



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 12 • № 1 • 2016 С. 67 – 71

УДК 524.386–87

Исследования экзопланет и протопланетных дисков в Главной астрономической обсерватории НАН Украины

Ю.Г. Кузнецова^{1*}, В.Н. Крушевская¹, О.В. Захожай^{1,4}, А.М. Мацяка³,
А.П. Видьмаченко¹, Я.О. Шляхецкая¹, М.В. Андреев^{1,2}, Я.О. Романюк¹

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, г. Киев

²Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, г. Киев

³Queensland University of Technology, School of Mathematical Sciences, Brisbane

⁴Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg, Germany

В ГАО НАН Украины ведутся многолетние спектральные и фотометрические наблюдения транзитных и не транзитных экзопланетных систем. На основе полученных данных исследуется влияние экзопланет на хромосферную активность родительских звезд, проводится моделирование кривых блеска и расчет параметров экзопланетных систем, поиск планет в системах затменных двойных звезд. В области исследований протопланетных дисков разработан новый алгоритм для расчетов распределения энергии в спектрах систем, содержащих сферический центральный источник и окружающий его протопланетный диск.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКЗОПЛАНЕТ ТА ПРОТОПЛАНЕТНИХ ДИСКІВ В ГОЛОВНІЙ АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ НАН УКРАЇНИ, Кузнецова Ю.Г., Крушевська В.М., Захожай О.В., Мацяка А.М., Видьмаченко А.П., Шляхецкая Я.О., Андреев М.В., Романюк Я.О. — В ГАО НАН України ведуться багаторічні спектральні та фотометричні спостереження транзитних та не транзитних екзопланетних систем. На основі отриманих даних досліджується вплив екзопланет на хромосферну активність батьківських зір, проводиться моделювання кривих блиску і розрахунки параметрів екзопланетних систем, пошук планет в системах затемнених подвійних зір. В області досліджень протопланетних дисків розроблено новий алгоритм для розрахунків розподілу енергії в спектрах систем, які містять сферичне центральне джерело та протопланетний диск, що його оточує.

THE STUDY OF EXOPLANETS AND PROTOPLANETARY DISCS IN THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF NAS OF UKRAINE, by Kuznyetsova Yu., Krushevska V.N., Zakhzhay O.V., Matsiaka O.M., Vidmachenko A.P., Shliakhetskaya Ya.O., Andreev M.V., Romanyuk Ya.O. — Long-term spectral and photometric observations of transit and nontransit exoplanet systems are carried out in MAO NAS of Ukraine. On the base of obtained data we study the influence of exoplanets on chromospheric activity of the host stars, model the light curves, calculate exoplanet system's parameters and search planets in eclipsing binary star's systems. In the field of protoplanetary disc researches it was developed a new algorithm for calculation of the energy distribution in spectra of systems containing a spherical central source and a surrounding protoplanetary disc.

Ключевые слова: экзопланеты; транзиты; тайминг; протопланетные диски.

Key words: exoplanets; transits; timing; protoplanetary discs.

1. ВВЕДЕНИЕ

В отделе Физики планетных систем ГАО НАН Украины исследования экзопланет на основе оригинальных спектральных и фотометрических данных ведутся с 2000 г. в следующих направлениях:

1. Спектральные и фотометрические исследования транзитных экзопланетных систем. Моделирование кривых блеска. Расчет параметров систем «звезда–планета».
2. Спектральные и фотометрические исследования хромосферной активности звезд солнечного типа в экзопланетных системах.
3. Поиск планет в системах затменных двойных звезд.

Многоцветные фотометрические наблюдения проводятся на двух телескопах «Целестрон–14''» (ГАО НАНУ и наблюдательная станция Лесники), а также на Zeiss–600 и Meade LX200 14'' (обсерватория пика Терскол) с использованием BVR-фильтров системы Джонсона. Спектральные наблюдения проводятся на 2-м телескопе пика Терскол с использованием кудэ эшелле спектрометра с высоким разрешением ($R = 45\,000$ и $120\,000$).

Также последние 10 лет ведутся исследования околозвездных дисков. Разработан новый алгоритм для расчетов распределения энергии в спектрах систем, содержащих сферический центральный источник и окружающий его протопланетный диск, имеющий разные размеры внутренних полостей и разные законы расширения. Алгоритм позволяет моделировать распределения энергии в спектрах (РЭС) систем

* Кузнецова Юлиана Геннадиевна; ✉ juliana@mao.kiev.ua, sagittari07@gmail.com

с центральной щелью и без нее, получать выражения для предельных углов наклона к наблюдателю и площадей проекций составляющих систем, учитывать различные варианты их взаимного экранирования. Используя этот алгоритм, моделируются РЭС от звезд и субзвезд с разными массами (от коричневых карликов до горячих звезд спектрального класса В), которые окружают диски на разных стадиях эволюции (от 1 до 100 млн. лет).

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

2.1. Транзитные экзопланетные системы

Используя оригинальные фотометрические данные и данные миссии KEPLER, проводится моделирование кривых блеска транзитных явлений экзопланетных систем методом Монте-Карло по схеме Марковской цепи (рис. 1) [6, 7].

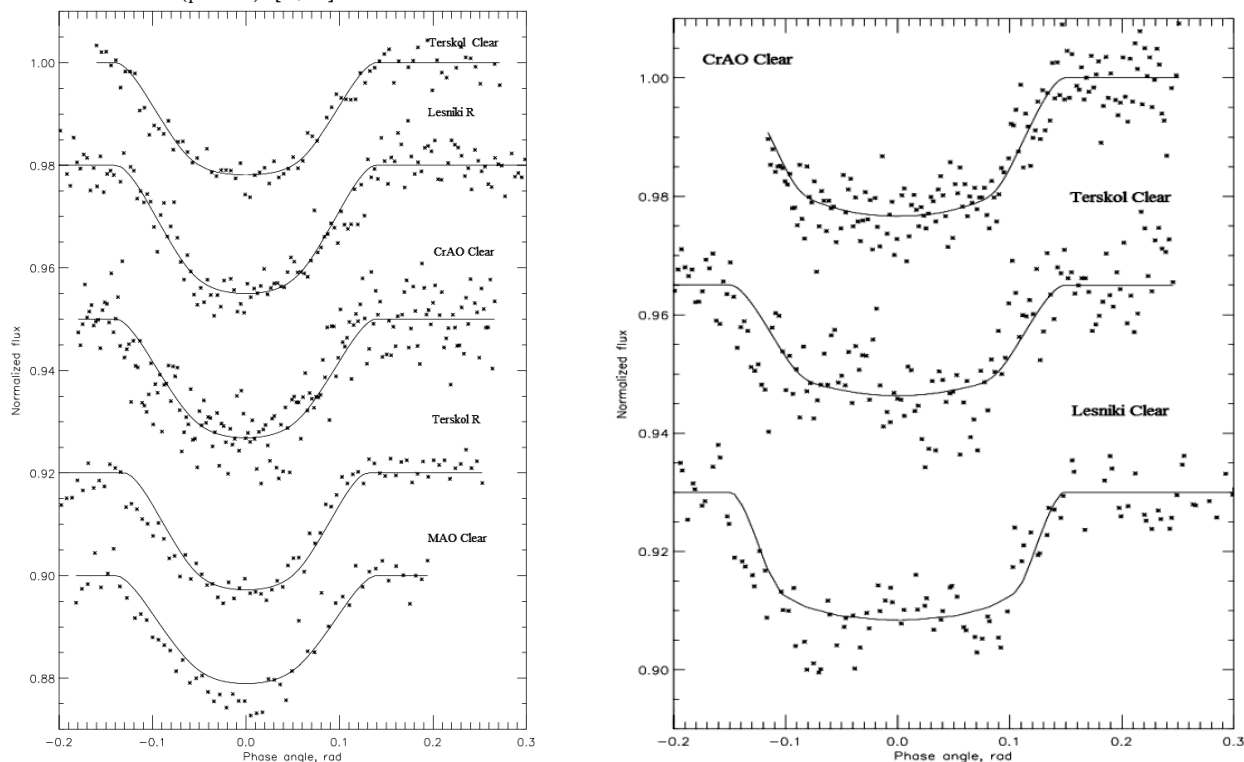


Рис. 1. Фазовые кривые блеска для TrES-3 (a) и Qatar-1 (b), полученные на разных обсерваториях. Точки — наблюдательные данные. Сплошные кривые получены моделированием с наилучшими параметрами

Если планета найдена транзитным методом, то отклонения в периодичности наблюдаемых транзитов позволяют обнаружить в системе дополнительные планеты. Взаимное гравитационное влияние планет приводит к вариациям времени наступления этих транзитных явлений. При этом точность метода довольно высока и позволяет найти планеты размером с Землю.

На основе полученных кривых методом вариации момента времени середины транзита (TTV) мы проводим поиск дополнительных внесолнечных планет для ряда транзитных систем. С использованием авторской программы рассчитываются основные орбитальные параметры систем звезд с планетами: отношение радиусов планеты и звезды (R_p/R), углы наклона плоскости орбиты планеты (i), эксцентриситеты орбит экзопланет (e) [5, 8].

2.2. Спектрофотометрические исследования хромосферной активности звезд солнечного типа в экзопланетных системах

Цель данной работы — исследование влияния, которое могут оказывать близкорасположенные массивные экзопланеты на хромосферы их родительских звезд; поиск переменности хромосферной активности ряда звезд, имеющих экзопланеты; поиск корреляции такой переменности с орбитальными периодами экзопланет и их гармониками, что может быть проявлением влияния этих планет на хромосферы родительских звезд.

Проводятся многолетние фотометрические наблюдения и анализ данных для четырех систем HD68988, HD168746, HD219828 и Quatar-1, и спектральные — для HD189733. Все системы содержат экзопланеты с малыми орбитальными периодами (1,5–6,5 суток) и массами в пределах $0,23 - 1,9 M_{Jup}$.

Выявление вариаций хромосферной активности родительских звезд, возникающих под воздействием их близкорасположенных массивных планет-гигантов, основано на анализе переменности наиболее мощных хромосферных линий H&K CaII и H α .

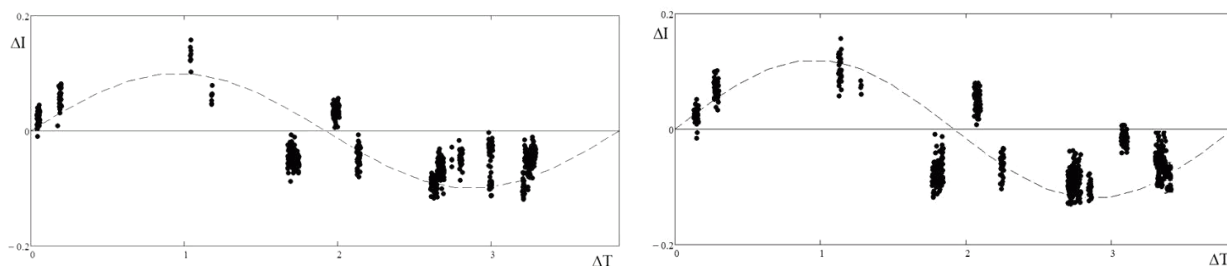


Рис. 2. Фазовые кривые блеска системы HD219828 (2013г.) в фильтрах В (1), R (2), свернутые с орбитальным периодом планеты $P_{\text{орб}} = 3,83$ сут. Амплитуды вариаций: $A_R = 0,012 \pm 0,007^m$, $A_B < 0,012 \pm 0,007^m$

В результате фотометрических исследований обнаружена переменность в фазовых кривых блеска в В- и R-фильтрах системы Джонсона, содержащих линии H&K CaII и H α , для четырех указанных экзопланетных систем (рис. 2). После проведения периодограммного Фурье-анализа данных найдены периоды вариаций, соответствующие орбитальным периодам экзопланет и их гармоникам. Это указывает на возможную связь изменений хромосферной активности с орбитальными периодами экзопланет. Амплитуды вариаций лежат в диапазоне 0,055–0,015 звездных величин в различных фильтрах [9].

В спектрах системы HD189733, полученных на протяжении явления транзита, обнаружены центральные эмиссионные пики в ядрах линий H&K CaII, которые, как известно, являются индикаторами хромосферной активности [4].

2.3. Поиск планет в системах затменных двойных звезд

Значительное внимание уделяется фотометрии затменных двойных систем и поиску возможных компаньонов в таких системах. Так, в рамках международной наблюдательной кампании “The Dwarf project: Eclipsing binaries — precise clocks to discover exoplanets” проводится фотометрическое патрулирование более 50 короткопериодических систем: маломассивные двойные с К–М карликами, короткопериодические горячие субкарлики (sdB, sdO) с М компонентами, системы с белым карликом [10].

Когда более яркая звезда закрывается диском второй звезды, яркость системы падает. Первичное затмение — это момент времени минимальной светимости. Также наблюдается меньшее по амплитуде вторичное затмение, когда менее яркая звезда заходит за диск более яркой. Если вокруг такой системы вращается планета, то звезды под действием гравитации планеты смещаются относительно центра масс системы «звезды–планета» и двигаются по модифицированной орбите. В результате этого моменты минимумов затмений будут постоянно меняться. Цель проекта — исследование периодичности смещения этих минимумов на основе высокоточного определения времени минимумов затмений.

В рамках международного проекта SPAREBIS “Search for Planets Around Eclipsing Binary Stars” проводится работа по обнаружению дополнительных тел на основе фотометрических данных, полученных для систем тесных затменных двойных звезд: Ar CrB, AC Boo, V1097 Her, CG Cyg, TZ Lyr, HS Aur, CV Boo, AB And.

В результате анализа данных транзитным методом в системах CV Boo и V0873 Per обнаружены неизвестные ранее компоненты (табл. 1).

Таблица 1. Параметры третьего тела в системах CV Boo и V0873 Per (красный карлик)

Объект	$P_{\text{орб}}$ (3), сут	M_3	e
CV Boo	$74,43 \pm 0,06$	$\approx 0,3M_{\odot}$	$\approx 0,7$
V0873 Per	297 ± 15	$\approx 0,2M_{\odot}$	$\approx 0 \div 0,05$

Для затменной системы CV Boo в правой части рис.3 показан график (О–С) — теоретическая кривая и наблюдательные точки. Ассиметричность кривой объясняет эксцентриситет орбиты третьего компонента в системе, равный $e \approx 0,7$.

3. ПРОТОПЛАНЕТНЫЕ ДИСКИ: ИХ ГЕОМЕТРИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ

В процессе звёздообразования могут сложиться физические условия, при которых звезда окружена протопланетным диском, в том случае, если момент количества движения системы попадает в определённый интервал [1]. Тогда в плоскости, перпендикулярной оси вращения протозвёзды, начинает формироваться аккреционный диск (объекты класса 0 и 1). Со временем аккреция вдоль плоскости диска и на центральный объект постепенно уменьшается, и основными факторами, влияющими на эволюцию диска, становятся испарение вещества и силы вязкости (объекты класса 2). На этом этапе формируется область, внутри которой нет пыли — внутренняя щель, а также начинают формироваться протопланеты. С испарением газовой составляющей переработанная пылевая компонента формирует осколочный диск (объекты класса 3). Подобное представление о формировании планетных систем было сформулировано ещё в 60-х годах Сафроновым [2, 3], однако первое наблюдательное подтверждение было получено лишь

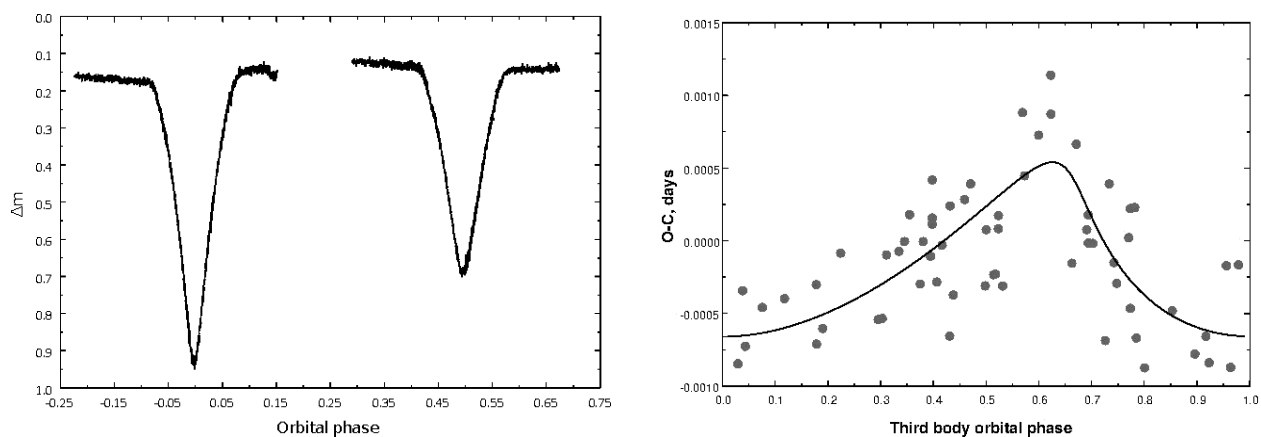


Рис. 3. Кривая блеска в Bessell R-фильтре и график (O-C)

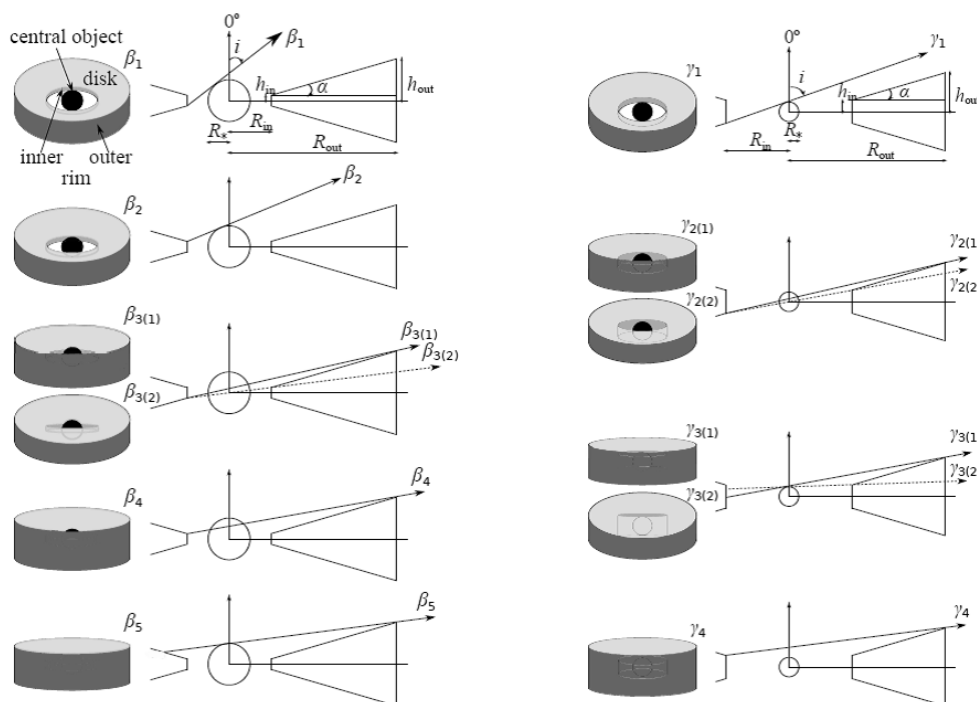


Рис. 4. Схемы ключевых конфигураций для критических углов и соответствующих проекций излучающих поверхностей [15] для геометрически узких дисков (левая часть рисунка) и геометрически толстых дисков (правая часть рисунка)

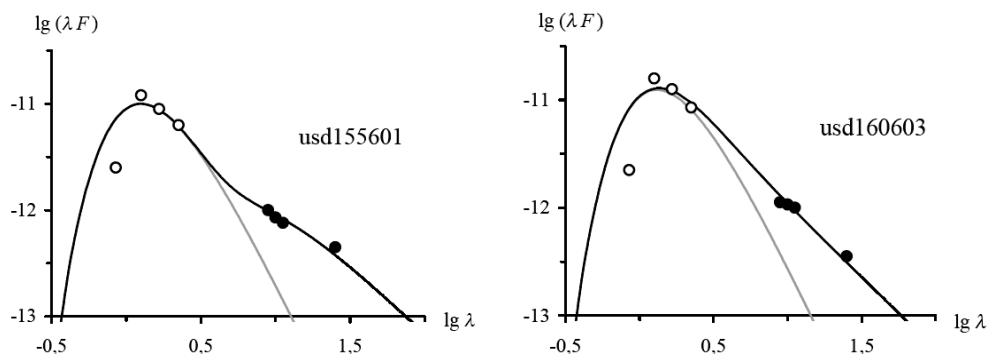


Рис. 5. Примеры сравнения наблюдательных данных (кружки) и моделируемых РЭС для систем коричневый карлик + диск (черные линии) и только коричневых карликов (серые линии) для usd155601 и usd160603. Белые кружки — потоки, зафиксированные космическим телескопом им. Спитцера; черные кружки — наземные наблюдения [11]. Ед. измерения длины волны $[\lambda]$ — мкм

в 1984 году с обнаружением избытка излучения в инфракрасной области спектра Веги космическим телескопом IRAS.

За последние 10 лет в ГАО НАН Украины была разработана геометрическая модель дисков, позволяющая моделировать потоки излучения от протопланетных дисков, окружающих маломассивные звезды и коричневые карлики [12, 13, 14, 15]. Систематизация возможных вариантов расположения систем в пространстве проводилась в два этапа: сначала выделялись критические углы в пределах, в которых необходимо рассматривать определенные геометрические конфигурации, затем аналитически получались выражения для расчетов их площадей. На рис. 4 схематически показаны рассматриваемые геометрические конфигурации для критических углов систем с внутренними щелями. Представлены проекции систем с дисками, ориентированными к наблюдателю под разными критическими углами, для которых были созданы новые расчетные методы. Ожидается, что большинство первичных протопланетных дисков должны быть геометрически тонкими (полутолщина меньше радиуса звезды). Геометрически толстые диски (полутолщина превышает радиус центрального объекта) — это переходные диски с большими внутренними полостями. За счет очень большого внутреннего радиуса (несколько десятков а.е.) и того, что радиальный закон изменения полутолщины диска ожидается подобным первичному диску, внутренняя полутолщина такого диска должна существенно превышать радиус центральной звезды (или коричневого карлика). Радиальный закон изменения полутолщины первичного диска: $h_r = 0,1R_*(r/R_*)^{9/8}$, где r — радиальное расстояние диска, R_* — радиус звезды (или коричневого карлика).

Чтобы протестировать полученный алгоритм расчёта распределения энергии в спектре, выполнена аппроксимация наблюдательных данных [14]. Построены спектральные распределения для 10 субзвёздных объектов с дисками из рассеянного скопления Верхнего Скорпиона [11]. На рис. 5 показаны в качестве примера два из них. Кружками обозначены наблюдения Шольца [11]: белыми — наземные наблюдения, черными — наблюдения космического телескопа Спитцер. Черной линией показаны спектральные распределения энергии для систем с дисками, которые лучше всего согласовывались с наблюдательными данными, серой — поток от субзвезды без диска.

ЗОВ благодарит фонд Немецкого академического обмена (DAAD), стипендия № 91613113.

1. Рузмайкина Т.В. Угловой момент протозвезд, порождающих протопланетные диски // Письма в Астрон. журн. — 1981. — **7**. — С.188–190.
2. Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969. — 244 с.
3. Сафронов В.С., Рузмайкина Т.В. О переносе момента количества движения и аккумуляции твердых тел в солнечной туманности // Протозвезды и планеты / под ред. Т.Герелса. — 1982. — **2**. — С.623–644.
4. Шляхецкая Я.О., Кузнецова Ю.Г., Видьмаченко А.П., Крушевская В.Н. Переменность спектральных линий экзопланетной системы HD189733 во время транзита // Вісник Астрономічної школи. — 2014. — **10**, № 3. — С.147–151.
5. Шляхецкая Я., Кузнецова Ю., Мацяка А. и др. Применение метода вариации времени середины транзита (TTV) для экзопланетной системы TrES-3 // Вісник Астрономічної школи. — 2015. — **11**, № 1. — С.48–52.
6. Gimenez A. Equations for the analysis of the light curves of extra-solar planetary transits // The Astrophysical Journal. — 2006. — № 450. — P.1231–1237.
7. Kopal Z. Language of the stars: A Discourse on the theory of the light changes of eclipsing variables. — Netherlands: Springer Netherlands, 1979.
8. Krushevska V., Kuznyetsova Yu., Matsiaka O., et al. Determination of parameters of transit exoplanets, using data obtained at the small telescopes // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso (Proceedings). — 2014. — **43**, № 3. — P.458–458.
9. Kuznyetsova Yu., Krushevska V., Andreev M., et al. Photometric researches of chromospheric activity variations for star systems with exoplanets using small telescopes // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2014. — **43**, № 3. — P.408–408.
10. Pribulla T., Vaňko M., Ammler-von Eiff M., et al. The Dwarf project: Eclipsing binaries — precise clocks to discover exoplanets // Astronomische Nachrichten — 2012. — **333**, Issue 8. — P.754.
11. Scholz A., Jayawardhana R., Wood K., et al. Evolution of Brown Dwarf Disks: A SPITZER Survey in Upper Scorpius // Astrophys. J. — 2007. — **660**. — P.1517–1531.
12. Zakhzhay O.V. Spectral energy distribution simulations for substars with gapless disks // Radio Physics and Radio Astronomy — 2011. — **2**, № 2 — P.125–132.
13. Zakhzhay O.V. Spectral energy distribution simulations for substars with disks having inner holes // Radio Physics and Radio Astronomy. — 2011. — **2**, № 3 — P.211–220.
14. Zakhzhay V.A., Zakhzhay O.V., Vidmachenko A.P. Peculiarities of simulation of thin flat discs with central objects in accordance with their spatial location // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2011. — **27**, № 3 — P.140–153.
15. Zakhzhay O.V., del Burgo C., Zakhzhay V.A. Geometry of highly inclined protoplanetary disks // Advances in Astronomy and Space Physics — 2015. — **5**. — P.33–38.

Поступила в редакцию 9.08.2016

Принята к печати 14.09.2016