

Методы исследований экзопланет и новые инструменты

В.И. АНАНЬЕВА
ИКИ РАН

Хотя за последние годы число известных внесолнечных планет приблизилось к двум тысячам, большинство планет даже у самых близких звезд не обнаружены (Земля и Вселенная, 2006, № 4; 2007,



№ 4; 2008, № 2; 2009, № 1; 2010, № 4). В 2020–2030-е гг. начнут работу уникальные наземные инструменты и космические обсерватории, которые обеспечат прорыв в знаниях о планетах других звезд.

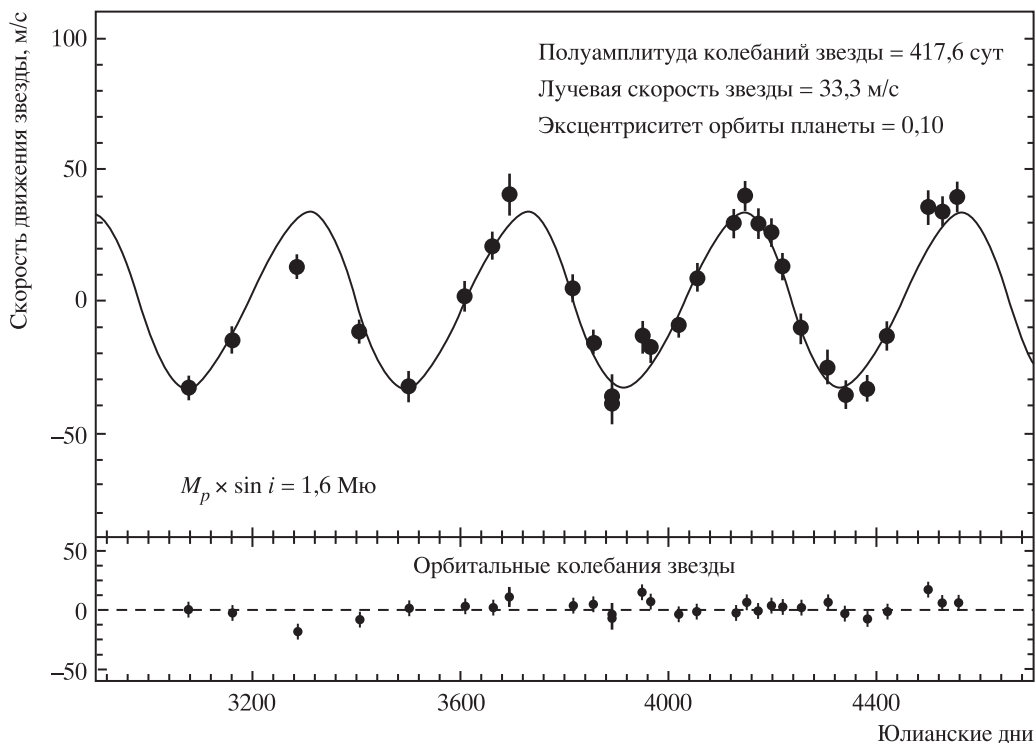
МЕТОД ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

За два десятилетия, прошедшие с момента открытия первой внесолнечной планеты у нормальной звезды, наши знания о планетных системах других звезд значительно расширились. К апрелю 2015 г. идентифицировано свыше 1800 экзопланет более чем в 1200 системах, их список продолжает попол-

няться почти ежедневно (Земля и Вселенная, 2012, № 6; 2014, № 5). У многих экзопланет нет аналогов в Солнечной системе, некоторые настолько необычны, что их существование считалось невозможным. Так, существуют планеты-гиганты, вращающиеся на расстоянии всего нескольких звездных радиусов и нагретые до высоких температур, планеты на высокоэллипти-

ческих, ретроградных или даже полярных орбитах, планеты, вращающиеся вокруг пары звезд как целого, и, наконец, испаряющиеся планеты, за которыми тянется густой шлейф силикатной пыли.

Чтобы понять, какие инструменты необходимы для исследований экзопланет, надо выяснить, какими способами их ищут сейчас и какие ограничения накладыва-



ет каждый из этих способов.

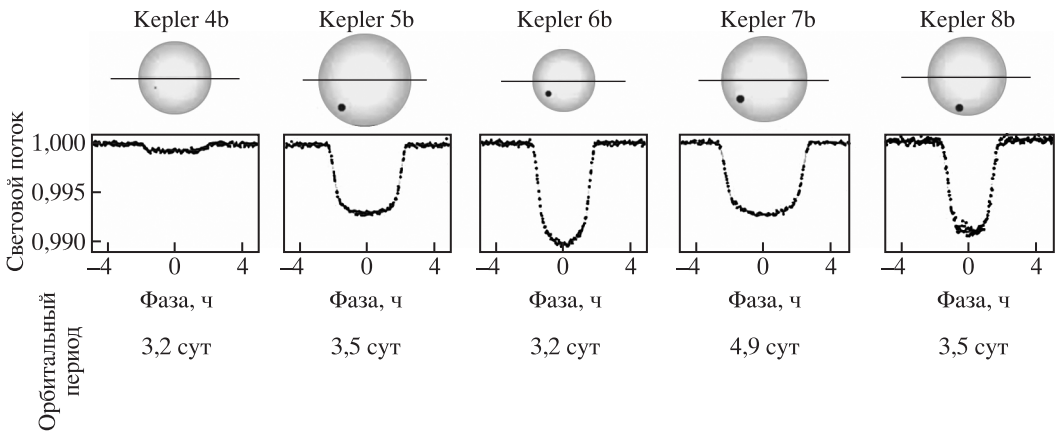
Исторически сложилось, что самым распространенным стал метод измерения радиальных, или лучевых, скоростей родительских звезд (его еще называют RV-методом – от слов radial velocity). Он основан на том, что, строго говоря, не планета вращается вокруг звезды, а звезда и планета вращаются вокруг общего центра масс. Звезда, обладающая планетной системой, будет двигаться по своей небольшой орбите из-за гравитационного влияния планет. Это можно зафиксировать с помощью прецизионных астрометрических изме-

рений или очень точно измеряя лучевые скорости звезды (скорости вдоль луча зрения). Лучевые скорости звезды измеряются по еле заметному смещению линий в ее спектре относительно линий в спектре лабораторного эталона (как правило, в этом качестве выступают пары йода). Точность лучших современных спектрографов HARPS (установлен на 3,6-м телескопе в Европейской Южной Обсерватории Ла-Силья в Чили), HARPS-N (3,6-м телескоп Галилея в Обсерватории Ла Пальма на Канарских островах), HIRES (10-м телескоп Обсерватории им. Кека на Гавайях) и PFS (6,5-м

График колебаний лучевой скорости звезды HD 167042 (созвездие Дракона, 163 св. лет от нас), вызванных планетой-гигантом HD 167042 b массой 1,7 $M_{\text{Ю}}$. NASA.

телескоп Магеллан II в Чили), достигает 0,8–1 м/с.

Много это или мало? Для сравнения: планета-гигант (“горячий юпитер”) на тесной орбите может наводить на свою звезду колебания лучевой скорости с амплитудой 50–200 м/с. Юпитер наводит на Солнце колебания с амплитудой до 12,7 м/с и периодом 11,857 земного года, Сатурн – с амплитудой 2,75 м/с и периодом 29,4 земного года. Влияние на Солнце планет земного типа гораздо



Кривые блеска нескольких звезд во время транзитов планет по их диску. Глубина транзита пропорциональна величине $(R_{pl}/R_{star})^2$, по мере уменьшения размеров транзитной планеты она быстро уменьшается. По данным космической обсерватории "Кеплер". NASA.

меньше – амплитуда соответствующих колебаний не превышает 0,1 м/с. Все это говорит о том, что метод измерения лучевых скоростей хорош для поиска планет-гигантов и мало применим к экзопланетам земного типа. Действительно, к апрелю 2015 г. этим способом было открыто 579 планет в 436 системах, подавляющее большинство из них – планеты-гиганты.

Если бы какая-нибудь инопланетная цивилизация, по уровню развития равная нашей, искала планеты в Солнечной системе, измеряя лучевые скорости Солнца,

при современном уровне развития наблюдательной техники она, скорее всего, смогла бы найти лишь Юпитер и на пределе возможного – Сатурн.

Существенный недостаток метода измерения лучевых скоростей – нельзя измерить точную массу планеты. Можно определить только минимальную массу, то есть произведение $m_p \times \sin i$, где m_p – истинная масса планеты, i – наклонение орбиты планеты к лучу зрения. Если это наклонение неизвестно (так и бывает в большинстве случаев), из наблюдений колебаний лучевой скорости звезды мы можем получить только нижний предел на массу планеты. Это легко понять: одно и то же колебание лучевой скорости может быть вызвано как сравнительно маломассивной планетой, чью орбиту мы видим "с ребра", так и планетой большой массы, чья орбита расположена к нам практиче-

ски плашмя. Несколько объектов, зарегистрированных по колебаниям лучевых скоростей родительской звезды и считавшихся планетами, впоследствии оказались коричневыми карликами и даже маломассивными звездами.

ТРАНЗИТНЫЙ МЕТОД ПОИСКА ПЛАНЕТ

Другой метод, транзитный, – единственный позволяющий с высокой достоверностью заметить экзопланеты. С его помощью их открыто более 1200. Если наклонение орбиты внесолнечной планеты к лучу зрения близко к 90° (система наблюдается "с ребра"), становится возможным наблюдение транзитов – проходов планеты по диску своей звезды, приводящих к регулярным незначительным ослаблениям ее блеска. Транзит планеты-гиганта радиусом 9–15 R_3 обычно ослабляет блеск звезды, подобной Солнцу, на

1–2%, транзит “нептуна” радиусом около $4 R_3$ – на 0,13%, транзит близких по размеру Земли – всего на 0,0084%. Очевидно, что для поиска небольших экзопланет методом транзитов нужна исключительная точность фотометрических наблюдений.

Впервые транзит внесолнечной планеты наблюдался в 2000 г. Так был найден “горячий юпитер” HD 209458 b в созвездии Пегаса (153 св. года от нас), за год до этого открытый с помощью измерения лучевых скоростей родительской звезды (Земля и Вселенная, 2002, № 5). Измерения, проведенные независимо обоими методами, позволили определить точную массу и радиус этой планеты, а значит, и ее среднюю плотность. Именно этим хороши транзитные планеты: для многих из них можно определить важнейшие характеристики – массу и радиус.

Поиск внесолнечных планет путем наблюдения транзитов осложнялся тем, что наблюдать транзиты приходилось сквозь беспокойную земную атмосферу. При наземных наблюдениях точность фотометрии обычно не превышает 0,2–0,3%, более слабые транзитные сигналы зашиваются атмосферными мерцаниями. Подавляющее большинство экзопланет, найденных в

ходе наземных транзитных обзоров Super WASP, HATNet, TrES и др., – “горячие юпитеры” (типичная экзопланета данного класса расположена на расстоянии порядка 0,05 а. е. от звезды и нагрета до 1000–3000 К; Земля и Вселенная, 2004, № 6, с. 40).

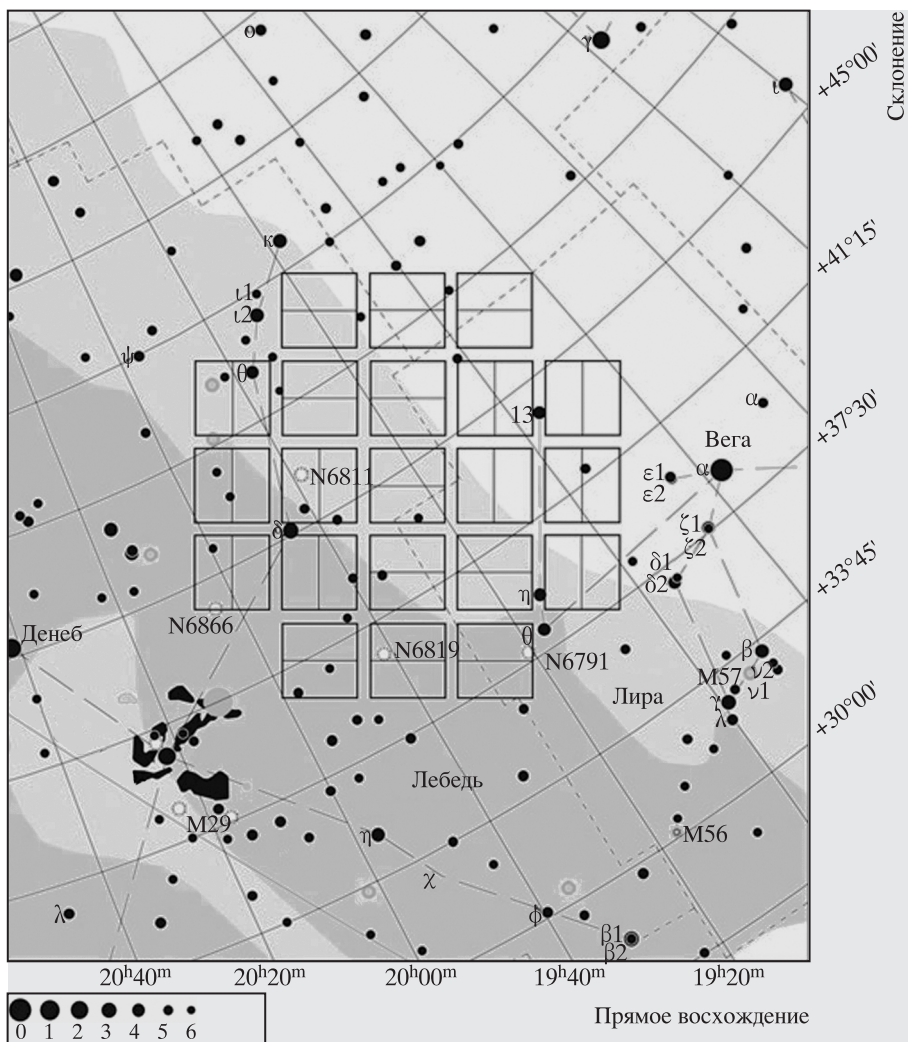
СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ

Для поиска небольших планет необходимы космические обсерватории. В декабре 2006 г. была запущена европейская космическая обсерватория “COROT”, в марте 2009 г. – американская “Кеплер” (Земля и Вселенная, 2007, № 5, с. 61; 2009, № 4, с. 44–45). Хотя “COROT” открыла два с половиной десятка планет (большей частью “горячие юпитеры”), основные наши знания о планетных системах Галактики были получены с помощью “Кеплера” (Земля и Вселенная, 2011, № 6; 2014, № 3, с. 91).

Космическая обсерватория “Кеплер” выведена на гелиоцентрическую орбиту, близкую к земной, с периодом 372,5 сут. Она медленно удаляется от Земли, отставая от нее в орбитальном движении. Диаметр главного зеркала телескопа – 0,95 м, площадь поля зрения близка к 105 квадратным градусам. В течение четырех

лет (с мая 2009 г. по май 2013 г.) телескоп непрерывно наблюдал одну и ту же область неба, называемую “полем Кеплера”, расположенную в районе созвездий Лебедя и Лиры.

Точность фотометрии “Кеплера” для сравнительно ярких звезд достигала 20–30 ppm (1 ppm – одна миллионная доля)! За время наблюдений “поля Кеплера” было обнаружено более 4600 надежных транзитных кандидатов, подтверждена планетная природа 1019 из них (на конец апреля 2015 г.). “Кеплер” выявил резкое увеличение числа планет по мере уменьшения их размеров ($N \sim R_p^{-2}$). Как оказалось, небольших планет (земного типа, суперземель и “нептунов”) гораздо больше, чем планет-гигантов! Кроме того, обсерватория нашла плоские плотные упакованные компактные системы (Земля и Вселенная, 2015, № 1, с. 75–76), в которых орбиты 4–5 планет проходят глубоко внутри орбиты Меркурия. Еще одним неожиданным открытием стали необычные “газовые карлики” – планеты с массами всего в 2–3 раза больше массы Земли, но со средней плотностью, много меньшей плотности воды (для сравнения: средняя плотность Земли превышает плотность воды в 5,5 раза). Согласно данным, полученным “Кеплером”, больше по-



Поле обзора неба космической обсерваторией “Кеплер” в районе созвездий Лебедя и Лиры. NASA.

ловины звезд галактического диска имеют планетные системы (а может, и вообще все).

Однако и у транзитного метода есть недостатки. Главным считается низкая вероятность

транзитной конфигурации. Геометрическая вероятность того, что с точки зрения земного наблюдателя планета пройдет по диску своей звезды, близка к R_{star}/a , где R_{star} – радиус звезды, a – большая полуось орбиты планеты. Для “горячих юпитеров” эта величина близка к 10%, с увеличением расстояния между планетой и звездой она быстро падает.

Так, геометрическая вероятность транзитной конфигурации Земли относительно Солнца составляет всего 0,47%. Это значит, что в среднем из 213 планет, похожих на Землю, у звезд такого же размера, как Солнце, только одна планета окажется транзитной с точки зрения земного наблюдателя, остальные пройдут выше или ниже диска своей звезды.

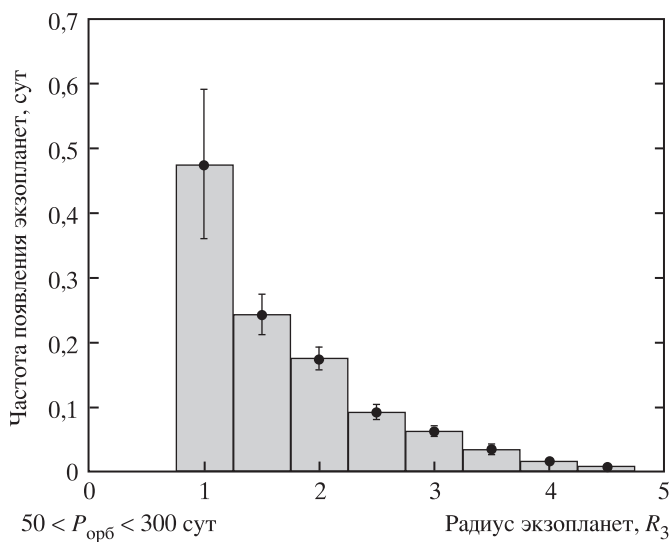


График распространённости экзопланет в зависимости от расстояния от нас. Их количество быстро растёт по мере уменьшения размеров планет. По данным космической обсерватории “Кеплер”. NASA.

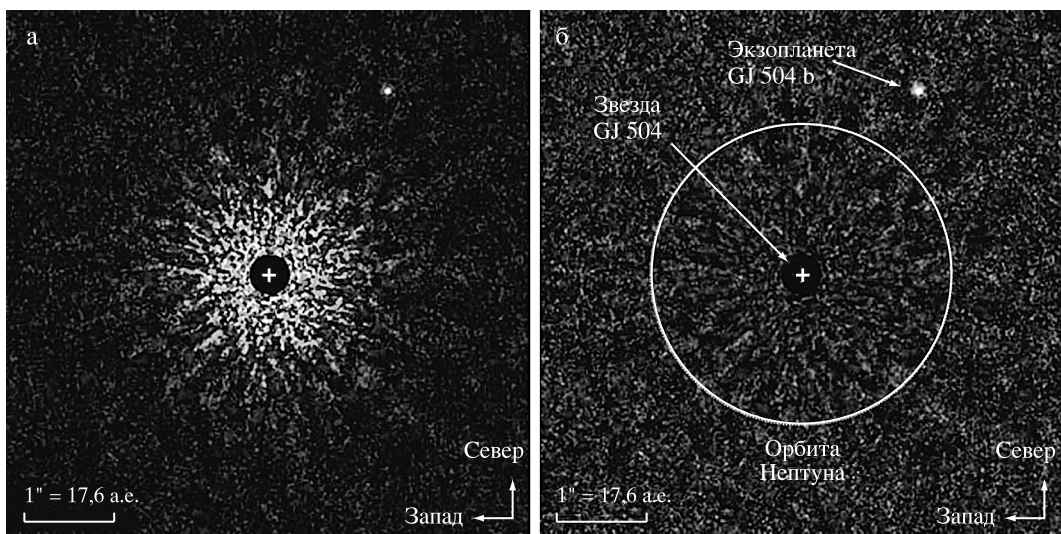
Если бы “Кеплер” смотрел на Солнечную систему с расстояния менее 100 пк и ему повезло бы оказаться вблизи плоскости эклиптики, за четыре года наблюдений он смог бы уверенно распознать Венеру. Меркурий слишком мал, чтобы дать заметный транзитный сигнал, а Земля сделала только три оборота вокруг Солнца (соответственно, наблюдалось бы только три транзитных события, что мало для надёжной регистрации такой небольшой планеты, как наша).

Если транзитный метод эффективнее всего “ловит” планеты на тесных орбитах, то есть близких к звезде, получение прямых изображений (imaging) лучше всего подходит для поиска молодых горячих планет, удалённых от своей звезды на десятки и сотни астрономических

единиц. В этом случае наблюдения ведутся в ближнем ИК-диапазоне в полосах J, H, K_s и L' , соответствующих 1,2; 1,6; 2,2 и 3,8 мкм. Конечно, речь не идет о регистрации планет, светящихся отраженным светом своей звезды, как все планеты Солнечной системы, а, скорее всего, о молодых массивных планетах-гигантах – источниках собственного теплового излучения. Как правило, возраст этих планет всего несколько десятков миллионов лет и они нагреты до 800–1800 К, их массы составляют 4–12 $M_{Ю}$. Самой прохладной планетой стал гигант GJ 504 b, чья масса оценивается в 4 $M_{Ю}$, температура составляет всего 510 К. Уже получены снимки двух десятков внесолнечных планет и трех десятков коричневых карликов – объектов, промежуточных по

своим свойствам между звездами и планетами-гигантами (Земля и Вселенная, 2001, № 1, с. 104). Например, система из четырех экзопланет HR 8799 b, c, d, e у звезды HR 8799 в созвездии Пегаса открыта этим методом в 2008–2010 гг. на инфракрасных снимках, полученных с помощью 10-м телескопа Кек II Обсерватории им. Кека, Гавайи.

Важнейший недостаток поисков планет на инфракрасных снимках заключается в том, что они не дают возможности “увидеть” обычные холодные планеты возрастом более нескольких сотен миллионов лет и уже достаточно остывшие. Так, наблюдая Солнечную систему с расстояния в несколько десятков световых лет с помощью современных инфракрасных телескопов, астрономы не нашли бы ни одной планеты. Но будущее, несомненно, именно за этим методом. Когда-нибудь мы сможем получать изображения и спектры внесолнечных планет так же, как сей-



Экзопланета GJ 504 b – газовый гигант, обращается вокруг звезды солнечного типа 59 Девы (GJ 504), удаленной на 58 св. лет от нас. Снимки получены 22 мая 2011 г. (а; $\lambda = 1,6$ мкм) и 12 апреля 2012 г. (б; $\lambda = 1,2$ мкм) на 8,2-м телескопе Субару с помощью системы адаптивной оптики HiCIAO. Японская национальная астрономическая обсерватория, Гавайи.

час планет Солнечной системы и их спутников!

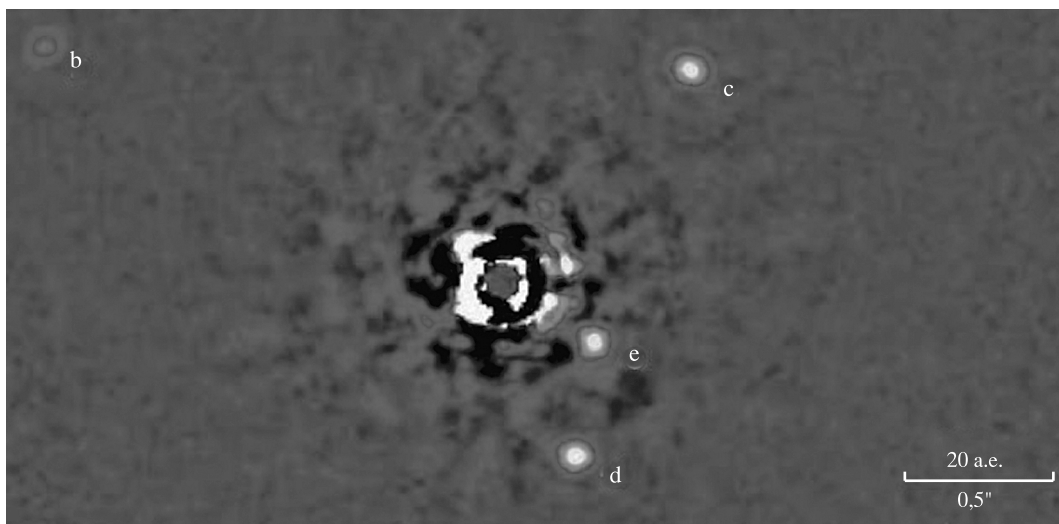
ДРУГИЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ЭКЗОПЛАНЕТ

Специалисты пользуются еще одной возможностью для поиска внесолнечных планет – гравитационным микролинзированием. Эффект гравитационного микролинзирования происходит, когда три объекта – звезда-источник,

звезда-линза и наблюдатель – оказываются почти точно на одной прямой. Гравитационное поле звезды-линзы искривляет лучи звезды-источника, что приводит с точки зрения наблюдателя к усилению (иногда в десятки и сотни раз!) видимого блеска последней. Анализируя кривую блеска, можно оценить массу звезды-линзы, ее скорость поперек луча зрения и другие параметры. Если же рядом со звездой-линзой есть планеты, их гравитационное поле внесет искажения в итоговую кривую блеска – на характерной симметричной кривой появятся дополнительные пики и провалы.

Большое достоинство гравитационного микролинзирования – для него совершенно не важна светимость объекта-линзы. С его помощью можно зарегистрировать очень

холодные планеты, значительно удаленные от своих звезд, и даже свободно плавающие “планеты-бродяги”, выброшенные из своих систем в результате гравитационных возмущений (Земля и Вселенная, 2001, № 1, с. 111; 2011, № 5, с. 77; 2014, № 1, с. 82). Основной недостаток этого метода – звезда-источник исключительно редко оказывается на одном луче зрения с объектом-линзой и земным наблюдателем. Именно поэтому поиск событий микролинзирования происходит на богатых звездных полях в направлении на центр Галактики. Планеты, открытые таким образом, как правило, оказываются на удалении нескольких килопарсек от Солнца. Сейчас известно 33 экзопланеты, обнаруженные методом гравитационного микролинзирования, большинство



из которых принадлежит к красным карликам – самым многочисленным звездам Галактики. Дальнейшее изучение вновь открытых планет сильно затруднено из-за их удаленности и низкого блеска родительских звезд. Метод хорош для набора статистики, но не для изучения конкретных систем.

Астрометрия – четвертый способ поиска экзопланет. Фактически он дополняет RV-метод. С помощью астрометрии ученые измеряют не колебания лучевой скорости родительской звезды, вызванные гравитационным влиянием планеты, а смещения положения звезды на небесной сфере, обусловленные той же причиной. До сих пор этим методом надежно не зарегистрировано ни одной экзопланеты (несколько открытий, анонсированных

за последние годы, не подтвердились). Причина заключается в исключительно малом смещении под действием экзопланет даже самых ближайших звезд. Так, аналог Юпитера у звезды, подобной Солнцу, расположенной на расстоянии 1,33 пк (расстояние до звезды альфа Центавра), вызовет ее смещение на 0,004 угловой секунды. Такая малая величина находится далеко за пределами возможностей даже крупнейших наземных телескопов, например 10-м телескопы Обсерватории им. Кека при наилучших условиях видимости дают угловое разрешение около 0,02", то есть в пять раз хуже.

Как и в случае транзитного метода, резкое увеличение чувствительности астрометрии может быть достигнуто с помощью космических телескопов. 19 декабря

Экзопланеты HR 8799 b, c, d, e у звезды HR 8799 в созвездии Пегаса, расстояние – 129 св. лет от нас. Инфракрасное изображение получено с помощью 10-м телескопа Обсерватории им. Кека, NASA.

2013 г. на орбиту была выведена европейская космическая астрометрическая обсерватория “Гайя” (“GAIA”; Земля и Вселенная, 2014, № 3). Этот проект не посвящен непосредственно поиску экзопланет, он предназначен для построения точной трехмерной карты нашей Галактики. В рамках миссии планируется определить координаты, параллаксы и собственные движения миллиарда звезд (1% полного числа звезд Галактики) с огромной точностью (лучше 10 угловых микросекунд для звезд ярче +10^m, лучше 25 угловых

микросекунд для звезд ярче $+15^m$, лучше 300 угловых микросекунд для звезд ярче $+20^m$). Исключительная точность измерения координат ярчайших звезд позволит, как ожидается, найти несколько тысяч планет-

гигантов с орбитальными периодами 1,5–9 лет в радиусе 200–500 пк. У значительной части открытых планет “Гайя” сможет определить орбитальные характеристики и точную массу. По расчетам, в радиусе 200 пк обсерватория может обнаружить более 4700 планет-гигантов, у примерно 2100 из них будут определены орбитальные характеристики с точностью лучше 20%.

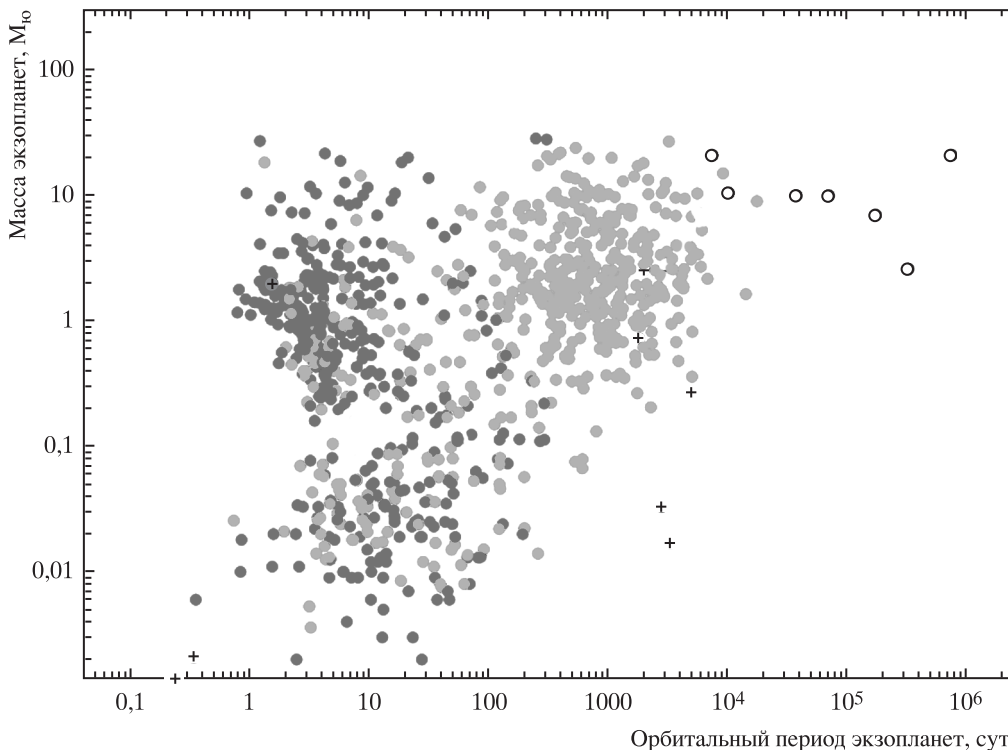
Планируется, что звездный каталог с результатами наблюдений будет опубликован в 2020 г. Совместный анализ данных, полученных обсерваторией “Гайя” и наземными RV-обзорами, позволит найти большин-

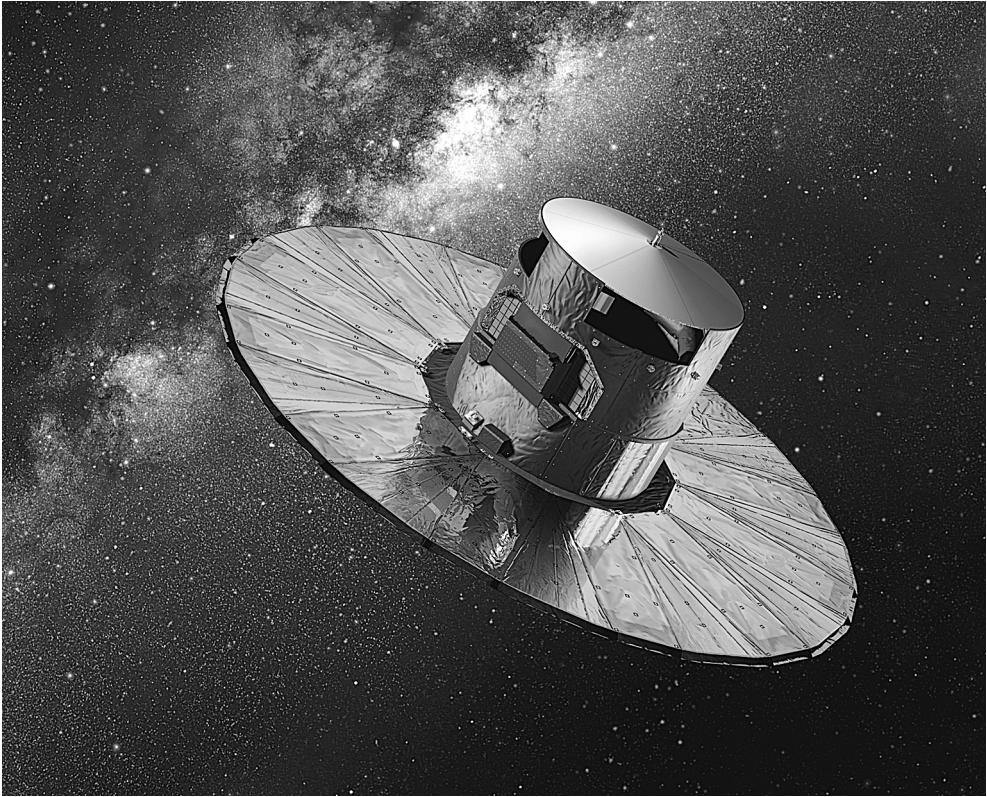
ство планет-гигантов с периодами короче девяти земных лет в радиусе менее 200 пк от Солнца.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Что изменится в ближайшее время при изучении небольших экзопланет – “нептунов”, суперземель и планет земного типа? Здесь ситуация значительно менее радужная. На ближайшие несколько лет намечена реализация сразу нескольких космических проектов, которые приведут к резкому увеличению количества известных экзопланет, но ни один из них не обеспечит открытие всех планет в

График известных внесолнечных планет, размещенных в зависимости от их орбитального периода и массы. Они открыты различными методами: транзитный (черные кружки), лучевых скоростей (серые кружки), гравитационного микролинзирования (крестики), на ИК-снимках (белые кружки). По данным архива экзопланет NASA на 4 мая 2015г. (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>).





окрестностях Солнечной системы.

Так, на 2017 г. в рамках Малых исследовательских программ NASA намечен запуск космической обсерватории “TESS” (The Transiting Exoplanet Survey Satellite – спутник для обзора транзитных экзопланет), предназначенной для поиска экзопланет у сравнительно ярких звезд. Космический аппарат будет оснащен четырьмя широкоугольными телескопами с объективами диаметром 12 см, шириной обзора каждой камеры $23^\circ \times 23^\circ$ и ПЗС-камерами. Поля зрения всех камер выстроены

в линию, формируя наблюдательную площадку общей площадью 2100 квадратных градусов. На каждой площадке телескоп будет снимать фотометрию звезд от $+4^m$ до $+12^m$ в течение 27 сут (два витка вокруг Земли), потом переходить к следующей площадке. За два года планируется исследовать всю небесную сферу. Авторы проекта обещают разыскать у ближайших звезд около 300 экзопланет земного типа и суперземель, около 700 мини-“нептунов”, более тысячи “нептунов” и 660 планет-гигантов. Недостатком проекта можно считать

Европейская космическая астрометрическая обсерватория “Гайя”. Рисунок ESA.

малое время мониторинга одной наблюдательной площадки (27 сут), позволяющее находить только планеты на тесных (короткопериодических) орбитах. Впрочем, часть наблюдательных площадок будет перекрываться, особенно вблизи полюсов эклиптики, и там станет возможным открывать планеты, находящиеся на более широких орбитах. Между тем только около 2% планет будут найдены в обитаемой зоне сво-

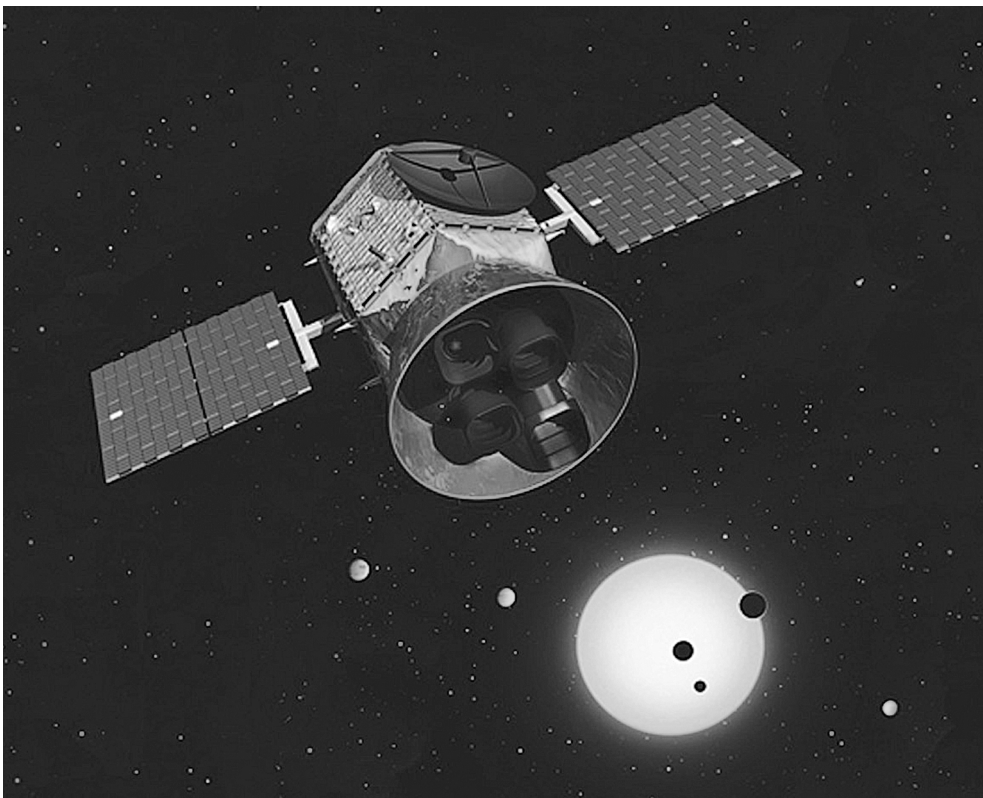
их звезд – тусклых красных карликов, остальные будут существенно горячее. Наблюдая Солнечную систему из глубин космоса, “TESS” не смогла бы обнаружить здесь ни одной планеты.

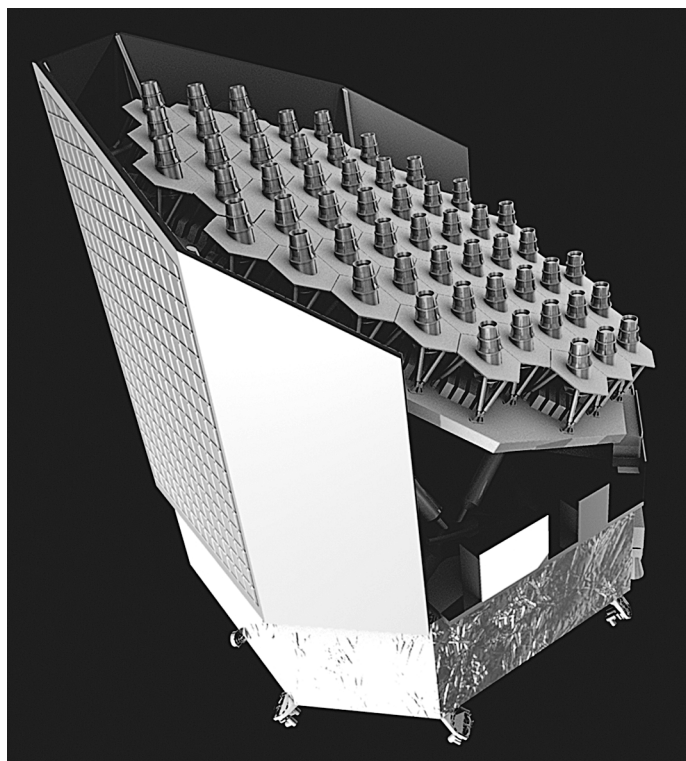
Несравненно к более амбициозным проектам относится “PLATO” (PLANetary Transits and Oscillations of stars – транзиты планет и колебания звезд; ESA), запуск космической обсерватории

по этому проекту предполагается в 2024 г. Как и “TESS”, “PLATO” собирается искать транзитные планеты у ярких звезд с блеском до +11^m. В отличие от “TESS” поиск не ограничится планетами, находящимися на короткопериодических, а значит, очень близких к звезде орбитах. В рамках этого проекта предусмотрен непрерывный фотометрический мониторинг двух основных наблюдательных полей в течение трех лет, также планируется охватить наблюдениями несколько дополнительных полей в течение 2–5 месяцев. Авторы проекта предлагают

установить на “PLATO” 32 основные и две дополнительные камеры. Предполагаемые параметры каждого телескопа: апертура – 12 см, поле зрения – 1100 квадратных градусов, чувствительность в диапазоне 500–1050 нм, его оснастят CCD-детектором с матрицей 4510 × 4510 пикселей. Поскольку поля зрения отдельных камер частично перекроются, общее поле зрения составит 2250 квадратных градусов. “PLATO” планируется направить в точку Лагранжа L2 системы Солнце – Земля (реальная орбита совершит либрации вокруг L2). Про-

Малая космическая обсерватория “TESS”, предназначенная для поиска экзопланет транзитным методом. Рисунок NASA.





Предполагаемый облик космической обсерватории "PLATO". Рисунок ESA.

должительность функционирования обсерватории, вероятно, превысит 8 лет. За все время работы планируется охватить наблюдениями примерно половину небесной сферы. Несомненно, что "PLATO" откроет тысячи планет у сравнительно ярких звезд, в том числе земного типа. У этого проекта тот же недостаток, что и у других обсерваторий, использующих транзитный метод. Из-за низкой геометрической вероятности транзитной конфигурации большинство планет даже у ближайших звезд (!) так и не будут обнаружены.

В 2018 г. ожидается запуск американской кос-

мической инфракрасной обсерватории им. Джеймса Вебба (James Webb Space Telescope, "JWST") с 6,5-м телескопом, призванной заменить знаменитый Космический телескоп им. Э. Хаббла и космическую инфракрасную обсерваторию "Спитцер". Ракета-носитель выведет "JWST" в точку Лагранжа L2 системы Солнце – Земля. Работа обсерватории рассчитана на пять лет, но ученые надеются не менее чем на десять лет. Чувствительность телескопа будет в диапазоне от 0,6 мкм (оранжевые лучи) до 28,5 мкм (средний ИК-диапазон). Обсерватория предна-

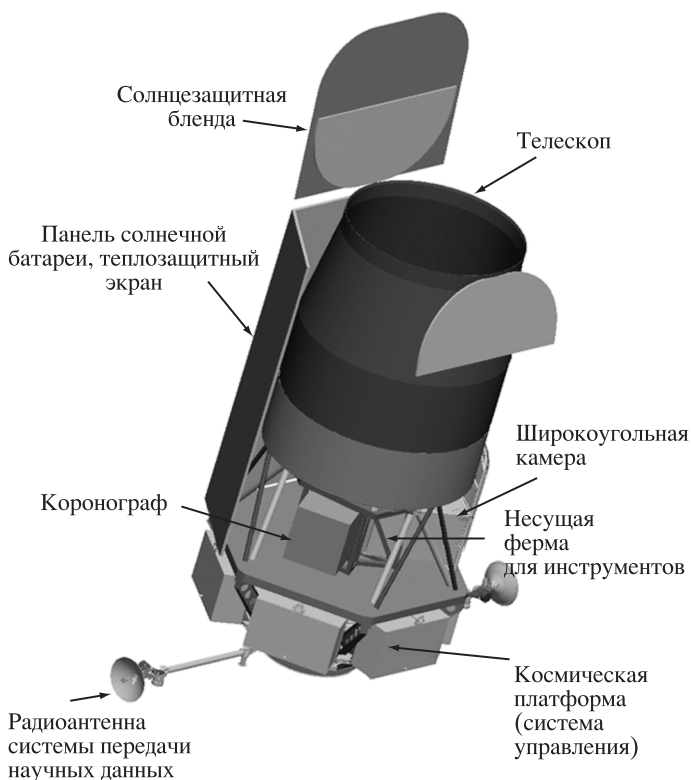
значена для решения обширного круга научных задач: рождение и эволюция галактик, распределение в пространстве темной материи, процессы образования планетных систем, поиск объектов пояса Койпера. Одной из основных научных целей "JWST" станет получение изображений и спектров внесолнечных планет. Камера ближнего инфракрасного диапазона NIRCam будет снабжена коронографом, блокирующим яркий свет родительских звезд, что позволит получать снимки планет-гигантов с эффективной температурой вплоть до 300 К, расположенных дальше 12 а.е. от своих звезд, в ближайших окрестностях Солнца. Кроме того, спектрограф ближнего инфракрасного диапазона NIRSpec определит трансмиссионные спектры транзитных экзопланет. Ожидается, что "JWST" сможет изучить химический состав и физические условия в атмосферах множества экзопланет – планет-гигантов и "нептунов", суперземель и планет земного типа.

Перспективная космическая обсерватория

Перспективная космическая обсерватория "WFIRST-AFTA". Рисунок NASA.

NASA "WFIRST-AFTA" (Wide-Field InfraRed Survey Telescope-Astrophysics Focused Telescope Assets – широкоугольный инфракрасный обзорный телескоп для астрофизических исследований) не предназначена специально для поиска экзопланет, но способна дать уникальные данные о них. На ней установят 2,4-м инфракрасный телескоп с полем зрения 0,281 квадратного градуса и угловым разрешением 0,11". Ее основная работа будет посвящена внегалактической астрономии и космологии – изучению галактик на высоких красных смещениях, далеких сверхновых, темной материи. Среди его целей – поиск внесолнечных планет методом гравитационного микролинзирования.

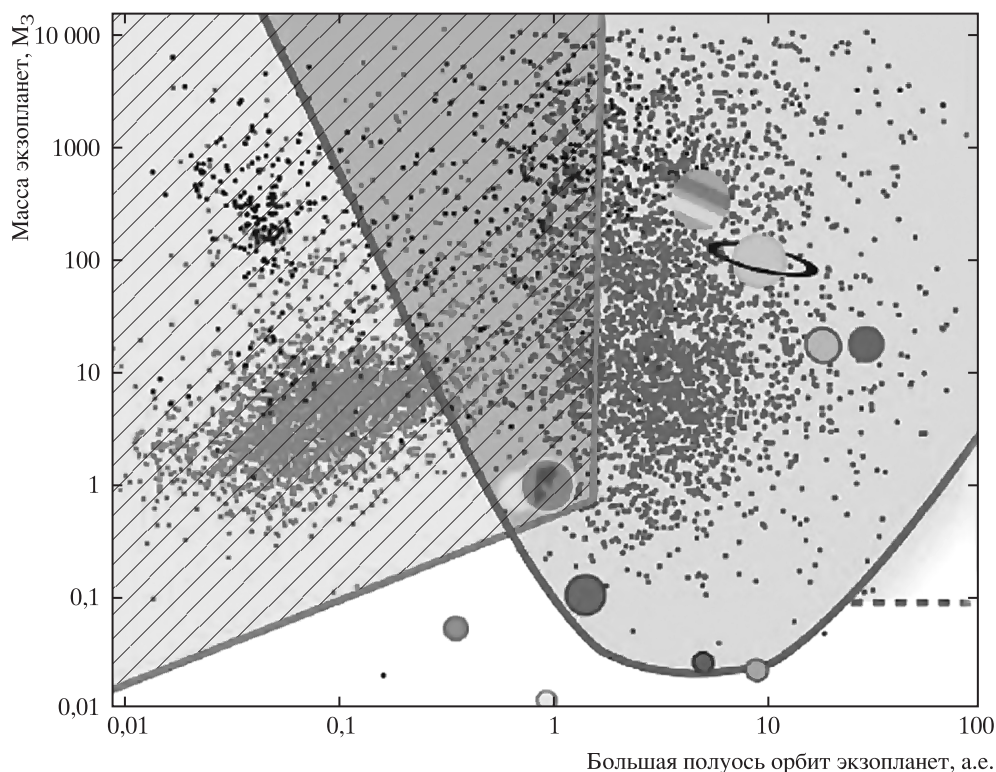
Ожидается, что за время своей работы "WFIRST-AFTA" откроет около 3 тыс. экзопланет массой 0,1–10⁴ M_З, находящихся во внешних зонах своих планетных систем, в том числе примерно тысячу суперземель массой 2–10 M_З, 300 планет массой порядка массы Земли и около 40 планет массой,



сравнимой с массой Марса. Предполагается, что он определит характеристики холодных планет массой более 0,3 M_З с точностью лучше 10%. Также ожидается, что "WFIRST-AFTA" обнаружит планеты-скитальцы, не связанные с какой-либо звездой. Помимо поиска планет с помощью микролинзирования телескоп сможет получать прямые изображения планет-гигантов и "нептунов" у самых ближайших звезд, используя коронаграф. Спектральная чувствительность коронаграфа – 0,4–1,0 мкм, инструмент обеспечит контраст 10⁻⁹ с внутренним рабочим углом 3λ/D

для излучения с длиной волны 0,4 мкм. Разрешение коронаграфа – 17 угловых миллисекунд. Предполагается, что "WFIRST-AFTA" стартует на околоземную геосинхронную орбиту с наклоном 28,5°. Работа обсерватории рассчитана на пять лет с возможностью продления еще на пять лет.

В случае успешного запуска "WFIRST-AFTA" ее исследования экзопланет дополнят данные транзитных обзоров и работы обсерватории "Гая". В результате удастся собрать богатейшую информацию о планетных системах Галактики, которые уточнят



Большая полуось орбит экзопланет, а.е.

сценарии формирования и эволюции планетных систем, обеспечат глубокое понимание процессов эволюции планет различной массы, химического состава и степени инсоляции, помогут уточнить климатические модели.

Какие перспективы у метода измерения лучевых скоростей? Сейчас лучшие из современных спектрографов (HARPS, HARPS-N, HIRES, PFS) имеют точность единичного измерения 0,8–1 м/с для относительно ярких звезд и идеальных условий наблюдения. Это позволяет находить горячие планеты с массой вплоть до 2–3 M_J на близких к звезде орбитах или “неп-

туну” на орбитах, удаленных от своей звезды на 1–2 а.е. Примером открытия, сделанного RV-методом на пределе возможного, можно считать открытие горячей планеты земного типа у звезды альфа Центавра В с минимальной массой $1,13 \pm 0,09 M_J$ и орбитальным периодом 3,23 земных суток. Полуамплитуда колебаний лучевой скорости звезды, вызванных этой планетой, составила всего 0,51 м/с! Такой слабый сигнал стало возможно “вытащить из-под шумов”, только набрав и проанализировав значительный массив данных. В общей сложности было получено 459 замеров лу-

График областей чувствительности телескопов, установленных на космических обсерваториях “Кеплер” (штриховка) и “WFIRST-AFTA” (серый фон). NASA.

чевой скорости звезды альфа Центавра В.

Ожидается, что в 2016 г. будет введен в строй спектрограф нового поколения ESPRESSO, который планируется установить на 8,2-м телескопе VLT. Заявленная точность измерения лучевых скоростей сравнительно ярких звезд с помощью этого спектрографа достигнет 0,1–0,2 м/с. Это позволит обнаруживать суперземли

массой 4–5 M_{\odot} на расстоянии около 1 а.е. от звезды, подобной Солнцу, а также планеты с массой порядка массы Земли в обитаемой зоне красных карликов. Заметим, что поиск потенциально обитаемых планет у красных карликов вести легче, чем у солнцеподобных звезд. Из-за меньшей массы родительской звезды ее отклик на гравитационное влияние планеты оказывается выше, а сама обитаемая зона располагается ближе к звезде. Так, если Земля вызывает колебания скорости Солнца с амплитудой всего 9 см/с и периодом один год, то в обитаемой зоне красного карлика массой 0,21 M_{\odot} и спектрального класса M5 орбитальный период нашей планеты оказался бы равным 21 сут, амплитуда колебаний достигла бы 65 см/с. Нет никаких сомнений, что первые потенциально обитаемые планеты будут открыты именно у красных карликов.

К еще более амбициозным приборам от-

носится высокоточный спектрограф CODEX (COsmic Dynamics and EXo-earth experiment – космическая динамика и эксперимент по поиску экзоземель). Его планируется установить на 39,4-м Европейском Экстремально Большом Телескопе (E-ELT), строительство которого должно завершиться в 2024–2025 гг. Ожидается, что точность CODEX в измерении лучевых скоростей звезд ярче 9^m достигнет 2 см/с! Это позволит уверенно обнаруживать экзопланеты, подобные Земле, у ближайших звезд – аналогов Солнца.

Итак, третье десятилетие XXI в. должно ознаменоваться настоящим прорывом в изучении внесолнечных планетных систем. Уже к началу 2020-х гг. обсерватория “Гайя” может найти большинство планет-гигантов с орбитальными периодами 1,5–9 лет в радиусе 200–500 пк от Солнца. К этому же времени “TESS” откроет все транзитные планеты с

радиусами более 2–3 R_{\oplus} и периодами короче 27 сут у ярких звезд до +1^m. Масса и средняя плотность новых планет будет определена методом лучевых скоростей спектрографами нового поколения HARPS-N (в Северном полушарии) и ESPRESSO (в Южном). Космический телескоп им. Джеймса Вебба приступит к измерению химического состава атмосфер транзитных планет и построению их температурных профилей. В середине 2030-х гг. начнет работу обсерватория “PLATO”, которая продолжит исследования “Кеплера” и, возможно, откроет экзопланеты земного типа у звезд, таких как Солнце. Массы транзитных кандидатов “PLATO” будут измерены спектрографом CODEX. Наконец, данные, полученные к концу 2030-х гг. “WFIRST-AFTA”, позволят собрать богатую статистику о внешней, холодной части планетных систем Галактики, недоступной для других методов.