приведены в табл. 4.

Табл. 4. Оценки R_0 нефазовыми методами¹

Авторы	Год	Метод	Оценки R_0 , кпк		Примечания
			Авторская	Скоррек.	
<i>Шаровые скопления</i>					
Беликов и Сыровой [5]	1977	Градиент диаметров	8.5(±2)	9.4 ± 2.2	$M_V(RR) = 0.38[m/H] + 1.32$
Сурдин [28]	1980	Градиент металличности	10.1 ± 0.7		$M_V(RR) = 0.38[m/H] + 1.32$, $M_V(RR) = 0.6$
Сурдин и Феоктистов [125]	1999	Градиент металличности: [28]	8.6 ± 1.0	9.2 ± 1.1	$M_V(HB) = 0.2[Fe/H] + 1.00$. Пересмотр [28]
<i>Рассеянные скопления</i>					
Беликов и Сыровой [5]	1977	Градиент диаметров	8.5(±2)		Источник данных о РС не указан

¹Существуют только относительные оценки.

1.7. Измерения по теоретическим опорным расстояниям

Измерения R_0 этого класса основаны на шкалах расстояний, откалиброванных по теоретическим ограничениям:

1. *Эддингтоновский предел* (ЭП) — наибольшее светимость звезды заданной массы, при котором давление излучения не превышает силу тяжести. Калибровка по ЭП применялась при оценивании R_0 по рентгеновским барстерам [57] и рентгеновскому источнику Cyg X-3 [93]. Предполагалось, что объекты — контактные двойные, включающие нейтронную звезду с массой $1.4M_\odot$. Формально, ЭП дает верхние оценки расстояний до объектов и, соответственно, величины R_0 . Однако если компактный компонент двойной — более массивный объект (черная дыра), то предельная светимость, ОР и оценка R_0 увеличатся [113]. Сопоставление теоретических и относительных расстояний до барстеров в ШС показывает, что шкала [57]

скорее нуждается в увеличении, чем в сокращении. Поэтому величины R_0 по рентгеновским источникам в [57, 93] вряд ли следует рассматривать как оценки сверху.

2. *Наибольшая светимость планетарных туманностей* по теоретическим моделям использовалась для калибровки шкалы этих объектов [56]. Из модельных предположений по крайней мере возраст туманностей сильно влияет на результат.

Оценки R_0 данного класса приведены в табл. 5. Здесь M_* и R_* — соответственно масса и радиус компактного компонента рентгеновского источника. В этих исследованиях основное внимание уделяется нахождению теоретических ОР, а не собственно определению по ним R_0 . Так, в [56, 57] вопрос о статистических и селекционных эффектах даже не ставится.

Табл. 5. Оценки R_0 по теоретическим опорным расстояниям

Авторы	Год	Метод	Калибровка опорных расстояний	Оценка R_0 , кпк	Примечания
Пространственные методы					
<i>Рентгеновские барстеры</i>					
Ебисудзаки и др. [57]	1984	S(C)	Эддингтоновский предел	$7(\pm 0.6)$	$M_* = 1.4M_\odot$, $R_* = 10$ км, для оболочки из чистого He
<i>Планетарные туманности (ПТ)</i>					
Допита и др. [56]	1992	S	Теоретические звездные модели	7.6 ± 0.7	Средний возраст ПТ — 5×10^9 лет
Кинематические методы					
<i>Рентгеновские источники</i>					
Молнар [93]	1985	$V_1 I_1$	Эддингтоновский предел	7.7 ± 1	$M_* = 1.4M_\odot$, $\theta_0 = 250$

1.8. Измерения по абсолютным опорным расстояниям

1. *Моделирование систематических движений в оболочке объекта* (обычно ее расширения) по собственным движениям (μ) и лучевым скоростям (V_r) ее отдельных деталей: скопления мазеров H_2O в областях звездообразования [75, 76, 113, 114]. Такое исследование для каждого ОО (скопления) по характеру и сложности сходно с моделированием кинематики всей галактической подсистемы ОО. Реалистичность модельных предположений определяет систематическую ошибку абсолютного ОР. Статистическая точность зависит, в основном, от количества мазерных деталей с μ и V_r и от их дисперсии скоростей. Необходимость оценивать для *каждого* мазера его смещение по лучу зрения относительно центра оболочки делает систему уравнений плохо обусловленной. Отсюда сильная корреляция (~ 0.8) между оценками ОР и скоростями расширения и вращения [114]. Указанные в работах сравнительно небольшие ошибки ОР (10–20%) отражают, в основном, статистическую неопределенность и могут быть заметно занижены. Сколько бы не было мазеров с нужными данными, находится только одно опорное расстояние — до центра оболочки.

2. *Метод статистических параллаксов* (сопоставление дисперсий μ и V_r) также требует измерений μ и V_r для отдельных объектов в составе опорного объекта. Обычно предполагается изотропия остаточных скоростей и нормальное распределение их μ - и V_r -компонент: скопление мазеров H_2O W51 [69], центроид К- и М-гигантов в балдже [81]. В случае центрального звездного скопления предполагают не изотропию, а доминирование в динамике центрального тела — черной

дыры (Sgr A*) [58, 70]. Возможно, это допущение не совсем верно, тогда следует учесть вклад в наблюдаемую V_r -дисперсию „разогрева” от потенциала самого скопления [70]. Статистическая ошибка метода $\sim 10\text{--}20\%$, отличия распределений скоростей от нормального и анизотропия скоростей увеличивают неопределенность до $\sim 20\text{--}30\%$ [69]. Скопления и центр оид также дают лишь по одному ОР.

3. *Сопоставление углового диаметра оболочки объекта с ее линейным диаметром*, который определяется по „фазовому лагу” между событиями на ближней и дальней сторонах расширяющейся оболочки: звезды ОН/ИК. Отклонения от предполагаемой симметрии оболочки задают предельную точность линейного радиуса $\sim 10\%$, поэтому обычно общая неопределенность ОР получается больше [79].

4. *Моделирование вращения некоторого тела вокруг объекта* — звезды S2 вокруг объекта в направлении на Sgr A* [58]. Орбита S2 предполагается кеплеровской, а лучевая скорость ее фокуса (Sgr A*) — нулевой. Первое может быть не совсем верным из-за релятивистских эффектов и возмущений от близких звезд, второе — из-за возможных радиальных осцилляций Sgr A* в балдже и произвола в системе отсчета для V_r . Без учета этих эффектов ошибка ОР — $\sim 5\%$, что в любом случае несомненное достижение для абсолютных методов и для проблемы R_0 в целом.

Все абсолютные оценки R_0 (табл. 6) основаны на одном или нескольких (звезды ОН/ИК) ОР. Даже статистическая точность оценок невелика (кроме ОР Sgr A*). Основные усилия в работах направлены на измерение ОР, а не на нахождение R_0 : для центральных объектов проблемы селекции и приведения ОР к ЦГ не обсуждаются, из кинематических методов используются самые примитивные (B_1 и B_3E). Однако абсолютные измерения R_0 несомненно перспективны при дальнейшем росте числа ОР и при использовании более совершенных методов их обработки.

1.9. Измерения по разным типам опорных объектов

Обсудим проблемы, обусловленные типом ОО; главная из них — ошибки ОР.

1.9.1. Переменные звезды типа RR Лиры

Эти объекты, один из основных индикаторов расстояний, для определения R_0 используются в методе Бааде. Проблема их шкалы расстояний остается довольно сложной. Оценки наклона зависимости $M_V(RR)$ от $[Fe/H]$ находятся в пределах от 0.0 до 0.4 зв. вел./dex, а самих величин $M_V(RR)$ — от $0^m.3$ до $1^m.1$ [59, 113]. Новые исследования (и по данным Hipparcos) не привели к окончательному разрешению проблемы из-за рассогласования между двумя группами результатов: 1) тригонометрические и статистические параллаксы дают относительно слабую величину $\langle M_V(RR) \rangle \sim 0.75 \pm 0.15$ с малым или нулевым наклоном шкалы; 2) анализ теоретических звездных моделей, метод Бааде и Весселинка, пульсационный анализ, данные о RR-лиридах в ШС с расстояниями, найденными совмещением с главной последовательностью, указывают на большой наклон и, как правило, на более яркий нуль-пункт [111]. Причины этого расхождения не установлены. Одной из них может быть несовпадение функций светимости для RR-лирид поля и в скоплениях.

В таблицах этого обзора оценки R_0 приведены к единой системе калибровок. Т.к. в случае RR-лирид шкалы отличаются не только средним нуль-пунктом, но и наклоном, здесь использовался метод М. Дж. Рида [113] сравнения шкал по нуль-

Табл. 6. Абсолютные оценки R_0

Авторы	Год	Метод ¹	Способ определения ОР	Оценка R_0 , кпк	Примечания
Пространственные методы					
<i>Источник Sgr A*</i>					
Эйзенхауэр и др. [58]	2003	GC	Моделирование вращения вокруг объекта	8.0 ± 0.4	Орбита — кеплеровская
<i>Центральное звездное скопление</i>					
Генцель и др. [70]	2000	GC	Статистический параллакс	8.0 ± 0.9	Сферическая симметрия. Пересмотрено в [58]
Эйзенхауэр и др. [58]	2003	GC	Статистический параллакс: звезды ранних и поздних классов	7.1 ± 0.9 8.0 ± 1.7	Сферическая симметрия. Пересмотр [70]
<i>Скопления мазерных источников H₂O</i>					
Рид и др. [114]	1988	GC	Моделирование движений в оболочке Sgr B2(North)	7.1 ± 1.5	Пост. скорость расширения, твердотельное вращение
Рид [113]	1993	GC	Моделирование расширения оболочки Sgr B2(Middle)	6.5 ± 1.5	Подробности не приведены
<i>Звезды ОН/ИК</i>					
Коухен и др. [49]	1989	GC	Сопоставление углов. и лин. диаметров: ОН 357.7-0.1	10 ± 5	Сферическая симметрия оболочки
<i>Центроид К- и М-гигантов балджа</i>					
Хьютерер и др. [81]	1995	GC	Статистический параллакс	8.21 ± 0.98	Изотропия орбит в балдже
Кинематические методы					
<i>Скопления мазерных источников H₂O</i>					
Гуинн и др. [76]	1989	V ₁ I ₁	Моделирование расширения оболочки W49 (North)	7.6 ± 1.6	Расширение по степенному закону. Пересмотрено в [75]
Гуинн и др. [75]	1992	V ₁ I ₁	Модел. расшир-я и вращ-я оболочки W49 (North)	8.1 ± 1.1	Расшир-е и вращ-е по степ. законам. Пересмотр [76]
Рид и др. [114]	1988	V ₁ I ₁	Статист. параллакс: W51	10.8 ± 4.6	$\theta_0 = 220 \pm 20$
<i>Звезды ОН/ИК</i>					
Херманн и др. [79]	1985	V ₃ E	Сопоставление углового и линейного диаметров	9.2 ± 1.2	Сфер. симмет-я оболочек. Гал. вращ.: модель Шмидта
Моран [94]	1993	V ₁ I ₁		8.9 ± 0.8	$\theta_0 = 220$
Хонма и Софу [80]	1996	V ₃ E		$7.7(\pm 0.8)$	Гал. вращение: по HI [91]

¹GC — расстояние до объекта в центре Галактики (Galactic center).

пункту для близкой к средней металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$. В табл. 2 принята локальная калибровка $M_V(\text{RR}) = 0.75 \pm 0.15$ для этой металличности [11, 47, 113].

1.9.2. Шаровые скопления

Проблема расстояний до шаровых скоплений (ШС), традиционных и самый популярных ОО, также остается острой. Шкалы ШС основывают обычно на калибровке абсолютной звездной величины горизонтальной ветви, $M_V(\text{HB})$, которую ранее практически отождествляли с калибровкой $M_V(\text{RR})$ [59, 113]. Поэтому тенденция к ослаблению $M_V(\text{RR})$ вначале привела и к укорочению расстояний до ШС.

Однако работы по данным Pirragos, подтвердив короткую локальную калибровку $M_V(\text{RR})$, в отношении $M_V(\text{HB})$ дали иные результаты. Ставший благодаря Pirragos надежным метод сопоставления главных последовательностей ШС с локальными субкарликами дал гораздо более яркую калибровку, в среднем $M_V(\text{HB}) \lesssim 0.5 \pm 0.1$ на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$ [47, 111], как и сопоставление с локальными

звездам типа δ Щита, $M_V(\text{HB}) = 0.47 \pm 0.12$ на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.55$ [89]. Но по другим способам выводят более слабый нуль-пункт: $M_V(\text{HB}) = 0.61 \pm 0.11$ (сравнение дисперсий μ и V_r), $M_V(\text{HB}) = 0.7 \pm 0.15$ (сопоставление с последовательностью белых карликов) [47]. Поэтому здесь в качестве компромисса принята шкала со старой калибровкой $M_V(\text{HB}) = 0.6 \pm 0.15$ на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$ и с промежуточным наклоном, подтверждаемым поздними результатами [47]: $M_V(\text{HB}) = 0.2[\text{Fe}/\text{H}] + 0.86$.

В связи с определением расстояний до ШС отметим проблемы скучивания звезд в плотных полях скоплений и учета поглощения света [108].

1.9.3. Мириды

Переменных типа o Кита в окнах прозрачности примерно в 3 раза меньше, чем RR-лирид, но они ярче, особенно в ИК-диапазоне [59, 71], где стандартное отклонение от зависимости период-светимость — лишь $\sim 0^m 1$, а проблема учета эффектов поглощения света не является острой. Однако остаются сомнения в применимости локальной калибровки мирид (I тип населения) к миридам в ЦГ (II тип населения), а также в однородности центральных мирид [59, 113].

По миридам R_0 было оценено Глассом и Фистом (1982) [71] (табл. 2). Позднее Фист [59] пересмотрел этот результат за счет новых оценки межзвездного поглощения и шкалы $M_K = 1.69 - 3.79 \lg P$: $R_0 = 8.2 \pm 0.4$ кпк. Скорректированная оценка в табл. 2 — пересчет этого значения к шкале $M_K = (0.84 \pm 0.14) - 3.47 \lg P$ с нуль-пунктом по данным Pirragos [143] (шкалы сравнивались для величины $\lg P = 2.4$). Неопределенность шкалы принята равной $0^m 15$.

1.9.4. Звезды типа δ Щита

Эти переменные невысокой светимости ($M_V = 2 \div 4$) с периодами $P \leq 0^d 2$ находятся на стадии ухода с главной последовательности. Высокоамплитудные звезды типа δ Щита с конца 1990-х гг. начали использовать в методе Бааде [90, 95], который предпочтительнее применять только к долгопериодическим, богатым металлами переменным ($\lg P > -1.10$, $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.70$), т.к. они ярче и имеют более сильную концентрацию к центру балджа [90]. Короткопериодические переменные помимо большого разброса расстояний подвержены сильной селекции.

Здесь использована шкала $M_V(\delta \text{ Sct}) = -3.725 \lg P - 1.933$ по более позднему результату [89]. Систематические ошибки R_0 за счет ОР для этих переменных и RR-лирид приняты одинаковыми [90] — $0^m 15$.

1.9.5. Звезды главной последовательности вблизи точки поворота

Ван ден Берг (1974) [136] предположил, что звезды этого типа ответственны за резкий рост числа объектов на интервале $19 < V < 20$ в окне прозрачности $(l, b) = (0^\circ, -8^\circ)$, и использовал их в качестве ОО в методе Бааде [136, 137]. Такое отождествление несколько произвольно: рост можно связать и с более слабыми звездами главной последовательности [100]. Тогда R_0 в [137] — завышенное. Однако в [137] не была внесена поправка за $|b| \neq 0^\circ$, что занижает R_0 . Здесь результат [137] скорректирован лишь за счет приведения к $M_V(\text{RR}) = 0.75 \pm 0.15$ (табл. 2).

1.9.6. Планетарные туманности (ПТ)

Использование индивидуальных ПТ в качестве ОО из-за большой неопределенности ОР перспективы пока не имеет. Однако пытаются работать (в классе пространственных методов), основываясь на коллективных калибровках ПТ балджа. Потташ (1990) [106] предложил использовать усечение функции светимости этих ПТ с яркой стороны для нахождения R_0 . При этом всего несколько (самых ярких) ПТ являются ОО, поэтому статистическая ошибка R_0 должна быть велика. Кроме того, из-за конечных размеров балджа ($R \sim 1.5$ кпк) в категорию самых ярких будут чаще попадать ПТ из ближней части балджа. Отсюда, можно ожидать систематического занижения R_0 . Светимость усечения калибруется по расстояниям до внешних галактик, что вносит дополнительные ошибки распространения внутригалактических шкал вовне. Преимущество использования ПТ: их функцию светимости можно пересчитать из данных радионаблюдений [106] и почти устранить проблему поправок за поглощение света. Результат [106] был приведен в табл. 2 к принятой здесь калибровке классических цефеид $d_{\text{LMC}} = 18^m50 \pm 0^m2$ (см. пункт 1.9.8).

В сходной работе Допита и др. (1992) [56] светимость усечения ПТ была откалибрована по теоретическим звездным моделям. При снижении предполагаемого возраста ПТ с 5.0×10^9 до 0.8×10^9 лет R_0 увеличивается на 0^m44 . Последняя величина принята за систематическую ошибку R_0 по теоретическим ОР для ПТ в [56].

1.9.7. Звезды красного сгущения (red clump stars)

Звезды красного сгущения (ЗКС) составляют на диаграмме цвет-величина дельта (red clump) — высокометаллический аналог горизонтальной ветви. Пачыньски и Станек (1998) [102] предложили рассматривать ЗКС как новый индикатор расстояний и использовали его в методе Бааде. Преимущество ЗКС как ОО — в их многочисленности (~ 1000 в каталоге Hipparcos, ~ 10000 в окне Бааде), что дает высокую точность калибровки шкалы и оценки R_0 . После работы [102] высказывались сомнения в возможности использования ЗКС как индикатора расстояний [47, 111]. Однако Станек и др. (2000) [124] показали, что по теоретическими и наблюдательным данным средняя абсолютная величина ЗКС, $M_I(\text{RC})$, слабо меняется с возрастом и металличностью. Здесь принята калибровка $M_I(\text{RC}) = -0.24$ (для $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.15$ в окне Бааде), средняя из недавних результатов [123, 134]. Систематическая ошибка шкалы ЗКС — 0^m15 [123].

1.9.8. Классические цефеиды

Эти переменные, благодаря высокой светимости, внутренне точным шкалам расстояний ($\sim 0^m1-0^m2$ [59]) и небольшой дисперсии скоростей, являются наиболее популярными ОО в кинематических методах. Однако вопрос о масштабе шкал цефеид пока не получил окончательного разрешения. Новые результаты по данным Hipparcos свидетельствуют как в пользу удлинения расстояний на 0^m1-0^m2 ($d_{\text{LMC}} \sim 18^m6 \div 18^m7$), так и в пользу сокращения ($d_{\text{LMC}} \lesssim 18^m4$) [12, 25, 111]. В качестве компромисса здесь принята стандартная калибровка $d_{\text{LMC}} = 18^m50$ [113].

Определение „гамма-скоростей” (лучевых скоростей, приведенных к центрам масс цефеид) — отдельная сложная задача [105]. Однако систематические ошибки гамма-скоростей обычно невелики; общая неопределенность — от 0.3 до ~ 5 км/с [72].

Систематическую ошибку измерений R_0 по цефеидам примем равной 0^m2 , исходя из современной неопределенности масштаба шкал этих ОО.

1.9.9. Звезды ранних спектральных классов

Из-за своей многочисленности, высокой светимости и низкой дисперсии скоростей эти звезды также удобны для оценивания R_0 кинематическими методами. Но по надежности расстояний О- и В-звезды уступают классическим цефеидам. Их стандартное отклонение от средней светимости $\sim 0^m6$ [18, 34]. Данные Hipparcos позволили повысить внутреннюю точность калибровок для звезд главной последовательности (ГП) до 0^m1 – 0^m2 и для гигантов — до 0^m2 – 0^m3 ; для сверхгигантов она варьируется от 0^m2 до 1^m [18]. Калибровки Балона и Шоббрука (1984) [35] и Локтина и Бешенова (20016) [18] (данные Hipparcos) в среднем подтвердили старые калибровки для ГП, но гиганты и сверхгиганты получились слабее, чем раньше, в среднем на $\gtrsim 0^m3$. С этими результатами согласуется и вывод Дамбиса и др. (2001) [10] о необходимости сокращения фотометрических расстояний до ОВ-ассоциаций [37].

Принятие новых калибровок требует корректировки оценок R_0 по ОВ-звездам, которая зависит от доли гигантов и сверхгигантов в выборке и может находиться в пределах от $\approx 0\%$ до $\approx 15\%$, если принять, что расстояния до этих звезд нужно сократить на 0^m3 . Предполагая, что доля этих звезд в выборках составляет 50% [34, табл. 1], примем поправку -0^m15 для оценок R_0 по ОВ-звездам (табл. 3).

Другой недостаток ОВ-звезд — большая ошибка скоростей V_r (~ 10 км/с) [72].

Исходя из разброса калибровок ОВ-звезд [35], примем систематическую ошибку измерения R_0 по этим ОО равной 0^m5 , что согласуется с оценкой [113].

1.9.10. Области Н II и подобные им объекты

В отличие от одиночных ОВ-звезд области Н II легче идентифицировать, у них меньше внутренняя неопределенность расстояний ($\gtrsim 0^m3$) [23] и точные лучевые скорости из радионаблюдений. Поэтому данные об областях Н II часто привлекаются для кинематических исследований Галактики [12, 22, 24, 40, 63, 96].

Расстояния до областей Н II определяются по фотометрии возбуждающих звезд ранних типов. Применяют: 1) усреднение расстояний до индивидуальных звезд с известными МК-классами, 2) совмещение с принятой начальной ГП (ZAMS fitting) и 3) сопоставление с принятым набором изохрон. Массовыми являются два первых способа. Из них второй имеет бóльшую внутреннюю точность. Однако принадлежность некоторых звезд к классам светимости I–IV должна систематически занижать расстояния. Поэтому первый способ, учитывающий класс светимости, остался популярным. Но и при его применении обычно считают, что звезды с неизвестным классом светимости принадлежат ГП, что также занижает расстояния. Третий способ, естественное развитие второго, дает наиболее надежные результаты.

Уменьшение светимостей гигантов и сверхгигантов на $\sim 0^m3$ (см. пункт 1.9.9) непосредственно затрагивает лишь первый способ — получается сокращение в среднем на $\sim 0^m09$ (доля этих звезд в выборках $\sim 30\%$). Однако приписывание всем звездам класса V во втором и, частично, в первом способах требует коррекции в сторону увеличения расстояний. Т.к. поправки разных знаков требуются в сопоставимом числе случаев, принятие более слабых светимостей гигантов и сверхгигантов [18, 35]

не означает необходимости сокращать значения R_0 по областям Н II; скорее, может идти речь об их увеличении на $\sim 0^m 1$. Этот вывод подтверждается результатами [12] по данным Hipparcos. Поэтому оценки R_0 по данному типу ОО в табл. 3 не корректировались.

Измерения лучевых скоростей по эмиссионным радиолиниям СО с точностью ~ 1 км/с на порядок увеличили надежность скоростей центров масс комплексов области Н II/молекулярные облака и еще больше повысили интерес к этим объектам.

Часто области Н II объединяют в одну выборку с другими сходными ОО (отражающие туманности, звездные группы). Такое смешивание, однако, несколько снижает однородность выборки и надежность результатов.

Систематическая ошибка оценок R_0 по областям Н II и подобным объектам принята равной $0^m 4$ — средней неопределенности калибровок ГП ([35, рис. 9]).

1.9.11. Рассеянные скопления (РС)

Расстояния до РС (внутренняя точность $\sim 0^m 1$ – $0^m 3$ [17, 72]) также определяются методом совмещения с начальной ГП (НГП). Сопоставление с тригонометрическими параллаксами Hipparcos показало хорошее согласие с фотометрическими расстояниями [18]. Возникшие ранее сомнения в надежности последних следует переадресовать системе параллаксов Hipparcos [17, 113]. Средние поправки по данным Hipparcos имеют разные знаки для разных шкал (ср. [17] и [12, 25]). Т.к. шкалы РС в среднем не требуют значительной коррекции, оценка R_0 по РС [3] в табл. 3 не исправлялась. Оценка в [7] сразу была получена для шкалы, откалиброванной по параллаксам Hipparcos в [17]. Систематическую ошибку за счет неопределенности НГП положим равной $0^m 4$ в согласии с величинами поправок к шкалам в [12, 25]. Точность лучевых скоростей для молодых РС невелика — 5–10 км/с [72].

1.9.12. Красные сверхгиганты

Могут быть перспективным типом ОО: внутренняя точность расстояний до них по ИК-фотометрии $\sim 0^m 2$, ошибка гамма-скоростей — 1–3 км/с [72].

1.9.13. Облака ОН

Колесник и Юревич (1983) использовали зависимость комбинации параметров линий поглощения ОН от расстояния для нахождения расстояний до молекулярных облаков (с внутренней точностью 15–50%) [13] и кинематического определения R_0 [14, 30]. Указанная зависимость калибровалась в [13] по областям Н II. Систематическая ошибка R_0 в [14, 30] принята равной $0^m 7$, что складывается из ошибок калибровок НГП $0^m 4$ и шкалы ОН по областям Н II $\sim 0^m 5$ – $0^m 6$ [13]. Оценка [14] по облакам ОН в табл. 3 не корректировалась, как и в случае областей Н II.

1.9.14. Рентгеновские источники

Использовались теоретические ОР до этих объектов (табл. 5).

Барстеры, нестационарные (взрывающиеся) рентгеновские источники, центрируются к ЦГ (и к плоскости Галактики), что дает основание применить к ним метод Шепли [57]. Вопрос о селекции для этих объектов не обсуждался, но вряд ли

она велика. Поэтому барстеры могут стать перспективным типом ОО при условии, что удастся увеличить их статистику и уточнить их шкалу расстояний.

Источник Суг Х-3 мог быть использован как ОО [93] благодаря калибровке светимости на эддингтоновский предел и наличию линий поглощения от облаков HI на фоне непрерывного радиоконтинуума Суг Х-3. Последний факт позволяет оценить лучевую скорость объекта и кинематическое расстояние до него. Перспективы подобных ОО неясны. Оценки V_r по спектру поглощения подвержены большим ошибкам и обычно дают нижний предел расстояния. Необходимость принятия модели вращения вносит дополнительные ошибки из-за дисперсии скоростей и за счет возможных отличий от этой модели закона вращения источников типа Суг Х-3.

Моделирование отклонений от эддингтоновских атмосфер для нейтронных звезд показало, что систематическая неопределенность расстояний до них может достигать по крайней мере 15% (см. [113]). Примем систематическую ошибку оценивания R_0 по рентгеновским источникам равной 0^m3 .

1.9.15. Скопления мазерных источников

Скопления источников мазерного излучения H_2O в областях звездообразования могут быстро расширяться со скоростью до 100 км/с и выше; иногда скопления вращаются со скоростью $\sim 10\text{--}20$ км/с [75, 114]. Сопоставление величин μ и V_r для отдельных мазерных источников в скоплении в рамках принятой кинематической модели дает абсолютную оценку расстояния. Дисперсия скоростей мазеров ~ 15 км/с может быть сопоставима со скоростями расширения и вращения скопления [75]. В этом случае для получения удовлетворительной точности требуются данные для большого числа мазерных деталей: в [75] 105 деталей дают внутреннюю ошибку лишь $\sim 10\%$. Точность ограничивается и неоднородным распределением мазеров относительно возбуждающей звезды, как в Sgr B2(North) [114].

Когда движения мазерных источников носят хаотический характер применяют метод сопоставления радиальной и трансверсальной дисперсий скоростей.

Общая неопределенность абсолютных ОР в обоих методах вряд ли меньше $\sim 20\%$ (см. секцию 1.8). Оценки R_0 по скоплениям мазеров (табл. 6) пока не очень надежны — они получались лишь как расстояние до центрального объекта (Sgr B2) и несовершенным кинематическим методом B_1 по единственному ОО в каждом случае. Дальнейшая перспектива у этого типа ОО может быть, если удастся найти другие скопления мазеров и выполнить для них нужные наблюдения.

1.9.16. К- и М-гиганты в галактическом балдже

Абсолютное расстояние до центроида этих звезд в окне Бааде можно оценить методом статистических параллаксов [81] (см. секцию 1.8). Этот центроид является единственным ОО (расстояния до отдельных звезд не известны). Изотропия орбит в балдже, ключевое предположение при определении ОР, вряд ли верно, т.к. имеются многочисленные данные о бароподобной структуре балджа [39]. Учет последней требует принятия фазовой модели бара, что резко усложняет задачу и вводит зависимость от модельных предположений. Не ясно, существенен ли эффект селекции по отдельности для звезд с μ и для звезд с V_r . Если, например, величины μ преимущественно известны для звезд переднего фона, то это дает дополнительное смещение

оценок OP и R_0 . Видимо, невозможно выяснить этот вопрос, не зная расстояний до отдельных звезд. Таким образом, измерение R_0 по центроиду гигантов балджа пока вряд ли следует считать надежным.

1.9.17. Звезды ОН/ИК

Эти звезды, экстремальный класс красных гигантов и сверхгигантов, наблюдаются в микроволновом радио- и ИК-диапазонах. Вокруг ОН/ИК-звезды есть тонкая оболочка — источник мазерного излучения ОН, пики которого соответствуют ближней и дальней сторонам оболочки. Поскольку оболочка расширяется, то в спектре на $\lambda = 18$ см пики излучения удалены на 20–40 км/с. Если звезда ОН/ИК — переменная, переменна и ее оболочка. Фазовый лаг между вариациями интенсивности излучения от ближней и дальней сторон оболочки позволяет оценить ее линейный диаметр. Угловой диаметр измеряется методом радиоинтерферометрии. Сопоставление этих двух диаметров дает абсолютное OP (историю вопроса см. в [79, 113]).

Многие ОН/ИК-звезды находятся вблизи ЦГ, но использовать их как ОО нельзя из-за трудностей измерения там угловых диаметров оболочек [113]. Но на удалении от ЦГ точность расстояний до ОН/ИК-звезд $\gtrsim 10\%$ дает возможность кинематических определений R_0 (табл. 6). Поскольку таких звезд известно по крайней мере несколько десятков, это делает их перспективным типом ОО.

1.9.18. Источник Sgr A*

Этот объект стал опорным благодаря измерениям при помощи техники адаптивной оптики в 2002–2003 гг. лучевой скорости звезды S2, обращающейся вокруг компактного массивного тела в направлении на Sgr A*. Моделирование вращения звезды по 5 измерениям лучевой скорости и 19 положениям на картинной плоскости (начиная с 1992 г.) позволило получить в предположении кеплеровской орбиты абсолютное OP 7.94 ± 0.42 кпк (Эйзенхауер и др., 2003 [58]). Внутренняя точность 5% — беспрецедентная для абсолютных методов! Правда, 5 величин V_r относятся только к двум существенно разным эпохам, а полный виток с начала наблюдений звезда еще не совершила (период обращения ~ 16 лет); до 2002 г. положения S2 не очень точные. Поэтому пока нельзя уверенно утверждать, что кеплеровского приближения достаточно. Если даже это и так, дальнейший прогресс в точности расстояния ожидается медленным, т.к. наиболее ценны измерения V_r в окрестностях перигея, который уже пройден (2002.33) [58]. Точность может увеличиться за счет привлечения данных о других звездах, но они обращаются вокруг Sgr A* гораздо медленнее.

1.10. „Наилучшая” величина R_0

При выведении этой величины учтем основные виды ошибок и корреляций, связанные с выделенными классами измерений R_0 .

Из оценок R_0 в табл. 2–6 здесь не использовались: 1) оценки R_0 , отвергнутые самими авторами или позднее пересмотренные без изменений метода и данных; 2) оценки, основанные на зависимой от R_0 „калибровке” вида $\theta_0 = \text{const}$; 3) оценки по комбинированным выборкам ОО (из-за нарушения принципа однородности выборки [23] и из-за различия поправок калибровок и величин систематических ошибок для разных типов ОО в выборке); 4) динамические оценки как ненадежные.

Относительные оценки R_0 для каждого типа ОО были пересчитаны к единой шкале расстояний или калибровке (табл. 7). Все принятые в дальнейшую обработку

Табл. 7. Система шкал расстояний и калибровок для корректировки оценок R_0

Обозначение	Объекты калибровки	Шкала или калибровка	Неопределенность (σ_{cal})
$M_V(RR)$	Переменные типа RR Лиры	$M_V(RR) = 0.75$ на $[Fe/H] = -1.3$	$0^{m.15}$
$M_V(HB)$	Звезды горизонтальной ветви шаровых скоплений	$M_V(HB) = 0.2[Fe/H] + 0.86$	$0^{m.15}$
$M_K(o\text{ Cet})$	Мириды	$M_K(o\text{ Cet}) = -7.49$ на $\lg P = 2.4$	$0^{m.15}$
$M_V(\delta\text{ Sct})$	Звезды типа δ Щита	$M_V(\delta\text{ Sct}) = -3.725 \lg P - 1.933$	$0^{m.15}$
d_{LMC}	Большое Магелланово Облако	$d_{LMC} = 18^{m.50}$	$0^{m.2}$
$M_I(RC)$	Звезды красного сгущения	$M_I(RC) = -0.24$ на $[Fe/H]_{BVG} = -0.15$	$0^{m.15}$
OB+PC	OB	OB-звезды	Поправка модулей расстояния: $-0^{m.15}$
	НII	Области НII и подобные объекты	Без поправки
	PC	Рассеянные скопления	Без поправки
	OH	Облака OH	Без поправки

оценки R_0 выделены в табл. 2–6 жирным шрифтом. Эти оценки R_{0j} (точнее модули расстояний) усреднялись, на первом этапе — в пределах одного вида измерений R_0 (одинаковы класс метода, класс ОР и тип ОО) с учетом статистических ошибок оценок R_{0j} и систематической ошибки метода ($0^{m.2}$ для пространственных и кинематических методов и $0^{m.25}$ для нефазовых). На втором этапе взвешенное усреднение проводилось внутри *групп калибровок*, в которые объединялись оценки R_0 , приведенные к одинаковым шкалам или калибровкам. Приведение оценок R_0 к единой системе независимых или согласованных калибровок и введение групп калибровок необходимо для учета корреляции между оценками по калибровкам одного типа. Затем усреднялись средние R_0 для зависимых калибровок OB, НII, PC, OH. Наконец, усреднение результатов для *независимых групп калибровок* с учетом систематической ошибки σ_{cal} , обусловленной типом ОО, давало величину $\langle R_0 \rangle$, „наилучшую” для выборки оценок R_0 . Для относительных измерений величины σ_{cal} указаны в последней колонке табл. 7, для абсолютных — $\sigma_{cal} = 0^m$.

Величины $\langle R_0 \rangle$ для некоторых групп оценок R_0 даны в табл. 8; N_{est} — число оценок, N_{pap} — число публикаций. Относительные и абсолютные $\langle R_0 \rangle$ отличаются

Табл. 8. „Наилучшие” величины R_0 для некоторых групп оценок R_0

Годы	Все оценки			Относительные оценки			Абсолютные оценки		
	$\langle R_0 \rangle$, кпк	N_{est}	N_{pap}	$\langle R_0 \rangle$, кпк	N_{est}	N_{pap}	$\langle R_0 \rangle$, кпк	N_{est}	N_{pap}
1974–1993	7.85 ± 0.24	41	37	7.98 ± 0.24	35	31	7.61 ± 0.68	4	4
1994–2004	7.89 ± 0.19	25	21	7.93 ± 0.23	20	17	7.78 ± 0.33	5	4
1974–2004	7.90 ± 0.17	66	58	8.03 ± 0.20	55	48	7.73 ± 0.31	9	8

мало ($<0^{m.1}$) и незначимо, что свидетельствует в пользу корректности в среднем масштабов шкал расстояний. „Наилучшее” значение по всем 65 оценкам из 13 независимых групп $\langle R_0 \rangle = \mathbf{7.9 \pm 0.2}$ кпк. Оно изменилось мало по сравнению с эпохой до Hipparcos (табл. 1). Различия R_0 , полученных до и с 1994 г. в среднем отличаются незначимо. Отсутствие больших противоречий между результатами может быть, отчасти, следствием „bandwagon effect”. Но в любом случае нельзя не констатировать, что **в первом приближении удалось достигнуть общего согласия**

по данной проблеме: величину R_0 с точностью до одной цифры можно теперь считать с высокой вероятностью известной.

Значительный прорыв в решении проблемы R_0 ожидается в случае успешной реализации космических проектов GAIA, SIM, FAME и других. Однако произойдет это, видимо, не раньше, чем через 5–7 лет, даже при штатном развитии событий. Поэтому вряд ли следует пассивно ожидать результатов новых космических миссий. Потенциал современной наблюдательной техники и имеющихся данных не исчерпан. В ближайшие годы дальнейший прогресс может быть связан с совершенствованием традиционных и разработкой новых методов определения опорных расстояний и методов определения R_0 по ОР и другим данным. Первой задаче может помочь дальнейшее изучение природы нынешних и потенциальных опорных объектов.

1.11. Исследования по проблеме R_0 , проводимые в России

Отечественные исследователи традиционно активно работают в направлениях, связанных с проблемой R_0 .

1. В последние годы, вслед за появлением каталога Hipparcos и других новых данных, основные усилия были направлены на *совершенствование шкал расстояний*, прежде всего на *получение новых калибровок*. Были найдены статистические параллаксы переменных типа RR Лиры (Дамбис и Расторгуев, 2001 [11]; Дамбис, 2003 [52]) и классических цефеид (Расторгуев и др., 1999 [25]), калибровка светимостей ОВ-звезд по тригонометрическим параллаксам Hipparcos (Локтин и Бешенов, 2001б [18]), поправка к расстояниям [37] до ОВ-ассоциаций по тригонометрическим параллаксам Hipparcos и методом статистических параллаксов (Дамбис и др., 2001 [10]), для рассеянных скоплений — статистические параллаксы (Расторгуев и др., 1999 [25]) и поправка к шкале расстояний по тригонометрическим параллаксам (Локтин и Бешенов, 2001а [17]), согласование шкал голубых сверхгигантов, цефеид, рассеянных скоплений и молекулярных (СО-)облаков путем сравнения первых производных от угловой скорости и методом статистических параллаксов (Заболотских и др., 2002 [12]). Продолжаются исследования классических цефеид как типа опорных объектов, прежде всего по вопросам определения моды пульсации и классификации цефеид по модам (Расторгуев и др., 1999 [25]; Сачков 2002 [27]; Заболотских и др., 2004 [146]); такие работы имеют важное значение для совершенствования шкал расстояний до этих объектов.

Наиболее важными из полученных результатов стали: данные в пользу сокращения шкалы расстояний для переменных типа RR Лиры и против увеличения шкалы для классических цефеид; обнаружение неоднородности шкалы цефеид по отношению к поправкам калибровки и вывод о настоящей необходимости выявления цефеид, пульсирующих в первом оберitone; подтверждение калибровок для ОВ-звезд ГП и сокращение шкалы гигантов и сверхгигантов; сокращение шкалы ОВ-ассоциаций; подтверждение общей надежности фотометрических (относительных) расстояний до рассеянных скоплений; отсутствие необходимости сокращения шкалы СО-облаков несмотря на сокращение шкалы ОВ-гигантов и сверхгигантов.

Здесь перечислены, в основном, результаты прямо инструктивные в настоящий момент для проблемы R_0 и, в частности, для выведения „наилучшей” оценки R_0 . В этом направлении были и другие работы, но задача сделать полный их обзор не ставилась, т.к. они в целом опосредованно связаны с проблемой R_0 : многие их ре-

зультаты сразу не приводят к новым оценкам R_0 или к пересмотру старых и даже не всегда означают необходимость такого пересмотра. Эти последствия, как правило, наступают позднее, когда появляются новые/пересмотренные каталоги расстояний и результаты их анализа, накапливается „критический” массив согласующихся результатов, требующих учета.

Глушкова и др. (1998) [72] предложили новый тип опорных объектов — красные сверхгиганты, который может стать перспективным.

2. Выполнены работы и по *совершенствованию собственно методов определения R_0* . Расторгуев и др. (1994) [26] разработали и применили на практике способ совместного моделирования пространственного распределения шаровых скоплений и эффекта селекции методом наибольшего правдоподобия. Анализ в [26] является наиболее совершенной версией метода Шепли. Никифоров и Петровская (1994) [24] и Никифоров (1999а,б) [21, 22] предложили и использовали метод построения оптимально сглаженных моделей вращения, позволяющий выявлять и учитывать значимые особенности закона вращения подсистемы при кинематическом оценивании R_0 . Разработаны и применены методы учета различия между законами вращения подсистемы опорных объектов и подсистемы Н I (Никифоров 1999в, 2000 [96, 97]); ранее в классе E кинематических методов такое различие всегда игнорировалось.

3. Получены относительные *оценки R_0 по новым базам данных*: в классе кинематических методов — по классическим цефеидам (Дамбис и др., 1995 [9]), по цефеидам, рассеянным скоплениям и красным сверхгигантам (Глушкова и др., 1998 [72]), по СО-облакам (Никифоров, 1999б,в, 2000 [22, 96, 97]), по рассеянным скоплениям (Герасименко, 2004 [7]); методом Сурдина (в классе нефазовых методов) — по шаровым скоплениям (Сурдин и Феоктистов, 1999 [125])

Влияние российских исследователей на прогресс в этих трех направлениях является значительным. Полученные результаты по шкалам расстояний не сводятся просто к поправкам расстояний в конкретных каталогах, а являются важной частью общего потока новых данных о калибровках и шкалах, без которой было бы трудно объективно судить о происшедших в последние годы изменениях и о реальных проблемах в этой области. В частности, данные результаты оказали значительное влияние на ряд выводов настоящего обзора, среди них — на выбор параметров задачи вычисления „наилучшего” значения R_0 . Работы по совершенствованию собственно методов получения оценок R_0 остаются очень редкими, и уже поэтому каждая из них представляет ценность. Российские работы в этом направлении не имеют зарубежных аналогов. Активность отечественных исследователей по созданию новых баз данных об ОО и по оцениванию R_0 на их основе не уступает, а зачастую и превосходит зарубежную. Так, новые данные о рассеянных и шаровых скоплениях, красных сверхгигантах и молекулярных облаках использовались только в российских работах.

Российские исследователи не занимаются лишь абсолютным оцениванием R_0 . Такие работы требуют суперсовременного оборудования в комплексе — как наблюдательных инструментов, так и специальных приемников излучения (техника адаптивной оптики), — которого нет в наших обсерваториях из-за низкого финансирования науки вообще и астрономии, в частности. Другая причина — объективная: большинство абсолютных оценок R_0 делается по центральным объектам Галактики со склонением $\delta \lesssim 30^\circ$, которые даже на юге России неудобны для наблюдений. Участия в создании обсерваторий на низких широтах Россия не принимает, не на-

ходя на это средств.

Однако в остальных трех направлениях, указанных выше, отечественный потенциал остается высоким — кадры и оборудование позволяют продолжать активную работу, хотя вне Москвы из-за низкого финансирования все больше ощущается недостаток молодых кадров, профессионально работающих по данной проблеме. Положение еще можно исправить, если финансовая политика изменится...

1.12. Определение расстояний: проблемы внегалактической астрономии и R_0

1.12.1. Измерение расстояний до других галактик и определение R_0

Эти две задачи связывает общая астрономическая проблема определения расстояний. Разница лишь в масштабах расстояний и в том, что в случае внегалактических объектов (отдельные галактики, скопления и сверхскопления галактик) их размеры, как правило, малы по сравнению с расстоянием до них, поэтому здесь расстояние до самого объекта и непосредственно измеряемые расстояния до опорных объектов в нем, как правило, можно считать тождественными. Исключение составляют только сравнительно „близкие” объекты (БМО, скопление в Деве) или вмещающие Галактику образования (Местное сверхскопление), размерами которых не следует пренебрегать, по крайней мере полностью, но и тогда соответствующие коррекции обычно не представляют большой проблемы. В случае же определения R_0 задача преобразования опорных расстояний в оценку R_0 , наоборот, стоит, как правило, остро и способна привести, как говорилось выше, к заметным систематическим ошибкам.

Основная трудность общей проблемы определения расстояний состоит в отсутствии таких методов, которые были бы пригодны для измерений на всех астрономических масштабах сразу.

Абсолютные (геометрические) методы являются наиболее непосредственными в том смысле, что они не требуют каких-либо калибровок в качестве промежуточных шагов. Но эти методы эффективны пока только в относительно близких окрестностях Солнца: в эпоху после Hipparcos метод тригонометрического параллакса — в пределах двух-трех сотен парсек, методы векового и статистического параллаксов звезд поля — в пределах лишь на порядок большего радиуса. Более „дальнодействующие” абсолютные методы имеют, как правило, низкую точность, даже в случайном отношении; к тому же, они работают только в некоторых существенных предположениях и, следовательно, отягощены большими систематическими ошибками. Для задачи определения R_0 такие методы рассматривались в п. 1.8. Внегалактические абсолютные расстояния пытаются определять методом Бааде–Весселинка, на основе эффекта Сюняева–Зельдовича, по временной задержке сигнала (time delay) от разных частей объекта, методом статистических параллаксов применительно к мазерам H_2O . Однако неопределенность этих измерений обычно составляет от 1.5 до 10 раз [36], что не позволяет на их основании разрешить современные споры о короткой и длинной шкалах внегалактических расстояний и, соответственно, о величине постоянной Хаббла H_0 . Редкие случаи точных оценок расстояний — по сверхновой 1987A в БМО [103] и по мазерам в галактике NGC 4258 [36, 74] — происходят благодаря уникальным сочетаниям редкого события и/или удачных геометрических свойств объекта и, следовательно, заведомо непригодны для массовой измерений расстояний.

Поэтому вне близких окрестностей Солнца основными являются *относительные* методы определения расстояний, использующие принцип „стандартных свеч”: шкалы относительных расстояний, построенные для отдельных типов объектов в рамках этих методов, превращают в абсолютные, калибруя их по близким объектам того же типа в предположении, что светимости близких и далеких объектов равны. Расстояния же до близких (калибровочных) объектов при этом находят одним или несколькими методами с меньшими радиусами действия, в пределах которых эти объекты находятся. Непосредственно по абсолютным расстояниям можно откалибровать, как правило, только шкалы для тех типов объектов, представители которых имеются в близких окрестностях Солнца. Эти шкалы, в свою очередь, используются для калибровки других более „дальнедействующих” шкал и т.д. В результате выстраивается так называемая „лестница космических расстояний”, „ступеньками” которой можно считать калибровки шкал. Ранее в пределах Галактики требовалось одна-две, а вне ее — обычно несколько таких ступенек. Однако недавно, после получения результатов миссий *Hipparcos* и космического телескопа Хаббла (*HST*), в этом отношении произошел определенный прорыв: теперь почти всегда для внутригалактических шкал достаточно одной ступеньки, а для внегалактических — от одной до трех [36].

В прошлом пытались калибровать шкалы расстояний до внешних галактик, опираясь на величину R_0 . Де Вокулёр (1983) [53, 54] предлагал использовать нашу Галактику в качестве „стандартной свечи” для калибровки соотношений Галли-Фишера и Фабера-Джексона. При этом величины R_0 и θ_0 (линейной скорости вращения диска Галактики на $R = R_0$) служили параметрами модели для вычисления общей абсолютной светимости Галактики. Помимо проблем такого моделирования самого по себе данный подход осложнен тем, что требует знания морфологического типа нашей звездной системы и предполагает, что она является „средней” галактикой для этого типа. Общая систематика калибровки по R_0 и θ_0 должна быть очень большой, поэтому сейчас ее больше не применяют. Любопытно, что в недавней книге Бинни и Меррифилда (1998) [36] этот способ калибровки даже не упомянут.

По крайней мере в настоящее время величина R_0 не является калибровочной „ступенькой” для внегалактических шкал, поэтому расстояния до галактик не выражаются в единицах этой постоянной. Таким образом, проблема R_0 и проблема расстояний до внешних галактик связаны, к счастью, не непосредственно (величину R_0 не нужно знать, чтобы найти абсолютные расстояния до галактик), а лишь через общие калибровки шкал. Однако это означает, что оценки расстояний до галактик, полученные относительными методами, и относительные измерения R_0 являются коррелированными, если зависят от калибровок одинаковых типов.

При определении расстояний до сравнительно близких галактик (до ~ 30 Мпк) теперь можно воспользоваться довольно широким набором относительных методов, основанных на локальных (околосолнечных) или внутригалактических калибровках. Почти все эти методы и калибровки либо прямо используются для определения R_0 , либо связаны с калибровками в проблеме R_0 через дополнительную калибровочную ступеньку. К первым относятся методы: по светимостям переменных звезд — классических цефеид (например, [66]), звезд типа RR Лиры (например, [47, 110, 133]) и мирид (например, [61, 138]); сопоставление с главной последовательностью шаровых скоплений (ШС) [139]; по звездам красного сгущения (например, [116, 133, 134]). Ко второй группе принадлежат методы: по ярчайшим звездам

ветви гигантов (полуэмпирическая калибровка с использованием расстояний до шаровых скоплений) [116, 117]; по функции светимости ШС в Е-галактиках, которую калибрует средняя светимость ШС Галактики, и по функции светимости планетарных туманностей с расстояниями до БМО или до М 31 в качестве калибровки (см. ссылки в [36], для оценки R_0 в работе Потташа [106] использовалась калибровка по БМО); по ярчайшим звездам в галактике (калибровка по цефеидам) [82].

Пересмотр любой из этих общих калибровок, конечно, приводит к пропорционально одинаковым изменениям основанных на них оценок R_0 и расстояний до внешних галактик. Вместе с тем, в целом наши знания величины R_0 и этих расстояний связаны далеко не так жестко. Правда, внегалактические расстояния в основном базируются как раз на общих калибровках, хотя есть и исключения: редкие случаи точных абсолютных расстояний и один относительный метод — по новым звездам (см. [36]), — основанный на независимой калибровке по галактическим новым с абсолютными параллаксами расширения (эта калибровка не используется при определении R_0). Зато среди измерений R_0 есть довольно большая группа, не связанная с общими для двух проблем калибровками: абсолютные измерения R_0 , которые гораздо более информативны, чем в случае расстояний до галактик, ряд относительных измерений — по ОВ звездам, областям Н II, рассеянными скоплениям РС, карликовым цефеидам, и, возможно, по некоторым другим редким видам опорных объектов, — а также теоретические измерения. В настоящей сводке к таким измерениям относятся 27 оценок R_0 (41% от общего числа), которые дают „наилучшее” (среднее) значение $\langle R_0 \rangle = 7.72 \pm 0.23$ кпк, незначимо отличное от значения $\langle R_0 \rangle = 7.90 \pm 0.17$ кпк по всем измерениям. Все это позволяет говорить о некоторой независимости *среднего* значения R_0 и *среднего* масштаба внегалактических расстояний.

К тому же, расстояние до отдельно взятой близкой галактики можно определить, как правило, несколькими независимыми методами. В таких случаях *средняя* или компромиссная оценка этого расстояния по всем результатам не так уж чувствительна к изменениям отдельной калибровки, как и „наилучшее” R_0 .

Для определения расстояний до далеких галактик (от нескольких десятков до тысяч мегапарсек) требуется дополнительная калибровочная „ступенька”, которой служат расстояния до более близких галактик (до ~ 25 Мпк), найденные указанными выше методами „ближнего действия”. В качестве калибровочных объектов используют БМО, М 31, М 33, скопления в Деве и в Печи, другие группы и отдельные близкие галактики. На таких калибровках основаны методы Талли–Фишера, по сверхновым типа Ia, по сверхновым типа II (тот же метод Бааде–Весселинка, но с калибровкой по цефеидам), по аппроксимации фундаментальной плоскости Е-галактик $D_n - \sigma_0$ (при калибровке по цефеидам здесь нужна еще одна калибровочная ступенька, т.к. этих переменных нет в Е-галактиках), по флуктуациям поверхностной яркости (см., например, [36, 66]). Оценки расстояний этими методами наследуют ошибки локальных калибровок, коррелируя таким образом с оценками R_0 , но, обладая также собственной систематикой, являются очевидно менее точными в систематическом смысле, чем методы ближнего действия.

Создание новых методов нахождения внегалактических расстояний продолжается. Так, Комберг (2004) [15] (грант РФФИ 01-02-16274) предложил оценивать расстояния до радиоисточников из сопоставления спектроскопических данных о размерах областей формирования широких линий излучения в спектрах квазаров и радиогалактик с данными РСДБ о поперечных угловых размерах радиовыбросов из

их ядер.

Сравнение полученных разными методами расстояний до одних и тех же объектов (галактик и их скоплений), возможность не частая внутри Галактики, дает способ взаимного тестирования методов. Однако это пока не привело к появлению общепризнанной согласованной системы шкал несмотря на огромные усилия исследователей. Систематические различия между разными группами шкал породили бурные дискуссии, для разных масштабов расстояний — разные, о систематике и даже о состоятельности различных методов, шкал, индикаторов расстояний. Появление новых высокоточных данных (Hipparcos и HST), к сожалению, не разрешило этих споров, а, скорее, подтвердило массив старых результатов и добавило новую информацию для размышлений, лишь в некоторых случаях уменьшив масштаб разногласий.

В случае близких галактик наиболее жаркие дискуссии идут о расстоянии до *Большого Магелланова Облака* (БМО). Еще до появления каталога Hipparcos было отмечено противоречие между модулями этого расстояния, d_{LMC} , по переменным типа RR Лиры ($\sim 18^m 25$), с одной стороны, и по классическим цефеидам и по миридам ($\sim 18^m 5$) — с другой [113]. Эта двойственность сохранилась и после выполнения новых локальных калибровок шкал по данным Hipparcos — большинство недавних оценок d_{LMC} попадает либо в одну, либо в другую категорию. *Большие значения* d_{LMC} обычно находят: по классическим цефеидам — $18^m 55$ – $18^m 70$ для разных калибровок [1, 47, 111]); по RR-лиридам с калибровкой по локальным субкарликам $M_V(\text{RR}) \sim 0.5$ на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$ — $18^m 71 \pm 0^m 15$ [110], $18^m 64 \pm 0^m 12$ [47]; по миридам — $18^m 54 \pm 0^m 18$ [138], $18^m 60 \pm 0^m 1$ [61]; абсолютными методами по сверхновой 1987A — $18^m 58 \pm 0^m 05$ [103] (по временной задержке в кольце вокруг звезды), $18^m 7 \pm 0^m 2$ [36] (методом Бааде–Весселинка); по верхушке ветви гигантов — $18^m 69 \pm 0^m 25 \pm 0^m 06$ (случайная и систематическая ошибки) [116]. *Маленькие значения* d_{LMC} обычно получают: по RR-лиридам с калибровкой по локальным переменным этого типа $M_V(\text{RR}) = 0.75$ на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$ — $18^m 2 \pm 0^m 2$ [36, 111, 113, 133]; по звездам красного сгущения (ЗКС) в работах Удальского — $18^m 13 \pm 0^m 07$ [133], $18^m 24 \pm 0^m 08$ [134]; по затменной двойной в БМО — $(18^m 22 \div 18^m 30) \pm \sim 0^m 1$ (см. [47]). В итоге, распределение недавних оценок d_{LMC} явно отличается от нормального [66].

Эти результаты дают повод говорить о двух конкурирующих шкалах расстояний — так называемых „длинной” с $d_{\text{LMC}} \sim 18^m 5$, принятой более широко, и „короткой” с $d_{\text{LMC}} \sim 18^m 25$ (см., например, [47, 133]). Однако учет результатов для других галактик не позволят считать ситуацию столь простой. В случае *Малого Магелланова Облака* (ММО) модуль расстояния относительно БМО по RR-лиридам, наоборот, получается слегка больше (на $\sim 0^m 06$ – $0^m 15$), чем по классическим цефеидам [111, 133], хотя металличности объектов ММО и БМО радикально, по-видимому, не отличаются [133]. Таким образом, по сравнению с БМО разница между двумя шкалами сокращается на $\sim 0^m 1$ и для ММО вряд ли является значимой. Правда, расстояние до ММО по ЗКС ($18^m 6$) так же заметно меньше, чем по цефеидам ($18^m 9$) [111, 133]. Для *галактики M 31* очевидного противоречия между шкалами RR-лирид и классических цефеид не отмечалось ни до появления каталога Hipparcos [113], ни после — по лиридам/горизонтальной ветви расстояние по отношению к БМО обычно получают больше на $0^m 15$ – $0^m 45$ [111], тогда абсолютное расстояние до M 31 при разнице шкал для БМО $-0^m 25$ выходит на $-0^m 1 \div +0^m 2$ больше по сравнению с классическими цефеидам. По ЗКС найдено относитель-

ное расстояние до М 31 большее, чем по цефеидам, но абсолютные расстояния по этим шкалам практически совпадают ($24^m.4$ – $24^m.5$) [111], т.к. $d_{\text{ЛМС}}$ по ЗКС получается меньшим. Ко всему этому следует добавить, что и средние оценки R_0 по соответствующим опорным объектам очевидно не укладываются в простую схему „длинные/короткие шкалы”: $\langle R_0 \rangle = 7.76 \pm 0.21$ кпк по RR-лиридам [калибровка $M_V(\text{RR}) = 0.75$ на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$], $\langle R_0 \rangle = 7.95 \pm 0.30$ кпк по классическим цефеидам (калибровка $d_{\text{ЛМС}} = 18^m.50$), $\langle R_0 \rangle = 8.55 \pm 0.30$ кпк по ЗКС; везде указана статистическая ошибка. Если бы разница масштабов двух первых шкал, судя по оценкам $d_{\text{ЛМС}}$, действительно была $\gtrsim 0^m.25$, то различие в $\langle R_0 \rangle$ составляло бы $\gtrsim 1$ кпк (!) и было бы давно замечено; в реальности это расхождение незначимо и в несколько раз меньше (0.2 кпк $\approx 0^m.05$). В случае ЗКС даже знак различия противоположный: R_0 получается на $0^m.15$ – $0^m.2$ больше, чем по другим шкалам, тогда как расстояния до БМО и ММО выходят меньшими.

Совокупность указанных результатов говорит в пользу того, что расхождения между расстояниями до близких галактик, прежде всего до БМО, нельзя, по видимому, интерпретировать просто как различие масштабов шкал (калибровок). Скорее, эти расхождения указывают на существование каких-то некорректностей применения шкал к конкретным галактикам из-за особенностей опорных объектов в последних. Поэтому „длинными” или „короткими” правильнее называть лишь шкалы расстояния до БМО, но не шкалы в целом.

Разногласие внегалактических расстояний, скорее всего, связано с другой, помимо калибровок, важной проблемой относительных методов определения расстояний — неуниверсальностью „стандартных свечей”, т.е. неполной идентичностью функций светимости локальных калибровочных и далеких опорных объектов одного типа. Светимость может зависеть по крайней мере от химического состава и возраста объектов и от типа окрестностей. Влияние этих факторов известно до сих пор не очень надежно. Так, оценки наклона зависимости абсолютной звездной величины от металличности для RR-лирид находятся в пределах от 0.0 (нет зависимости) до 0.4 зв. вел./dex [59, 113], а для классических цефеид — от 0 до -1.3 зв. вел./dex [66]. Произвол в учете влияния химического состава, данные о котором, к тому же, часто неточны, в учете весьма переменного поглощения света, двойственности звезд и других факторов, возможные ошибки идентификации типа опорных объектов объясняют часть разброса оценок расстояний, с одной стороны, и постоянно побуждают исследователей к пересмотрам конкурирующих шкал с целью их „примирения” — с другой. Так, появилось предположение о том, что *RR-лириды* в БМО могут быть в среднем ярче галактических и лирид в М31, тем более что первые беднее металлами: $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle \sim -1.9$ в БМО, -1.3 в Галактике и -1.1 в М 31 (см. [113]). С другой стороны, Расторгуев и др. (1999) [25] (гранты РФФИ 96-02-18491, 96-15-96656), выполнив калибровку *классических цефеид* по статистическим параллаксам на основе данных каталогов Hipparcos и TRC, получают $d_{\text{ЛМС}}$ не более $18^m.40$. Напротив, Каретта и др. [47] утверждают, что „так называемые короткую и длинную шкалы” для БМО можно примирить (с $d_{\text{ЛМС}} \sim 18^m.5 \div 18^m.6!$), используя для *цефеид и переменных типа RR Лир* согласованную шкалу покраснений. Группа А. Сендиджа вообще ставит под вопрос использование *классических цефеид* как точных индикаторов расстояний из-за найденных ею различий в показателях цвета и наклонах шкал между переменными Галактики и БМО [120], а для RR-лирид группа получает яркую калибровку [119]. В [47] указывается на сильную зависимость $d_{\text{ЛМС}}$ по

затменным двойным от покраснения. Не все соглашаются с деталями процедуры измерения Удальским d_{LMC} по ЗКС [133, 134], в частности, с его поправками за различия в возрасте и химическом составе: использование галактических рассеянных скоплений бедных металлами с расстояниями, найденными совмещением с ГП, приводит к большему значению по ЗКС $d_{\text{LMC}} = 18^m.42 \pm 0^m.16$ [132], как и применение других карт покраснения ($d_{\text{LMC}} = 18^m.47 \pm 0^m.06$) [118]; в [116] на основе многополосных наблюдений области вокруг сверхновой SN 1987A и собственных оценок покраснения выведено еще большее значение $d_{\text{LMC}} = 18^m.59 \pm 0^m.04 \pm 0^m.08$; появилось предположение, что сгущение на ветви красных гигантов в БМО имеет вертикальную структуру [104], и это может еще больше усложнить интерпретацию данных. В [47] отмечается, что разброс величин $E(B-V)$, полученный в разных работах для одних и тех же мест в БМО, велик и может объяснить значительную часть разброса недавних оценок d_{LMC} . Несмотря на то что эти результаты пока не привели к согласию, они дают важный материал для совершенствования относительных методов нахождения расстояний — работы, которую настоятельно необходимо продолжать.

Последняя задача, конечно, крайне актуальна и внутри Галактики, что приводит к взаимному влиянию друг на друга проблемы R_0 и проблемы внегалактических расстояний. В частности, рассогласование между разными группами новых результатов для Галактики (см. пункт 1.9.1) вызвали сомнения в универсальности функции светимости переменных типа RR Лиры — предположению о различиях между RR-лиридами поля и в скоплениях [110, 111, 129]. Глубокое перемешивание в оболочках звезд скоплений под влиянием более плотных окрестностей, увеличивающее содержание гелия в атмосферах и светимость, могло бы объяснить рассогласование как калибровок, так и наклонов шкал (см. [110, 111]). Однако отсутствие наблюдаемых различий между лиридами поля и скоплений в БМО свидетельствует против такого предположения (см. [47, 111]). Нельзя, правда, исключить, что здесь мы имеем дело с какими-то анамалиями БМО. Вопрос остается открытым.

Таким образом, проблемы R_0 и внегалактических расстояний, будучи связанными относительными методами определения расстояний, не являются просто прикладными задачами для этих методов, а могут активно способствовать их совершенствованию, осуществляя обратную связь. Синтез результатов, полученных в рамках обеих проблем, становится одним из направлений такого совершенствования и дополнительной связью между двумя проблемами. В будущем, когда в проблеме R_0 абсолютные методы обгонят относительные по надежности и величина R_0 станет калибровкой для шкал, значение этого направления существенно вырастет.

1.12.2. Постоянная Хаббла и R_0

Постоянная Хаббла (H_0), характеризующая темп расширения Вселенной в современную эпоху, локально определяется как коэффициент пропорциональности в законе Хаббла, связывающем скорости разбегания галактик и расстояния до них. H_0 — важнейший космологический параметр, имеющий множество космологических и астрофизических приложений. От H_0 зависят: возраст Вселенной; размеры наблюдаемой ее части; критическая плотность, общая плотность энергии и геометрия Вселенной; наши представления о процессе образования неоднородностей во Вселенной и о физических свойствах галактик и квазаров (см., например, [36, 66]).

Из-за возмущений хаббловского потока крупномасштабными концентрациями

материи в близкой Вселенной (Местное сверхскопление, Великий Аттрактор, концентрация Шепли) постоянно H_0 желательно определять по далеким объектам (со скоростями $\gtrsim 10^4$ км/с), чтобы максимально снизить влияние ошибок моделирования этих „локальных” возмущений [36, 66]. Для нахождения расстояний до таких объектов нужны методы дальнего действия (см. предыдущий пункт), для которых заведомо недостаточно одной калибровочной ступеньки. Когда требовалось несколько таких ступенек, соответствующий произвол калибровок приводил к более чем двукратному разбросу оценок H_0 с концентрациями к значениям ~ 55 и ~ 110 км/с/Мпк (см. [36]). Самой неприятной чертой этой двойственности была и, к сожалению, остается сильная корреляция результатов не с методами и данными, а с именами авторов исследований.

Появление к середине 1990-х гг. благодаря таким инструментам, как HST, новых точных данных сократило число калибровочных ступенек (в принципе, до двух-трех). Произошло это, во многом, за счет того, что наблюдения с HST классических цефеид, которые по-прежнему играют центральную роль при калибровке дальнедействующих шкал, позволили определять расстояния непосредственно по этим переменным в радиусе 30 Мпк [66]. По цефеидам стало возможным непосредственно откалибровать все шкалы указанного типа (только для $D_n - \sigma_0$ требуется еще один шаг — калибровка по скоплениям и группам галактик с расстояниями по цефеидам). В результате разброс оценок H_0 значительно снизился, хотя двойственность осталась. Последняя вновь приводит к дилемме между так называемыми „короткой” и „длинной” шкалами (не соответствующими, однако, шкалам для БМО с аналогичными названиями). Приверженцы короткой шкалы обосновывают свое мнение согласием результатов широкой группы методов, получая большие величины H_0 : 70–82 км/с/Мпк по разным методам со средним $H_0 = 72 \pm 8$ км/с/Мпк (группа У. Фридман [66, 67]). С этими результатами согласуются оценки Тихонова и Галазутдиновой (2002) [29] $H_0 = 75 \pm 8$ и 81 ± 5 км/с/Мпк по группе галактик NGC 1023 с расстояниями по ярчайшим звездам (гранты РФФИ 97-02-17163, 00-02-16584). Адепты длинной шкалы основываются, в основном, на измерениях по сверхновым типа Ia — методе, имеющем наибольшие внутреннюю точность и радиус действия (до 30000 км/с), — а также на критике других методов, выводя меньшие значения $H_0 \lesssim 60 \pm (2 \div 4)$ км/с/Мпк (группа А. Сендиджа [126, 127]). Попытки „примирить” результаты есть и здесь: так, группа Фридман и по сверхновым Ia находит большую величину $H_0 = 71 \pm 2 \pm 6$ км/с/Мпк [66].

Заметим, что сократился и разброс результатов абсолютных методов, но это также может быть своего рода „band-wagon effect” [36].

Следует подчеркнуть, что даже „короткая” шкала H_0 Фридман и др. основана на калибровке $d_{\text{LMC}} = 18^m 50 \pm 0^m 1$ (у группы Сендиджа она несколько ярче — $d_{\text{LMC}} = 18^m 56$ [126]), что соответствует „длинной” шкале БМО. Таким образом, двойственность оценок H_0 не вытекает из двойственности шкал БМО: если принять для цефеид „короткую” шкалу БМО $d_{\text{LMC}} = 18^m 25$, то H_0 возрастет до ~ 80 км/с/Мпк и разногласие с „длинной” шкалой H_0 увеличится почти вдвое.

Традиционное использование величины d_{LMC} в качестве калибровки при нахождении расстояний по классическим цефеидам дает основание считать расстояние до БМО „краеугольным камнем астрономической шкалы расстояний” (см., например, [47]). Это, во многом, объясняет столь большое внимание к этой величине и жаркие споры вокруг нее. Однако такое отношение к d_{LMC} вряд ли совершенно

оправдано. Ведь для того, чтобы найти по цефеидам расстояние до далекой галактики, достаточно принять локальную калибровку шкалы, а определять расстояние до БМО, в том числе и по цефеидам, в качестве промежуточного шага не обязательно. Величина $d_{\text{ЛМС}}$ в случае цефеид, во многом, служит удобным средством сравнения различных шкал для этих объектов, поэтому калибровка такого типа используется и при внутригалактических измерениях, в частности, в настоящем обзоре при выведении среднего R_0 . Однако это не означает, что определить R_0 по цефеидам нельзя, не найдя прежде величины $d_{\text{ЛМС}}$. Только если принимаемая величина $d_{\text{ЛМС}}$ находится как среднее из результатов *всех* методов, она становится отдельной калибровочной ступенькой для внегалактических шкал цефеид. Так делают группы и Фридман, и Сендиджа, но, заметим, что принятые ими калибровки не противоречат результатам по цефеидам. Кроме того, БМО не является типичной галактикой, к которой применяют шкалу цефеид, ни по типу, ни по химическому составу (калибровочные галактики в [66] на несколько десятых dex более богаты металлами, чем БМО). Поэтому жесткую привязку этой шкалы к истинному значению $d_{\text{ЛМС}}$ вряд ли можно считать бесспорной стратегией.

Величины H_0 и R_0 связаны через калибровку классических цефеид („наилучшее” значение R_0 в данном обзоре согласовано с H_0 , полученными для $d_{\text{ЛМС}} = 18^m50$). Однако эта связь не очень сильная, т.к. обе постоянные лишь частично зависят от этой калибровки: и расстояние до БМО, и R_0 определяются далеко не только по цефеидам. Современные неопределенности расстояния до БМО и калибровки шкалы цефеид примерно равны — $\pm \sim 0^m2$ (стандартная ошибка). Однако для H_0 это дает ошибку $\pm 9\% = 6 \div 7$ км/с/Мпк, а для $\langle R_0 \rangle$ — лишь $\pm 0.8\% = 0.06$ кпк из-за большого числа независимых от калибровки $d_{\text{ЛМС}}$ измерений R_0 .

От шкалы RR-лирид H_0 непосредственно не зависит, но от нее зависит возраст шаровых скоплений, который обычно получался слишком близким к возрасту Вселенной даже для небольших H_0 . Интересно, что новые калибровки по локальным субкарликам ($d_{\text{ЛМС}} = 18^m54$) дают возраст ШС 12.9 ± 2.9 млрд. лет (уровень 96%), что примиряет его с верхней оценкой возраста Вселенной по постоянной Хаббла ($t_0 = H_0^{-1}$): даже $H_0 = 72$ км/с/Мпк [66] дает лишь $t_0 = 13.9$ млрд. лет [47, 67, 117].

В заключение заметим, что не приходится говорить о связи R_0 и параметра замедления q_0 , т.к. последний не зависит от калибровок шкал, а лишь от закона изменения относительных расстояний с красным смещением.

2. Исследования по проблеме R_0 , финансируемые РФФИ

РФФИ поддерживает все направления отечественных исследований, связанные с проблемой R_0 (секция 1.11).

1. Большая часть работ по тематике R_0 в рамках грантов РФФИ посвящено задаче совершенствования шкал расстояний. Эти работы выполнялись группой А. С. Расторгуева (ГАИШ МГУ). В качестве основного инструмента получения калибровок объектов различных типов группа использовала современный, наиболее строгий вариант метода статистических параллаксов, детально разработанный в [25] (гранты 96-02-18491 и 96-15-18491). Метод учитывает движение локального центроида относительно Солнца, дифференциальное вращение, дисперсию скоростей, ошибки лучевых скоростей и собственных движений, изменение ориентации эллипсоида скоростей. Позднее Заболотских и др. [12] (гранты 01-02-06012, 00-02-

17804, 99-02-17842, 01-02-16086) усовершенствовали метод, введя в модель функции распределения остаточной пространственной скорости возмущения от спиральной волны плотности и неопределенность абсолютных звездных величин (расстояний) объектов. Оптимизация параметров, в том числе и поправочного коэффициента к шкале, выполнялась наиболее корректным способом — методом наибольшего правдоподобия. Все работы группы Расторгуева в этом направлении отличает стремление использовать все возможные данные о собственных движениях, а не ограничиваться только каталогом Hipparcos; последнее является обычной практикой.

В [25] метод статистических параллаксов в указанной строгой версии был впервые применен к молодым объектам галактического диска — классическим цефеидам и молодым рассеянными скоплениям. Ранее это было невозможно, т.к. данный метод из-за низкой дисперсии скоростей молодых объектов требует высокоточных собственных движений. В [25] для 270 цефеид были использованы собственные движения из каталогов Hipparcos и TRC, для 117 рассеянных скоплений — абсолютные собственные движения в системе четырехмиллионного каталога (4M), редуцированные в систему Hipparcos. В результате найдено, что шкала расстояний Бердникова и др. (1996) [6] (гранты РФФИ 94-02-04344, 95-02-05276, 94-02-04347) для короткопериодических цефеид (с периодами $P < 9^d$) нуждается в увеличении в среднем на 15–20%, тогда как для цефеид с $P < 9^d$ она согласуется со статистическими параллаксами. Показано, что недооценка светимости короткопериодических цефеид может быть частично связана с наличием в этой группе заметной доли (20–40%) звезд, пульсирующих в первом оберitone, которые до сих пор ошибочно считаются пульсирующими в основном тоне. Этот результат выдвинул на первый план проблему пульсаторов в первом оберitone как возможную причину рассогласования различных калибровок шкал цефеид. По рассеянным скоплениям надежных результатов получить не удалось. Однако был сделан вывод о том, что для согласования статистических параллаксов цефеид и скоплений достаточно увеличить обе шкалы на 0^m12 – 0^m15 . При этом получается величина $d_{\text{LMC}} \sim 18^m4$, что противоречит выводам группы М. У. Фиста (см. [111]) о необходимости увеличения шкалы цефеид, соответствующего $d_{\text{LMC}} = 18^m7$. В целом работа [25] дает важные аргументы в пользу критического отношения к результатам группы Фиста.

Тот же строгий метод статистических параллаксов был применен к данным о переменных типа RR Лиры в работах Дамбиса и Расторгуева (2001) [11] (гранты РФФИ 98-02-16107, 99-02-17842, 00-02-17804) и Дамбиса (2003) [52] (гранты 01-02-06012, 00-02-17804, 99-02-17842, 01-02-16086). В первом исследовании использованы данные о 262 RR-лиридах с собственными движениями из каталогов Hipparcos, PRM, NPM1 и 4M с редуциацией в систему Hipparcos. Во втором привлечены данные о 182 лиридах с собственными движениями из еще большего набора каталогов — Hipparcos, Tycho-2, SPM, UCAC, NPM1 и 4M,— также с редуциацией в систему Hipparcos; впервые калибровалась шкала для фильтра K , до этого тестировались только шкалы для фильтра V . Заметим, что непосредственная калибровка K -шкалы очень важна, т.к. использование ИК-наблюдений значительно менее проблемно с точки зрения систематических ошибок шкалы. Обе работы подтвердили необходимость сокращения шкалы для локальных RR-лирид поля, результаты находятся ближе к „слабому” краю интервала современных калибровок этих объектов [111]: $M_V(\text{RR}) = (0.76 \pm 0.12) + (0.26 \pm 0.26)([\text{Fe}/\text{H}] + 1.6)$ в работе [11] и $M_V(\text{RR}) = 1.04 + 0.14[\text{Fe}/\text{H}] \pm 0.11$ в работе [52] (на $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.3$

$M_V(\text{RR}) = 0.83 \pm 0.14$ и 0.86 ± 0.11 , соответственно).

Часто вместо строгого метода статистических параллаксов используют его упрощенный вариант — согласование оценок постоянной Оорта A , полученных по лучевым скоростям и собственным движениям; в частности, его применяла для классических цефеид группа Фиста (см. [111]). Заболотских и др. [12] (гранты 01-02-06012, 00-02-17804, 99-02-17842, 01-02-16086) сравнили результаты усовершенствованного и упрощенного методов статистических параллаксов для одних и тех же данных о классических цефеидах, рассеянных звездных скоплениях и красных гигантах. Оказалось, что методы дают систематически различные поправки к шкалам: сравнение первых производных угловой скорости приводит к более коротким шкалам (на 12–14%), чем строгий метод статистических параллаксов. Причина этого эффекта остается неясной — численное моделирование в [12] существенных смещений ни для одного из методов не выявило. Очевидно, причина кроется в неадекватности каких-то модельных предположений для одного или обоих методов, возможно, — в представлении некруговых движений в модели. Выбор между методами (и шкалами) в [12] не был сделан. Это фиксирует современную неопределенность нуль-пунктов рассмотренных шкал на уровне $\gtrsim 10\%$, близком к значениям систематических ошибок калибровок σ_{cal} в табл. 7, принятым в результате обобщения всех собранных данных.

Другой важный результат работы [12] — согласование шкалы [41] СО-облаков (ассоциированных с областями II и отражательными туманностями), которые часто используются при кинематическом оценивании R_0 , со шкалой классических цефеид и рассеянных скоплений способом сравнения первых производных угловой скорости. Оценки коэффициента, на который нужно поделить расстояния до СО-облаков, составляют 0.95 ± 0.07 для $R_0 = 7.5$ кпк и 0.90 ± 0.08 для $R_0 = 8.5$ кпк. Эти поправки свидетельствуют против сокращения шкал до облаков несмотря на сокращение расстояний до гигантов и сверхгигантов. Однако поправки не отличаются значимо от единицы, что не дает и твердых оснований для увеличения шкалы СО-облаков.

Сходный подход использования двух методов статистических параллаксов — строгого и упрощенного — использовался Дамбисом и др. (2001) [10] (гранты РФФИ 99-02-17842, 98-02-16107, 00-02-17804) при нахождении поправки к расстояниям [37] до ОВ-ассоциаций. В согласии с прямым сравнением с тригонометрическими параллаксами Hipparcos найдено, что эти расстояния завышены на 10–20%. Здесь также упрощенный метод приводит к большему сокращению шкалы (на $24\% \pm 10\%$), чем строгий (на $11\% \pm 6\%$).

Тема неверной классификация классических цефеид была продолжена в статье Заболотских и др. (2004) [146] в рамках грантов РФФИ 02-02-16677 и 03-02-06588. В статье проверено предположение о том, что причина укороченности расстояний по шкале Бердникова и др. (1996) [6] лежит в ошибочной классификации цефеид, к которым эта шкала применялась. В работе для более надежной классификации цефеид использованы современные подходы нейрокомпьютерной техники. В результате были выявлены галактические цефеиды с неверной классификацией, но их число оказалось недостаточным, чтобы объяснить расхождение шкалы Бердникова и др. (1996) с другими шкалами. Сделан вывод о необходимости анализа мод пульсаций калибровочных цефеид в скоплениях, привлеченных в [6].

Глушкова и др. (1998) [72] (гранты РФФИ 95-02-05276, 96-02-18491, 96-02-

18239) предложили использовать в качестве *новых опорных объектов* красные сверхгиганты. Возможно, это — перспективные ОО. Расстояния до них можно определить по ИК-фотометрии с внутренней точностью $\sim 0^m.2$, а гамма-скорости — с ошибкой 1–3 км/с.

2. Другое направление по тематике R_0 , поддерживаемое РФФИ, — работы по *совершенствованию собственно методов определения R_0* . Никифоров (1999а,б) [21, 22] (гранты 96-02-19636, 96-02-19658) разработал, протестировал при помощи численного моделирования и применил эмпирический способ построения оптимизации сглаженности модельного закона вращения, устраняющий соответствующие систематические ошибки R_0 . Включающая такую оптимизацию обобщенная процедура оценивания R_0 была сформулирована для произвольной однородной плоской подсистемы опорных объектов. Эта работа стала первой в классе DI_1 кинематических способов — до этого проблема неадекватности модельного закона вращения при внутренней оптимизации игнорировалась (см. секцию 1.4).

В работах Никифорова (1999в, 2000) [23, 96, 97] (грант 96-02-19636) на базе того же алгоритма оптимизации сглаженности модельного закона вращения впервые были разработаны, протестированы и применены два метода учета различия между законами вращения подсистемы опорных объектов и подсистемы Н I при внешней оптимизации — в классе E кинематических методов определения R_0 . В предложенных методах кинематические модели допускают постоянный сдвиг скорости вращения одной подсистемы ОО относительно подсистемы Н I, что позволяет в целом устранить систематическое искажение оценки R_0 за счет этого эффекта.

3. *Получение оценок R_0 по новым для этой задачи базам данных* — еще одно направление исследований в рамках проектов, поддержанных РФФИ. Во всех этих работах найдены относительные оценки R_0 кинематическими методами. Глушкова и др. (1998) [72] (гранты РФФИ 95-02-05276, 96-02-18491, 96-02-18239) привлекли новые данные для комбинированной выборки 700 опорных объектов населения I типа. В работах Никифорова (1999в, 2000) [22, 96, 97] (грант 96-02-19636) новые методы классов DI_1 и DE были применены к новым данным о молекулярных облаках [41], которые ранее не использовались для оценивания R_0 . Полученные результаты позволили объяснить всю совокупность противоречивых оценок R_0 по ОО этого типа: смещенные значения R_0 в некоторых работах обусловлены различием законов вращения ОО и Н I, а также использованием излишне гладкой модели вращения. Герасименко (2004) [7] (грант РФФИ 00-02-16217) применила методы Уивера и Фоккера к новой оригинальным данным — однородному каталогу параметров рассеянных скоплений [86] с расстояниями, скорректированными по параллаксам Hipparcos. К сожалению, метод Уивера принадлежит к не очень надежному классу I_2 (см. секцию 1.4), а в методе Фоккера [65] используется нестандартная оптимизация: минимизируется не сумма квадратов остаточных скоростей (невязок уравнений), а средневзвешенный квадрат этих скоростей с весами, представляющими вероятность случайным образом получить такую же или большую по абсолютной величине невязку. Чтобы найти эту вероятность, невязки сравнивают с масштабным параметром, который подбирается так, чтобы минимум средневзвешенного квадрата невязки как функции R_0 получился резким. Строгой процедуры выбора указанного параметра не сформулировано. Отсутствие теоретического обоснования метода фактически признавал и сам его автор, указывая, что предложенный выбор весов является „интуитивным”, а „главное оправдание” метода состоит в „эмпирическом факте”, что при некото-

ром масштабном параметре минимум становится резким [65]. Возможно, оба метода устраняют влияние объектов с большими пекулярными скоростями и ошибками в расстояниях, но эффективность таких оценок R_0 требует подтверждения численным моделированием.

4. Новое направление, поддержанное РФФИ,— *обобщение результатов по проблеме R_0 как отдельная задача*. Работы по этой теме сейчас идут в рамках проекта 04-02-17447-а (И. И. Никифоров, НИАИ СПбГУ). Собраны данные по проблеме R_0 , создана новая классификация видов измерений R_0 с учетом специфики источников ошибок, разработан и реализован алгоритм вычисления „наилучшей” величины R_0 . Часть этих результатов приведена в настоящем обзоре.

Воздействие работ, финансируемых РФФИ, на развитие российских исследований по проблеме R_0 является определяющим.

3. Проблематика проектов РФФИ и направления мировых исследований, связанных с определением R_0

Из материалов разделов 1 и 2 очевидно, что тематика исследований по проблеме R_0 в рамках проектов РФФИ соответствует большинству актуальных направлений в этой области. К этим направлениям относится: совершенствование традиционных и создание новых методов определения опорных расстояний и собственно методов определения R_0 из анализа ОР и других данных; использование для определения R_0 новых, более обширных и надежных, баз данных. Нет лишь работ по абсолютному оцениванию R_0 по причинам, указанным во разделе 2. С другой стороны, зарубежными исследователями в последнее десятилетие уделялось мало внимания совершенствованию методов определения R_0 и задаче обобщения различных измерений R_0 , во многом, из-за увлеченности более общей проблемой определения расстояний. Можно сказать, что поддержанные РФФИ работы в этих направлениях восполняют упущение. Таким образом, актуальность проектов РФФИ в данной области, является несомненной; уровень работ близок к мировому, а в некоторых отношениях и превосходит его.

Гранты РФФИ получают все российские научные группы, чьи работы связаны с проблемой R_0 . В течение некоторого времени ощущался дефицит внимания к исследованиям немосковских групп, но в последние годы дисбаланс уменьшается.

Литература

1. *Абрамян Г.В.* // Астрофизика. 2004. Т. 47. С. 25.
2. *Бархатова К.А., Блюм М.Э.* // Астрономо-геодезические исследования. Свердловск: Уральский гос. ун-т, 1986. С. 4.
3. *Бархатова К.А., Герасименко Т.П., Блюм М.Э., Люханов К.Б.* // Бюл. Абастуманск. астрофиз. обсерв. 1985. N 59. С. 169.
4. *Бархатова К.А., Локтин А.В.* // Астрон. цирк. 1981. N 1164.
5. *Беликов В.Т., Сыровой В.В.* // Астрон. цирк. 1977. N 968. С. 5.
6. *Бердников Л.Н., Возякова О.В., Дамбис А.К.* // Письма в „Астрон. журн.” 1996. Т. 22. С. 936.

7. Герасименко Т.П. // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 124.
8. Давыденкова М.С. Конус избегания в системе шаровых скоплений и расстояние до центра Галактики. Дипломная работа. СПб: СПбГУ, 2001
9. Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С. // Письма в „Астрон. журн.” 1995. Т. 21. С. 331.
10. Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С. // Письма в „Астрон. журн.” 2001. Т. 27. С. 68.
11. Дамбис А.К., Расторгуев А.С. // Письма в „Астрон. журн.” 2001. Т. 27. С. 132.
12. Заболотских М.В., Расторгуев А.С., Дамбис А.К., // Письма в „Астрон. журн.” 2002, Т. 28. С. 516.
13. Колесник И.Г., Юревич Л.В. // Астрофизика. 1983. Т. 19. С. 761.
14. Колесник И.Г., Юревич Л.В. // Кинематика и физика неб. тел. 1987. Т. 3. N 3. С. 72.
15. Комберг Б.В. // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 771.
16. Локтин А.В. // Астрон. журн. 1979. Т. 56. С. 1188.
17. Локтин А.В., Бешенов Г.В. // Письма в „Астрон. журн.” 2001а. Т. 27. С. 450.
18. Локтин А.В., Бешенов Г.В. // Астрон. журн. 2001б. Т. 27. С. 819.
19. Мальшева Т.Г., Пшеничникова Л.А. // Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды. Свердловск: Уральский гос. ун-т, 1990. С. 162.
20. Никифоров И.И. // Вестник ЛГУ. 1990. Сер. 1. Вып. 4. С. 108.
21. Никифоров И.И. // Астрофизика. 1999а. Т. 42. С. 399.
22. Никифоров И.И. // Астрон. журн. 1999б. Т. 76. С. 403.
23. Никифоров И.И. Пространственно-кинематическое и динамическое моделирование Галактики. Дис. ... кандидата физ.-мат. наук. СПб.: СПбГУ, 2003. 197 с., <http://www.astro.spbu.ru/astro/publications/disser/NikiforovII/>
24. Никифоров И.И., Петровская И.В. // Астрон. журн. 1994. Т. 71. С. 725.
25. Расторгуев А.С., Глушкова Е.В., Дамбис А.К., Заболотских М.В. // Письма в „Астрон. журн.” 1999. Т. 25. С. 689.
26. Расторгуев А.С., Павловская Е.Д., Дурлевич О.В., Филиппова А.А. // Письма в „Астрон. журн.” 1994. Т. 20. С. 688.
27. Сачков М.Е.. // Письма в „Астрон. журн.” 2002. Т. 28. С. 653.
28. Сурдин В.Г. // Астрон. журн. 1980. Т. 57. С. 959.
29. Тихонов Н.А., Галазутдинова О.А. // Астрофизика. 2002. Т. 45. С. 311.
30. Юревич Л.В. // Астрофизика. 1985. Т. 23. С. 265.
31. Alves D.R. // Astrophys. J. 2000. V. 539. P. 732.
32. Arp H.C. // Galactic Structure / Eds Blaauw A., Schmidt M. Chicago: University of Chicago Press, 1965. Ch. 19. P. 401.

33. *Baade W.* // Publ. Obs. Univ. Mich. 1951. V. 10. P. 7.
34. *Balona L.A., Feast M.W.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1974. V. 167. P. 621.
35. *Balona L.A., Shobbrook R.R.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1984. V. 211. P. 375.
36. *Binney J., Merrifield M.* Galactic Astronomy. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1998. 13+796 p.
37. *Blaha C., Humphreys R.M.* // Astron. J. 1989. V. 98. P. 1598.
38. *Blanco V.M., Blanco B.M.* // Mem. Soc. Astron. Ital. 1985. V. 56. P. 15.
39. *Blitz L.* // Physics of the Gaseous and Stellar Disks of the Galaxy / Ed. King I.R. ASP Conf. Series. 1994. V. 66. P. 1.
40. *Blitz L., Brand J.* // The outer Galaxy / Eds Blitz L., Lockman F.J. Berlin: Springer-Verlag, 1988. P. 73.
41. *Brand J., Blitz L.* // Astron. and Astrophys. 1993. V. 275. P. 67.
42. *Byl J., Ovenden M.W.* // Astrophys. J. 1978. V. 225. P. 496.
43. *Caldwell J.A.R., Avruch I.M., Metzger M.R., Schechter P.L., Keane M.J.* // Variable Stars and Galaxies / Ed. Warner B. ASP Conf. Series. 1992. V. 30. P. 111.
44. *Caldwell J.A.R., Coulson I.M.* // Astron. J. 1987. V. 93. P. 1090.
45. *Camm G.L.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1938. V. 99. P. 71.
46. *Carney B.W., Fulbright J.P., Terndrup D.M., Suntzeff N.B., Walker A.R.* // Astron. J. 1995. V. 110. P. 1674.
47. *Carretta E., Gratton R.G., Clementini G., Fusi Pecci F.* // Astrophys. J. 2000. V. 533. P. 215.
48. *Clube S.V.M., Watson F.G.* // Observatory. 1978. V. 98. P. 124.
49. *Cohen R.J., Shepherd M., Gayrd M.J., West M.E.* // The Center of the Galaxy. IAU Symp. N 136 / Ed. Morris M. Dordrecht etc., 1989. P. 51.
50. *Crampton D., Bernard D., Harris B.L., Thackeray A.D.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1976. V. 176. P. 683.
51. *Cruz-González C.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1974. V. 41. P. 168.
52. *Dambis A.K.* // Galactic and Stellar Dynamics / Eds Boily C., Patsis P., Portegies Zwart S., Spurzem R., Theis C. EAS Publ. Series. 2003. V. 10. P. 55.
53. *de Vaucouleurs G.* // Astrophys. J. 1983. V. 268. P. 451.
54. *de Vaucouleurs G.* // Astrophys. J. 1983. V. 268. P. 468.
55. *de Vaucouleurs G., Buta R.* // Astron. J. 1978. V. 83. P. 1383.
56. *Dopita M.A., Jacoby G.H., Vassiliadis E.* // Astrophys. J. 1992. V. 389. P. 27.
57. *Ebisuzaki T., Hanawa T., Sugimoto D.* // Publ. Astron. Soc. Japan. 1984. V. 36. P. 551.
58. *Eisenhauer F., Schödel R., Genzel R., Ott T., Tecza M., Abuter R., Eckart A., Alexander T.* // Astrophys. J. 2003. V. 597. P. L121.

59. *Feast M.W.* // The Galaxy. Proc. of a NATO Advanced Study Institute, held at Cambridge, UK, 4–15 August 1986 / Eds Gilmore G., Carswell B. Dordrecht: Reidel D., 1987. P. 1.
60. *Feast M.W., Shuttleworth M.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1965. V. 130. P. 245.
61. *Feast M., Whitelock P., Menzies J.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2002. V. 329. P. L7.
62. *Fernley J.A., Longmore A.J., Jameson R.F., Watson F.G., Wesselink T.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1987. V. 226. P. 927.
63. *Fich M., Blitz L., Stark A.A.* // Astrophys. J. 1989. V. 342. P. 272.
64. *Fich M., Treffers R.R., Dahl G.P.* // Astron. J. 1990. V. 99. P. 622.
65. *Fokker A.D.* // Bull. Astron. Inst. Netherl. 1968. V. 20. P. 29.
66. *Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K., Ferrarese L., Kelson D.D., Sakai S., Mould J.R., Kennicutt R.C., Jr., Ford H.C., Graham J.A., Huchra J.P., Hughes S.M.G., Illingworth G.D., Macri L.M., Stetson P.B.* // Astrophys. J. 2001. V. 553. P. 47.
67. *Freedman W.L., Turner M.S.* // Reviews of Modern Physics. 2003. V. 75. P. 1433.
68. *Frenk C.S., White S.D.M.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1982. V. 198. P. 173.
69. *Genzel R., Downes D., Schneps M.H., Reid M.J., Moran J.M., Kogan L.R., Kostenko V.I., Matveyenko L.I., Rönnäng B.* // Astrophys. J. 1981. V. 247. P. 1039.
70. *Genzel R., Pichon C., Eckart A., Gerhard O.E., Ott T.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2000. V. 317. P. 348.
71. *Glass I.S., Feast M.W.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1982. V. 198. P. 199.
72. *Glushkova E.V., Dambis A.K., Mel'nik A.M., Rastorguev A.S.* // Astron. and Astrophys. 1998. V. 329. P. 514.
73. *Gould A., Stutz A., Frogel J.A.* // Astrophys. J. 2001. V. 547. P. 590.
74. *Greenhill L.J., Henkel C., Becker R., Wilson T.L., Wouterloot J.G.A.* // Astron. and Astrophys. 1995. V. 304. P. 21.
75. *Gwinn C.R., Moran J.M., Reid M.J.* // Astrophys. J. 1992. V. 393. P. 149.
76. *Gwinn C.R., Moran J.M., Reid M.J., Schneps M.H., Genzel R., Downes D.* // The Center of the Galaxy. IAU Symp. N 136 / Ed. Morris M. Dordrecht etc., 1989. P. 47.
77. *Harris W.E.* // Astron. J. 1976. V. 81. P. 1095.
78. *Harris W.E.* // Star Clusters. IAU Symp. N 85 / Ed. Hesser J.E. Dordrecht: Reidel D., 1980. P. 81.
79. *Herman J., Baud B., Habing H.J., Winnberg A.* // Astron. and Astrophys. 1985. V. 143. P. 122.
80. *Honma M., Sofue Y.* // Publ. Astron. Soc. Japan. 1996. V. 48. P. L103.
81. *Huterer D., Sasselov D.D., Schechter P.L.* // Astron. J. 1995. V. 110. P. 2705.
82. *Karachentsev I.D., Tikhonov N.A.* // Astron. and Astrophys. 1994. V. 286. P. 718.
83. *Kerr F.J., Lynden-Bell D.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1986. V. 221. P. 1023.
84. *Knapp G.R.* // Kinematics, Dynamics and Structure of the Milky Way. Workshop on “The Milky Way” / Ed. Shuter W.L.H. Dordrecht: Reidel D., 1983. P. 233.

85. *Layden A.C., Hanson R.B., Hawley S.L., Klemola A.R., Hanley C.J.* // *Astron. J.* 1996. V. 112. P. 2110.
86. *Loktin A.V., Gerasimenko T.P., Malisheva L.K.* // *Astron. and Astrophys. Trans.* 2001. V. 20. P. 605.
87. *Maciel W.J.* // *Astrophys. and Space Sci.* 1993. V. 206. P. 285.
88. *Martin P.G.* // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1971. V. 153. P. 251.
89. *McNamara D.H.* // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 1997. V. 109. P. 1221.
90. *McNamara D.H., Madsen J.B., Barnes J., Ericksen B.F.* // *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2000. V. 112. P. 202.
91. *Merrifield M.R.* // *Astron. J.* 1992. V. 103. P. 1552.
92. *Metzger M.R., Caldwell J.A.R., Schechter P.L.* // *Astron. J.* 1998. V. 115. P. 635.
93. *Molnar L.M.* Ph. D. Thesis. Harvard University, 1985.
94. *Moran J.M.* // *Sub Arcsecond Radio Astronomy* / Eds Davis R., Booth R.S. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. P. 62.
95. *Morgan S.M., Simet M., Borgenquast S.* // *Acta Astronomica.* 1998. V. 48. P. 509.
96. *Nikiforov I.I.* // *Кинематика и физика неб. тел. Приложение.* 1999в. N 2. С. 34.
97. *Nikiforov I.I.* // *Small Galaxy Groups* / Eds Valtonen M.J., Flynn C. ASP Conf. Series. 2000. V. 209. P. 403.
98. *Nikiforov I.I., Bobrova (Mel'nichnikova) A.Yu.* // *Кинематика и физика неб. тел. Приложение.* 1999. N 2. С. 29.
99. *Olling R.P., Merrifield M.R.* // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1998. V. 297. P. 943.
100. *Oort J.H., Plaut L.* // *Astron. and Astrophys.* 1975. V. 41. P. 71.
101. *Ovenden M.W., Byl J.* // *Kinematics, Dynamics and Structure of the Milky Way. Workshop on "The Milky Way"* / Ed. Shuter W.L.H. Dordrecht: Reidel D., 1983. P. 59.
102. *Paczyński B., Stanek K.Z.* // *Astrophys. J.* 1998. V. 494. P. L219.
103. *Panagia N.* // *New Views of the Magellanic Clouds. IAU Symp. N 190* / Eds Chu Y.-H., Suntzeff N., Hesser J., Bohlender D. Dordrecht: Kluwer, 1999. P. 549.
104. *Piatti A.E., Geisler D., Bica E., Claria J.J., Santos J.F.C., Jr., Sarajedini A., Dottori H.* // *Astron. J.* 1999. V. 118. P. 2865.
105. *Pont F., Mayor M., Burki G.* // *Astron. and Astrophys.* 1994. V. 285. P. 415.
106. *Pottasch S.R.* // *Astron. and Astrophys.* 1990. V. 236. P. 231.
107. *Quiroga R.J.* // *Astron. and Astrophys.* 1980. V. 92. P. 186.
108. *Racine R., Harris W. E.* // *Astron. J.* 1989. V. 98. P. 1609.
109. *Rees R.F.* // *Proper Motions and Galactic Astronomy* / Ed. Humphreys R.M. ASP Conf. Series. 1997. V. 127. P. 109.
110. *Reid I.N.* // *Astron. J.* 1998. V. 115. P. 204.

111. *Reid I.N.* // Annual Rev. Astron. and Astrophys. 1999. V. 37. P. 191.
112. *Reid M.J.* // The Center of the Galaxy. IAU Symp. N 136 / Ed. Morris M. Dordrecht etc., 1989. P. 37.
113. *Reid M.J.* // Annual Rev. Astron. and Astrophys. 1993. V. 31. P. 345.
114. *Reid M.J., Schneps M.H., Moran J.M., Gwinn C.R., Genzel R., Downes D., Rönnäng B.* // Astrophys. J. 1988. V. 330. P. 809.
115. *Rohlf K., Chini R., Wink J.E., Böhme R.* // Astron. and Astrophys. 1986. V. 158. P. 181.
116. *Romaniello M., Salaris M., Cassisi S., Panagia N.* // Astrophys. J. 2000. V. 530. P. 738.
117. *Salaris M., Cassisi S.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1998. V. 298. P. 166.
118. *Salaris M., Percival S., Girardi L.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2003. V. 345. P. 1030.
119. *Sandage A.* 2004, in press (astro-ph 0405409).
120. *Sandage A., Tammann G.A., Reindl B.* // Astron. and Astrophys. 2004, in press (astro-ph 0402424).
121. *Sasaki T., Ishizawa T.* // Astron. and Astrophys. 1978. V. 69. P. 381.
122. *Shapley H.* // Astrophys. J. 1918. V. 48. P. 154.
123. *Stanek K.Z., Garnavich P.M.* // Astrophys. J. 1998. V. 503. P. L141.
124. *Stanek K.Z., Kaluzny J., Wysocka A., Thompson I.* // Acta Astronomica. 2000. V. 50. P. 191.
125. *Surdin V.G.* // Astron. and Astrophys. Trans. 1999. V. 18. P. 367.
126. *Tammann G.A., Reindl B., Thim F., Saha A., Sandage A.* // A New Era in Cosmology / Eds Metcalfe N., Shanks T. ASP Conf. Series. 2002. V. 283. P. 258.
127. *Tammann G.A., Sandage A., Saha A.* // A decade of Hubble Space Telescope science. Proc. of the Space Telescope Science Institute Symp., held in Baltimore, MD, USA, April 11–14, 2000, / Eds Livio M., Noll K., Stiavelli M. Space Telescope Science Institute symposium series. 2003. V. 283. P. 222.
128. *Tello C.* // Cosmology and Large-Scale Structure in the Universe / Ed. de Carvalho R.R. ASP Conf. Series. 1992. V. 24. P. 167.
129. *Tello C.* // Astron. J. 1994. V. 107. P. 1381.
130. *Toomre A.* // Quart. J. Roy. Astron. Soc. 1972. V. 13. P. 241.
131. *Trumpler R.J., Weaver H.F.* Statistical Astronomy, New York: Dover Publications, 1953. C. 561.
132. *Twarog B.A., Anthony-Twarog B., Bricker A.R.* // Astron. J. 1999. V. 117. P. 1816.
133. *Udalski A.* // Acta Astronomica. 1998. V. 48. P. 113.
134. *Udalski A.* // Astrophys. J. 2000. V. 531. P. L25.
135. *Van de Steene G.C., Zijlstra A.A.* // Astron. and Astrophys. 1995. V. 293. P. 541.
136. *van den Bergh S.* // Astrophys. J. 1974. V. 188. P. L9.
137. *van den Bergh S., Herbst E.* // Astron. J. 1974. V. 79. P. 603.

138. *van Leeuwen F., Feast M.W., Whitelock P.A., Yudin B.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1997. V. 287. P. 955.
139. *Walker A.R.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1985. V. 217. P. 13.
140. *Walker A.R., Mack P.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1986. V. 220. P. 69.
141. *Walker A.R., Terndrup D.M.* // Astrophys. J. 1991. V. 378. P. 119.
142. *Weaver H.* // Astron. J. 1954. V. 59. P. 375.
143. *Whitelock P.A., Feast M.W.* // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2000. V. 319. P. 759.
144. *Woolley, R. v. d. R.* // J. Brit. Astron. Assoc. 1963. V. 73. P. 131.
145. *Woltjer L.* // Astron. and Astrophys. 1975. V. 42. P. 109.
146. *Zabolotskikh M.V., Rastorguev A.S., Egorov I.E.* // Order and Chaos in Stellar and Planetary Systems. / Eds Byrd G.G., Kholshchevnikov K.V., Mylläri A.A., Nikiforov I.I., Orlov V.V. ASP Conf. Series. 2004. V. 316. P. 199.