

УДК 524.31+523.489

**Н. Г. Щукина¹, Х. Трухильо Буэно^{2,3},
И. Э. Васильева¹, К. В. Францева^{4,5}**

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
shchukin@mao.kiev.ua, vasil@mao.kiev.ua

²Instituto de Astrofísica de Canarias, 38205 La Laguna, Tenerife, Spain

³Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna
38206 La Laguna, Tenerife, Spain

⁴SRON Netherlands Institute for Space Research
Landleven 12, 9747 AD Groningen, The Netherlands

⁵Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, The Netherlands

Вариации центр — край интенсивности и линейной поляризации непрерывного излучения звезд при транзитах экзопланет

Выполнено моделирование вариаций центр — край интенсивности излучения и линейной поляризации в континууме для сетки одномерных моделей атмосфер звезд, параметры которых соответствуют звездам с транзитом планет из архива экзопланетных систем NASA. Интервал длин волн, для которых проводились расчеты, заключен между 300 нм и 950 нм. Показано, что потемнение лимба уменьшается с увеличением эффективной температуры звезды. На длине волны $\lambda = 370$ нм, соответствующей максимуму фотометрической полосы пропускания UХ в системе Джонсона — Кузинса, значения потемнения для звезд с транзитом планет заключены в диапазоне между 0.03 и 0.3. Линейная поляризация зависит не только от эффективной температуры, но и от ускорения свободного падения на поверхности звезды и металличности. Ее значения уменьшаются с увеличением этих параметров. В UХ-полосе максимальная линейная поляризация звезд с транзитом планет составляет 4 %, минимальная — около 0.3 %. Потемнение к краю и линейная поляризация быстро уменьшаются с длиной волны. В полосе пропускания R ($\lambda = 700$ нм) линейная поляризация на лимбе фактически на два порядка меньше, чем в UХ-полосе. Вариации центр — край интенсивности и линейной поляризации непрерывного излучения на разных длинах волн можно аппроксимировать полиномами четвертой и шестой степени соответст-

венно. Коэффициенты аппроксимации, а также IDL-процедуры для их чтения доступны в электронном формате. Показано, что есть два класса звезд с высокой линейной поляризацией на лимбе. В первый из них входят холодные карлики. Их типичные представители — HATS-6, Kepler-45, а также все звезды с близкими параметрами. Второй класс звезд — более горячие гиганты и субгиганты. К нему относятся CoRoT-28, Kepler-91 и группа звезд с эффективными температурами 5000 K и ускорением свободного падения около 3.5.

ВАРІАЦІЇ ЦЕНТР — КРАЙ ІНТЕНСИВНОСТІ ТА ЛІНІЙНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ НЕПЕРЕРВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗІР ПРИ ТРАНЗИТАХ ЕКЗОПЛАНЕТ, Щукіна Н. Г., Трухільйо Буено Х., Васильєва І. Е., Францева К. В. — Виконано моделювання варіацій центр — край інтенсивності випромінювання і лінійної поляризації в континуумі для сітки одновимірних моделей атмосфер зір, параметри яких відповідають зорям з транзитом планет з архіву NASA. Інтервал довжин хвиль, для яких проводились розрахунки, лежить між 300 нм і 950 нм. Показано, що потемніння лімба зменшується зі збільшенням ефективної температури зорі. На довжині хвилі $\lambda = 370$ нм, яка відповідає максимуму фотометричної смуги пропускання UХ в системі Джонсона — Кузінса, значення потемніння для зір з транзитом планет лежать в діапазоні між 0.03 і 0.3. Лінійна поляризація, на відміну від потемніння до краю, залежить не тільки від ефективної температури зорі, але й від її прискорення сили тяжіння та металічності. Її значення зменшується зі збільшенням цих параметрів. У UХ-смугі максимальна лінійна поляризація зір з транзитом планет складає приблизно 4 %, тоді як мінімальна величина — близько 0.3%. Потемніння до краю і лінійна поляризація швидко зменшуються з довжиною хвилі. У смугі пропускання R ($\lambda = 700$ нм) лінійна поляризація на лимбі фактично на два порядки менша, ніж в UХ-смугі. Варіації центр — край інтенсивності і лінійної поляризації неперервного випромінювання на різних довжинах хвиль можна апроксимувати поліномами четвертого та шостого ступеня відповідно. Коефіцієнти апроксимації, а також IDL-процедури для їхнього читання, доступні в електронному форматі. Показано, що є два класи зір з високою лінійною поляризацією на лимбі. У перший з них входять холодні карлики. Їхні типові представники — HATS-6, Kepler-45, а також всі зорі з близькими параметрами. Другий клас зір — більш гарячі гіганти і субгіганти. До нього належать CoRoT-28, Kepler-91 і група зірок з ефективними температурами і прискоренням сили тяжіння близько 5000 K і 3.5 відповідно.

CENTER-TO-LIMB VARIATION OF THE CONTINUUM INTENSITY AND LINEAR POLARIZATION OF STARS WITH TRANSITING EXOPLANETS, by Shchukina N. G., Trujillo Bueno J., Vasilyeva I. E., Frantseva K. V. — The limb darkening and the center-to-limb variation of the

continuum polarization is calculated for a grid of one-dimensional stellar model atmospheres and for a wavelength range between 300 nm — 950 nm. Model parameters match those of the transiting stars taken from the NASA exoplanet archive. The limb darkening of the continuum radiation for these stars is shown to decrease with their effective temperature. For the $\lambda = 370$ nm wavelength, which corresponds to the maximum of the Johnson-Cousins UX filter, the limb darkening of the transiting stars are enclosed in a range between 0.03 and 0.3. In contrast, the continuum linear polarization depends not only on the effective temperature of the star, but also on its gravity and metallicity. Its value decreases for increasing values of these parameters. At the UX band maximum the linear polarization of stars with transiting planets amounts to about 4 %, while the minimum value is about 0.3 %. The continuum limb darkening and the linear polarization decreases rapidly with wavelength. At the R band maximum ($\lambda = 700$ nm) the linear polarization close to the limb is in fact two orders of magnitude smaller than in the UX band. The center-to-limb variation of the continuum intensity and the linear polarization of the stars with transiting planets can be approximated, respectively, by polynomials of fourth and sixth degree. The coefficients of the polynomials, as well as the IDL procedures for reading them, are available in electronic form. It is shown that there are two classes of stars with high linear polarization at the limb. The first one consists of cold dwarfs. Their typical representatives are HATS-6, Kepler-45, as well as all the stars with similar parameters. The second class of stars includes hotter giants and subgiants. Among them we have CoRoT-28, Kepler-91 and the group of stars with effective temperatures and gravities around 5000 K and 3.5, respectively.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и изучение экзопланет — одна из успешно развивающихся областей современной астрофизики. На сегодня подавляющее большинство планетарных систем обнаружено с помощью наблюдений вариаций блеска звезд, возникающих при транзите планет по диску звезды (т.н. метод транзитной фотометрии, он же транзитный метод). На втором месте по количеству открытых экзопланет стоят наблюдения доплеровских смещений спектральных линий (метод Доплера или метод радиальных скоростей), вызванных вращением звезды и планеты вокруг общего центра масс. Оба метода взаимно дополняют друг друга, что позволяет получить достаточно точную информацию о массе и размере экзопланет, а также о параметрах их орбит. Среди других методов следует упомянуть метод вариации продолжительности транзитов (transit timing variation), метод гравитационного микролинзирования, прямые методы обнаружения планет, а также метод обнаружения экзопланет около пульсаров путем выявления изменений в регулярности импульсов (тайминг пульсаций). Применение еще одного мето-

да (астрометрического), основанного на измерении смещений звезды под действием вращающейся возле неё планеты, позволило найти пока лишь одну планетную систему.

В настоящее время в литературе активно обсуждаются возможности открытия или подтверждения существования планет путем регистрации вариаций линейной поляризации непрерывного излучения от экзопланетных систем [31]. Известно, что излучение, идущее от всего диска сферически-симметричной звезды, является неполяризованным. Любое нарушение симметрии ведет к ненулевой линейной поляризации при интегрировании ее по диску. Источниками асимметрии могут стать изменение формы звезды, вызванное ее вращением или приливным взаимодействием звезды с планетой, магнитные пятна на диске звезды, вариации температуры по ее поверхности, затмение части поверхности звезды планетой при ее прохождении (транзите) по диску. Еще один источник поляризации — рассеяние излучения звезды молекулами, аэрозолями и пылевыми частицами, содержащимися в атмосфере планеты [50, 58].

Теоретические оценки [5] показывают, что первый эффект пренебрежимо мал — максимальная величина линейной поляризации P не превышает $3 \cdot 10^{-9}$ от неполяризованного излучения в континууме. Наличие пятен может вызывать поляризацию от $3 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-5} и даже до 10^{-4} [5, 36, 41, 63]. Оценки величины поляризации, обусловленной вариациями температуры по поверхности звезды, получены на сегодня лишь для случая серой атмосферы. Согласно данным [27] для переменных звезд типа *Mira* она может достигать нескольких процентов. Наблюдательные данные о поляризации, вызванной рассеянием звездного излучения атмосферой планеты, известны только для нескольких экзопланетных систем [4, 5, 41, 63]. Следует отметить, что они довольно противоречивы. Разброс амплитуд поляризации, полученных разными авторами, достигает двух порядков и лежит в интервале $2 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-4}$. Первые результаты моделирования затмения планетами звезд-карликов спектральных классов G, K, M, T, опубликованные в 2005 г. Карчиофи и Магальяэсом [15], показали, что поляризационный сигнал, оставаясь достаточно слабым ($P = 10^{-5} \dots 10^{-6}$), превышает погрешности современных спектрополяриметров.

В настоящее время исследования в области спектрополяриметрии экзопланетных систем ведутся главным образом в трех направлениях. В первую очередь — это создание высокочувствительных звездных спектрополяриметров, позволяющих измерять сигнал порядка $P = 10^{-5} \dots 10^{-7}$. Отметим, что первые сведения о таких приборах были опубликованы Кемпом и др. [34] еще в 1987 г. Среди поляриметров, успешно работающих сегодня, следует упомянуть CHEOPS (Characterization of Exoplanets by Opto-Infrared Polarimetry and Spectroscopy) [20, 49], PlanetPol [32], POLISH (POLarimeter for Inclination Studies of High mass x-ray binaries/Hot jupiters) [63] и ZIMPOL (Zurich IMaging POLarimeter) [59]. Второе направление в поляриметрии экзопланетных систем — анализ химического состава и структуры атмосферы

планет [5, 50, 55, 56, 58, 65]. Третье направление — теоретическое моделирование кривых блеска и линейной поляризации при затмении, возникающем во время транзита одной или нескольких планет по диску родительской звезды [15, 22, 30, 36, 37]. Конечная цель такого моделирования — предсказать возможные спектрополяриметрические эффекты при транзите планет в зависимости от их радиуса, наклона орбит и периода обращения вокруг звезды.

Для того чтобы рассчитать указанные кривые, необходимо знать, как изменяются от центра к лимбу звезды интенсивность и линейная поляризация непрерывного излучения [15]. При такого рода расчетах эффект потемнения к краю можно учесть с помощью нелинейной зависимости от полярного угла θ , найденной Кларетом [18] в одномерном приближении для большой сетки длин волн, эффективных температур, ускорения свободного падения и металличности. Другая возможность — использовать коэффициенты потемнения к краю, полученные Сингом [54] для случая широкополосных фильтров, установленных на космических аппаратах CoRoT и Кеплер.

Для описания зависимости центр — край линейной поляризации звезд до недавнего времени использовались, как правило, солнечные данные, полученные для одномерной [21] или трехмерной моделей атмосферы Солнца [62], а также приближение Чандрасекхара [17]. Следует отметить, что данное приближение может давать большие ошибки, так как оно справедливо лишь для O-звезд, у которых основным источником непрозрачности является электронное рассеяние. Звезды с транзитом планет таковыми не являются, поскольку относятся к поздним спектральным классам. Согласно Кодэ [19] и Харрингтону [28] совместное действие в атмосферах таких звезд томпсоновского рассеяния на электронах и поглощения непрерывного излучения атомами приводит к заметному уменьшению линейной поляризации на лимбе. Одним из примеров ошибочного использования приближения Чандрасекхара может служить работа Костогрыз и др. [37], в которой применение указанного приближения к звезде спектрального класса K (HD 189733) дает более чем на порядок завышенные значения поляризации.

Причины такого подхода связаны с отсутствием до недавнего времени достоверных данных о зависимости центр — край линейной поляризации звезд. Заметный прогресс в этой области исследований наметился после представления Н. Г. Щукиной с сотрудниками [51—53], начиная с 2013 г., на нескольких конференциях первых результатов моделирования потемнения к краю и линейной поляризации в континууме F, G, K-звезд разной металличности [Fe/H] для диапазона длин волн $\lambda = 300 \dots 950$ нм. В 2015 г. Н. М. Костогрыз с сотрудниками [35, 36] опубликовали аналогичные результаты для звезд солнечной металличности, относящиеся к оптической части спектра ($\lambda = 400 \dots 700$ нм).

Цель настоящей работы — представить результаты расчетов вариации центр — лимб для интенсивности и линейной поляризации не-

прерывного излучения звезд для сетки атмосферных моделей, звездные параметры которых соответствуют обнаруженным на сегодня звездам с транзитом планет.

ЗВЕЗДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИТНЫХ СИСТЕМ

Мы проанализировали звездные параметры транзитных экзопланетных систем, используя данные из архива NASA <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, относящиеся к периоду времени до мая 2016 г. Напомним, что архив содержит информацию о планетных системах, обнаруженных с помощью космических миссий CoRoT (COncvection ROtation and planetary Transits) и Кеплер, а также наземных наблюдательных программ поиска экзопланет MEarth Project (searching for transiting habitable super-Earths around nearby M-dwarfs), HATNet (Hungarian Automated Telescope Network), SuperWASP (Wide Angle Search for Planets), OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), KELT-South (Kilodegree Extremely Little Telescope), Trans-Atlantic Exoplanet Survey и др.

На рис. 1 мы показываем эффективные температуры $T_{\text{эф}}$ и ускорение свободного падения lgg для звезд с транзитом планет из указанного архива. К маю 2016 г. число таких звезд составило 1890. По возможности мы указали также спектральные классы звезд, обозначив их со-

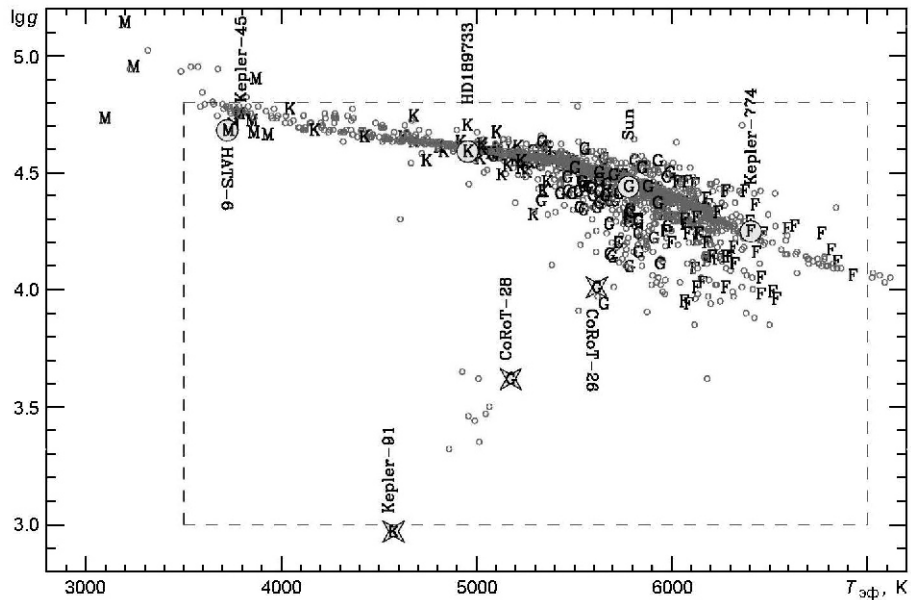


Рис. 1. Диаграмма «эффективная температура — ускорение свободного падения» для звезд с транзитом планет. Буквы М, К, G, F — спектральные классы звезд. Параметры звезд взяты из архива NASA <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, относящегося к периоду времени до мая 2016 г. Звезды, для которых информации о спектральном классе в архиве NASA нет, отмечены кружками. Для типичных звезд с транзитом планет (серые кружки и звездочки) указаны их названия (см. таблицу). Прямоугольник внутри рисунка содержит звезды со значениями параметров в интервале $4600 < T_{\text{эф}} < 6400$ К и $3.0 < lgg < 4.8$

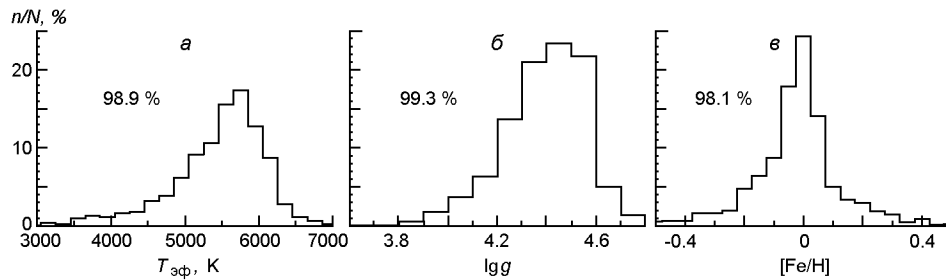


Рис. 2. Гистограмма распределения звезд по значениям эффективных температур $T_{\text{эф}}$ (а), ускорения свободного падения $\lg g$ (б) и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ (в) звезд с транзитом планет. Данные взяты из архива экзопланетных систем NASA. Числа на рисунке — количество звезд (в % к общему числу) в интервале $4600 < T_{\text{эф}} < 6400$ К, $3.0 < \lg g < 4.8$ и $-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$

ответствующими буквами М, К, G, F. Звезды, для которых информация о спектральном классе в архиве NASA отсутствует, отмечены на данном рисунке кружками. Сравнение данного рисунка с диаграммой Герцшпрунга — Рессела [39] показывает, что большинство экзопланетных систем относится к звездам главной последовательности. Число звезд, проэволюционировавших в стадию субгигантов и гигантов, фактически на два порядка меньше.

Гистограммы распределения эффективных температур, ускорения свободного падения и металличности для звезд с транзитами планет из архива NASA приведены на рис. 2. Все они имеют четко выраженный пик вблизи солнечных значений $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$. При этом у подавляющего большинства звезд ($> 98\%$) эффективные температуры $T_{\text{эф}}$ заключены в диапазоне $3500 \dots 7000$ К, а металличность $[\text{Fe}/\text{H}]$ — между -0.5 и $+0.5$. Число звезд солнечной металличности (-0.1

$[\text{Fe}/\text{H}] + 0.01$) составляет около 10% . Практически все звезды (99.3%) имеют значения ускорения свободного падения в пределах $3.0 < \lg g < 4.8$. Число звезд вне этого диапазона не превышает 1% .

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД

Модели звездных атмосфер. Исходя из вышеприведенной статистики, мы выполнили моделирование вариаций центр — край интенсивности излучения и линейной поляризации в континууме для сетки атмосферных одномерных моделей Куруца [38] со следующими звездными параметрами: $3500 < T_{\text{эф}} < 7000$ К, $3.0 < \lg g < 4.8$ и $-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$.

При расчете коэффициента поглощения в континууме были учтены следующие источники непрозрачности: связанно-свободное и свободно-свободное поглощение атомами водорода (H^- и H I), связанно-свободное поглощение металлами (C, Mg, Al, Si, Fe), свободно-свободное поглощение молекулами H_2 , рэлеевское рассеяние на ато-

мах водорода и томпсоновское рассеяние на электронах. Мы приняли во внимание дополнительный источник непрозрачности, создаваемый в области спектра с длиной волны $\lambda < 450$ нм «частоклом» спектральных линий. Учет частоклола проводился по методу, описание которого можно найти в работе [10].

Метод. Поляризованное излучение описывается четырьмя параметрами Стокса I , Q , U и V . В наших расчетах мы выбрали систему координат, при которой параметр Стокса Q представляет собой линейную поляризацию в направлении, параллельном звездному лимбу. Это означает, что второй параметр линейной поляризации U установится равным нулю. Параметр круговой поляризации V также равен нулю, поскольку мы исходим из предположения, что магнитное поле в атмосферах рассматриваемых звезд отсутствует.

Численное решение уравнений переноса для параметров Стокса I и Q было выполнено с помощью итеративного метода, разработанного для одномерного случая Трухильо Буэно и Мансо Сайнцем [61] и созданного на его основе кода NATAJA. Детали этого решения в применении к поляризованному излучению в континууме можно найти в работе [62]. Для описанной выше сетки моделей звездных атмосфер мы рассчитали изменение непрерывного излучения $I(\mu, \lambda)/I(\mu=1, \lambda)$ (т. е. потемнение к краю) и изменение линейной поляризации $P(\mu, \lambda) = Q(\mu, \lambda)/I(\mu, \lambda)$ при переходе от центра ($\mu = 1$) к краю диска с шагом $\Delta\mu = 0.025$. Здесь $\mu = \cos \theta$, где θ — угол между направлением излучения и нормалью к поверхности атмосферы. Моделирование потемнения и поляризации излучения в континууме проводилось для интервала длин волн $\lambda = 300 \dots 950$ нм с переменным шагом $\Delta\lambda$, изменяющимся от 5 нм в ультрафиолете до 20 нм в инфракрасной области спектра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ СЕТКИ МОДЕЛЕЙ ЗВЕЗДНЫХ АТМОСФЕР

Потемнение к краю интенсивности непрерывного излучения. Температура внешних слоев атмосферы звезд (фотосферы) увеличивается с глубиной, что, как известно [43], вызывает видимое потемнение края диска: при одинаковой оптической длине пути излучение в центре диска звезды приходит с большей глубины и, соответственно, из более горячих слоев фотосферы, в отличие от излучения периферии диска, приходящего по касательной из более холодных внешних слоев фотосферы. Вторая причина, влияющая на величину потемнения, — зависимость коэффициента поглощения от длины волны. В области длин волн $\lambda = 300 \dots 900$ нм поглощение излучения отрицательными ионами водорода, являющееся одним из источников непрерывной непрозрачности в атмосферах рассматриваемых нами звезд, увеличивается с длиной волны (см., например, рис. 6, 7 в монографии В. В. Соболева [2]). В результате оптическая длина пути непрерывного излучения в ближней инфракрасной области спектра оказывается меньше, а область формирования континуума — выше, чем в фиолетовой области

ти (см. рис. 6 в работе [62]). Поскольку с высотой градиент температуры уменьшается, диски звезд вблизи лимба с увеличением длины волны будут выглядеть ярче.

На рис. 3 мы показываем отношение $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$ интенсивности непрерывного излучения на расстоянии $\mu = 0.1$ от центра диска к интенсивности в центре ($\mu = 1$), рассчитанное для обсуждавшейся выше сетки звездных моделей в зависимости от эффективной температуры $T_{\text{эф}}$, ускорения свободного падения $\lg g$ и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. Результаты, представленные на этом рисунке, рассчитаны для длины волны $\lambda = 370$ нм, соответствующей максимуму фотометрической полосы пропускания UX в $UVBRI$ -системе Джонсона — Кузиса [6]. Отметим, что данная полоса находится сразу за границей серии Бальмера ($\lambda = 364.6$ нм). Наши расчеты для данной сетки моделей показывают, что на этой длине волны отношение $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$ в несколько раз меньше, чем в длинноволновой части спектра ($\lambda = 950$ нм).

Изолинии постоянных значений потемнения $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$ (за исключением области низких и высоких эффективных температур) на рис. 3, *a* практически параллельны вертикальной оси $\lg g$, что служит доказательством слабой зависимости потемнения от ускорения свободного падения, при этом яркость лимба увеличивается по мере увеличения эффективной температуры. В целом на длине волны $\lambda = 370$ нм значения $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$ для звезд с транзитом планет из архива NASA заключены в диапазоне между 0.03 и 0.3. Результаты, показанные на рис. 3, *б* — *г* дают более детальное представление о зависимости степени потемнения лимба в полосе UX от эффективной температуры, ускорения свободного падения и металличности звезд. Видно, что отношение $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$ для горячих звезд ($T_{\text{эф}} = 7000$ К) не менее чем в пять раз больше, чем для холодных звезд ($T_{\text{эф}} = 3500$ К). Яркость лимба горячих звезд слабо увеличивается с увеличением $\lg g$, в то время как у холодных звезд такая зависимость обнаруживается лишь у звезд со значениями $\lg g > 4.4$. В диапазоне от $-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.5$ потемнение к краю практически не зависит от металличности.

Вариации центр — край линейной поляризации непрерывного излучения. На рис. 4 мы приводим результаты моделирования линейной поляризации $Q(\mu = 0.1)/I(\mu = 0.1)$ непрерывного излучения вблизи лимба ($\mu = 0.1$) на длине волны $\lambda = 370$ нм, полученные для рассмотренной выше сетки моделей звезд, включая звезды с транзитом планет. Представленные на рис. 4, *a* изолинии заметно отклоняются от вертикали, свидетельствуя о том, что линейная поляризация, в отличие от потемнения к краю, зависит не только от эффективной температуры, но и от ускорения свободного падения на поверхности звезды. Наши расчеты $Q(\mu = 0.1)/I(\mu = 0.1)$ для полос пропускания V ($\lambda = 530$ нм) и R ($\lambda = 700$ нм) показывают, что изолинии на других длинах волн ведут себя подобным образом. Из рис. 4, *б*, *в* видно, что линейная поляризация быстро уменьшается с увеличением эффективной температуры и ускорения свободного падения на по-

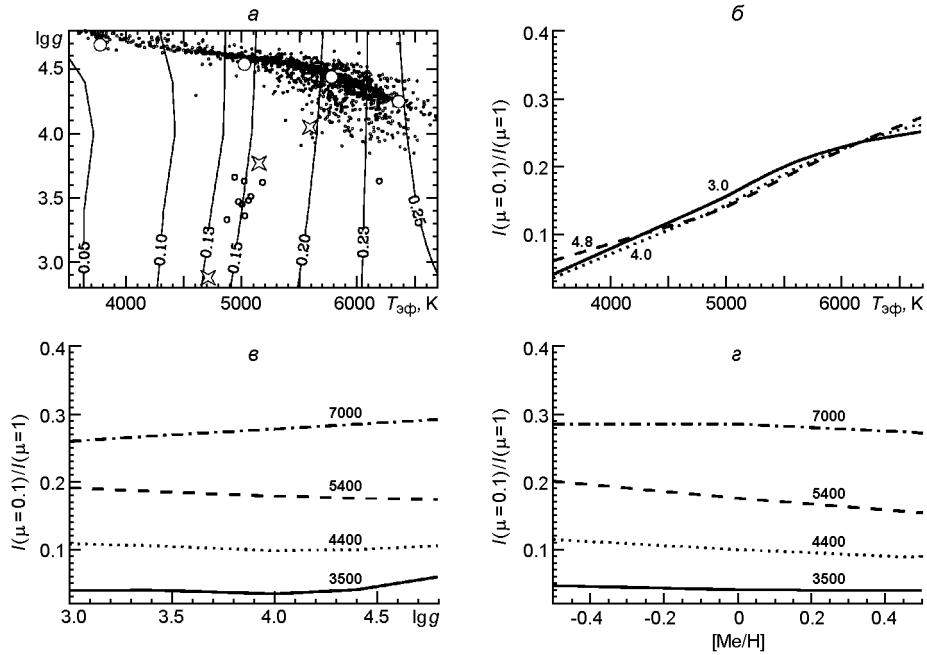


Рис. 3. Потемнение к краю $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$, рассчитанное для сетки моделей звезд в континууме $\lambda = 370$ нм (см. текст): *a* — изолинии одинакового потемнения для звезд солнечной металличности ($[Fe/H] = 0.0$) в виде функции от $T_{эф}$ и lgg (соответствующие значения $I(\mu = 0.1)/I(\mu = 1)$ указаны возле изолиний, кружки и звездочки — значения для звезд из архива экзопланетных систем NASA); *б* — зависимости потемнения от эффективной температуры звезд солнечной металличности для трех значений $lgg = 3.0, 4.0$ и 4.8 (цифры у кривых); *в* — зависимости потемнения от ускорения свободного падения звезд солнечной металличности для четырех значений $T_{эф} = 3500, 4400, 5400$ и 7000 К; *г* — зависимости потемнения от металличности звезд для тех же четырех значений $T_{эф}$ и ускорения свободного падения $lgg = 4.4$

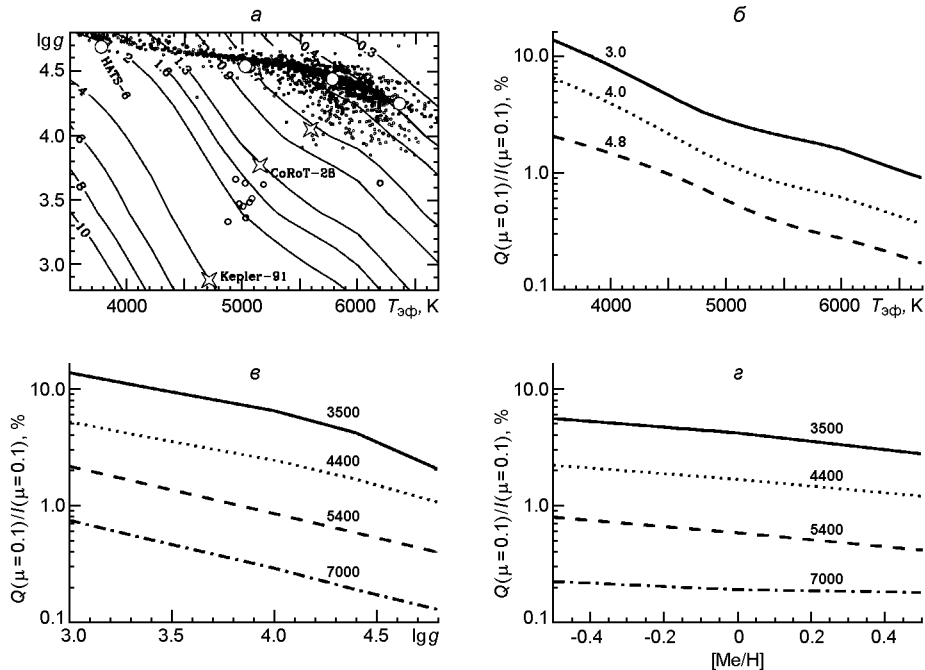


Рис. 4. То же для линейной поляризации $Q(\mu = 0.1)/Q(\mu = 0.1)$

верхности звезды. Для холодных звезд ($T_{\text{эф}} = 3500$ К) со значениями $\lg g = 3.0$ линейная поляризация $Q(\lambda, \mu)/I(\lambda, \mu)$ превышает 10 %, в то время как для горячих звезд ($T_{\text{эф}} = 7000$ К) при $\lg g = 4.8$ она на порядок меньше. Максимальная линейная поляризация звезд с транзитом планет из архива NASA составляет величину около 4 %, в то время как минимальная величина — около 0.3 %. Зависимость линейной поляризации от металличности в диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}]$ между -0.5 и $+0.5$ существенно меньше, чем от $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$ (рис. 4, з). При этом чувствительность $Q(\lambda, \mu)/I(\lambda, \mu)$ к металличности уменьшается с увеличением эффективной температуры. Максимальный эффект наблюдается у холодных звезд ($T_{\text{эф}} = 3500$ К). С увеличением металличности в указанном диапазоне линейная поляризация уменьшается примерно в два раза.

Приближенное решение для линейной поляризации. Зависимости линейной поляризации в континууме от звездных параметров, показанные на рис. 4, можно объяснить, обратившись к приближенному выражению для оценки амплитуды линейной поляризации выходящего излучения $P(\lambda, \mu) = Q(\lambda, \mu)/I(\lambda, \mu)$, полученному в работе [62]:

$$\frac{Q(\lambda, \mu)}{I(\lambda, \mu)} = \frac{3\sqrt{2}}{2} (1 - \mu^2) \frac{c}{c + k_c} \frac{J_0^2}{J_0^0}, \quad (1)$$

где k_c — коэффициент поглощения непрерывного излучения атомами; c — коэффициент поглощения, вызванный рэлеевским и томпсоновским рассеянием; J_0^0 — средняя интенсивность излучения; J_0^2 — тензор, описывающий «анизотропию» поля излучения или, иными словами, степень отличия между полем излучения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Все указанные величины относятся к области в атмосфере, где на данной длине волны формируется интенсивность выходящего наружу непрерывного излучения. В литературных источниках отношение $c/(c + k_c)$ носит название эффективной поляризуемости, а отношение J_0^2/J_0^0 известно как фактор анизотропии. Эти величины, как и множитель $(1 - \mu^2)$, являются функцией длины волны λ . Значения $c/(c + k_c)$ изменяются в диапазоне от 4.06 ($\lambda = 370$ нм) до 2.34 ($\lambda = 800$ нм).

Из формулы (1) следует, что линейная поляризация зависит в основном от произведения двух величин: эффективной поляризуемости и фактора анизотропии. Мы рассчитали их значения для лимба ($\mu = 0.1$) на длине волны $\lambda = 370$ нм в зависимости от эффективной температуры и ускорения свободного падения на поверхности звезды. Результаты расчетов в виде изолиний, вдоль которых эффективная поляризуемость и фактор анизотропии не изменяются, показаны на рис. 5, а, б. Обращаем внимание, что при расчете $c/(c + k_c)$ и J_0^2/J_0^0 область формирования континуума находилась на основании приближения Эддингтона — Барбье (см. формулу (2.53) в монографии [42]).

Согласно данному приближению эта область отождествляется с высотой, где оптическая глубина на рассматриваемой длине волны

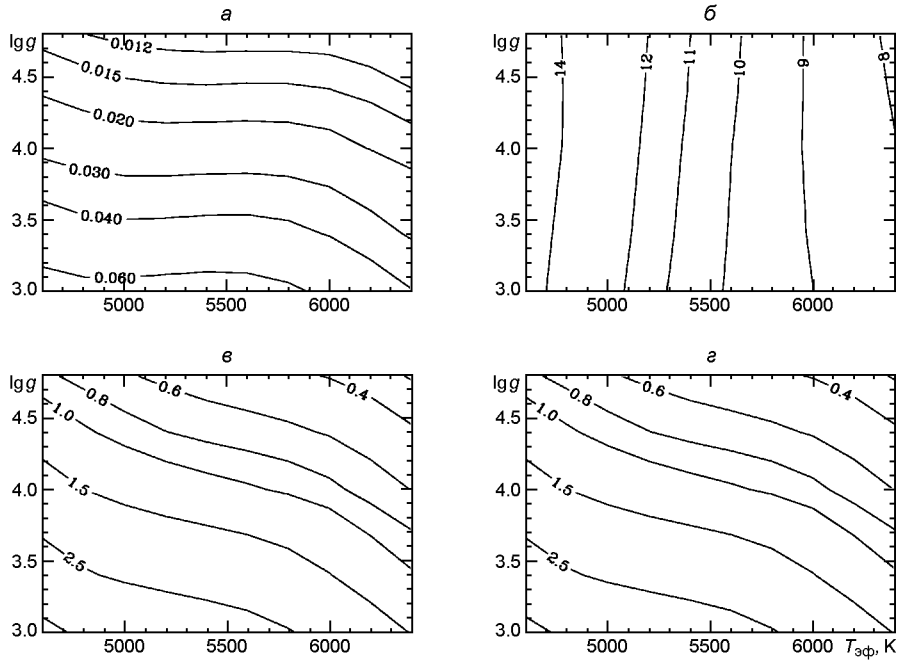


Рис. 5. Изолинии эффективной поляризуемости $\rho_c / (\rho_c + k_c)$ (а), фактора анизотропии J_0^2 / J_0^0 (б) и линейной поляризации Q/I (в, г) непрерывного излучения на длине волны $\lambda = 370$ нм вблизи лимба ($\mu = 0.1$), рассчитанные как функции двух переменных $T_{эф}$ и $lg g$ для звезд солнечной металличности ($[Fe/H] = 0$); в — приближенная оценка Q/I , полученная с помощью формулы (1), г — значения Q/I , найденные путем решения уравнений переноса для параметров Стокса Q и I . Все величины представляют собой функции двух переменных: $T_{эф}$ и $lg g$. Значения $\rho_c / (\rho_c + k_c)$, J_0^2 / J_0^0 и Q/I , для которых проведены соответствующие изолинии, указаны на рисунке

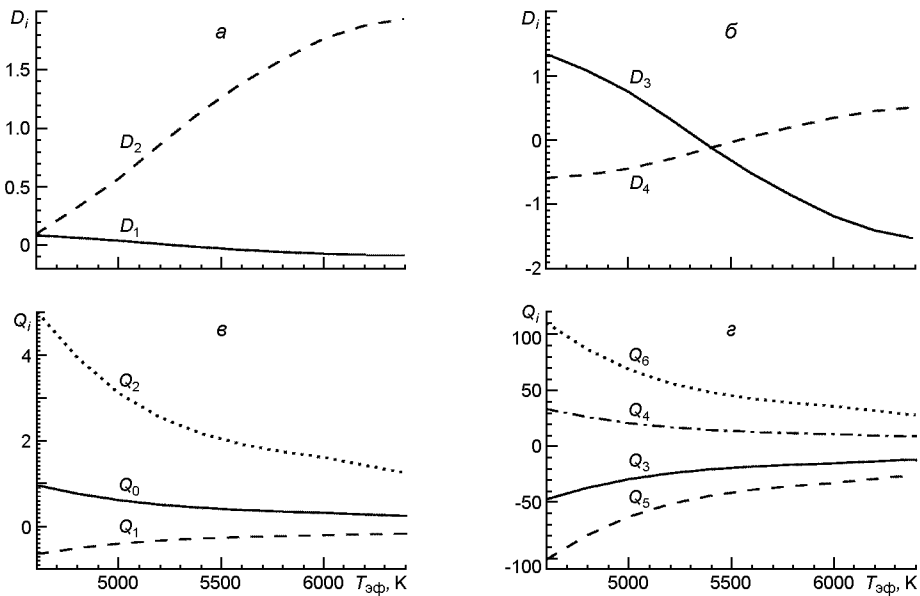


Рис. 6. Зависимость коэффициентов D_i полиномиальной аппроксимации потемнения к краю (а, б) и коэффициентов Q_i полиномиальной аппроксимации центр — край линейной поляризации (в, г) от эффективной температуры звезд ($\lambda = 420$ нм, $lg g = 4.4$, $[Fe/H] = 0$)

() = . Из рис. 5, а видно, что для изолиний эффективной поляризуемости характерна горизонтальная направленность, в то время как для изолиний фактора анизотропии — вертикальная. Подобное поведение является результатом низкой чувствительности $\mu_c / (\mu_c + k_c)$ к эффективной температуре и высокой — к ускорению свободного падения. Фактор анизотропии J_0^2 / J_0^0 , наоборот, зависит в основном от эффективной температуры, причем его значение быстро увеличивается с уменьшением $T_{\text{эф}}$. В результате совместного действия этих эффектов линейная поляризация выходящего излучения становится функцией двух переменных, а именно $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$.

Сравнение рис. 5, в и г показывает, что приближенное решение и решение, найденное из уравнения переноса поляризованного излучения, совпадают с точностью до коэффициента . Таким образом, приближение (1) является достаточно надежной оценкой линейной поляризации звезд рассматриваемой сетки при условии, что при ее интерпретации во внимание принимается не только эффективная поляризуемость, как это сделано в работе [35], но и фактор анизотропии.

Полиномиальные аппроксимации потемнения к краю и вариации центр — край линейной поляризации непрерывного излучения. На сегодняшний день опубликован ряд работ, в которых для описания зависимости центр — край интенсивности излучения в звездах предложено несколько видов аппроксимаций, начиная с линейной зависимости и заканчивая полиномом четвертой степени. Ссылки на эти работы и сами аппроксимации можно найти в работах Кларета [18, 54]. В данной работе мы предприняли попытку описать потемнение к краю для рассмотренной сетки моделей атмосфер в виде аналитической нелинейной зависимости от . Наилучшим образом полученные нами результаты можно представить полиномом четвертой степени, предложенным ранее Кларетом:

$$\frac{I(\mu, \eta)}{I(\mu=1, \eta)} = D_0 + D_1 x + D_2 x^2 + D_3 x^3 + D_4 x^4, \quad (2)$$

где

$$D_0 = 1 - D_1 - D_2 - D_3 - D_4, \quad x = \sqrt{\mu}.$$

Насколько нам известно, на сегодня нет публикаций, в которых вариации линейной поляризации от центра к краю диска были бы представлены в виде аналитической зависимости от звездных параметров. В данной работе мы получили такую зависимость. Оказалось, что для рассмотренной нами сетки моделей звездных атмосфер распределение линейной поляризации по диску звезд можно описать полиномом шестой степени:

$$\frac{Q(\mu, \eta)}{Q(\mu=1, \eta)} = Q_0 + Q_1 x + Q_2 x^2 + Q_3 x^3 + Q_4 x^4 + Q_5 x^5 + Q_6 x^6. \quad (3)$$

Коэффициенты D_i и Q_i являются функциями от четырех переменных: μ , $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$. Они и IDL-процедуры для их чтения доступны

в электронном формате. На рис. 6 в качестве примера показана зависимость этих коэффициентов от эффективной температуры для случая солнечной металличности $[Fe/H] = 0$, ускорения свободного падения $lgg = 4.4$ и длины волны $\lambda = 420$ нм, соответствующей максимуму фотометрической полосы пропускания B в $UVBRI$ -системе Джонсона — Кузинса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ИЗБРАННЫХ ЗВЕЗД С ТРАНЗИТОМ ПЛАНЕТ

Характеристики избранных звезд с транзитом планет. Выше мы обсуждали главным образом поведение потемнения $I(\lambda, \mu)/I(\lambda, \mu=1)$ и линейной поляризации $P(\lambda, \mu) = Q(\lambda, \mu)/I(\lambda, \mu)$ на лимбе ($\mu = 0.1$) для одной длины волны. Зависимости от длины волны и положения на диске удобнее всего рассмотреть на примере нескольких типичных звезд. Из множества звезд с транзитом планет, показанных на рис. 1, рис. 3, а и рис. 4, а, мы выбрали для обсуждения семь. Четыре из них (HATS-6, HD189733, Sun, Kepler-774), отмеченные большими кружками, расположены вдоль главной последовательности. Оставшиеся три (CoRoT-26, CoRoT-28, Kepler-91), отмеченные звездочками, — звезды вне этой последовательности. Список звезд и их параметры приведены в таблице. Принимая во внимание, что различные методы определения приводят к большому разбросу значений $T_{\text{эф}}$, lgg и $[Fe/H]$, мы приводим минимальные, средние и максимальные значения указанных параметров. При расчете спектрального распределения энергии, потемнения к краю и линейной поляризации для звезд из таблицы использовались усредненные значения.

Напомним, что экзопланетная система HD189733 представляет собой двойную систему звезд, одной из которых является оранжевый карлик спектрального класса K2V с вращающейся вокруг него планетой, а второй — красный M-карлик. Звезды CoRoT-28 и CoRoT-26 (спектральные классы G8/9 IV и G5) сошли с главной последовательности и начали эволюционировать в сторону превращения в красные

Параметры избранных звезд с транзитом планет

Объект	$T_{\text{эф}}$, К (min, mid, max)	lgg (min, mid, max)	$[Fe/H]$ (min, mid, max)	Литературный источник
CoRoT-26	5590	3.99, 4.05, 4.10	+0.01	[3]
CoRoT-28	5150	3.60, 3.77, 3.94	+0.15	[14]
HD189733	4780, 5022, 5201	4.26, 4.54, 4.71	-0.37, -0.06, +0.13	[7, 9, 16, 23—26, 44, 46, 48, 57, 60, 66]
HATS-6	3722, 3773, 3872	4.68, 4.69, 4.69	+0.2	[29]
Kepler-91	4550, 4708, 4917	2.85, 2.88, 2.95	+0.11, +0.34, +0.51	[33, 40, 45, 47]
Kepler-774	6270, 6360, 6523	3.97, 4.25, 4.54	-0.43, -0.17, -0.08	[8, 11, 33, 45, 47]
Солнце	5770	4.44	0.0	[1]

гиганты, в то время как Kepler-91 — уже находящаяся на ветви красных гигантов звезда спектрального класса КЗ. Указанные звезды имеют массы, близкие к солнечной, и радиусы, превышающие примерно в 2...6 раз радиус Солнца. Открытая в 2016 г. звезда Kepler-774 b относится к спектральному классу F и по массе больше Солнца примерно в полтора раза. У всех перечисленных звезд имеется по меньшей мере одна планета, вращающаяся с периодом от двух до одиннадцати земных суток. Все планеты относятся к классу так называемых горячих юпитеров, расположенных очень близко к центральной звезде. Экзопланетная система HATS-6 состоит из звезды-карлика спектрального класса M1 V и планеты типа Сатурна с периодом обращения чуть больше трех суток. Масса и радиус звезды составляет примерно половину от солнечных значений.

Зависимости от длины волны интенсивности непрерывного излучения, потемнения к краю и линейной поляризации.

На рис.7, а мы показываем спектральное распределение интенсивности непрерывного излучения $I(\mu, \lambda)$ в центре диска ($\mu = 1$) избранных звезд для длин волн $300 < \lambda < 950$ нм. Поведение кривых на этом рисунке находится в полном соответствии с представлением, что распределение энергии с длиной волны в рассматриваемых звездах зависит в первую очередь от их эффективной температуры. Энергия, излучаемая самой горячей из рассмотренных нами звезд Kepler-774 ($T_{\text{эф}} = 6360$ К), в несколько раз превышает энергию холодной звезды Kepler-91 ($T_{\text{эф}} = 4708$ К). Теоретическое и наблюдаемое [12, 13]

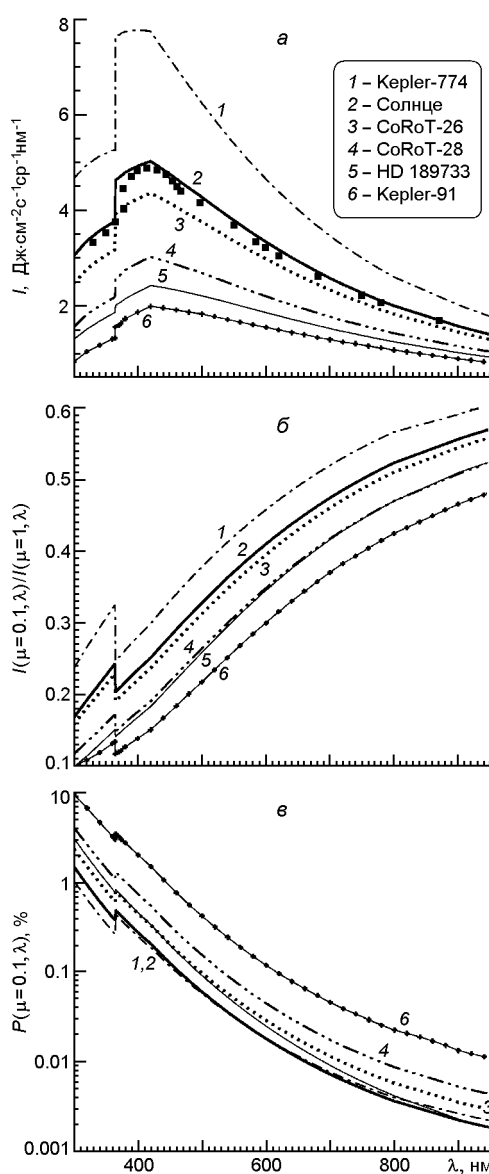


Рис. 7. Зависимости от длины волны интенсивности непрерывного излучения в центре диска (а), потемнения к краю $I(\mu = 0.1, \lambda) / I(\mu = 1, \lambda)$ (б) и линейной поляризации $P(\mu = 0.1, \lambda)$ (в) для звезд из таблицы. Квадратики — данные наблюдений [12, 13]

распределения интенсивности в непрерывном спектре Солнца на рис. 7, а хорошо согласуются между собой, что служит доказательством надежности кода NATAJA, используемого нами при численном решении уравнений переноса для параметров Стокса I и Q .

Зависимость потемнения к краю на лимбе ($\mu = 0.1$) от $T_{\text{эф}}$, наблюдаемая в коротковолновой части спектра на рис. 3, б, сохраняется и для других длин волн. Из рис. 7, б видно, что в диапазоне длин волн 300–950 нм степень потемнения лимба звезд уменьшается с длиной волны для всех типов рассмотренных звезд. В ближней инфракрасной области спектра, соответствующей максимуму фотометрической полосы пропускания R ($\lambda = 700$ нм) в системе Джонсона — Кузинса, диск холодной звезды Kepler-91 на лимбе выглядит в несколько раз более ярким, чем в полосе UX . Для горячей звезды Kepler-774 эти различия несколько меньше, в пределах фактора 2. На рис. 7, в мы приводим результаты моделирования линейной поляризации $P(\mu = 0.1, \lambda)$ непрерывного излучения избранных звезд вблизи лимба ($\mu = 0.1$) в зависимости от длины волны. Линейная поляризация $P(\mu = 0.1, \lambda)$ на лимбе, в отличие от отношения $I(\mu = 0.1, \lambda) / I(\mu = 1, \lambda)$, с длиной волны быстро уменьшается. Видно, что она достигает максимальных значений в коротковолновой части спектра ($\lambda = 300$ нм). В ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 700$ нм) линейная поляризация на лимбе фактически на два порядка меньше, чем в UX -полосе. Интересно, что представленные на рис. 7, в данные не коррелируют с эффективной температурой. Причиной такого поведения линейной поляризации $P(\mu = 0.1, \lambda)$ является, как мы показали выше, ее зависимость не только от $T_{\text{эф}}$, но и от ускорения свободного падения.

Анализ изолиний на рис. 4, а, рассчитанных для UX -полосы, приводит к выводу о наличии двух классов звезд с высокой линейной поляризацией на лимбе. К первому из них относятся сравнительно холодные карлики, расположенные в верхнем левом углу этого рисунка, (см. также рис. 1). Их типичными представителями являются HATS-6, Kepler-45 и все звезды, расположенные на рис. 1 рядом с ними. Этот вывод находится в полном согласии с результатами работы [36]. Второй класс звезд — более горячие гиганты и субгиганты, проэволюционировавшие с главной последовательности. К нему относятся CoRoT-28, Kepler-91 и группа звезд на рис. 4, а между ними. Из рис. 7, в видно, что линейная поляризация на длине волны $\lambda = 300$ нм для первой из этих звезд близка к 4 %, в то время как для второй (Kepler-91) она достигает 10 %.

Зависимости потемнения к краю и линейной поляризации от положения на диске, показанные на рис. 8, подтверждают хорошо известный факт, что потемнение и линейная поляризация быстро уменьшаются по мере продвижения к центру звезды [62]. Это означает, что в одномерных моделях атмосферы, подобных рассмотренным в данной работе, в центре диска $I(\mu = 0, \lambda) / I(\mu = 1, \lambda) = 1$ и $P(\mu = 0, \lambda) = 0$.

Усиление потемнения и поляризации при переходе в коротковолновую часть спектра, четко видное на рис. 8, находится в полном со-

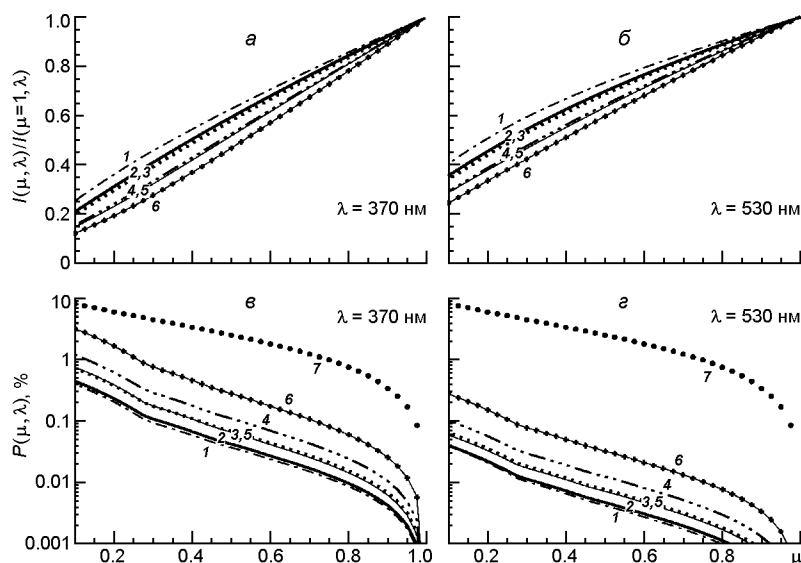


Рис. 8. Потемнение к краю $I(\mu, \lambda)/I(\mu=1, \lambda)$ (а, б) и линейная поляризация $P(\mu, \lambda)$ (в, г) в зависимости от расстояния μ до центра диска для звезд из таблицы (кривая 7 — приближение Chandrasekhara, остальные обозначения см. на рис. 7)

гласии с выводами, сделанными выше. Интересно, что ни одна из рассмотренных звезд, в том числе упоминаемая во введении HD 189733, не достигает значений $P(\mu, \lambda)$, предсказываемых приближением Chandrasekhara. Иными словами, это приближение является сильным преувеличением при описании линейной поляризации в звездах с транзитом планет, и его следует всячески избегать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты нашего исследования сводятся к следующему.

Мы выполнили моделирование вариаций центр — край интенсивности излучения (потемнение к краю) и линейной поляризации в континууме для сетки одномерных моделей звездных атмосфер со следующими параметрами: $3500 < T_{\text{эф}} < 7000$ К, $3.0 < \lg g < 4.8$ и -0.5

$[Fe/H] < +0.5$. Анализ данных из архива экзопланетных систем NASA, относящихся к периоду времени до мая 2016 г., показал, что в указанный диапазон эффективных температур, ускорения свободного падения и металличности попадают практически все звезды с транзитом планет (свыше 98 %). Моделирование потемнения и поляризации излучения в континууме было выполнено для интервала длин волн $\lambda = 300 \dots 950$ нм.

Мы показали, что на угловом расстоянии $\mu = 0.1$ от центра диска потемнение быстро уменьшается с увеличением эффективной температуры звезды, при этом зависимость от ускорения свободного паде-

ния и металличности выражена намного слабее. В целом на длине волны $\lambda = 370$ нм значения потемнения для звезд с транзитом планет из архива NASA заключены в диапазоне между 0.03 и 0.3.

Линейная поляризация P , в отличие от потемнения к краю, зависит не только от эффективной температуры звезды, но и от ее ускорения свободного падения. Значения P уменьшаются с увеличением $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$. Зависимость линейной поляризации от металличности меньше, при этом ее чувствительность к этому параметру падает с увеличением эффективной температуры. С увеличением металличности значения P уменьшаются примерно в два раза. Максимальная линейная поляризация звезд с транзитом планет из архива NASA на длине волны $\lambda = 370$ нм составляет 4 %, в то время как минимальная величина — около 0.3 %.

Мы оценили амплитуду линейной поляризации выходящего излучения с помощью приближения, приведенного в работе [62]. Сравнение приближенного решения с точным, полученным из уравнения переноса поляризованного излучения, показало, что данное приближение с точностью до коэффициента является надежной оценкой линейной поляризации звезд с транзитом планет.

Нам удалось описать потемнение к краю и линейную поляризацию для рассмотренной сетки моделей атмосфер в виде аналитической нелинейной зависимости от $\lambda^{-1/2}$. Оказалось, что наилучшим образом потемнение можно представить полиномом четвертой степени, а линейную поляризацию — полиномом шестой. Коэффициенты указанных полиномов являются функцией от четырех переменных: λ , $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$. Они, а также IDL-процедуры для их чтения доступны в электронном формате.

Мы детально обсудили вариации центр — край интенсивности и линейной поляризации нескольких звезд. Из 1890 звезд с транзитом планет из архива NASA мы выбрали наиболее типичные из них. Это HATS-6, HD189733, Kepler-774, CoRoT-26, CoRoT-28 и Kepler-91. Мы показали, что спектральное распределение энергии излучения для данных звезд зависит в первую очередь от их эффективной температуры. В диапазоне длин волн $\lambda = 300 \dots 950$ нм степень яркости лимба звезд с транзитом планет увеличивается, а линейная поляризация на лимбе с длиной волны уменьшается. В ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 700$ нм) линейная поляризация на лимбе фактически на два порядка меньше, чем в UX -полосе ($\lambda = 370$ нм).

Мы показали, что есть два класса звезд с высокой линейной поляризацией на лимбе. В первый из них входят сравнительно холодные карлики. Их типичными представителями являются HATS-6, Kepler-45 и все звезды с близкими к этим двум звездам значениями $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$. Второй класс звезд — более горячие гиганты и субгиганты, проэволюционировавшие с главной последовательности. К нему относятся CoRoT-28, Kepler-91 и группа звезд с эффективными температурами и ускорением свободного падения около 5000 К и 3.5 соответственно. Линейная поляризация в ультрафиолете на длине волны $\lambda =$

= 300 нм для CoRoT-28 близка к 4 %, в то время как для Kepler-91 она достигает 10 %.

Зависимости потемнения к краю и линейной поляризации от положения на диске, полученные в данной работе, подтверждают известный факт, что потемнение и линейная поляризация быстро уменьшаются к центру диска звезды. У всех рассмотренных нами звезд значения P в несколько раз меньше предсказываемых приближением Чандрасекхара. Иными словами, использование этого приближения для описания линейной поляризации звезд с транзитом планет является ошибочным.

Результаты данной работы представляют интерес для предсказания возможных спектрополяриметрических эффектов при транзите планет в зависимости от их радиуса, наклона орбит и периода обращения вокруг звезды.

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М: Мир, 1977.—446 с.
2. Соболев В. В. Курс теоретической астрофизики. — М: Наука, 1967.—528 с.
3. Almenara J. M., Bouchy F., Gaulme P., et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXIV. CoRoT-25b and CoRoT-26b: two low-density giant planets // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**555**.—P. A118—A128.
4. Berdyugina S. V., Berdyugin A. V., Fluri D. M., Piirola V. First detection of polarized scattered light from an exoplanetary atmosphere // *Astrophys. J.*—2008.—**673**.—P. L83—L86.
5. Berdyugina S. V., Berdyugin A. V., Fluri D. M., Piirola V. Polarized reflected light from the exoplanet HD189733b: First multicolour observations and confirmation of detection // *Astrophys. J. Lett.*—2011.—**728**.—P. L6—L10.
6. Bessel M. S. UVRI passbands // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1990.—**102**.—P. 1181—1199.
7. Bonfanti A., Ortolani S., Nascimbeni V. Age consistency between exoplanet hosts and field stars // *Astron. and Astrophys.*—2016.—**585**.—P. A5—A18.
8. Borucki W. J., Koch D. G., Basri G., et al. Characteristics of planetary candidates observed by Kepler. II. Analysis of the first four months of data // *Astrophys. J.*—2011.—**736**.—P. 19—40.
9. Bouchy F., Udry S., Mayor M., et al. ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters. II. A very hot Jupiter transiting the bright K star HD 189733 // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**444**.—P. L15—L19.
10. Bruls J. H. M. J. The formation of helioseismology line. IV. The NI I 676.8 nm intercombination line // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**269**.—P. 509—517.
11. Buchhave L. A., Latham D. W., Carter J. A., et al. Kepler-14b: A massive hot Jupiter transiting an F star in a close visual binary // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2011.—**197**.—P. 3—10.
12. Burlov-Vasiljev K. A., Gurtovenko E. A., Matveev Ya. B. New absolute measurements of the solar spectrum // *Solar Phys.*—1995.—**157**.—P. 51—73.
13. Burlov-Vasiljev K. A., Matveev Ya. B., Vasiljeva I. E. New measurements of the solar disk-center spectral intensity in the near IR from 645 nm to 1070 nm // *Solar Phys.*—1998.—**177**.—P. 25—40.
14. Cabrera J., Csizmadia Sz., Montagnier G., et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. XXVII. CoRoT-28b, a planet orbiting an evolved star, and CoRoT-29b, a planet showing an asymmetric transit // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**579**.—P. A36—A54.
15. Carciofi A. C., Magalhães A. M. The polarization signature of extrasolar planet transiting cool dwarfs // *Astrophys. J.*—2005.—**635**.—P. 570—577.

16. *Casagrande L., Schönrich R., Asplund M., et al.* New constraints on the chemical evolution of the solar neighbourhood and Galactic disc(s). Improved astrophysical parameters for the Geneva-Copenhagen survey // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**530**.—P. A138—A158.
17. *Chandrasekhar S.* On the radiative equilibrium of a stellar atmosphere // *Astrophys. J.*—1946.—**103**.—P. 351—370.
18. *Claret A.* A new non-linear limb-darkening law for LTE stellar atmosphere models. Calculations for $-5.0 \leq \log [M/H] \leq +1$, $2000 \text{ K} \leq T_{\text{эф}} \leq 50000 \text{ K}$ at several surface gravities // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**363**.—P. 1081—1190.
19. *Code A. D.* Radiative equilibrium in an atmosphere in which pure scattering and pure absorption both play a role // *Astrophys. J.*—1950.—**112**.—P. 22—24.
20. *Feldt M., Turatto M., Schmid H. M., et al.* “Planet Finder” instrument for the ESO VLT // *Proceedings “Towards Other Earths: DARWIN/TPF and the Search for Extrasolar Terrestrial Planets”*, Heidelberg, Germany, April 22—25, 2003 (ESASP-539, October 2003) / Eds M. Fridlund, T. Henning, —2003.—P. 99—107.
21. *Fluri A. D., Stenflo J. O.* Continuum polarization in the solar spectrum // *Astrophys. J.*—1999.—**341**.—P. 902—911.
22. *Frantseva K., Kostogryz N. M., Yakobchuk T. M.* Simulation of polarimetric effects in planetary system HD189733 // *Adv. Astron. and Space Phys.*—2012.—**2**.—P. 146—148.
23. *Fuhrmann K.* Nearby stars of the Galactic disc and halo. IV // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**384**.—P. 173—224.
24. *Ghezzi L., Cunha K., Smith V. V., et al.* Stellar parameters and metallicities of stars hosting Jovian and Neptunian mass planets: A possible dependence of planetary mass on metallicity // *Astrophys. J.*—2010.—**720**.—P. 1290—1302.
25. *Gonzalez G., Carlson M. K., Tobin R. W.* Parent stars of extrasolar planets. X. Lithium abundances and vsini revisited // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**403**.—P. 1368—1380.
26. *Gray R. O., Corbally C. J., Garrison R. F., et al.* Contributions to the nearby stars (NStars) project: Spectroscopy of stars earlier than M0 within 40 parsecs: The northern sample. I // *Astron. J.*—2003.—**126**.—P. 2048—2059.
27. *Harrington J. P.* The intrinsic polarization of Mira Variables // *Astrophys. J. Lett.*—1969.—**3**.—P. 165—168.
28. *Harrington J. P.* Polarization of radiation from stellar atmospheres. The grey case // *Astrophys. and Space Sci.*—1970.—**8**.—P. 227—242.
29. *Hartman J. D., Bayliss D., Brahm R., et al.* HATS-6b: A Warm saturn transiting an early M dwarf star, and a set of empirical relations for characterizing K and M dwarf planet hosts // *Astron. J.*—2015.—**149**.—P. A166—A185.
30. *Hayek W., Sing D., Pont F., Asplund M.* Limb darkening laws for two exoplanet host stars derived from 3D stellar model atmospheres. Comparison with 1D models and HST light curve observations // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**539**.—P. A102—A116.
31. *Hough J.* Polarimetry: a powerful diagnostic tool in astronomy // *Astron. and Geophys.*—2006.—**47**, N 3.—P. 3.31—3.35.
32. *Hough J. H., Lucas P. W., Bailey J. A., et al.* PlanetPol: A very high sensitivity polarimeter // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—2006.—**118**, N 847.—P. 1302—1318.
33. *Huber D., Silva Aguirre V., Matthews J. M., et al.* Revised stellar properties of Kepler targets for the quarter 1—16 transit detection run // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2014.—**211**.—P. 2—18.
34. *Kemp J. C., Henson D., Steiner C. T., Powell E. R.* The optical polarization of the Sun measured at a sensitivity of parts in ten million // *Nature*.—1987.—**326**.—P. 270—273.

35. *Kostogryz N. M., Berdyugina S. V.* Center-to-limb polarization in continuum spectra of F, G, K stars // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**575**.—P. A89—A97.
36. *Kostogryz N. M., Yakobchuk T. M., Berdyugina S. V.* Polarization in exoplanetary systems caused by transits, grazing transits, and starspots // *Astrophys. J.*—2015.—**806**.—P. 97—108.
37. *Kostogryz N. M., Yakobchuk T. M., Morozhenko O. V., Vid'machenko A. P.* Polarimetric study of transiting extrasolar planets // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**415**.—P. 695—700.
38. *Kurucz R. L.* ATLAS9 Stellar atmospheres programs and 2 km s⁻¹ grid. — Cambridge: Smithsonian Astrophys. Obs., 1993.—CD-ROM N 13.
39. *Lang K. R.* Astrophysical formulae. — Berlin, Helderberg, New York: Springer-Verlag, 1974.—Chapter 9.
40. *Lillo-Box J., Barrado D., Moya A., et al.* Kepler-91b: a planet at the end of its life. Planet and giant host star properties via light-curve variations // *Astron. and Astrophys.*—2014.—**562**.—P. A109.—A118.
41. *Lucas P. W., Hough J. H., Bailey J. A., et al.* Planetpol polarimetry of the exoplanet systems 55 Cnc and Boo // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**393**.—P. 229—244.
42. *Mihalas D.* Stellar atmospheres: Second ed. — San Francisco: W. H. Freeman and Co, 1978.—650 p.
43. *Milne E. A.* Handbuch der Astrophysik. — Berlin: Springer, 1930.—Vol. 3, Part 1.—P. 145.
44. *Mishenina T. V., Pignatari M., Korotin S. A., et al.* Abundances of neutron-capture elements in stars of the Galactic disk substructures // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**552**.—P. A128.—139.
45. *Pinsonneault M. H., An D., Molenda-Żakowicz J., et al.* A revised effective temperature scale for the Kepler input catalog // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2012.—**199**.—P. 30—51.
46. *Ramirez I., Fish J. R., Lambert D. L., Allende Prieto C.* Lithium abundances in nearby FGK dwarf and subgiant stars: Internal destruction, galactic chemical evolution, and exoplanets // *Astrophys. J.*—2012.—**756**.—P. 46.—59.
47. *Rowe J. F., Coughlin J. L., Antoci V., et al.* Planetary candidates observed by Kepler. V. Planet sample from Q1-Q12 (36 Months) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2015.—**217**.—P. 16.—22.
48. *Santos N. C., Sousa S. G., Mortier A., et al.* SWEET-Cat: a catalogue of parameters for stars with exoplanets. I. New atmospheric parameters and masses for 48 stars with planets // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**556**.—P. A150.—A160.
49. *Schmid H. M., Gisler D., Joos F., et al.* ZIMPOL/CHEOPS: a polarimetric imager for the direct detection of extra-solar planets // *ASP Conf. Ser.*—2005.—**343**.—P. 89—91.—(Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions / Eds A. Adamson, C. Aspin, C. J. Davis, T. Fujiiyoshi).
50. *Seager S., Whitney B. A., Sasselov D. D.* Photometric light curves and polarization of close-in extrasolar giant planets // *Astrophys. J.*—2000.—**540**.—P. 504—520.
51. *Shchukina N. G., Frantseva K. V., Trujillo Bueno J.* The continuum polarization of stars with transiting exoplanetary systems // WG1 meeting “Polarimetry of planetary systems” (COST Action MP1104 — Polarisation as a tool to study The Solar System and beyond), Florence, Italy, September 23—27, 2013. Online at <http://www.polarisation.eu/index.php/meetings/previous-meetings/10-meetings/102-polarimetry-planetary-systems>.
52. *Shchukina N. G., Frantseva K. V., Trujillo Bueno J.* Continuum polarization of stars as a result of occupation by transiting exoplanets // Proceedings of 21th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Taras Shevchenko National University, Kyiv, April 28—May 3, 2014. Online at <http://ysc.kiev.ua>, P.12.

53. *Shchukina N. G., Frantseva K. V., Trujillo Bueno J.* Continuum polarization of stars as a result of occultation by transiting exoplanets // WG2 meeting “Theory and modeling of polarisation in astrophysics” (COST Action MP1104 — Polarisation as a tool to study The Solar System and beyond), Prague, Czech Republic, May 5—8, 2014. Online at <http://www.asu.cas.cz/~wg2prague/talks.html>.
54. *Sing D. K.* Stellar limb-darkening coefficients for CoRot and Kepler // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**510**.—P. A21—A24.
55. *Sing D. K., Desert J.-M., Fortney J. J., et al.* Gran Telescopio Canarias OSIRIS transiting exoplanet atmospheric survey: detection of potassium in XO-2b from narrowband spectrophotometry // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**527**.—P. A73—A82.
56. *Sing D. K., Desert J.-M., Lecavelier Des Etangs A., et al.* Transit spectrophotometry of the exoplanet HD 189733b. I. Searching for water but finding haze with HST NICMOS // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**505**.—P. 891—899.
57. *Sousa S. G., Santos N. C., Israelian G., et al.* Spectroscopic parameters for a sample of metal-rich solar-type stars // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**458**.—P. 873—880.
58. *Stam D. M., Hovenier J. W., Waters L. B. F. M.* Using polarimetry to detect and characterize Jupiter-like extrasolar planets // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**428**.—P. 663—672.
59. *Stenflo J. O., Keller C. U., Gandorfer A.* Anomalous polarization effects due to coherent scattering on the Sun 2000 // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**355**.—P. 789—803.
60. *Torres G., Fischer D. A., Sozzetti A., et al.* Improved spectroscopic parameters for transiting planet hosts // *Astrophys. J.*—2012.—**757**.—P. 161.—174.
61. *Trujillo Bueno J., Manso Sainz R.* Iterative methods for the non-LTE transfer of polarized radiation: Resonance line polarization in one-dimensional atmospheres // *Astrophys. J.*—1999.—**516**.—P. 436—450.
62. *Trujillo Bueno J., Shchukina N. G.* Three-dimensional radiative transfer modeling of the polarization of the Sun’s continuous spectrum // *Astrophys. J.*—2009.—**694**.—P. 1364—1378.
63. *Wiktorowicz S. J.* Nondetection of polarized, scattered light from the HD 189733b hot Jupiter // *Astrophys. J.*—2009.—**696**.—P. 1116—1124.
64. *Wiktorowicz S. J., Matthews K. A.* High-precision optical polarimeter to measure inclinations of high-mass X-ray binaries // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—2008.—**120**, N 847.—P. 1282—1297.
65. *Wilson P. A., Colyn K. D., Sing D. K., et al.* A search for methane in the atmosphere of GJ 1214b via GTC narrow-band transmission spectrophotometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2014.—**438**.—P. 2395—2405.
66. *Wright N. J., Drake J. J., Mamajek E. E., Henry G. W.* The stellar-activity-rotation relationship and the evolution of stellar dynamos // *Astrophys. J.*—2011.—**743**.—P. 48—63.

Статья поступила в редакцию 07.07.16