

## ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ОБЪЕКТОВ ОБЗОРА *PAN-STARRS1* ПО ДАННЫМ ОБЗОРА *WISE*

© 2022 г. Р.А. Буренин\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 14 декабря 2021 г.

В работе обсуждается методика и результаты фотометрических измерений по данным инфракрасного обзора *WISE* для всех объектов обзора *Pan-STARRS1* в предположении о том, что координаты объектов известны («принудительная» фотометрия). Фотометрия проводилась с учетом полной модели функции размытия точки (ФРТ) и уточненной модели фона в обзоре *WISE*. Получены измерения потоков или верхние пределы на поток в полосах 3.4 мкм и 4.6 мкм для более чем трех миллиардов оптических объектов на северном небе, на склонениях  $\delta > -30^\circ$ . Эти измерения будут использованы для отождествления скоплений галактик, активных ядер галактик и квазаров в обзорах всего неба телескопов *eROSITA* и *ART-XC* им. М.Н. Павлинского на борту космической обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ).

*Ключевые слова:* фотометрия, обзоры неба

### ВВЕДЕНИЕ

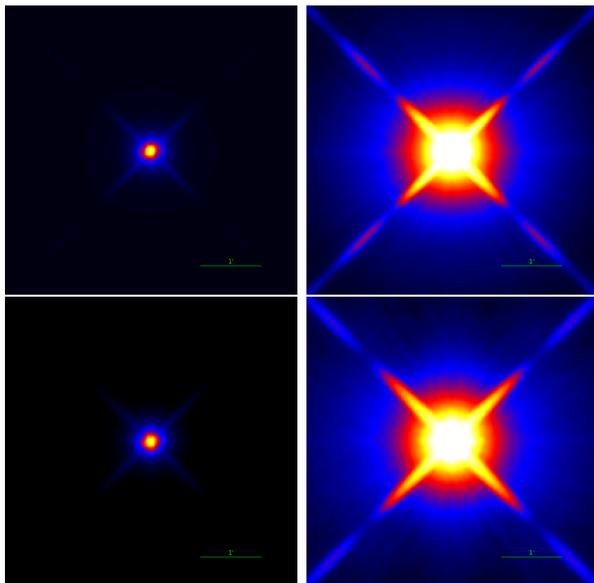
Обзор всего неба в инфракрасном (ИК) диапазоне при помощи телескопа на борту спутника *WISE* (*Wide-field Infrared Survey Explorer*, Райт и др., 2010) в настоящее время является наиболее чувствительным обзором неба в диапазоне 3–20 мкм и имеет очень большое значение для самых разных астрофизических исследований, в частности, для исследования галактик и квазаров на высоких красных смещениях. Обзор *WISE* был начат в январе 2010 г, наблюдения проводились в четырех полосах — 3.4 мкм (*W1*), 4.6 мкм (*W2*), 12 мкм (*W3*) и 22 мкм (*W4*). Основная часть обзора была завершена в конце 2010 г., когда на борту закончился хладагент (твердый водород) и стало невозможно проводить наблюдения в полосах *W3* и *W4*. По этим данным были выпущены сборки обзора и каталоги источников (Кутри и др., 2021).

После примерно трех лет пребывания в выключенном состоянии, наблюдения в полосах *W1* и *W2* были возобновлены и продолжаются до настоящего времени. Основной целью этих наблюдений является поиск комет, астероидов и малых планет (*NEOWISE Reactivation*, Мэйнцер и др.,

2014). По этим данным были также составлены глубокие карты обзора всего неба (Мейснер и др., 2017, 2021) и получены фотометрические измерения для источников с известными координатами, т.е. «принудительная» фотометрия, для всех объектов Слоановского обзора (Ланг и др., 2016), а также обзора *DESI LIS* (Дей и др., 2019). Кроме того, по этим данным были получены каталоги источников, обнаруженных в обзоре *WISE* (Шлафли и др., 2019; Марокко и др., 2021).

В этой статье представлены результаты принудительной фотометрии по данным обзора *WISE* для всех объектов *Pan-STARRS1* (Чамберс и др., 2016). Получены измерения потоков или верхние пределы на поток в полосах *W1* и *W2* для более чем трех миллиардов оптических объектов на северном небе, на склонениях  $\delta > -30^\circ$ . По сравнению со Слоановским обзором и обзором *DESI LIS*, обзор *Pan-STARRS1* покрывает заметно большую часть неба. По сравнению с измерениями в каталогах источников, обнаруженных в обзоре *WISE*, наши измерения содержат, в том числе, измерения с низкой значимостью и верхние пределы на ИК поток для всех оптических источников. Кроме того, угловое разрешение в обзоре *WISE* (около 6") является уже недостаточно высоким для обзора такой большой глу-

\*Электронный адрес: rodion@hea.iki.rssi.ru



**Рис. 1.** Изображение функции размытия точки (ФРТ) в обзоре спутника *WISE* в полосе *W1* (вверху) и в полосе *W2* (внизу). На изображениях справа и слева показана одна и та же ФРТ в разных цветовых масштабах для того, чтобы можно было увидеть весь динамический диапазон измерений ФРТ, который составляет величину порядка  $10^6$ .

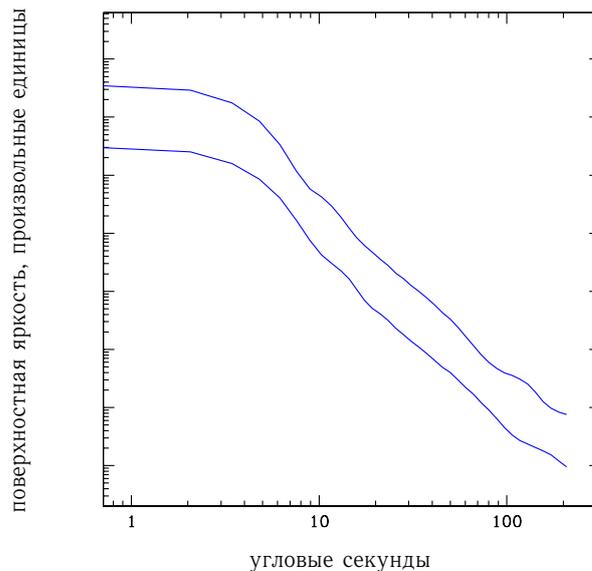
бины — значительная доля источников оказываются расположенными слишком близко. В наших измерениях ошибки должны быть ниже из-за отсутствия ошибок центрирования, а также из-за того, что должны быть ниже ошибки связанные со смешиванием источников (эффект путаницы).

Предполагается, что эти измерения будут использованы для отождествления далеких скоплений галактик, активных ядер галактик и квазаров в обзорах всего неба телескопов *eROSITA* и *ART-XC* им. М.Н. Павлинского на борту космической обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ) (Предел и др., 2021; Павлинский и др., 2021; Сюняев и др., 2021).

### ДАННЫЕ ОБЗОРА *WISE*

В нашей работе были использованы общедоступные сборки *unWISE*<sup>1</sup> (Ланг, 2014; Мейснер и др., 2017), использовались последние версии сборок, с семилетней полной экспозицией неба (*NeoWISE-R 7*, Мейснер и др., 2021). Сборки состоят из перекрывающихся площадок размером около  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ , размер области перекрытия составляет около  $3'$ . Для наших измерений использовались изображения неба в полосах *W1* и *W2*, с замаскированными дефектами, транзи-

<sup>1</sup><http://unwise.me/>



**Рис. 2.** Усредненные радиальные профили ФРТ в обзоре спутника *WISE* в полосах *W1*, *W2*.

ентами, следами спутников и т.п., а также соответствующие карты стандартного отклонения. Размер изображений составляет  $2048 \times 2048$  элементов, угловой масштаб —  $2''.75$ . Астрометрическая и фотометрическая калибровка изображений выполняется в стандартном конвейере обработки данных проекта *WISE* и применяется к данным, на основе которых составлены сборки *unWISE*.

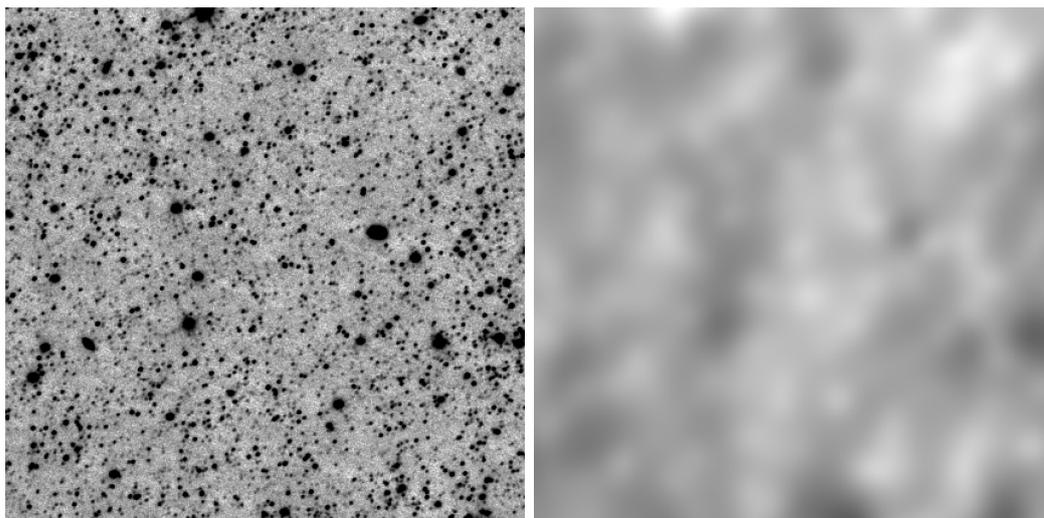
### ДАННЫЕ ОБЗОРА *PAN-STARRS1*

Данные обзора *Pan-STARRS1*<sup>2</sup> (Чамберс и др., 2016) были скачаны из архива *MAST*<sup>3</sup> в течение лета и осени 2019 г. Загрузка осуществлялась путем отбора данных на площадках обзора *WISE*, из таблицы *StackObjectView*, см. подробнее документацию архива данных проекта *Pan-STARRS1*<sup>4</sup>. Таким образом были получены данные о координатах объектов, результаты фотометрических измерений в виде различных величин — полученных подгонкой функции размытия точки (ФРТ), в постоянной апертуре, в адаптивной апертуре по методу Крона (Крон, 1980), а также различные флаги качества фотометрических измерений.

<sup>2</sup><https://panstarrs.stsci.edu/>

<sup>3</sup><https://mastweb.stsci.edu/mcasjobs/>

<sup>4</sup><https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS>



**Рис. 3.** Пример изображения сборки *unWISE* в полосе *W1* (слева) и модели фона, построенной по этим данным (справа). Размер поля составляет около  $20' \times 20'$ .

### ПРИНУДИТЕЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЯ ПО ДАННЫМ ОБЗОРА *WISE*

Для всех объектов обзора *Pan-STARRS1* были получены измерения потоков в полосах *W1* и *W2* в предположении о том, что положения источников не меняются и определены их координатами в обзоре *Pan-STARRS1*, т.е. для всех этих объектов была получена «принудительная» фотометрия по данным обзора *WISE*.

Астрометрическая калибровка как обзора *Pan-STARRS1* (Мэгние и др., 2020), так и обзора *2MASS* (Кутри и др., 2013), была выполнена относительно обзора *2MASS* (Скрутски и др., 2006). Основную часть данных обзора *Pan-STARRS1* составляет обзор  $3\pi$  (Чамберс и др., 2016), наблюдения для этого обзора проводились с 2009 по 2014 г. Обзор *WISE* был начат также в 2009 г и продолжается по настоящее время, с перерывом на 33 месяца после февраля 2011 г. Данные в сборках всего неба обзора *WISE* с семилетней полной экспозицией неба (*NeoWISE-R7*), которые используются в нашей работе, были получены путем усреднения всех данных обзора *WISE* имеющихся в наличии в декабре 2019 г (Мейснер и др., 2021).

Учитывая то, что астрометрическая калибровка обоих обзоров основана на данных обзора *2MASS*, оба обзора выполнены в близкую эпоху, а также то, что угловое разрешение телескопа *WISE* составляет величину около  $5''$ , фотометрические измерения с большими ошибками будут получены только для объектов, имеющих собственное движение больше нескольких

сотен миллисекунд в год. Поэтому для подавляющего большинства звезд, а также для всех галактик и квазаров имеющиеся астрометрические неопределенности не должны приводить к заметным ошибкам фотометрических измерений.

#### Модель ФРТ

Для подгонки модели источников на изображениях обзора *WISE* была использована модель функции размытия точки (ФРТ), полученная путем объединения данных наблюдений большого числа (около 4000) ярких и умеренно ярких звезд. Засвеченные области около центров наиболее ярких звезд маскировались при объединении данных. Использовались изображения звезд, расположенные на эклиптической широте не выше  $60^\circ$ , также считалось, что направление на полюс эклиптики в поле зрения телескопа всегда является постоянным — это определяется стратегией наблюдений, когда угол между оптической осью телескопа и направлением на Солнце всегда составляет  $90^\circ$  (Райт и др., 2010). Таким образом были получены высококачественные измерения ФРТ телескопа *WISE* в динамическом диапазоне поверхностной яркости порядка порядка  $10^6$ . Полученные ФРТ в полосах *W1* и *W2* показаны на рис. 1, усредненные радиальные профили ФРТ показаны на рис. 2. На высоких эклиптических широтах сборки *unWISE* составлены из изображений по-разному развернутых относительно направления на полюс экваториальных координат. Для того чтобы учесть это, ФРТ телескопа *WISE* усреднялась по всем направлениям на полюс эклиптики, которые имеются на данной площадке

сборок *unWISE*.

Модель ФРТ была получена на более тонком разбиении, по сравнению со сборками *unWISE*, элемент изображения составил  $1''.375$ , т.е. половину от элемента на исходных изображениях. При расчете потоков значение ФРТ в произвольной точке определялось при помощи билинейной интерполяции (например, Пресс и др., 1992). Для расчета потоков галактик был получен набор ФРТ сглаженных с центрально-симметричным экспоненциальным профилем и профилем де Вокулера (Де Вокулер, 1948), и линейная интерполяция проводилась также и по соответствующему радиусу. Учет эллиптичности в моделях галактик будет проведен в последующих версиях наших расчетов.

#### Модель фона

В первом приближении инструментальный фон был вычтен при составлении сборок *unWISE* (Ланг, 2014). Однако при ближайшем рассмотрении оказывается, что из-за того, что в широких крыльях ФРТ содержится значительная часть потока источников, фон недовычитается в областях неба размером порядка нескольких угловых минут, где число источников оказывается выше среднего. По этой же причине фон перевычитается в областях неба такого же размера, где число источников относительно мало. Кроме того, на изображениях сборок *unWISE*, возможно, остались следы инструментального фона на этом угловом масштабе.

Для того, чтобы учесть эти изменения фона при расчете потоков источников был проведен расчет фона при помощи вэйвлет-разложения изображений (Вихлинин и др., 1998). Для этого из изображений сборок *unWISE* были вычтены модели ФРТ для ярких звезд и далее при помощи ПО *wvdecomp*<sup>5</sup> на этих изображениях сборок был убран весь сигнал значимостью выше  $3\sigma$  на угловых масштабах ниже примерно  $30''$ . Остаток использовался в качестве модели фона. Пример модели фона, полученной таким образом, показан на рис. 3.

#### Измерение потоков

Для расчета потоков использовались только данные в непосредственной близости от положения объекта. Использовались элементы изображения с центрами, расположенными ближе некоторого радиуса, который вычислялся в зависимости от потока источника на сглаженном изображении *unWISE* и составлял величину от  $5''.5$  до

$\approx 20''$  для наиболее слабых и ярких источников, соответственно.

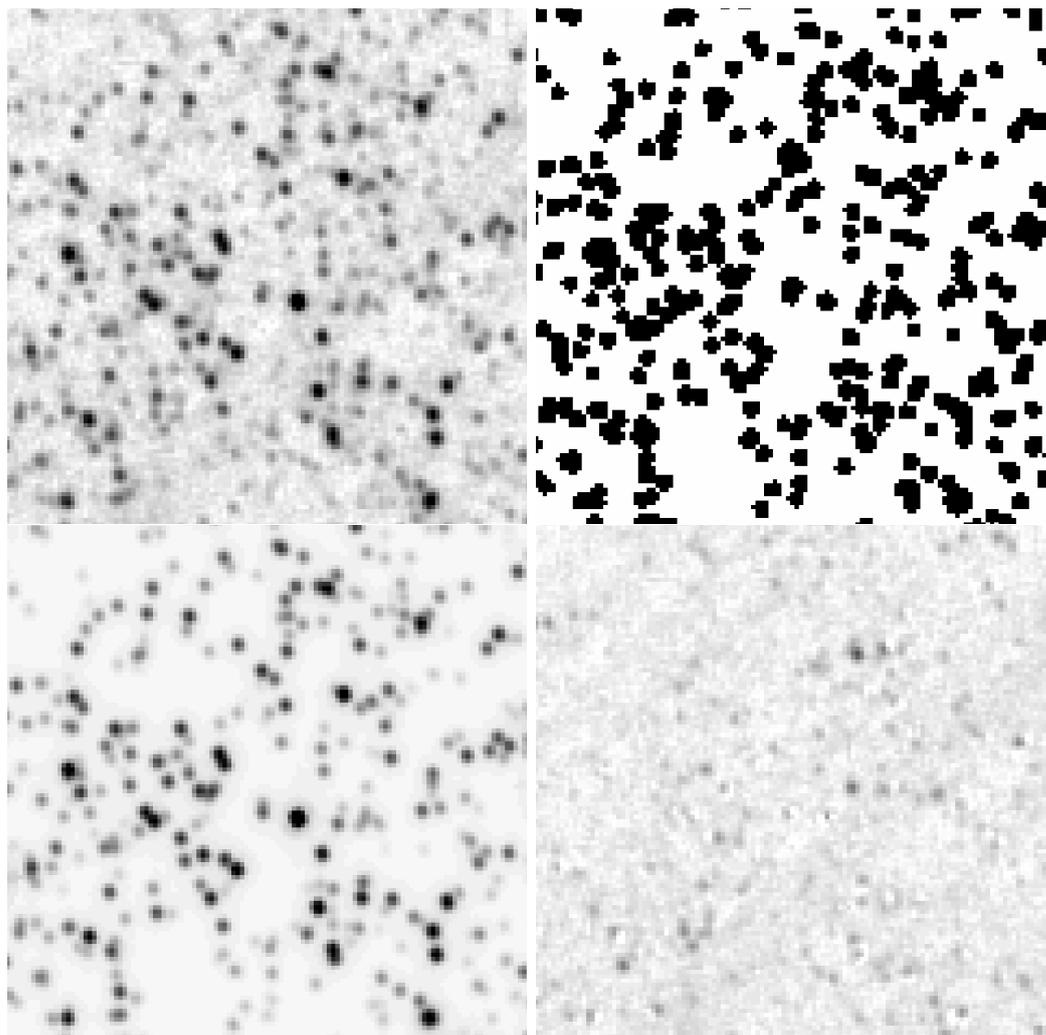
В первую очередь, отдельно проводился расчет модели для очень ярких звезд, которые оказывались засвеченными на изображениях обзора *Pan-STARRS1*. Эти источники центрировались по изображениям обзора *WISE*. Модель этих ярких звезд вычиталась из изображений сборок *unWISE*.

Для протяженных объектов обзора *Pan-STARRS1* делалась попытка определить их протяженность на изображениях *unWISE*. Такие объекты отбирались стандартным образом, по разнице между величинами, полученными подгонкой функции размытия точки (ФРТ), в постоянной апертуре, и в адаптивной апертуре по методу Крона (Крон, 1980) по данным обзора *Pan-STARRS1*. Для таких объектов радиус кружка, в котором использовались данные для подгонки модели источника, дополнительно увеличивался в 1.5 раза.

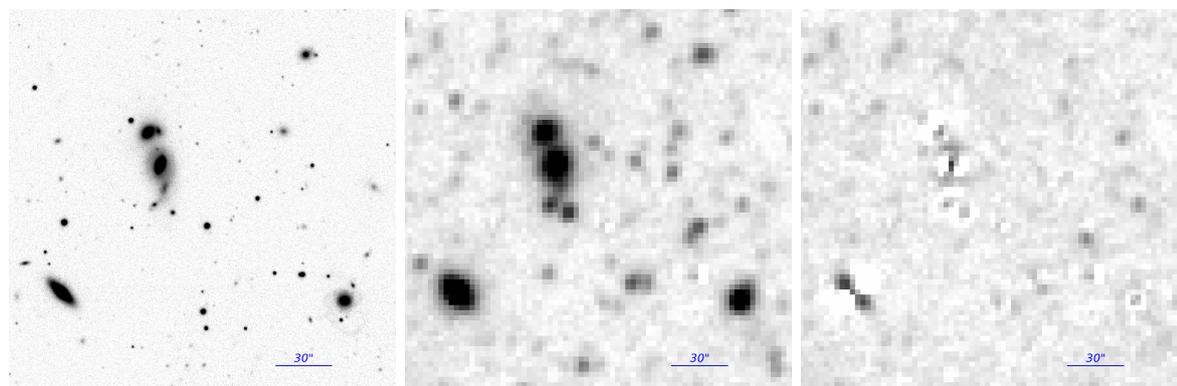
Исходное изображение разбивалось на связанные области («острова»), образованные пересекающимися кружками около объектов обзора *Pan-STARRS1*, в которых необходимо было рассчитать потоки для близко расположенных источников обзора *Pan-STARRS1*, как это показано на рис. 4 и все расчеты проводились одновременно для всех источников в каждой связанной области. Поскольку координаты точечных объектов обзора *Pan-STARRS1* заданы заранее и требуется подогнать к данным только потоки источников, модель является линейной по параметрам. Поэтому в этом случае потоки источников могут быть измерены методом наименьших квадратов за один проход, без необходимости дополнительных итераций. Для решения этой задачи использовался метод сингулярного разложения (Пресс и др., 1992).

Для протяженных объектов обзора *Pan-STARRS1* радиус протяженной модели определялся отдельно методом обратной параболической интерполяции (метод Brenta), после чего проводился перерасчет потоков всех источников в острове методом сингулярного разложения. Расчет проводился как для экспоненциального профиля галактики, так и для профиля де Вокулера, для каждого объекта вид профиля определялся из значения  $\Delta\chi^2$ . Если модель протяженного источника не приводила к улучшению  $\chi^2$  более чем на  $\Delta\chi^2 = 4$ , объект считался точечным. Эти расчеты повторялись не более 10 раз, и прекращались если дальнейшая подгонка радиуса галактики не приводила к улучшению  $\chi^2$ .

<sup>5</sup>doi:10.5281/zenodo.361034



**Рис. 4.** Пример изображения сборки *unWISE* размером около  $6' \times 6'$ , в полосе *W1* (вверху слева), разбиения на связанные области («острова»), в которых проводился расчет потоков для объектов обзора *Pan-STARRS1* (вверху справа), модель источников (внизу слева) и остаток от вычитания модели из изображения сборки *unWISE*. На последнем изображении остались только ИК источники, для которых не имеется соответствующих им объектов в обзоре *Pan-STARRS1*.



**Рис. 5.** Пример вычитания моделей галактик из изображения сборки *unWISE*. Слева — изображение обзора *Pan-STARRS1*, посередине — изображение сборки *unWISE* из которого вычтены модели звезд и все оставшиеся источники являются галактиками, либо объектами, которых нет в обзоре *Pan-STARRS1*, справа — остаток от вычитания моделей галактики из изображения сборки *unWISE*. Даже в случае спиральной галактики видимой с ребра (слева внизу) систематическая ошибка измерения потока составляет не более 5%.

Пример изображения изображения сборки *unWISE* в полосе *W1*, разбиения на связанные области («острова»), в которых проводился расчет потоков для объектов обзора *Pan-STARRS1*, модели источников и остатка от вычитания этой модели из изображения сборки *unWISE* приведены на рис. 4. На изображении остатка от вычитания модели остаются только ИК источники, для которых не имеется соответствующих им объектов в обзоре *Pan-STARRS1*.

Отметим, что из-за того, что угловое разрешение обзора *WISE* (около  $5''$ ) является недостаточным для того, чтобы разрешить слабые галактики, подавляющее большинство объектов, изначально определенных в качестве галактик, подгоняются моделью точечного источника. Моделью протяженного источника подгоняются, в основном, только более яркие галактики, ярче примерно  $17^m$ . Пример вычитания моделей ярких галактик из изображения сборки *unWISE* показан на рис. 5. Недостатки вычитания центрально симметричной модели хорошо видны на этом рисунке. Очевидно, что проявляются они тем больше, чем форма галактики оказывается дальше от центрально-симметричной. Однако, можно показать, что даже в случае спиральной галактики видимой с ребра (см. рис. 5, слева внизу) систематическая ошибка измерения потока составляет не более 5%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Полная таблица результатов фотометрических измерений полученных в нашей работе содержит более  $3 \cdot 10^9$  строк и доступна в электронном виде<sup>6</sup>. Эта таблица содержит следующие основные поля:

- *objID* — идентификатор объекта из обзора *Pan-STARRS1*, используя который можно при помощи *SQL*-запросов в базе данных в архиве *MAST*<sup>7</sup> для любого объекта получить результаты фотометрических измерений в обзоре *Pan-STARRS1*.
- $\alpha$ ,  $\delta$  — экваториальные координаты объекта в эпохе *J2000*.
- *W1*,  $\delta W1$ , *W2*,  $\delta W2$  — звездная величина в системе Веги, а также ошибка на звездную величину. Если ошибка равна  $-1$ , то соответствующая звездная величина представляет собой верхний предел на доверительном

уровне  $2\sigma$ . Фотометрическая калибровка является стандартной для обзора *WISE* (Кутри и др., 2013), потоки посчитаны напрямую из сборок *unWISE*.

- Значимость обнаружения источника в обзоре *WISE*, в единицах стандартного отклонения (*w1sig*, *w2sig*).
- Радиус модели протяженного источника, в угловых секундах (*w1reff*, *w2reff*).
- Фотометрические флаги, которые содержат сведения об условиях подгонки каждого источника и об ошибках, возникающих при этом (*w1flag*, *w2flag*).
- *star* — Флаг фотометрической классификации звезда-галактика.

Подробные сведения о значениях фотометрических флагов даны в Приложении.

Флаг фотометрической классификации звезда-галактика получен из показателей цвета ( $r - i$ ) и ( $r - W1$ ), где для обзора *Pan-STARRS1* взяты цвета, полученные подгонкой ФПТ. Распределение объектов обзора *Pan-STARRS1* по этим цветам показано на рис. 6. Объекты, расположенные ниже прямой линии на этом рисунке, т.е. цвета которых удовлетворяют условию:

$$(r - W1) > 2.1(r - i) + 2.4 \quad (1)$$

отмечены в качестве звезд. Можно показать, что это условие действительно хорошо разделяет звезды и галактики.

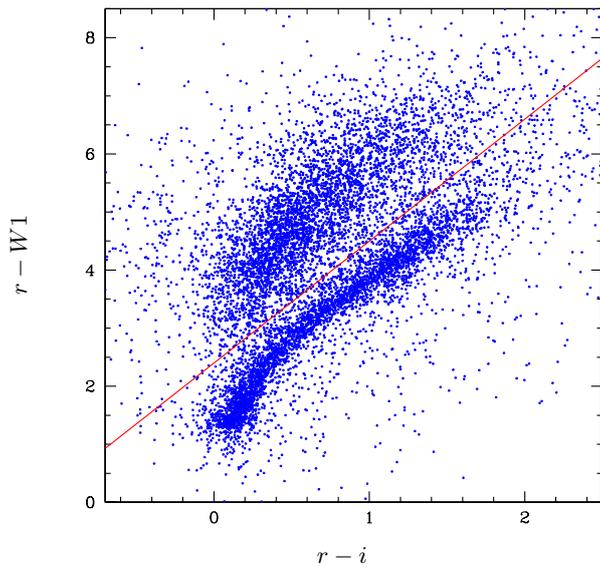
## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ДАННЫМИ ТЕЛЕСКОПА СПИТЦЕР

Для того, чтобы оценить качество полученных фотометрических измерений, можно провести сравнение результатов этих измерений с данными глубоких обзоров телескопа *Спитцер*. Для этого были использованы данные глубокого обзора телескопа *Спитцер* площадок, в которых в будущем будет выполняться глубокий обзор телескопа им. Веры Рубин (*Deep Drilling Fields, DDF*, Лэси и др., 2021). Данные этого обзора были скачаны из архива *IRSA*<sup>8</sup>. Обзор *DDF* был выполнен в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм и по своей глубине примерно на порядок превосходит обзор всего неба телескопа *WISE*, поэтому ошибками фотометрических измерений в этом обзоре для

<sup>6</sup><http://wise-forced.cosmos.ru/>

<sup>7</sup><https://mastweb.stsci.edu/mcasjobs/>

<sup>8</sup><https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/DeepDrill/>



**Рис. 6.** Распределение объектов обзора *Pan-STARRS1* по цветам ( $r - i$ ) и ( $r - W1$ ). Объекты, расположенные ниже прямой линии отмечены в качестве звезд при помощи соответствующего флага.

наших целей можно пренебречь. Угловое разрешение телескопа *Спитцер* в этих двух полосах также значительно превосходит разрешение телескопа *WISE* и составляет  $1''.66$  и  $1''.72$  соответственно (Фазио и др., 2004).

На рис. 7 показаны результаты сравнения измерений величин в полосе *W1* обзора *WISE* и в полосе 3.6 мкм обзора *DDF* для объектов в кружке радиусом  $20'$  около координат  $\alpha = 36^\circ.0$ ,  $\delta = -4^\circ.5$  (J2000). Для этого рисунка галактики отделялись от звезд по данным обзора *DDF* — звездообразными считались объекты, для которых разница между апертурной и кроновской величинами оказывалась меньше  $0.3^m$ . На этом рисунке величины звездообразных объектов сравниваются с ФРТ величинами обзора *DDF*, а величины галактик — с изофотными величинами соответствующих объектов.

Видно, что наши измерения величин как звездообразных, так и протяженных объектов являются несмещенными вплоть до предела обнаружения на сборках *unWISE*. Для ярких звезд,  $W1 < 13$ , систематическое уменьшение цвета связано с тем, что поток таких звезд оказывается в насыщении на изображениях сборок *unWISE*. Разброс разницы величин для объектов с величинами  $16.0 < W1 < 18.0$  может быть приближенно описан гауссианой со стандартным отклонением  $\sigma \approx 0.137^m$  для звездообразных объектов и  $\sigma \approx 0.198^m$  для галактик. Видно, что для галак-

тик распределение хуже соответствует нормальному, имеется заметное количество выбросов на масштабе одной величины и выше.

Для сравнения отметим, что для измерений обзора *CatWISE2020* (Марокко и др., 2021) разброс разницы величин для звездообразных объектов, посчитанный точно таким же образом как это было сделано выше для наших измерений, составляет  $\sigma \approx 0.163^m$ , т.е. примерно на 20% больше, ошибок наших измерений для этих же источников (см. выше). Дополнительные ошибки измерений появляются здесь, по-видимому, из-за того, что этот обзор выполнен по данным шести лет экспозиции обзора всего неба *WISE*, а также из-за того, что свой заметный вклад дают ошибки центрирования источников.

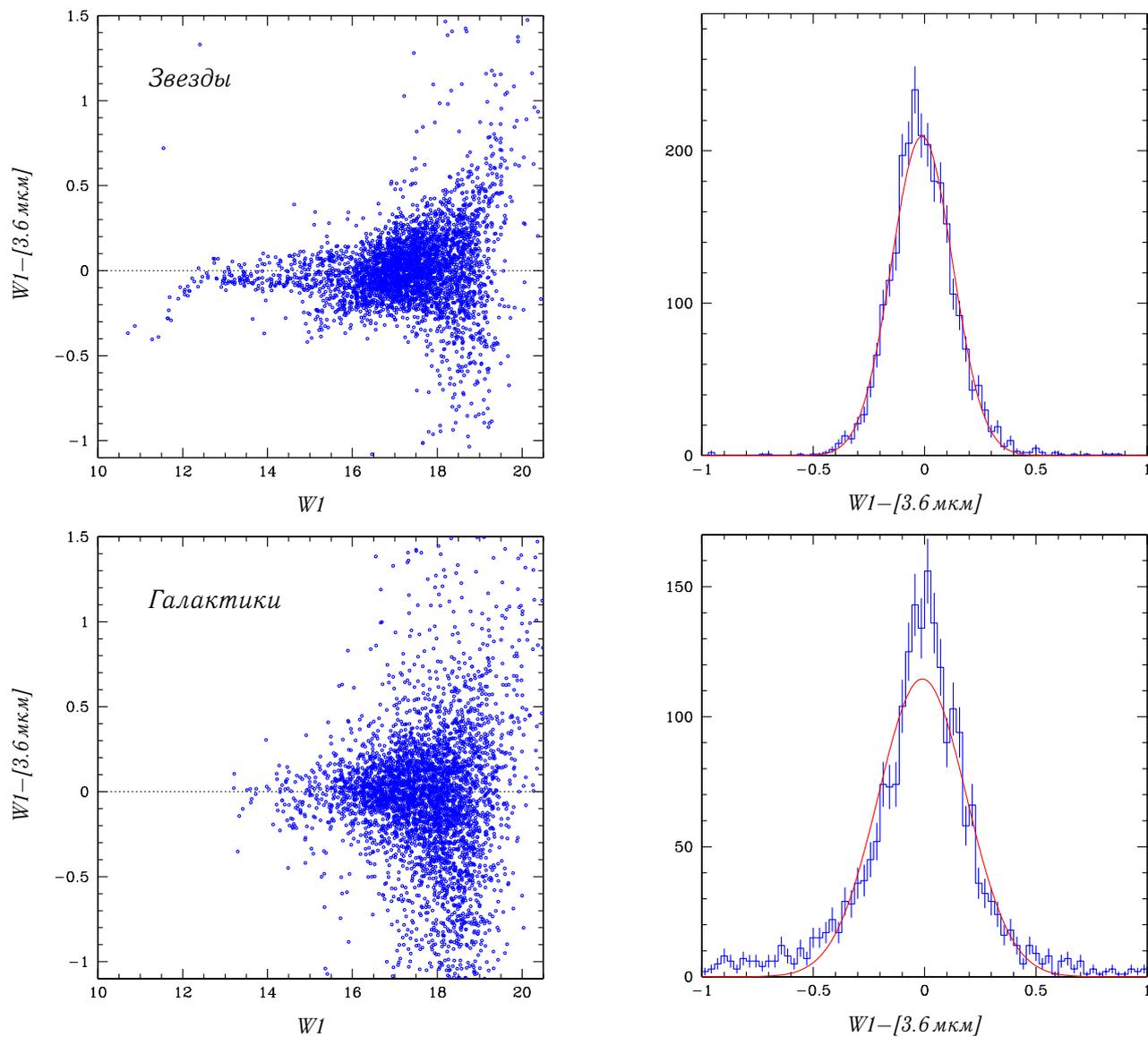
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты фотометрических измерений для всех объектов обзора *Pan-STARRS1* по данным ИК обзора *WISE* в предположении о том, что координаты источников известны и не меняются, т.е. результаты «принудительной» фотометрии. Получены измерения потоков или верхние пределы на поток в полосах 3.4 мкм и 4.6 мкм для более чем трех миллиардов оптических объектов на северном небе, на склонениях  $\delta > -30^\circ$ .

Результаты измерений, представленных в этой работе, а также результаты предыдущих версий этих измерений, были использованы нами ранее для отождествления скоплений галактик в обзоре обсерватории им. Планка (например, Буренин, 2017; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2021a). В будущем мы предполагаем использовать эти измерения для отождествления скоплений галактик, активных ядер галактик и квазаров в обзорах всего неба телескопов *ePOZITA* и *АРТ-ХС* им. М.Н. Павлинского на борту космической обсерватории *СРГ* (Предел и др., 2021; Павлинский и др., 2021; Сюняев и др., 2021). Эта работа в настоящее время уже началась (Зазнобин и др., 2021b; Буренин и др., 2021). Отметим, что данные обзора *Pan-STARRS1* равномерно покрывают почти всю «русскую» половину неба обзора *СРГ/ePOZITA*.

Результаты наших измерений сделаны общедоступными на странице в сети по адресу <http://wise-forced.cosmos.ru/>.

Автор благодарен Роману Кривоносу за помощь в организации доступа к данным измерений в сети. В этом исследовании использовались данные общедоступного архива обзора *Pan-*



**Рис. 7.** Результаты сравнения измерений величин в полосе  $W1$  обзора  $WISE$  и в полосе  $3.6$  мкм обзора  $DDF$  для объектов в кружке радиусом  $20'$  около координат  $\alpha = 36^\circ.0$ ,  $\delta = -4^\circ.5$  (J2000). Галактики здесь отделены от звезд по данным обзора  $DDF$ .

*STARRS1*, а также данные Архива инфракрасной науки НАСА/IPAC. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-12-00343.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, И. М. Хамитов, И. А. Зазнобин, Г. А. Хорунжев, М. В. Еселевич, В. Л. Афанасьев, С. Н. Додонов, Х.-А. Рубино-Мартин, Н. Агхамим, Р. А. Сюняев, Письма в Астрон. Журн., **44**, 317 (2018)
2. Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, М. Р. Гильфанов, А. А. Гроховская, С. Н. Додонов, М. В. Еселевич, И. А. Зазнобин, Э. Н. Иртуганов, Н. С. Лыскова, П. С. Медведев, А. В. Мещеряков, А. В. Моисеев, С. Ю. Сазонов, А. А. Старобинский, Р. А. Сюняев, Р. И. Уклеин, И. И. Хабибуллин, И. М. Хамитов, Е. М. Чуразов, Письма в Астрон. Журн., **47**, 461 (2021)
3. Р. А. Буренин, Письма в Астрон. Журн., **43**, 559 (2017)
4. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B. R. McNamara, W. Forman, C. Jones, H. Quintana, and A. Hornstrup), *Astrophys. J.*, **502**, 558 (1998)
5. Де Вокулер (G. de Vaucouleurs), *Annales d'Astrophysique*, **11**, 247 (1948)
6. Дей и др. (A. Dey, D. J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.*, **157**, 168 (2019)
7. И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, А. Р. Ляпин, Г. А. Хорунжев, В. Л. Афанасьев, А. А. Гроховская, С. Н. Додонов, М. В. Еселевич, Р. И. Уклеин, И. Ф. Бикмаев, И. М. Хамитов, М. Р. Гильфанов, Н. С. Лыскова, П. С. Медведев, Р. А. Сюняев, Письма в Астрон. Журн., **47**, 174 (2021a)
8. И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, А. Р. Ляпин, Г. А. Хорунжев, В. Л. Афанасьев, А. А. Гроховская, С. Н. Додонов, М. В. Еселевич, Р. И. Уклеин, И. Ф. Бикмаев, И. М. Хамитов, М. Р. Гильфанов, Н. С. Лыскова, П. С. Медведев, Р. А. Сюняев, Письма в Астрон. Журн., **47**, 155 (2021b)
9. Крон (R. G. Kron), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **43**, 305 (1980)
10. R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, J. W. Fowler, P. R. M. Eisenhardt, C. Grillmair, et al., *Explanatory Supplement to the AllWISE Data Release Products*, Explanatory Supplement to the AllWISE Data Release Products (2013)
11. Кутри и др. (R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, J. W. Fowler, P. R. M. Eisenhardt, C. Grillmair, et al.), *VizieR Online Data Catalog*, p. II/328 (2021)
12. Ланг и др. (D. Lang, D. W. Hogg, and D. J. Schlegel), *Astron. J.*, **151**, 36 (2016)
13. Ланг (D. Lang), *Astron. J.*, **147**, 108 (2014)
14. Лэси и др. (M. Lacy, J. A. Surace, D. Farrah, K. Nyland, J. Afonso, W. N. Brandt, et al.), *MNRAS*, **501**, 892 (2021)
15. Марокко и др. (F. Marocco, P. R. M. Eisenhardt, J. W. Fowler, J. D. Kirkpatrick, A. M. Meisner, E. F. Schlafly, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **253**, 8 (2021)
16. Мейснер и др. (A. M. Meisner, D. Lang, and D. J. Schlegel), *Astron. J.*, **153**, 38 (2017)
17. Мейснер и др. (A. M. Meisner, D. Lang, E. F. Schlafly, and D. J. Schlegel), *Research Notes of the American Astronomical Society*, **5**, 200 (2021)
18. Мэгние и др. (E. A. Magnier, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, J. L. Tonry, B. Goldman, S. Röser, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **251**, 6 (2020)
19. Мэйнцер и др. (A. Mainzer, J. Bauer, R. M. Cutri, T. Grav, J. Masiero, R. Beck, et al.), *Astrophys. J.*, **792**, 30 (2014)
20. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babushkin, et al.), *Astron. Astrophys.*, **650**, A42 (2021)
21. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babushkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.*, **647**, A1 (2021)
22. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing* (1992)
23. Райт и др. (E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, R. M. Cutri, T. Jarrett, et al.), *Astron. J.*, **140**, 1868 (2010)
24. Скрутски и др. (M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, et al.), *Astron. J.*, **131**, 1163 (2006)
25. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babushkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2104.13267 (2021)
26. Фазио и др. (G. G. Fazio, J. L. Hora, L. E. Allen, M. L. N. Ashby, P. Barmby, L. K. Deutsch, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **154**, 10 (2004)
27. Чамберс и др. (K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, H. A. Flewelling, M. E. Huber, C. Z. Waters, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:1612.05560 (2016)
28. Шлафли и др. (E. F. Schlafly, A. M. Meisner, and G. M. Green), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **240**, 30 (2019)

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Значение флагов, представленных в нашей таблице фотометрических измерений, получают суммированием значений флагов которые даны ниже. Значение каждого отдельного флага можно получить, как обычно, из побитного сравнения с суммарным флагом.

NOT\_IN\_FIELD = 1 — Объект находится вне поля изображения сборки *unWISE*.

DUPLICATE = 2 — Объект является дубликатом другого объекта в данных обзора *Pan-STARRS1*. Фотометрических измерений для такого объекта

не производится.

**BAD\_PHOTO = 4** — Фотометрическое измерение отсутствует из-за слишком большой населенности поля, либо в первом проходе получается отрицательный поток (в этом случае измерения не проводится, поток объектов устанавливается равным нулю).

**DO\_NOT\_FIT = 8** — На изображениях *unWISE* угловом на масштабе ФРТ телескопа *WISE* не имеется сигнала значимостью выше  $1.5\sigma$ , измерения потока объекта не проводится, в таблице дается  $2\sigma$  верхний предел на поток.

**EXT\_SELECTED = 16** — Объект отобран в качестве протяженного по данным обзора *Pan-STARRS1*, для него делается попытка определить протяженность по данным обзора *WISE*.

**FIT\_EXT = 32** — Объект подгонялся моделью протяженного источника.

**FIT\_DEVAUC = 64** — Объект подгонялся центрально-симметричной моделью с профилем де Вокулера. При положительном значении ключа **FIT\_EXT** и отрицательном значении ключа **FIT\_DEVAUC** — центрально-симметричной моделью с экспоненциальным профилем.

**PHOTO\_STAR = 128** — Объект является звездой согласно показателям цвета  $(r-i)$  и  $(r-W1)$  (см. текст).