



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 11 • № 1 • 2015 С. 48 – 52

УДК 524.386-878

Применение метода вариации времени середины транзита (TTV) для экзопланетной системы TrES-3

Ю. Кузнецова^{1*}, Я. Шляхецкая¹, А. Мацяка², В. Крушевская¹, Я. Романюк¹

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

На основе оригинальных фотометрических данных проведено моделирование кривых блеска методом Монте-Карло нескольких транзитных явлений в экзопланетной системе TrES-3. С использованием этих кривых, произведены расчеты точных значений центральных моментов транзитов для оценки возможности поиска новых планет методом тайминга в уже известных экзопланетных системах с использованием наземных наблюдений на малых телескопах. Также получены уточненные значения некоторых физических и орбитальных параметров системы TrES-3 — отношение радиусов планеты и звезды (R_p/R_) и угла наклона плоскости орбиты планеты (i).*

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ВАРІАЦІЇ ЧАСУ СЕРЕДИНИ ТРАНЗИТУ (TTV) ДЛЯ ЕКЗОПЛАНЕТНОЇ СИСТЕМИ TrES-3, Кузнецова Ю., Шляхецька Я., Мацяка О., Крушевська В., Романюк Я. — На основі оригінальних фотометричних даних проведено моделювання кривих блиску методом Монте-Карло декількох транзитних явищ для екзопланетної системи TrES-3. З використанням цих кривих зроблено розрахунки точних значень центральних моментів транзитів для оцінювання можливості пошуку нових планет методом таймінгу у вже відомих екзопланетних системах із застосуванням наземних спостережень на малих телескопах. Також розраховано уточнені значення деяких фізичних та орбітальних параметрів системи TrES-3 — відношення радіусів планети і зорі (R_p/R_) та кута нахилу площини орбіти планети (i).*

APPLICATION OF TRANSIT TIMING VARIATION METHOD (TTV) TO EXOPLANET SYSTEM TrES-3, Kuznyetsova Yu., Shliakhetskaya Y., Matsiaka O., Krushevska V., Romanyuk Ya. — On the basis of the original photometric data, the light curves of several transits in the exoplanet system TrES-3 were simulated by Monte Carlo method. Using these curves, the estimates of precise values of mid-transit time were calculated to assess the possibility of finding new planets by timing method in already known exoplanet systems using ground-based observations at small telescopes. More accurate values of the some orbital and physical parameters of TrES-3 system were also obtained including following the planet-star radius ratio (R_p/R_), the angle of the planet orbital plane inclination (i).*

Ключевые слова: экзопланеты; транзиты; тайминг; метод Монте-Карло.

Key words: exoplanet; transit; timing; Monte-Carlo method.

1. ВВЕДЕНИЕ

В случае, когда планета наблюдается как транзитная, зарегистрированные отклонения в периодичности транзитов позволяют обнаружить в системе дополнительные планеты, поскольку взаимное гравитационное влияние планет приводит к вариациям времени наступления этих транзитных явлений. TTV-метод основывается на определении времени середины транзита и выводе, происходит ли транзит планеты при строгой периодичности или же имеют место некоторые отклонения.

Цель данной работы — используя полученные кривые блеска, рассчитать точные значения центральных моментов транзитов и, таким образом, оценить возможность использования наземных наблюдений на малых телескопах с апертурой зеркал порядка 300–350 мм для поиска новых планет методом тайминга в уже известных экзопланетных системах.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для транзитной экзопланетной системы TrES-3 на протяжении 2014 года были получены наблюдательные данные для нескольких явлений транзитов, пять из которых представлены в данной работе (табл. 1).

Фотометрические наблюдения проводились на малом телескопе Celestron 1400-XLT (наблюдательная станция Лесники, Киев). Оптическая система телескопа — Шмидт–Кассегрен, F/11. Стандартная обработка с учетом темновых токов и плоских полей проведена с использованием программы MaximDL.

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

Таблица 1. Сводка данных наблюдений системы TrES-3

Дата наблюдений	Экспозиции, сек	Фильтр
2014.03.09	60	R
2014.03.22	60	R
2014.06.15	40	C
2014.09.04	60	R
2014.10.29	60	R

Таблица 2. Характеристики системы TrES-3

RA (J2000)	17° 52' 07''
DE (J2000)	+37° 32' 46''
V	12,4 mag
Глубина транзита	0,0291 mag
Длительность	77,4 мин
Период	1,30618608 сут
Начальная эпоха, E ₀	2454538,58069 (JD)

Таблица 3. Орбитальные параметры экзопланетной системы TrES-3

Даты	Момент начала транзита, T_{in}	Момент середины транзита, T_{mid}	Отношение радиусов, R_p/R_*	Наклонение орбиты, Incl. i (radian)
09.03.2014	2456726,40540509 +0,0054196272 (-0,002/+0,003)	2456726,40540509 +0,036749826 (-0,0009/+0,0006)	0,16881167 (-0,005/+0,005)	1,4613526 (-0,015/+0,013)
22.03.2014	2456739,44075231 +0,038605855 (-0,0018/+0,0031)	2456739,44075231 + 0,063719076 (-0,001/+0,0008)	0,11038902 (-0,003/+0,003)	1,5182936 (-0,025/+0,029)
15.06.2014	2456824,34204861 +0,032925677 (-0,0031/+0,0021)	2456824,34204861 +0,060588803 (-0,0008/+0,0007)	0,16727949 (-0,015/+0,031)	1,4401237 (-0,029/+0,017)
04.09.2014	2456905,35321759 + 0,0049683577 (-0,0012/+0,0016)	2456905,35321759 +0,038152323 (-0,0005/+0,0005)	0,17113848 (-0,004/+0,006)	1,4268070 (-0,009/+0,009)
29.10.2014	2456960,17600694 + 0,046206915 (-0,0015/+0,0016)	2456960,17600694 + 0,074559503 (-0,0006/+0,0005)	0,15352979 (-0,005/+0,007)	1,4402457 (-0,011/+0,011)

Таблица 4. Расчетные и наблюдаемые центральные моменты транзитов

Даты	Расчетный момент середины транзита, $T_{mid,calc}$	Наблюдаемый момент середины транзита, $T_{mid,obs}$	Отличия значений, $T_{mid,obs} - T_{mid,calc}$	Отличия значений, сек
09.03.2014	2456726,44237400	2456726,442154916	-0,000219084	-18,93
22.03.2014	2456739,5042348	2456739,504471386	0,000236586	20,44
15.06.2014	2456824,4063300	2456824,402637413	-0,003692587	-319,04
04.09.2014	2456905,38986696	2456905,391369913	0,001502953	129,86
29.10.2014	2456960,24968232	2456960,250566443	0,000884123	76,39

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В представленной работе поставлена задача расчета модельных параметров транзитной экзопланетной системы TrES-3 на основе полученных фотометрических данных. Использована аналитическая модель кривых блеска Coral [2], разработанная для двойных систем и адаптированная Gimenez [1] для транзитных экзопланетных систем. Использовались следующие модельные параметры:

- момент первого контакта (T_{in});
- момент середины транзита (T_{mid});
- отношение радиусов планеты и звезды (R_p/R_*);
- угол наклона плоскости орбиты планеты (i).

На основании предыдущих исследований [3] применено допущение круговой орбиты. Коэффициенты потемнения были зафиксированы по причине некоторой зашумленности кривой блеска. Оценка значений параметров, а также их ошибок, проводилась путем решения обратной задачи методом Монте-Карло по схеме Марковских цепей с использованием вейвлет-преобразования для учета систематических шумовых трендов в данных.

Кривые блеска транзитов. На рис.1 показаны кривые блеска пяти транзитов системы TrES-3: крестиками обозначены наблюдательные данные, сплошной линией — модельные кривые.

Орбитальные параметры. Рассчитаны орбитальные параметры экзопланетной системы TrES-3 (табл. 3) — момент начала транзита (T_{in}), момент середины транзита (T_{mid}), отношение радиусов планеты и звезды (R_p/R_*), угол наклона плоскости орбиты планеты (i). Формат значения моментов начала транзита и середины транзита: значение первой точки массива данных (JD) плюс доля юлианских суток.

Распределения параметров. Графически представлены распределения полученных параметров системы TrES-3: моментов начала транзита и середины транзита (рис.2); орбитального наклонения и отношения радиусов планеты и звезды (рис.3). Контуры изовероятностей 1σ , 2σ , 3σ включают 68,27%, 95,45% и 99,73% точек Марковских цепей соответственно. Центральные квадраты показывают наилуч-

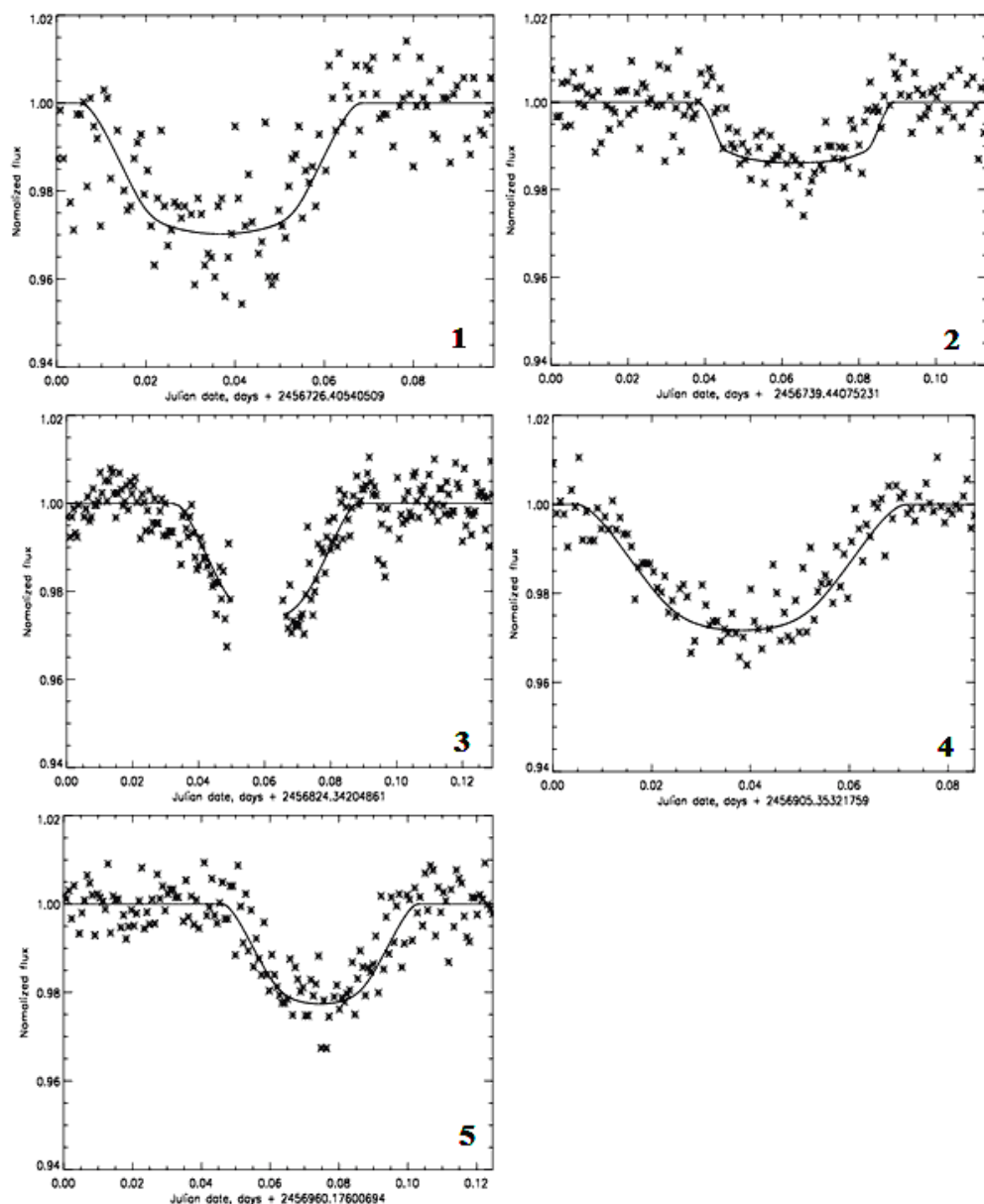


Рис. 1. Кривые блеска транзитов экзопланетной системы TrES-3: 1 — 2014.03.09, 2 — 2014.03.22, 3 — 2014.06.15, 4 — 2014.09.04, 5 — 2014.10.29.

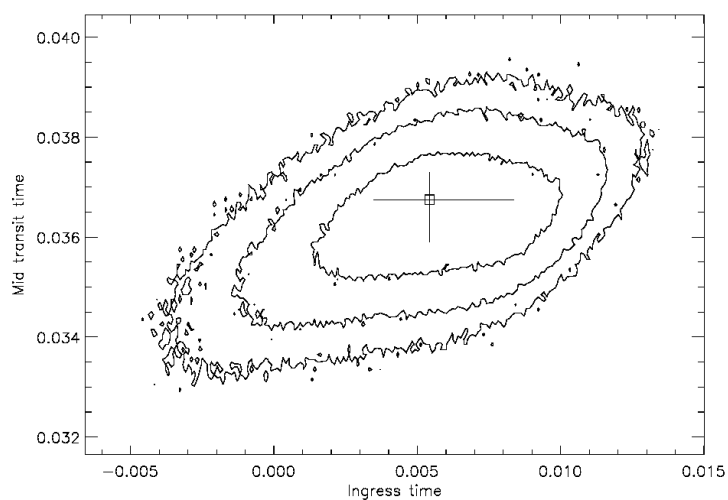


Рис. 2. Оценка совместного двумерного распределения для параметров системы TrES-3: моментов начала транзита и середины транзита

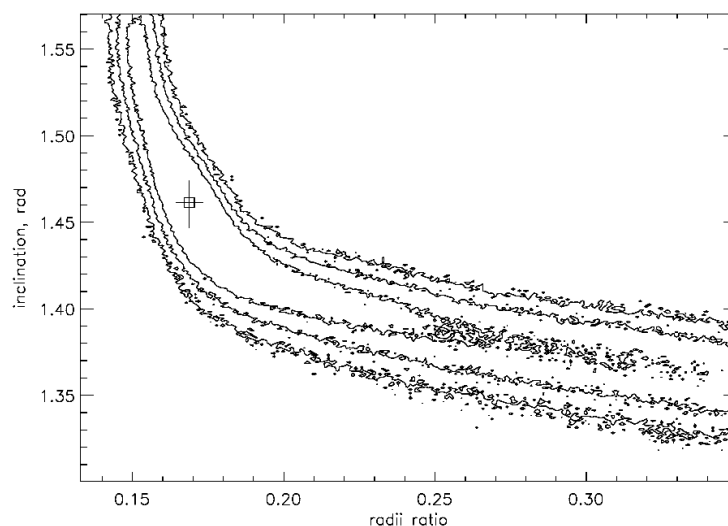


Рис. 3. Оценка совместного двумерного распределения для параметров системы TrES-3: орбитального наклонения и отношения радиусов планеты и звезды

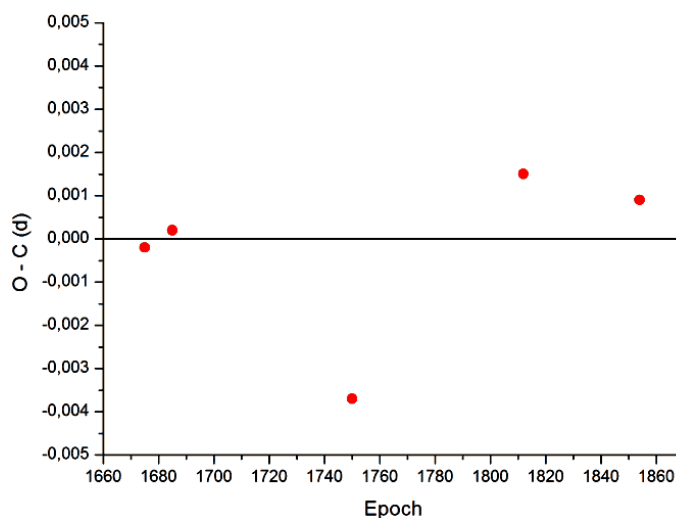


Рис. 4. Диаграмма «О-С» системы TrES-3 по пяти наблюдаемым транзитам

шие значения параметров, которые минимизируют величину χ^2 .

Поиск вариаций времени середины транзита. Получены расчетные центральные моменты транзитов по формуле

$$T_{\text{mid}} = E_0 + 1,30618608E,$$

где E_0 — начальная эпоха.

Результаты сравнения расчетных и наблюдаемых центральных моментов транзитов приведены в табл. 4. Соответствующие вариации моментов транзитов также подтверждаются на диаграмме «О-С» (рис. 4) для всех точек наблюдений.

4. ВЫВОДЫ

Зарегистрированы отличия наблюдаемых и расчетных моментов середины транзитов, лежащие в пределах 18–319 секунд, для пяти транзитных явлений экзопланетной системы TrES-3. На данный момент этого не достаточно для каких-либо определенных выводов о наличии или отсутствии в системе возмущающего третьего тела, исходя из статистических предпосылок.

В дальнейшем будут проводиться более точные расчеты для определения верхних границ присутствия возмущающих масс в транзитных системах и на большем количестве наблюдаемого материала. Также будет исследоваться природа вариаций наблюдаемых центральных моментов транзитов (ошибки наблюдений или физическое свойство системы). Тем не менее, можно уверенно сказать, что возможности наземных наблюдений на малых телескопах с апертурой зеркал порядка 300–350 мм позволяют решать задачу тайминга (вариации моментов транзитов) в транзитных системах.

1. *Gimenez A.* Equations for the analysis of the light curves of extra-solar planetary transits // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — № 450. — P. 1231–1237.
2. *Kopal Z.* Language of the stars: A Discourse on the theory of the light changes of eclipsing variables. — Netherlands: Springer Netherlands, 1979.
3. *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 Skalnat Pleso (Proceedings)*. — 2014 — **43**, № 3. — P. 458–458.

Поступила в редакцію 8.08.2015

Прийнята к печати 6.10.2015

НОВІ ВИДАННЯ



В.І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, А.О. Терещенко

Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. — Кн.1. — Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя, 2014. — 492 с.

У монографії визначена та сформульована сутність геоінформації, геоінформаційних технологій (ГІТ), понятійний апарат геоінформаційних систем (ГІС) і їх функціональні можливості. Розглянуті питання введення даних і їх цифрування. Висвітлені питання створення та збереження електронних карт за допомогою ГІТ. Представлені концептуальні основи ГІС, мета та принципи побудови ГІС, розглянуті сучасні технології обробки геопросторової інформації, моделі, що лежать у їх основі, сучасні напрями застосування ГІС і перспективи розвитку.

Викладені моделі й алгоритми, що лежать в основі ГІС. Розглянуті програмні засоби реалізації, інтеграції даних і технологій. Монографія містить графічні ілюстрації, що пояснюють роботу ГІС.

Книга може бути корисною для науковців, керівників державних установ, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

Зміст

Вступ

I. Загальні поняття про інформаційні та геоінформаційні системи

II. Історія розвитку ГІС

III. Структура, функції та технології ГІС

IV. Подання об'єктів реального світу в ГІС

V. Інформаційне забезпечення ГІС

VI. Загальні відомості про моделі даних у ГІС

VII. Растрові моделі подання просторових даних

VIII. Векторні моделі подання даних у ГІС

IX. Загальні відомості про системи керування базами даних

X. Принципи побудови баз даних, їх архітектура і класифікація

XI. Моделі баз даних

XII. Реляційні моделі та нормалізація відношень у них

XIII. Підвищення ефективності роботи баз даних

XIV. Мова структурованих запитів SQL

XV. Організація збереження даних у ГІС

Список використаної літератури