



УДК 52-13

Высокоточная ПЗС- фотометрия¹ транзитных экзопланетных систем

К. И. Иванов (ivorypalace@gmail.com)

Аннотация. В настоящее время всё более популярной среди исследователей планет становится экзопланетная астрономия. Объектом ее исследований являются внесолнечные планеты и системы, в состав которых они входят. В числе методов исследования экзопланет выделяется метод транзитов, позволяющий получать данные о системе по её фотометрическим характеристикам в фазе транзита. Прецизионные фотометрические наблюдения позволяют выявить ряд тонких эффектов, открывающих путь к пониманию физических процессов в экзопланетной системе. Высокая точность фотометрии позволяет изучать временные характеристики транзитов, что с учётом орбитального резонанса в перспективе даёт возможность обнаруживать новые планеты.

Ключевые слова: экзопланета, метод транзитов, фотометрия, транзитные эффекты.

Введение

Исследование внесолнечных планет (экзопланет) – молодая, перспективная и быстро развивающаяся область современной астрономии. Выдающийся успех космических миссий CoRoT [2] и KEPLER [4], обусловленный открытием внеатмосферными телескопами большого числа экзопланетных систем, отличающихся широким разнообразием физических параметров, наряду с триумфом принёс и новые проблемы, связанные с необходимостью более детального изучения вновь открытых объектов. Метод транзитов, заключающийся в наблюдении прохождения экзопланеты по диску звезды-хозяина и широко применяющийся в ходе поиска новых экзопланет, оказался потенциально гораздо более информативным, чем могло показаться на первый взгляд: в ходе высокоточных фотометрических исследований тесных экзопланетных систем типа «звезда – горячий юпитер» в стадии транзита были выявлены флуктуации потока излучения, развивающиеся на масштабах времени, значительно меньших времени транзита, и названные впоследствии транзитными эффектами. Природа данного явления в настоящий момент практически не изучена, однако уже сейчас разрабатываются модели, допускающие возникновение транзитных

¹ Прибор с зарядовой связью, русская транскрипция аббревиатуры CCD–Charge-CoupledDevice. Практическое значение в астрономии имеют ПЗС-матрицы – аналоговые интегральные микросхемы, состоящие из светочувствительных фотодиодов, выполненные на основе кремния и выполняющие роль приёмников изображения.

эффектов вследствие физических процессов, протекающих в системе. Потенциально данное предположение даёт возможность получать информацию о гравитационном взаимодействии компонентов системы, влиянии экзопланеты на магнитную активность звезды, наличии в системе иных экзопланет или экзолун косвенным путём с помощью прецизионной фотометрии. Особое место в этом ряду занимает теоретическая возможность обнаружения планет, сравнимых по размеру и массе [6] (и, возможно, по прочим характеристикам) с Землёй, используя явление орбитального резонанса, которое, в свою очередь, обнаруживает себя фотометрически, вызывая периодические вариации времени начала, конца и середины транзита. Результатом успешного развития данного направления может стать открытие большого числа экзопланет, схожих с Землёй по многим параметрам, что впервые позволит рассматривать её не как уникальный объект, а как один среди и в сравнении с прочими.

Ввиду слабого вклада транзитных эффектов в общую фотометрическую картину транзита, исследование данного явления представляет собою непростую задачу, подчас требующую мощных телескопов и специального оборудования. Несмотря на это, сотрудниками Иркутской и Коуровской астрономических обсерваторий был создан алгоритм получения и обработки данных, позволяющий успешно проводить высокоточные фотометрические наблюдения транзитов экзопланет с помощью автоматизированных телескопов малого диаметра «МАСТЕР-II», составляющих основу проекта МАСТЕР, развиваемого учёными ГАИШ МГУ под руководством В. М. Липунова. В настоящей статье приводится краткое техническое описание телескопа, рассматривается упомянутый алгоритм, а также демонстрируются результаты наблюдений, подтверждающие его эффективность.

Метод транзитов

Метод транзитов [7] является наиболее простым, легко реализуемым, но в то же время достаточно мощным методом обнаружения и исследования экзопланет. Данный метод основан на том, что при наблюдении планетной системы «с ребра» планета, с точки зрения земного наблюдателя, может периодически проходить по диску звезды, незначительно (обычно на 1–3 %) ослабляя её блеск. Точные фотометрические наблюдения позволяют построить кривую блеска (рис. 1) и найти период планеты и её радиус. Основными наблюдательными величинами являются глубина транзита ΔF , промежуток времени t_T между первым и четвертым контактами, а также промежуток времени t_F между вторым и третьим контактами.

Сам по себе транзитный метод достаточно информативен. Следует отметить, что изначально он предназначался для обнаружения планет у далёких звёзд, и в настоящий момент весьма успешно применяется с этой целью в рамках миссии «KEPLER». Однако позже выяснилось, что метод пригоден также для изучения фотометрических характеристик транзита экзопланеты по диску звезды-хозяина как процесса, и позволяет опреде-

лить период обращения планеты вокруг звезды, оценить её радиус по величине ослабления блеска, т. е. по доле площади звёздного диска, покрываемой планетой, если радиус самой звезды уже известен [9].

Основная причина вариаций блеска – экранирование потока излучения планетным диском – вовсе не является единственной. На фоне общего снижения оптического потока от звезды во время транзита могут наблюдаться флуктуации яркости на временных масштабах от нескольких минут до десятков минут, так называемые «транзитные эффекты» (далее ТЭ), природа которых на сегодняшний день остаётся неизвестной.

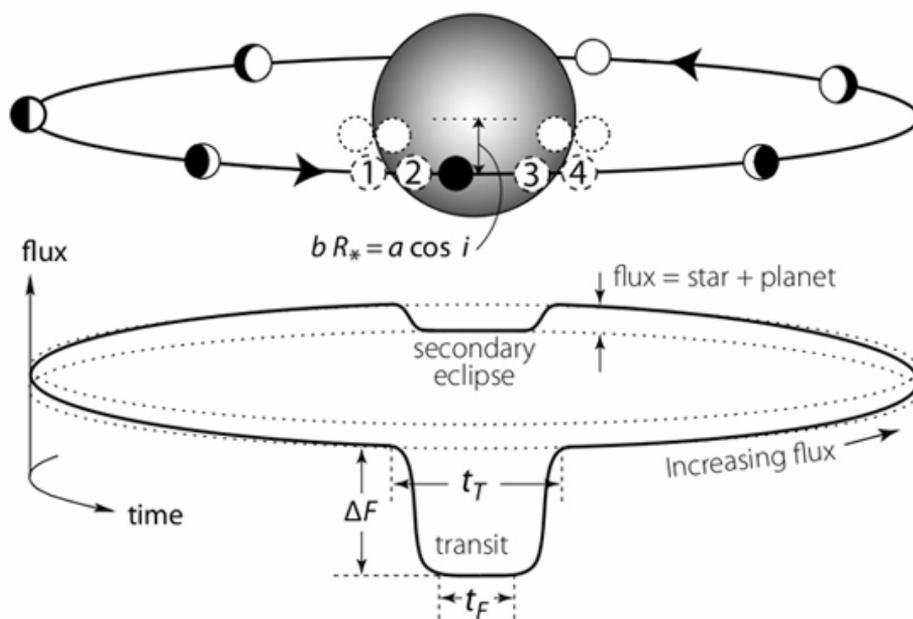


Рис. 1. Схема транзита экзопланеты по диску звезды [7]

Основные теории формирования ТЭ

Приступая к описанию моделей процессов, потенциально способных привести к возникновению ТЭ, сразу отметим, что в рамках настоящей работы будут рассматриваться лишь фотометрические эффекты, предположительно возникающие в результате физических процессов, протекающих в экзопланетных системах. Такие эффекты достоверно зафиксированы в системах звёзд, имеющих экзопланету типа горячий юпитер на очень низкой орбите, обращающуюся вокруг звезды-хозяина с периодом порядка нескольких земных суток. Эффекты, имеющие шумовую природу, а также вызванные неточностями получения и обработки данных, рассматриваться не будут.

Гравитационное взаимодействие компонентов экзопланетной системы, температурные и оптические эффекты

Одной из причин возникновения ТЭ может служить взаимное гравитационное влияние планеты и звезды. Принимая во внимание значительную среднюю массу планеты типа горячий юпитер, обычно превосходящей массу Юпитера, и экстремально низкую орбиту планеты, радиус которой часто менее 0,05 а. е., нетрудно понять, что как звезда, так и планета будут испытывать значительные приливные взаимодействия, потенциально способные повлиять на фотометрические характеристики процесса транзита.

Величина падения блеска звезды в момент транзита планеты по её диску определяется соотношением:

$$D = \left(\frac{R_{pl}}{R_s} \right)^2, \quad (1)$$

где R_{pl} и R_s – радиусы планеты и звезды соответственно. Вообще говоря, формула (1) справедлива для звезды с однородной фотосферой. Условие однородности может не выполняться для звезды, подверженной действию приливных сил, порождаемых планетой-гигантом на низкой орбите. Обращаясь вокруг звезды-хозяина, такая планета «тянет» за собою приливный «горб» по фотосфере звезды. Оптическая толщина в пределах такого «горба» выше, чем в невозмущённой фотосфере, и потому поток излучения из области, охваченной им, снижается, создавая эффект, напоминающий эффект потемнения солнечного диска от центра к лимбу. Экзопланета, на определённой стадии транзита проходящая на фоне «горба», экранирует его в той или иной степени в зависимости от угла, под которым наблюдается транзит относительно луча зрения наблюдателя.

Результатом такого явления могут быть кратковременные плавные вариации блеска звезды на фоне транзита, отличительными особенностями которых являлась бы малая амплитуда и, что более важно, – повторяемость и предсказуемость вследствие неизбежной корреляции с периодом обращения планеты. На самом деле такие явления в настоящий момент не обнаружены, и это позволяет предположить, что в чистом виде подобные ТЭ не наблюдались либо ввиду невозможности достижения необходимой точности измерений, либо ввиду отсутствия физической причины как таковой. Не исключено, что описанный механизм, не наблюдаемый в чистом виде, является причиной более сложных процессов, результат которых проявляется себя как ТЭ. Так, гравитационное воздействие крупной планеты может оказывать существенное влияние и на более глубокие слои звезды, вызывая изменения в ходе процессов в конвективной зоне. Следствием такого возмущения может быть аномальная грануляция и взрывные процессы в фотосфере, имеющие стохастический характер и вызывающие ощутимые вариации блеска.

Приливное воздействие звезды на планету, в совокупности с высокой степенью облучения освещенной стороны последней, может приводить к значительному нагреву дневной стороны планеты. В этом случае взаимодействие вещества освещенной стороны с более холодным веществом неосвещенной может вызвать мощные атмосферные течения турбулентного характера в масштабах планеты и резкие перепады температур (так называемые «термальные инверсии»). Данное явление уже наблюдалось на примере экзопланетной системы НАТ-R-1 [12], однако вопрос причастности подобного рода процессов к возникновению ТЭ остаётся открытым.

К оптическим эффектам, приводящим к возникновению ТЭ, относятся процессы покрытия планетным диском пятенных и факельных полей, присутствующих в фотосфере звезды, в результате чего будут наблюдаться отклонения потока излучения звезды в положительную и отрицательную сторону соответственно. Подобный эффект очень прост, и его роль в рождении ТЭ считается практически доказанной.

Магнитное взаимодействие компонентов экзопланетной системы

Особая роль в изучении ТЭ отводится магнитному взаимодействию компонентов экзопланетной системы, результатом которого может быть ряд сложных и интересных физических процессов, часть которых может проявлять себя фотометрически как ТЭ. Суть магнитного взаимодействия планеты и звезды проста и заключается в предположении значительного взаимного влияния магнитосфер обеих компонент.

Известно, что Юпитер обладает мощным магнитным полем, превышающим земное в 12 раз. Согласно существующим моделям, возникновение магнитного поля Юпитера обусловлено конвективными течениями в слое жидкого металлического водорода, отклоняемыми кориолисовыми силами вследствие быстрого вращения планеты. Экзопланеты типа горячий юпитер предположительно обладают схожим с Юпитером химическим составом, и, возможно, также имеют проводящий слой жидкого металлического водорода, с той лишь разницей, что температура планеты (или, как минимум, её внешних слоёв, обращённых к звезде) достигает 3000 К. Кроме того, мощное приливное воздействие центральной звезды за относительно короткий срок должно синхронизировать орбитальный и суточный периоды планеты, в результате скорость вращения горячего юпитера вокруг своей оси предполагается значительно меньше, чем таковая у Юпитера.

Однако предположение меньшей скорости суточного вращения горячего юпитера вовсе не означает ослабление магнитного поля. Математическое моделирование процессов [14], происходящих в верхних слоях экзопланеты, на основе уравнений МГД в предположении дипольной конфигурации магнитосферы, выявило ряд возможностей генерации мощных магнитных полей. Среди них – интенсивная конвекция сильно ионизированно-

го газа (ввиду высокой температуры планеты) в верхней атмосфере, магнитная индукция электрического тока в слоях жидкого металлического водорода в результате быстрого движения планеты в пределах магнитосферы звезды. Кроме того, отмечена возможность усиления динамо-эффекта в недрах планеты за счёт глубоких конвективных течений проводящего вещества, являющихся следствием как температурных, так и приливных эффектов (см. п.п. 2.1).

Таким образом, авторы [14] заключают, что магнитное поле горячего юпитера может быть не только сопоставимо, но и существенно превышать таковое у Юпитера, а значит, и влиять на активность звезды-хозяина, которая, в свою очередь, в значительной степени обусловлена собственными магнитными циклами и процессами. Результатом такого влияния могут быть, например, звёздные вспышки, которые, в случае достаточной интенсивности, вполне могут быть причиной возникновения ТЭ. Так как в основе теории возникновения вспышек на Солнце лежит концепция так называемого пересоединения магнитных линий, подобный подход можно по аналогии применить к другим звёздам, свойства которых с той или иной степенью достоверности близки свойствам Солнца. Солнечная вспышка развивается как результат пересоединения линий магнитного поля высокой напряжённости, первичным источником которого является механизм МГД-динамо, предположительно возникающий на границе конвективной и лучистой зон в результате дифференциального вращения Солнца.

Пересоединение магнитных линий Солнца предположительно происходит в отсутствие внешнего влияния, однако ничто не исключает возможность развития подобного процесса под влиянием внешнего магнитного поля, каковым может оказаться, например, поле горячего юпитера. Обращаясь вокруг центральной звезды, планета, воздействуя на её магнитосферу, может спровоцировать пересоединение и звёздную вспышку. Более того, в [10] рассматривается возможность пересоединения магнитных линий планеты и звезды. Суть процесса состоит в том, что при достижении некоторого порога напряжённости магнитных полей силовые линии поля экзопланеты пересоединяются на линии звёздного ветра и хромосферы звезды, что может породить в хромосфере области, нагретые до температуры 10^6 К, а также провоцировать вспышки.

Вспышки на звезде, возмущённой близкой планетой, в свою очередь, могут быть многочисленными и мощными, приводящими к частым КВМ, что создаёт вокруг звезды своеобразную оболочку из горячей плазмы [1]. Выброшенная звездой плазма захватывается магнитным полем сложной конфигурации, создаваемым взаимодействующими магнитосферами звезды и планеты, вследствие чего экзопланета движется вокруг звезды сквозь относительно плотную заряженную среду. Сила сопротивления среды в таких условиях может превышать давление звёздного ветра, отчего магнитосфера планеты вытягивается вдоль орбиты подобно кометному хвосту;

по схожей траектории планету непрерывно покидает перегретое ионизированное вещество.

Быстрое обращение планеты вокруг звезды, наряду со всеми упомянутыми выше процессами, может создавать эффект «перемешивания» плазмы в пределах магнитосферы. Это повлечёт возникновение неоднородностей в плазме и, как следствие, возмущения магнитосферы системы планета – звезда, что опять же чревато нестабильностью звезды и даже может вызвать процессы, подобные звёздным вспышкам в плазменном облаке, окружающем светило. Данная теория весьма сложна, основана на математическом моделировании и в настоящее время находится в стадии разработки.

Проект МАСТЕР

Описанные выше теории, рассматриваемые отдельно или в совокупности, могут послужить ценными средствами объяснения природы ТЭ. Основная трудность заключается в том, что на сегодняшний день накоплено достаточно мало наблюдательных данных, позволяющих соотнести ТЭ с той или иной теорией, которая, в свою очередь, не может быть достаточно хорошо развита, поскольку отсутствуют результаты наблюдений. В этой связи особую актуальность приобретает задача проведения как можно большего числа наблюдений транзитов экзопланет, получения качественных данных прецизионной фотометрической обработки, позволяющей уверенно выявить ТЭ.

Астрономический комплекс МАСТЕР – один из самых эффективных в своём классе и активно развивающихся проектов в области прикладной астрономии на территории России. Созданный учёными ГАИШ МГУ в 2002 г. с целью изучения космических гамма-всплесков, сегодня проект представляет собою мощную сеть наблюдательных инструментов и систем анализа и обработки данных.

Телескоп «МАСТЕР-II» [5], составляющий основу проекта, представляет собой систему из двух одинаковых телескопов системы «Гамильтонас» диаметром объектива 400 мм, фокусное расстояние объектива 1000 мм, поле зрения 4 квадратных градуса для каждой трубы. Конструкция телескопа укреплена на экваториальной монтировке NTM-500 фирмы Astelco, Телескоп снабжён набором светофильтров, соответствующих международной фотометрической системе Джонсона – Козинса, двумя ПЗС-приёмниками ArogeeAlta разрешением 4096×4096 пикселей с прямой засветкой и антиблумингом и способен работать в полностью автоматическом и дистанционном режимах.

Техническое оснащение телескопа позволяет осуществлять поиск новых и более детальное исследование уже известных экзопланетных систем методом транзитов. Ниже приводится краткое описание первых наблюдений экзопланетных систем TrES-3и WASP-12 с помощью телескопа «МАСТЕР-II».

Фотометрические наблюдения экзопланетных систем

Калибровка ПЗС-приёмников

Любая оптическая система имеет свои недостатки. Не является исключением и телескоп «МАСТЕР-II», вследствие чего необработанные кадры звёздного неба искажены, что является серьёзным препятствием на пути к качественной фотометрической обработке, и, фактически, делает её невозможной. Для достижения максимальной точности фотометрии необходимо свести к минимуму вклад случайных ошибок в результирующую точность наблюдений. Источниками случайных ошибок являются:

- 1) шум источника. В этом случае накладывается нижний предел на экспозицию. Вклад шума источника уменьшается путем увеличения экспозиции;
- 2) шум ПЗС. Данный шум включает в себя тепловой шум и шум считывания, влияние нелинейности ПЗС, а также вклад попиксельных и внутривнутрипиксельных вариаций чувствительности;
- 3) влияние атмосферы Земли, которое включает в себя: вариации фона неба, изменение экстинкции и атмосферные мерцания (атмосферная сцинтилляция).

Тепловой шум и шум считывания учитываются кадрами темнового тока (DARK), которые вычитаются из некалиброванных кадров.

Учёт теплового шума и шума считывания производился путём вычитания кадров темнового тока (DARK) из «сырых» кадров. Каждый кадр темнового тока получен путём медианного усреднения пяти отдельных кадров, снятых вручную при закрытом затворе с соблюдением температурного режима матриц.

Внутрипиксельные вариации чувствительности, а также так называемое виньетирование устранялось путём деления кадров, полученных на предыдущем этапе, на кадр плоского поля (FLAT). Кадры плоского поля были получены медианным суммированием девяти отдельных кадров – коротких экспозиций по сумеречному небу. Для достижения наилучшего результата съёмка производилась по чистому небу с соблюдением температурного режима. Для каждого из девяти кадров плоского поля были получены и впоследствии вычтены кадры темнового тока. Другим важным критерием является уровень заполнения пикселей: он не должен превышать 70 % и находиться в пределах линейного участка диапазона чувствительности ПЗС-приёмника.

Минимизация влияния свечения земной атмосферы осуществляется путём грамотного подбора соответствующего оптического фильтра. Фильтры подбираются таким образом, чтобы полосы их пропускания не включали в себя частоты, характерные для атмосферной экстинкции и эмиссии. Оптимальным выбором являются широкополосные абсорбционные фильтры R и V .

Более подробно алгоритм стандартной калибровки ПЗС-приёмника описан в [11].

Наблюдения и результаты

Наблюдение экзопланетных систем с последующей прецизионной фотометрической обработкой – нетривиальная задача для астрономических систем с широким полем зрения, в число которых входит телескоп «МАСТЕР-II». Как правило, стандартные алгоритмы фотометрической обработки изображений оказываются неприменимы в данном случае, и потому требуют адаптации под конкретный инструмент и условия наблюдений.

В целях проверки применимости стандартных алгоритмов обработки, используемых в системе МАСТЕР в ходе планового обзора неба, в конце августа 2011 г. были проведены наблюдения экзопланетной системы TrES-3. Наблюдения проводились в удовлетворительных погодных условиях (лёгкая дымка), съёмка исследуемого объекта осуществлялась параллельно в фильтрах V и R с экспозицией 180 с. Обработка полученных изображений выполнена с помощью программного пакета IRAF [13]. Кривые блеска транзита в фильтрах R и V показаны на рис. 2–3.

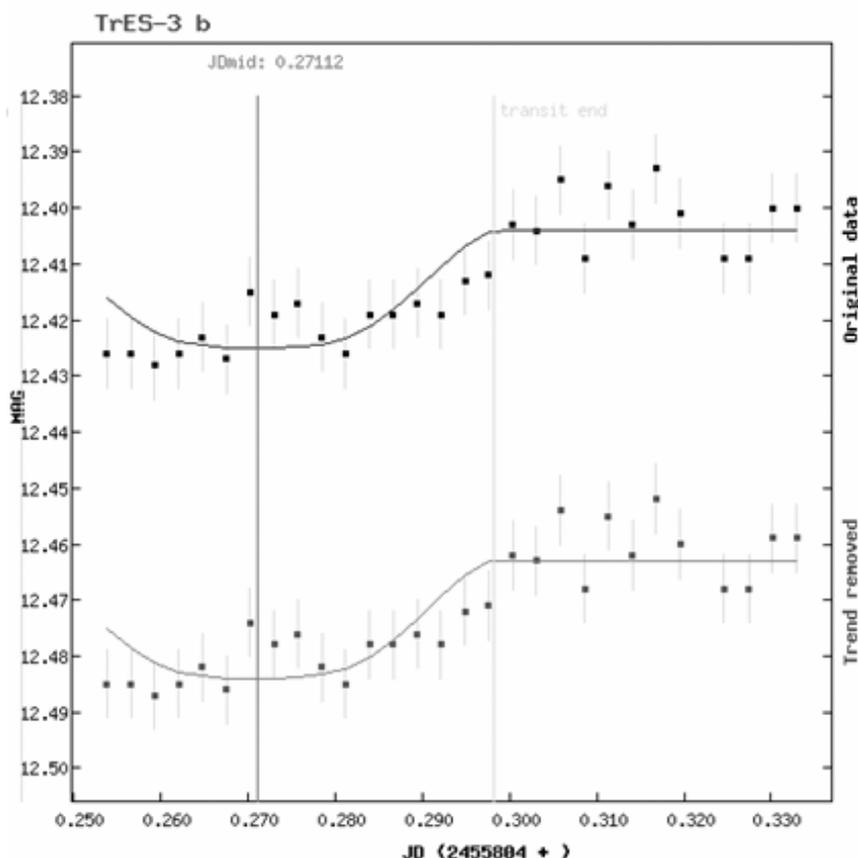


Рис. 2. Кривая блеска транзита экзопланеты TrES-3b по диску звезды-хозяина в фильтре V . Аппроксимированный ход транзита обозначен сплошной линией. Вертикальная черта – середина транзита

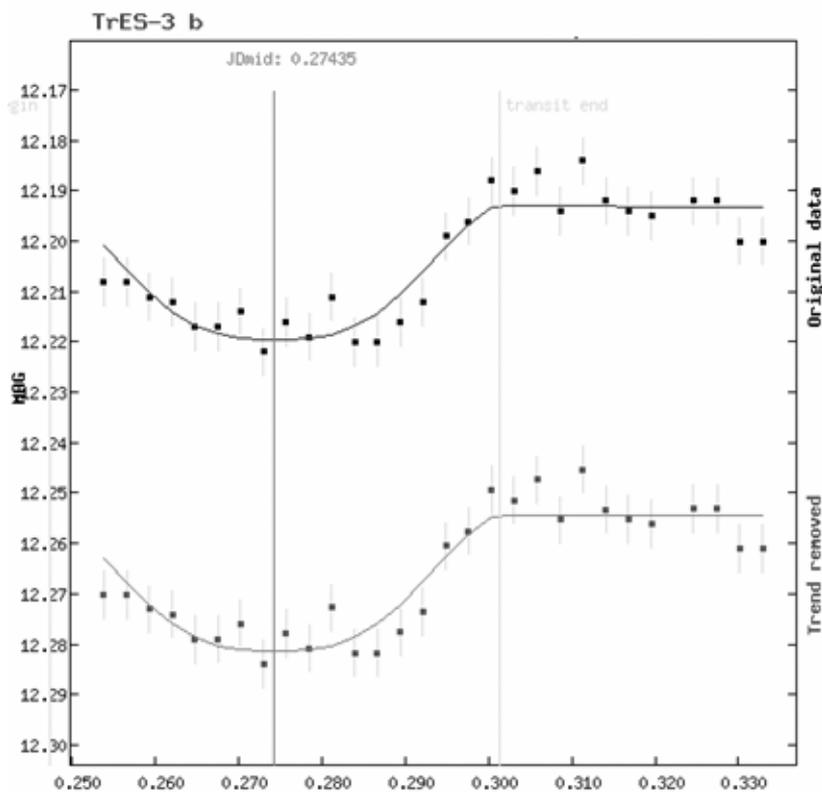


Рис. 3. То же, но в фильтре R

Измеренное отношение сигнал/шум составило 112 единиц, и в целом оценивалось как удовлетворительное. Несмотря на это, полученные кривые блеска демонстрируют «выбросы» на масштабе одного кадра, что свидетельствует в пользу предположения о неверной центровке апертуры в процессе фотометрической обработки кадров. Первые 35 % времени транзита исключены в процессе обработки ввиду высокого уровня шума, связанного с флуктуациями атмосферного фона. Высокая степень разброса данных на кривой блеска также явилась причиной невозможности определения наличия «транзитных эффектов». Достигнутая точность составила $0,01^m$. Таким образом, на практике удалось получить неплохую фотометрическую точность, позволяющую фиксировать факт транзита и измерять некоторые его параметры, такие как глубина и продолжительность. Однако даже с применением особого алгоритма фиттинга не удалось получить точности, достаточной для наблюдения тонких транзитных эффектов.

С целью достижения более высокой точности было принято решение полностью отказаться от стандартного алгоритма фотометрической обработки, заменив его на новый. Новый алгоритм должен был учитывать особенности телескопа «МАСТЕР-II», среди которых важнейшей является большое поле зрения. Общая схема работы алгоритма выглядит следующим образом:

1. Выбирается фрагмент кадра $20' \times 20'$, содержащий объект и несколько ярких звёзд в его окрестности. Данный шаг необходим для минимизации влияния вариаций фона неба в пределах кадра, имеющих место в широком поле зрения.

2. Формируется ансамбль опорных звёзд по заданному критерию (яркостная и локализационная близость, малая ошибка измерения, близкий колор-индекс), к ним применяется алгоритм медианной фильтрации.

3. Выполняется исправление данных за неоднородность прозрачности атмосферы методом, описанным в [3].

4. Изучается поведение опорных звёзд. Фотометрически нестабильные звёзды исключаются из ансамбля.

5. Строится кривая блеска объекта.

6. Точность наблюдений определяется поведением фотометрически близкой контрольной звезды.

Данный алгоритм учитывает все явные особенности телескопа «МАСТЕР-II», что даёт возможность максимально нивелировать шумы и ошибки измерения. Для проверки работоспособности алгоритма в сентябре 2011 г. были проведены наблюдения экзопланетной системы WASP-12 в стадии транзита. Результат представлен на рис. 4–5.

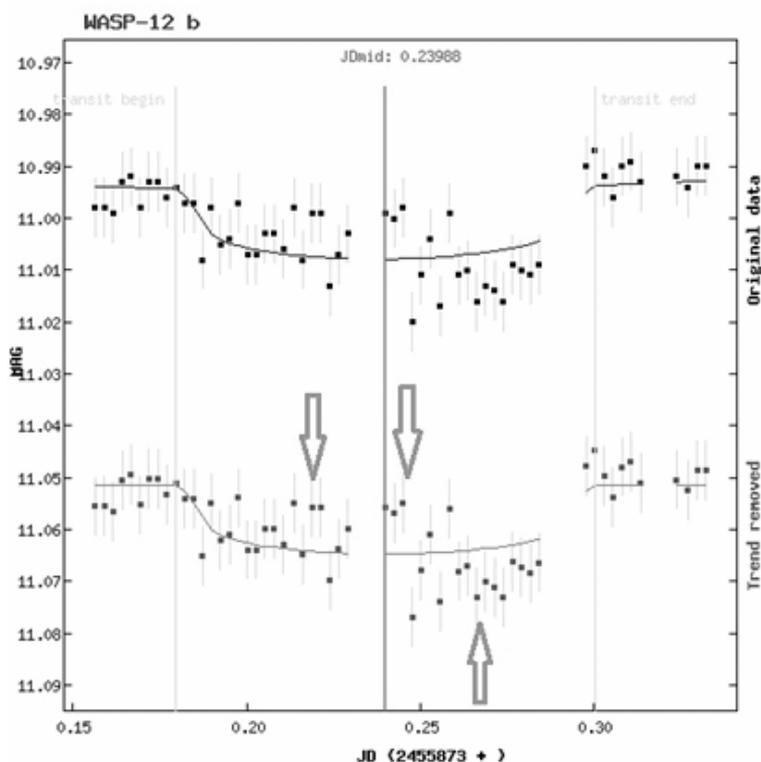


Рис. 4. Кривая блеска транзита экзопланеты WASP-12b по диску звезды-хозяина в фильтре V . Стрелками обозначены тонкие транзитные эффекты

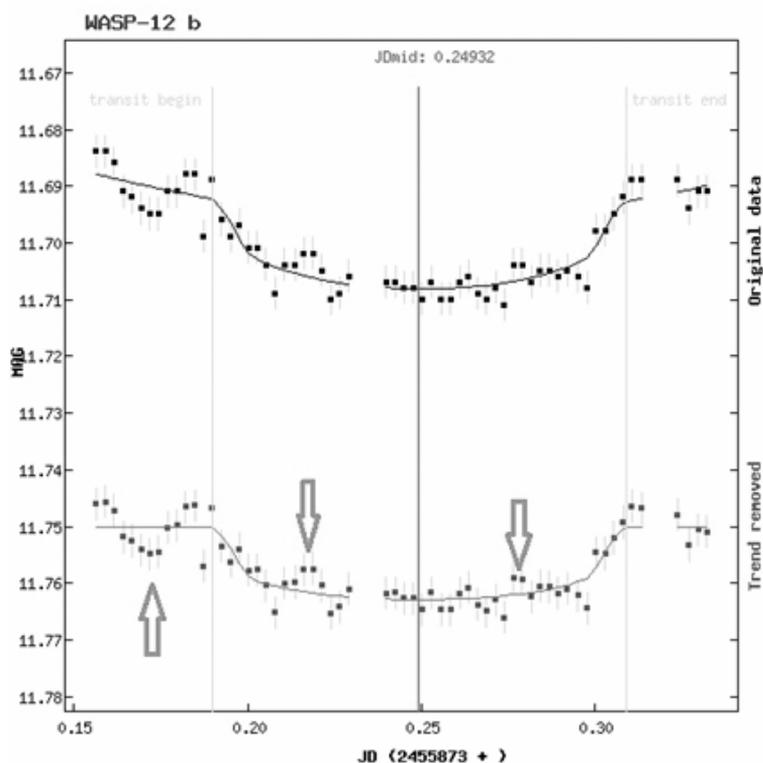


Рис. 5. То же, но в фильтре R

Как видно из рисунка, кривые блеска имеют плавный характер, что свидетельствует об успешной работе алгоритма. Отношение S/N на уровне исследуемой звезды равно 180, стандартное отклонение фона для измерений в фильтрах R и V составило 0,003 и 0,004 соответственно. Отчётливо видны вариации блеска звезды в фазе транзита («транзитные эффекты»), происходящие на временных масштабах в 15 и 30 мин. Плавный характер кривой блеска и отсутствие пикообразных «выбросов» свидетельствуют об успешном исправлении критических ошибок позиционирования апертуры и низком уровне остаточного шума.

Высокое качество фотометрической обработки данных позволяет успешно рассчитать практическую длительность транзита: в данном случае интервал $t_T = 171,9 \pm 4,2$ мин, что соответствует теоретическому и среднему практическому значениям по данным ETD [8]. Момент середины транзита определён с точностью до 1,5 мин, что позволяет использовать фотометрические данные для анализа временных характеристик транзита, и, следовательно, имеется и потенциальная возможность поиска новых тел в системе с учётом явления орбитального резонанса, реализация которой возможна при условии наличия достаточно большого числа успешных наблюдений.

Выводы

Таким образом, на основании результатов первых наблюдений экзопланетных систем TrES-3 и WASP-12 оптимизирован процесс обработки кадров, методами прецизионной фотометрии получены кривые блеска транзитов экзопланет TrES-3b и WASP-12b по дискам родительских звёзд, выявлен ряд «транзитных эффектов». Объяснение природы обнаруженных эффектов требует дальнейших наблюдений, однако высокая степень свободы конечных данных от шума уже сейчас позволяет с большой вероятностью предположить физическую природу данного явления. Стоит отметить, что некоторые солнечные вспышки действительно развиваются на сходных масштабах времени. Также вариации яркости могут быть следствием покрытия планетой пятнистых и факельных полей. Высокая точность фотометрии позволяет проводить анализ временных характеристик транзитов, выявляя их вариации с точностью до 1,5 мин, что даёт возможность обнаружения новых тел, опираясь на явление орбитального резонанса. Работа по данной теме продолжается.

Список литературы

1. The dynamics of stellar coronae harboring hot-jupiters II. A space weather event on a hot-jupiter / O. Cohen [et al.] // arXiv:1102.4125v2. 2011.
2. CoRoT [Electronic resource]. – URL: <http://www.esa.int/esaMI/COROT/index.html>.
3. *Everett M.* Technique for Ultrahigh-Precision CCD Photometry / M. Everett, S. Howell // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2001. – Vol. 113, Iss. 789. – P. 1428–1435.
4. KEPLER [Electronic resource]. – URL: <http://kepler.nasa.gov>.
5. MASTER Robotic Net / V. Lipunov [et al.] // Advances in Astronomy. – 2010. – Vol. 2010. – article id. 349171.
6. Estimating transiting exoplanet masses from precise optical photometry / D. Mislis [et al.] // arXiv:1112.2008v1. 2011.
7. *Perryman M.* The Exoplanet Handbook / M. Perryman. – N. Y. : Cambridge University Press, 2011. – 410 p.
8. Exoplanet Transit Database. Reduction and processing of the photometric data of exoplanet transits / S. Poddany [et al.] // New Astronomy. – 2010.
9. Extrasolar Planet Transits Observed at Kitt Peak National Observatory / P. Sada [et al.] // arXiv:1202.2799v1. 2012.
10. Star-planet interactions / E. Shkolnik [et al.] // arXiv:0809.4482v1. 2008.
11. 1 % Photometry: End-to-end Calibration of Astronomical Telescopes and Detectors / C. Stubbs [et al.] // arXiv:astro-ph/0604285 v1. – 2006.
12. SPITZER IRAC secondary eclipse photometry of the transiting extrasolar planet HAT-P-1b / K. Todorov [et al.] // arXiv:0911.2218v2. 2009. – URL: http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/author_form?author=Abazajian,+K&fullauthor=Abazajian,+%20Kevork+%20N.&charset=UTF-8&db_key=AST/
13. *Tody D.* IRAF in the Nineties / D. Tody // Astronomical Data Analysis Software and Systems II.
14. Hot Jupiter magnetospheres / G. Trammell [et al.] // arXiv:1011.0017v1. 2010.

Precise CCD-photometry of Transiting Exoplanet Systems

К. I. Ivanov

Annotation. Nowadays popularity of exoplanetary astronomy increases. Research objects of this branch are extrasolar planets and systems into which structure they are included. Among other methods of exoplanets research the transit method. Precision photometric supervision of exoplanetary systems allows to reveal a number of thin effects which, may be a key to understanding of the physical processes proceeding in system. High precision photometry allows to study temporary characteristics of transits that taking into account the phenomenon of an orbital resonance in the long term gives the chance to find new planets.

Key words: exoplanet, transit method, photometry, transit effects.

Иванов Кирилл Ильич

младший научный сотрудник

Иркутский государственный университет

664003, г. Иркутск, К. Маркса, 1

тел.: (3952) 27-12-94

Ivanov Kirill Ilich

Research Scientist

Irkutsk State University

1, K. Marx st., Irkutsk, 664003

tel.: (3952) 27-12-94