

УДК 523.44

ВОЗМОЖНОСТИ МНОГОЦВЕТНОЙ ФОТОМЕТРИИ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ С ТЕЛЕСКОПОМ ROBORHOT

© 2020 г. А. Э. Потоскуев^{a, *}, В. В. Бусарев^b, В. В. Крушинский^a, Э. Д. Кузнецов^a,
А. А. Попов^a, А. М. Соболев^a

^aУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

^bМосковский государственный университет, Москва, Россия

*e-mail: aleksander.potoskuev@gmail.com

Поступила в редакцию 02.09.2019 г.

После доработки 26.02.2020 г.

Принята к публикации 30.04.2020 г.

Рассмотрены возможности по исследованию астероидов посредством многоцветной фотометрии на телескопе Roborhot. Роботизированный телескоп модифицированной системы Долла-Кирхема с диаметром главного зеркала 0.6 м и фокусным расстоянием 4.2 м оснащен трехканальным фотометром с фильтрами g' , r' и i' фотометрической системы SDSS с полем зрения $20'$. Использование трехканального фотометра при наблюдении малых тел позволит строить многоцветные кривые блеска без фазовых задержек. Диаграммы показателей цвета $r' - i'$ и $g' - r'$ позволят выполнить классификацию астероидов C- и S-типов. Высокоточные кривые блеска дадут возможность определять параметры вращения астероидов, что необходимо для корректного учета влияния эффекта Ярковского. Результаты многоцветных фотометрических наблюдений на телескопе Roborhot позволят решать комплексные научные задачи, связанные с исследованием физической и динамической эволюции малых тел Солнечной системы.

Ключевые слова: многоканальный фотометр, кривая блеска, астероиды, таксономия, показатели цвета

DOI: 10.31857/S0320930X20050072

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение астероидов Солнечной системы, сформированных из вещества одной протопланетной туманности, но имеющих отличия в составе ввиду различных условий их формирования, позволяет выделить среди них группы объектов с близкими спектральными характеристиками. В течение последних десятилетий было разработано несколько таксономических систем астероидов, в основе которых лежит разделение объектов по показателям цвета (в принятой фотометрической системе) или по спектрам объектов (Binzel и др., 2019). Основной трудностью прямого получения спектров астероидов с целью оценки состава их вещества является то, что большая их часть является объектами со слабым блеском по причине малых размеров и/или низких значений альбедо. Но эта задача может быть решена для значительно большего числа объектов с помощью многополосной фотометрии. Помимо этого, применение нескольких широкополосных светофильтров при наблюдении астероидов может быть использовано для построения кривых блеска объектов, что позволяет определить их геометрические и вра-

щательные характеристики (Pravec и др., 2019). Изменение показателя цвета в зависимости от фазы вращения астероида может свидетельствовать о фотометрической неоднородности его поверхности, которое, например, свойственно объектам, поверхность которых претерпевала изменения в сравнительно недавнее время (Li и др., 2015).

В данной работе рассмотрены возможности многоцветной фотометрии астероидов, которая будет осуществляться с помощью телескопа Roborhot, расположенного в Коуровской астрономической обсерватории (КАО) Уральского федерального университета (УрФУ). Далее будут приведены краткое описание инструмента и его характеристики, затем – примеры исследовательских задач, которые могут быть решены с его использованием.

ИНСТРУМЕНТ

Отличительной чертой телескопа Roborhot является сочетание многоканального фотометра и роботизированной системы управления комплексом. Инструмент был изготовлен с целью на-

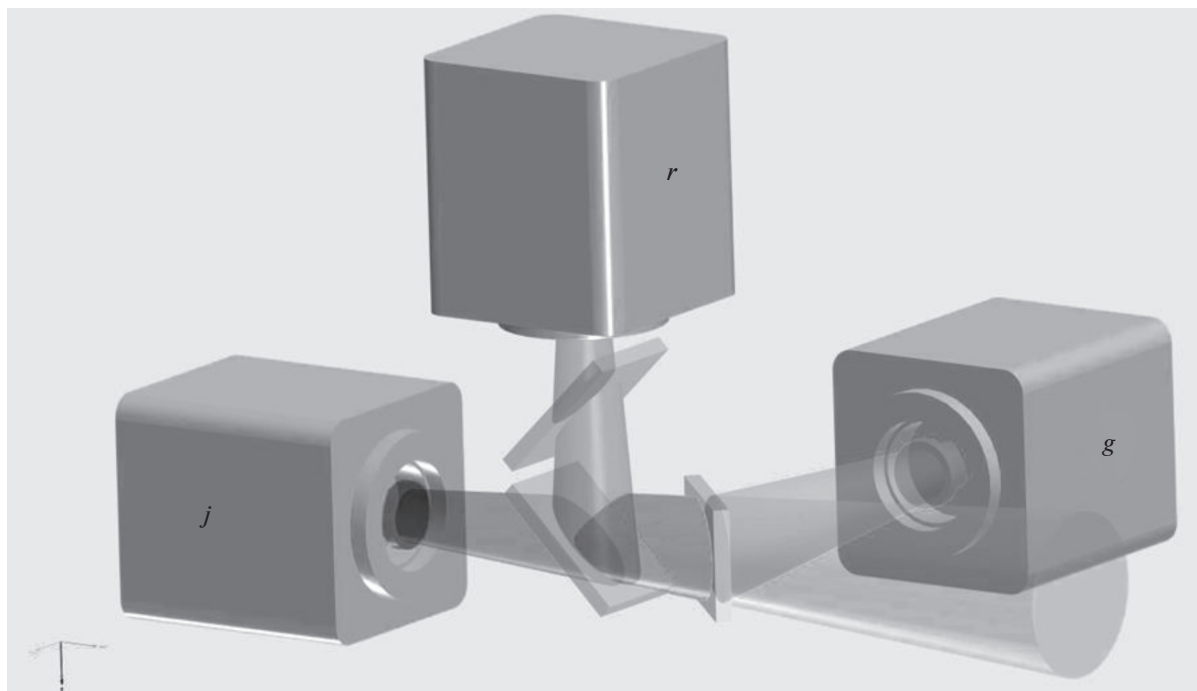


Рис. 1. Дизайн трехканального фотометра.

блюдения транзитных явлений и переменных источников света, а также редких краткосрочных событий, например, взрывов сверхновых или оптических послесвечений гамма-всплесков. Инструмент может быть успешно использован и при решении наблюдательных задач, связанных с движением и вращением астероидов. Дополнительное преимущество инструмента заключается в том, что имеется возможность наблюдения объекта в нескольких фотометрических полосах одновременно, что особенно важно при наблюдениях кратковременных событий, например, астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ).

Телескоп, оснащенный многоканальным фотометром, имеет ряд преимуществ по сравнению с инструментом с одноканальным детектором и сменными фильтрами (например, фильтровым колесом). Во-первых, одновременные наблюдения в нескольких полосах предпочтительны для быстро изменяющихся источников света, например, для АСЗ или астероидов, имеющих короткие периоды осевого вращения. В построенных многоцветных кривых блеска не будет фазовой задержки, если экспозиции в разных полосах были одновременными. В этом случае непосредственно из наблюдательных данных может быть получено изменение показателя цвета в зависимости от фазы вращения астероида без ошибок фазового сдвига. Во-вторых, благодаря статической конфигурации детектора и параллельным наблюдениям в нескольких полосах, производимым при одних и тех же атмосферных условиях, фотомет-

рическая точность может быть повышена. Отсутствие подвижных частей в фотометре увеличивает стабильность инструмента, а наблюдательное время может быть использовано более эффективно, поскольку при данной конфигурации отсутствует необходимость в смене фильтров и последующих коррекциях фокусировки. Основным недостатком многоканального фотометра является наличие дополнительных оптических элементов, что снижает его итоговую оптическую пропускную способность, а наличие нескольких камер приводит к необходимости использования более сложного программного обеспечения для их синхронизации и к большей итоговой стоимости устройства.

Конструкция фотометра (см. рис. 1) обеспечивает хорошее качество изображений для телескопа с фокальным числом $F/D > 7$ и полем зрения около $20'$. В ней используются плоскопараллельные дихроичные фильтры деления нефокусированного потока света, что упрощает конструкцию, увеличивает оптическую пропускную способность и уменьшает общие габариты детектора.

Три канала устройства представлены в фотометрической системе SDSS с полосами g' , r' и i' , эффективные длины волн которых составляют 4775, 6130 и 7485 Å, соответственно (см. рис. 2). Все оптические элементы были изготовлены фирмой Asahi Spectra (<https://www.asahi-spectra.com>). Светофильтры установлены непосредственно перед затворами каждой из ПЗС-камер модели

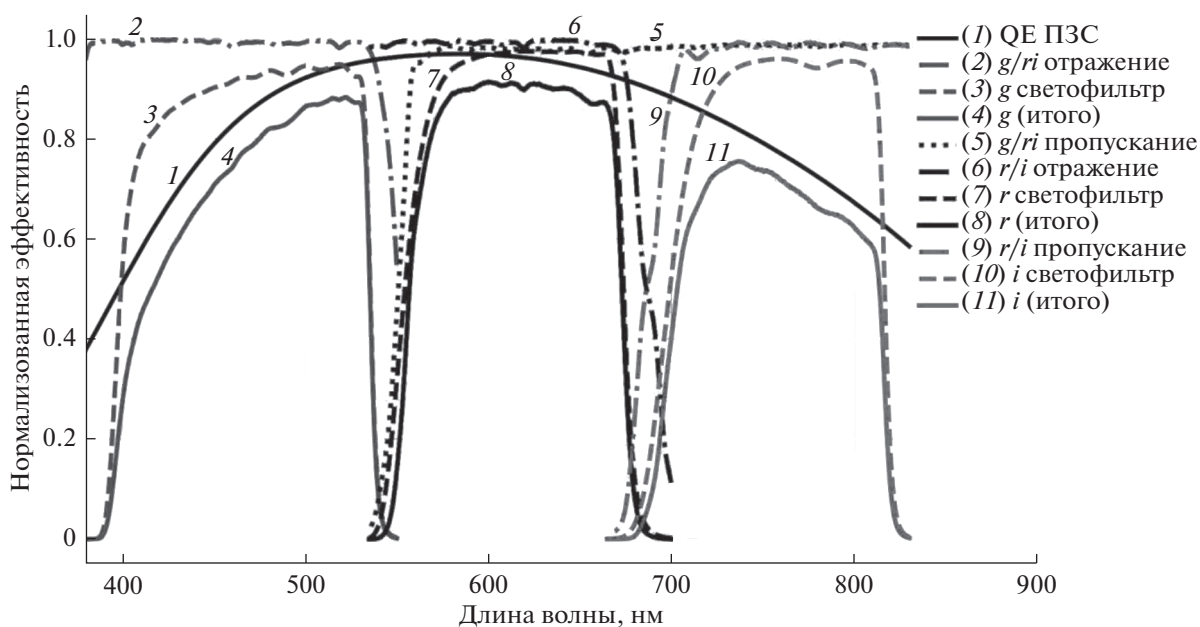


Рис. 2. Эффективность компонент фотометрической системы и общая эффективность в полосах пропускания светофильтров (предоставлено фирмой-производителем).

ML4240MB производства Finger Lakes Instrumentation (<http://www.flicamera.com>). Камеры оснащены матрицами с обратной засветкой модели E2V CCD42-40-1-368 MB с разрешением 2048×2048 пикселей и размером пикселя 13.5 мкм. Измеренные шум считывания (read noise) и коэффициент усиления (gain) составляют $8.3 e^-/\text{пиксель}$ и $1.4 e^-/\text{ADU}$, соответственно. Темновой ток матриц составляет порядка $0.2 e^-/\text{пиксель}$ в секунду при температуре -30°C . Охлаждение камер осуществляется системой Пельтье вплоть до -55°C относительно окружающей температуры.

Многоканальный фотометр установлен на телескопе Robophot, который является телескопом модифицированной системы Долла-Кирхема с диаметром главного зеркала 0.6 м и фокусным расстоянием 4.2 м. Поле зрения и размер пикселя имеют размеры $21'$ и $0.65''$, соответственно. По результатам тестовых наблюдений, полуширина (FWHM) функции рассеяния точки (PSF) составила $2.8''$ по всему полю зрения и ограничивалась атмосферными условиями. Нижняя оценка продолжительности ясного времени для КАО составляет порядка 400 ч за год. Оценка получена на основании анализа базы данных робот-телескопа MASTER-II Ural и архива метеорологических датчиков обсерватории. Для наблюдений астероидов на телескопе Robophot будет доступно не менее 75% наблюдательного времени (или 300 ч в год).

Телескоп и экваториальная монтировка изготовлены фирмой APM Telescopes (<http://www.professional-telescopes.net>), а весь инструмент расположен под куполом типа “раковина” с диаметром

3.5 м. Управление комплексом (представляющим собой фотометр, монтировку, купол, метеостанцию и сервер) целиком осуществляется посредством пакета RTS2 (Kubánek и др., 2004), который находится в свободном доступе и делает возможным полностью автономное использование комплекса.

Трехканальный фотометр на период отладки работы комплекса был использован для наблюдений на телескопе системы Несмита с диаметром главного зеркала 1.2 м в КАО. Полученная в результате тестовых наблюдений точность фотометрических измерений проиллюстрирована на рис. 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСТЕРОИДОВ

Привлечение дополнительного наблюдательного материала необходимо для решения многих астероидных задач. Причиной тому является то, что лишь для относительно небольшого числа астероидов известны фотометрические и физические параметры, за исключением значения абсолютной звездной величины H (зачастую известной с погрешностью порядка десятых долей звездной величины). Для оценки альbedo и плотности астероида можно воспользоваться усредненными значениями, соответствующими определенному таксономическому классу (DeMeo, Carry, 2013; Carry, 2012). Как уже было отмечено в предыдущем разделе, трем каналам используемого фотометра соответствуют полосы g' , r' и i' фотометрической системы SDSS. Простое разделение

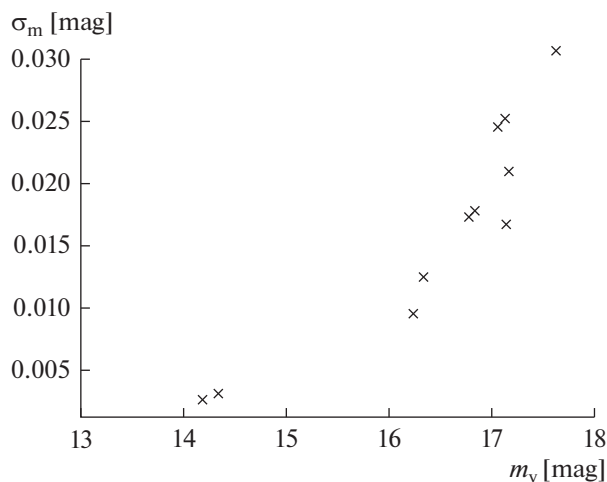


Рис. 3. Зависимость погрешности фотометрических измерений от видимой звездной величины наблюдаемого точечного источника (полоса g').

астероидов на S- и C-типы может быть осуществлено при помощи показателя цвета a , рассчитываемого по формуле (Ivezic и др., 2001):

$$a = 0.89(g' - r') + 0.45(r' - i') - 0.57, \quad (1)$$

где значение $a < 0$ соответствует C-типу и $a > 0$ – S-типу. Стоит отметить, что построение диаграммы зависимости показателя цвета $i' - z'$ от a позволило бы разделить объекты со значениями $a > 0$ на астероиды S-типа и V-типа (Mainzer и др., 2012). Поэтому рассматривается вариант усовершенствования оптической схемы фотометра с целью дополнения его светофильтрами u' и z' до классической системы SDSS. В таком случае было бы возможно осуществлять и оценку формы спектра отражения астероидов во всем видимом диапазоне. Как уже отмечалось, значительным преимуществом телескопа является достаточно большое поле зрения ($20'$). Это дает возможность одновременных наблюдений на одном кадре нескольких астероидов, что позволяет сократить количество наблюдательного времени при осуществлении обзорных исследований семейств астероидов.

Для оценки диаметра D астероида по известным значениям абсолютной звездной величины H и геометрического альbedo p_V можно использовать формулу (Pravec, Harris, 2007):

$$D = 1329 \text{ км} \cdot 10^{-H/5} / \sqrt{p_V}. \quad (2)$$

Формула (2) также может быть применена для оценки значения альbedo при известном значении диаметра.

При решении задач, включающих в себя моделирование эволюции орбит астероидов на больших промежутках времени, необходимо учитывать эф-

фект Ярковского и YORP-эффект (Pravec и др., 2019), которые напрямую зависят от геометрических и вращательных характеристик объекта (Vokrouhlicky и др., 2015). Учет эффекта Ярковского, который в первую очередь сказывается на дрейфе большой полуоси астероида, требует информации об ориентации оси вращения астероида, определяющей величину и знак возникающего эффекта. Однако, для более точной его оценки, необходима информация о таких физических параметрах объекта, как его размер, плотность и альbedo (Spoto и др., 2015).

YORP-эффект, оказывающий влияние на изменение ориентации оси и скорости вращения объекта, может быть смоделирован по заданным значениям периода и ориентации оси вращения астероида и предположении об его геометрической форме (Vokrouhlicky и др., 2015). Эволюция оси вращения также зависит от орбиты объекта, а для астероидов, находящихся на гелиоцентрических орбитах с большими значениями угла наклона и вращающихся в прямом направлении, она может иметь хаотический характер, как это было показано на примере астероида (4765) Wasserburg (Pravec и др., 2019): при моделировании эволюции оси вращения объекта на интервале времени 250 тыс. лет, при одинаковых начальных значениях ее наклона, но слабо меняющихся долготе полюса и параметре динамического сглаживания, результирующий наклон варьировался в пределах 110° .

Анализ кривых блеска астероидов позволяет определять геометрические и вращательные характеристики тел (см., например, Durech и Напуш, 2018). Оценка периода вращения может быть осуществлена посредством частотного анализа кривой блеска астероида. По набору кривых блеска, полученных при различных фазовых углах, может быть выполнено моделирование формы и определено положение оси вращения исследуемого объекта. В результате моделирования, однако, может быть получено несколько решений, содержащих оптимальные параметры геометрической формы и направления оси вращения. Построение кривых блеска по данным фотометрии, которые были получены при наблюдениях объекта до и после прохождения им оппозиции, является необходимым для более точных оценок вращательных и геометрических характеристик астероида (Oszkiewicz и др., 2017). Количество имеющихся моделей формы астероидов в базе данных DAMIT в 2010 г. оценивалось величиной порядка 1650 (Durech и др., 2010). Позже с учетом частичных моделей, требующих уточнений, их количество возросло до 2500 (Durech и др., 2017). По состоянию на 13.01.2020 база данных DAMIT содержит 4207 моделей для 2404 астероидов (<https://astro.troja.mff.cuni.cz/projects/damit/>).

Инструмент BlueEye600 robotic observatory (робот-телескоп системы Ричи-Кретъена с диаметром главного зеркала 60 см, параметр $seeing \approx 2''-3''$), обладающий близкими к телескопу Robophot характеристиками, был использован при решении аналогичной задачи — наблюдение астероидов с целью получения дополнительных фотометрических точек кривой блеска для уточнения геометрической модели наблюдавшихся ранее астероидов (Durech и др., 2018). Для решения такого рода задачи может потребоваться порядка нескольких сотен точек фотометрических измерений (Durech и др., 2016). На основании этого можно оценить количество моделей формы астероидов, которые можно построить в результате анализа кривых блеска — порядка 10–20 моделей формы астероидов в год (при 300 часах наблюдательного времени в год и экспозиции 180 с). Планируется, что обработка фотометрических наблюдений будет выполняться для всех астероидов, зафиксированных в кадре, а не только для целевого астероида. Это позволит оптимально использовать возможности телескопа и увеличить количество астероидов, имеющих модели формы. Моделирование геометрической формы астероида может быть выполнено путем инверсии кривой блеска с использованием, например, пакета программ ADAM (Viikinkoski, 2015). Кроме того, наблюдения астероидов могут быть нацелены на уточнение уже имеющихся моделей, для которых форма объекта или ориентация оси вращения определены неоднозначно.

Результаты широкополосной фотометрии могут быть использованы для исследования явлений, которые связаны с изменением цвета поверхности астероида. В связи с бомбардировкой поверхности тела микрометеоритами, облучением солнечными и космическими лучами, возникает изменение отражательных свойств верхних слоев объекта, которое сказывается на его наблюдаемом спектре (Brunetto et al., 2015). В процессе “созревания” поверхностного вещества астероида, в зависимости от таксономического класса, уменьшаются его альbedo и глубина абсорбционных линий, возникает спектральное покраснение (MacLennan и др., 2015). Обновление поверхностных слоев астероида может быть осуществлено под воздействием приливных сил, возникающих при тесных сближениях с массивными телами, а также в результате столкновений и/или разрушений астероидов (Binzel и др., 2019), при которых могут формироваться новые объекты с “молодыми” поверхностями. Подробное рассмотрение изменений показателей цвета в пределах периода вращения астероида может быть использовано для выдвижения гипотезы об эволюционном прошлом исследуемого объекта. Таким образом, благодаря наблюдениям астероидов на телескопе Robophot, возможно не только увеличение числа уже имеющихся моделей объектов и их уточне-

ние, но и построение уникальных многоцветных кривых блеска без фазовой задержки, что позволит исследовать малые тела Солнечной системы более детально.

На телескопе Robophot планируется проведение многоцветных фотометрических наблюдений объектов, входящих в пары, и групп астероидов, движущихся по близким орбитам (Kuznetsov, Safronova, 2018; Kuznetsov, Vasileva, 2019; Pravec и др., 2019). Анализ динамической эволюции орбит показывает, что ряд таких пар и групп образовались в процессе каскадного дробления родительского тела (Fatka и др., 2019). Поскольку в результате этого процесса образуются тела относительно небольшого размера (менее 30–40 км), то их динамическая эволюция существенно зависит от влияния эффекта Ярковского. Без сведений о физических параметрах астероида и параметрах его осевого вращения невозможно построить достоверное описание динамической эволюции группы астероидов, оценить возраст пар астероидов и установить последовательность дробления родительского тела (Kuznetsov и др., 2018; 2019a; 2019b).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы планируют осуществить многоцветные фотометрические наблюдения малых тел Солнечной системы на телескопе Robophot с целью решения актуальных научных задач, связанных с исследованием астероидов. Использование трехканального фотометра при наблюдении малых тел позволит построить многоцветные кривые блеска без фазовых задержек, в результате анализа которых могут быть получены оценки вращательных и геометрических характеристик астероидов, наряду с исследованием спектральных свойств и состава вещества их поверхностных слоев. Построение диаграмм с показателями цвета $r' - i'$ и $g' - r'$ позволит выполнить классификацию астероидов C- и S-типов. Высокоточные кривые блеска дадут возможность определять параметры вращения астероидов, что необходимо для корректного учета влияния эффекта Ярковского. Результаты многоцветных фотометрических наблюдений на телескопе Robophot позволят решать комплексные научные задачи, связанные с исследованием физической и динамической эволюции малых тел Солнечной системы.

Фактически данная статья посвящена обсуждению важных методических вопросов по фотометрическим наблюдениям астероидов, которые еще предстоит выполнить. Полученные результаты авторы предполагают опубликовать в последующих статьях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FEUZ-2020-0030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbidelli A., Birlan M., Vernazza P., Burt B.J., Moskovitz N., Slivan S.M., Thomas C.A., Rivkin A.S., Hicks M.D., Dunn T., Reddy V., Sanchez J.A., Granvik M., Kohout T.* Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // *Icarus*. 2019. V. 324. P. 41–76.
- Brunetto R., Loeffler M.J., Nesvorný D., Sasaki S., Strazzulla G.* Asteroid Surface Alteration by Space Weathering Processes // *Asteroids IV* / Ed. Michel P., DeMeo F.E., Bottke W.F. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 597–616.
- Carry B.* Density of asteroids // *Planet. Space Sci.* 2012. V. 73. P. 98–118.
- DeMeo F.E., Carry B.* The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 723–741.
- Ďurech J., Hanuš J.* Reconstruction of asteroid spin states from Gaia DR2 photometry // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 620. Article id. A91.
- Ďurech J., Hanuš J., Ali-Lagoa V.* Shape models of asteroids reconstructed from WISE data and sparse photometry // *American Astron. Soc. Division for Planet. Sci. Meeting Abstracts #49*. 2017. eid. 110.27.
- Ďurech J., Hanuš J., Oszkiewicz D., Vančo R.* Asteroid models from the Lowell photometric database // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 587. Article id. A48.
- Ďurech J., Hanuš J., Brož M., Lehký M., Behrend R., Antonini P., Charbonnel S., Crippa R., Dubreuil P., Farroni G., Kober G., Lopez A., Manzini F., Oey J., Poncy R., Rinner C., Roy R.* Shape models of asteroids based on lightcurve observations with BlueEye600 robotic observatory // *Icarus*. 2018. V. 304. P. 101–109.
- Durech J., Sidorin V., Kaasalainen M.* DAMIT: a database of asteroid models // *Astron. and Astrophys.* V. 513. P. 13. Article id. A46.
- Fatka P., Pravec P., Vokrouhlický D.* Cascade disruptions in asteroid clusters // *Icarus*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113554>
- Ivezić Ž., Tabachnik S., Rafikov R., Lupton R.H., Quinn T., Hammergren M., Eyer L., Chu J., Armstrong J.C., Fan X., Finlator K., Geballe T.R., Gunn J.E., Hennessy G.S., Knapp G.R., Leggett S.K., Munn J.A., Pier J.R., Rockosi C.M., Schneider D.P., Strauss M.A., Yanny B., Brinkmann J., Csabai I., Hindsley R.B., Kent S., Lamb D.Q., Margon B., McKay T.A., Smith J.A., Waddel P., York D.G., SDSS Collaboration* Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data // *Astron. J.* 2001. V. 122. P. 2749–2784.
- Kubánek P., Jelínek M., Nekola M., Topinka M., Štrobl J., Hudec R., Sanguino M., Ugarte P.A., Castro-Tirado A.J.* RTS2 – Remote Telescope System, 2nd Version // *AIP Conf. Proc.* 2004. V. 727. P. 753–756.
- Kuznetsov E.D., Glamazda D.V., G.T. Kaiser G.T., Krushinsky V.V., Popov A.A., Safronova V.S., Shagabutdinov A.A., Ustinov D.S., Vibe Yu.S.* Pairs of asteroids in close orbits // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2018. V. 53. Iss. S1. A159.
- Kuznetsov E.D., Potoskuev A.E., Safronova V.S., Ustinov D.S.* Dynamical evolution of asteroid pairs with close orbits // *Proc. X All-Russian Conf. “Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics” (FAPMM 2018)*. AIP Conf. Proc. 2019a. V. 2103. Iss. 1. P. 020008-1–020008-6.
- Kuznetsov E.D., Rosaev A.E., Plavalova E.* The Yarkovsky effect estimation for some asteroid pairs with close orbits // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2019b. V. 54. Iss. S2. A230.
- Kuznetsov E., Safronova V.* Application of metrics in the space of orbits to search for asteroids on close orbits // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 157. P. 22–27.
- Kuznetsov E.D., Vasileva M.A.* On new members of asteroid clusters similar to asteroid pairs // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2019. V. 54. Iss. S2. A229.
- Li J.-Y., Helfenstein P., Buratti B.J., Takir D., Clark B.E.* Asteroid photometry // *Asteroids IV* / Eds. Michel P. et al. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 129–150.
- MacLennan E.M., Emery J.P., Lucas M.P., Pinilla-Alonso N.* Assessment and Characterization of Space Weathering Styles on Asteroid Surfaces // *Space Weathering of Airless Bodies: An Integration of Remote Sensing Data, Laboratory Experiments and Sample Analysis Workshop*. 2015. V. 1878. P. 2033.
- Mainzer A., Masiero J., Grav T., Bauer J., Tholen D.J., McMillan R.S., Wright E., Spahr T., Cutri R.M., Walker R., Mo W., Watkins J., Hand E., Maleszewski C.* NEOWISE studies of asteroids with Sloan photometry: preliminary results // *Astrophys. J.* 2012. V. 745. Id. 7 (9 p.)
- Oszkiewicz D.A., Ski B.A., Moskovitz N., Kankiewicz H., Marciniak A., Licandro J., Galiazzo M.A., Zeilinger W.W.* Non-Vestoid candidate asteroids in the inner main belt // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 599. Id. A107.
- Pravec P., Harris A.W.* Binary asteroid population. 1. Angular momentum content // *Icarus*. V. 190. P. 250–259.
- Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., Scheirich P., Ďurech J., Scheeres D.J., Kušnirak P., Hornoch K., Galad A., Pray D.P., Krugly Yu. N., Burkhonov O., Ehgamberdiev Sh.A., Pollock J., Moskovitz N., Thirouin A., Ortiz J.L., Morales N., Husarik M., Inasaridze R. Ya., Oey J., Polishook D., Hanuš J., Kučáková H., Vraštil J., Vilagi J., Gajdoš Š., Kornoš L., Vereš P., Gaftonyuk N.M., Hromakina T., Sergeyev A.V., Slyusarev I.G., Ayvazian V.R., Cooney W.R., Gross J., Terrell D., Colas F., Vachier F., Slivan S., Skiff B., Marchis F., Ergashev K.E., Kim D.-H., Aznar A., Serra-Ricart M., Behrend R., Roy R., Manzini F., Molotov I.E.* Asteroid pairs: A complex picture // *Icarus*. 2019. V. 333. P. 429–463.
- Spoto F., Milani A., Knezevic Z.* Asteroid family ages // *Icarus*. 2015. V. 257. P. 275–289.
- Viikinkoski M., Kaasalainen M., Durech J.* ADAM: A general method for using various data types in asteroid reconstruction // *Astron. and Astrophys.* 2015. V. 576. P. 11. Article id. A8.
- Vokrouhlický D., Bottke W.F., Chesley S.R., Scheeres D.J., Statler T.S.* The Yarkovsky and YORP Effects // *Asteroids IV* / Ed. Michel P., DeMeo F.E., Bottke W.F. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 509–531.