

Атмосферы экзопланет

В.И. ШЕМАТОВИЧ,
доктор физико-математических наук
Институт астрономии РАН

На заре открытия внесолнечных планет (экзопланет) в середине 1990-х гг. мало кто верил, что изучение их атмосфер когда-либо будет возможно. После открытия в 2002 г. с помощью Космического телескопа им. Хаббла атмосферы у транзитной экзопланеты HD 209458b многие скептики оценили это событие лишь как одноразовый успех. В настоящее время основные направления исследований атмосфер экзопланет твердо установлены благодаря наблюдениям нескольких десятков



их атмосфер. Это позволило расширить наши представления об атмосферах экзопланет, оказавшихся различными по температуре, излучению, содержанию

химических элементов. Состав атмосферы может изменяться в зависимости от того, где и когда сформировались планеты, что позволяет проследить историю их образования; будущие наземные и космические телескопы, возможно, найдут атмосферные биомаркеры в потенциальных обитаемых зонах вокруг других звезд, то есть инструмент поиска внеземной жизни. Конечная цель изучения атмосфер экзопланет состоит в том, чтобы ответить на извечный вопрос – одиноки ли мы во Вселенной?

КАК ВОЗНИКЛИ АТМОСФЕРЫ
ЭКЗОПЛАНЕТ?

Одним из наиболее значимых достижений в фундаментальных космических исследованиях в последние десятилетия стало открытие внесолнечных планетных си-

стем (Земля и Вселенная, 1995, № 6, с. 61; 2000, № 1, с. 67). Их изучение в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах позволили получить первые оценки важнейших характеристик (состав и тепловое состояние) атмосфер объектов раз-

личной массы. Сейчас ученые пытаются решить проблемы образования, устойчивости и эволюционного статуса атмосфер планет в других звездных системах с помощью математического моделирования и реализации развернутых наблюда-

тельных компаний наземными и космическими телескопами. Необходимо ответить на основные вопросы современной астрофизики: как образуются и изменяются во времени планеты, каким образом возникли планетные системы и почему появилась жизнь на Земле? Изучая Солнечную систему, мы связываем “локальные” исследования с вопросом о существовании похожих на Землю внесолнечных планет и условий, ожидаемых на их поверхности (Земля и Вселенная, 2012, № 1, с. 32; 2012, № 2, с. 102; 2015, № 1, с. 75–76; 2015, № 6, с. 13).

Многолетние наблюдения говорят о том, что жизнь на Земле может сильно повлиять на состав и перемены, происходящие в атмосфере нашей планеты. Между тем в окрестностях далеких звезд обнаружено 1931 подтвержденных экзопланет, принадлежащих к 1222 планетным системам, и это число продолжает расти (Земля и Вселенная, 2005, № 4–6; 2009, № 1; 2010, № 4; 2011, № 3; 2012, № 6; 2014, № 5). Кандидатов на звание экзопланет куда больше: космическая обсерватория “Кеплер” насчитала свыше 4 тыс. потенциально возможных планет. Идет разработка методов детального изучения атмосфер этих тел. Конечная цель – найти в

атмосфере биомаркеры, указывающие на существование инопланетной жизни. К наиболее перспективным направлениям изучения атмосфер относятся: транзиты суперземель (класс экзопланет, масса которых превышает массу Земли, но значительно меньше массы газовых гигантов), вращающихся в обитаемой зоне звезд класса красных карликов; прямая визуализация наиболее близких аналогов Земли с помощью космических инструментов.

Звездные системы рождаются из скоплений газа и пыли, разбросанных в космическом пространстве. Такие скопления вещества формируют огромные диски с активной молодой звездой (или звездами) в их центре (Земля и Вселенная, 1988, № 5; 2001, № 1, с. 47). Протопланеты возникают от пыли до планетезималей и планетных зародышей в течение от нескольких миллионов до десятков миллионов лет. Растут протопланеты за счет массивных газовых водородно-гелиевых оболочек первичной туманности. Захват и удержание части местного газа туманности зависят от ее состояния и эволюции звездного излучения, а также плазмы звездного ветра у родительской звезды. Этот процесс создает первичную атмосферу планеты до тех пор, пока не

происходит истощения локальных ресурсов вещества в диске за счет воздействия звездного ветра и излучения. Во внутренних зонах ранней звездной системы испарение пыли и газа из диска может происходить на протяжении 3 млн лет, в то время как на его “краях” удаление вещества, скорее всего, займет больше времени. У планетных зародышей есть больше времени, чтобы собрать вещество, и, следовательно, они могут стать более массивными. Захват газа туманности может достичь стадии, когда скорость аккреции газа превышает скорость падения твердого вещества, так что планета развивается очень быстро в газовый гигант, подобный Юпитеру.

Недавно открыты маломассивные планеты, массы и радиусы которых определили по данным космических обсерваторий “Corot” и “Кеплер” (Земля и Вселенная, 2007, № 5, с. 61; 2011, № 6). Известно, что существует переход между малыми экзопланетами земного типа и подобными Нептуну. Многие каменные планеты, возможно, сохранили свои захваченные водородные оболочки на протяжении всего времени их формирования. Установлено, что у большинства суперземель с радиусами около $1,6 R_3$ слишком



Схематическое представление формирования звезды и ее планетной системы. На нижних вставках показаны различные стадии этого процесса: начиная от гравитационного возмущения плотного молекулярного облака и завершая образованием планетной системы на примере Солнечной системы.

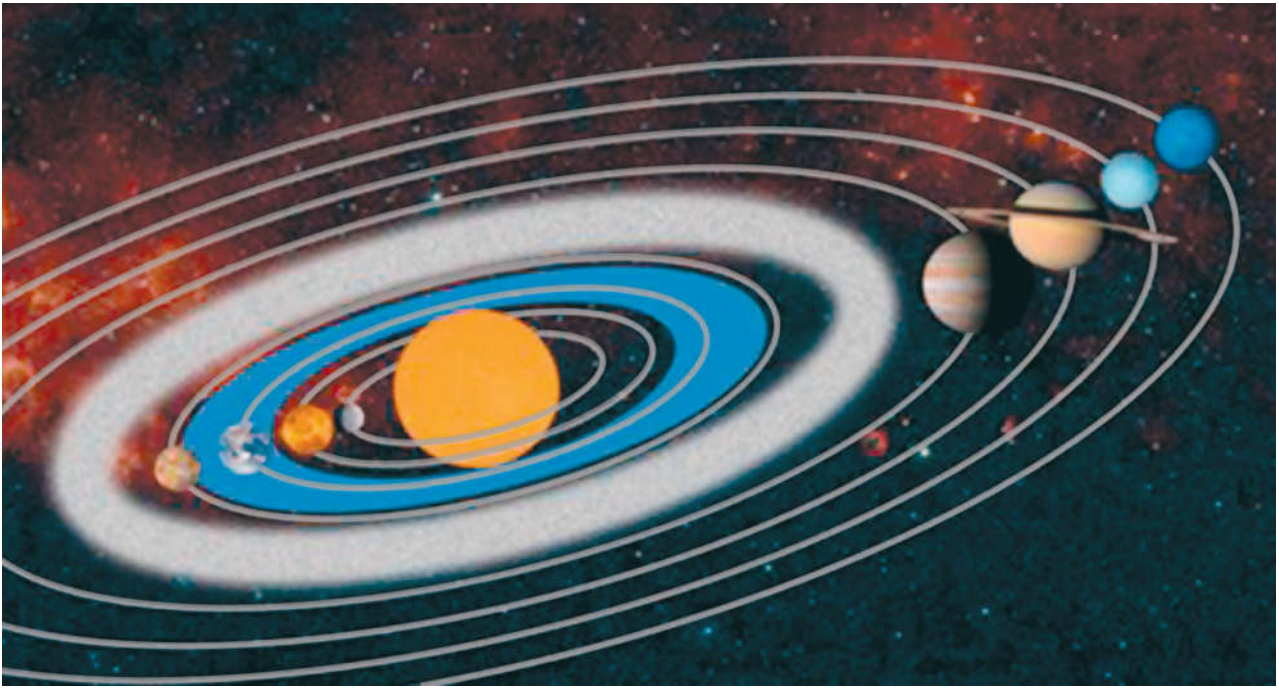


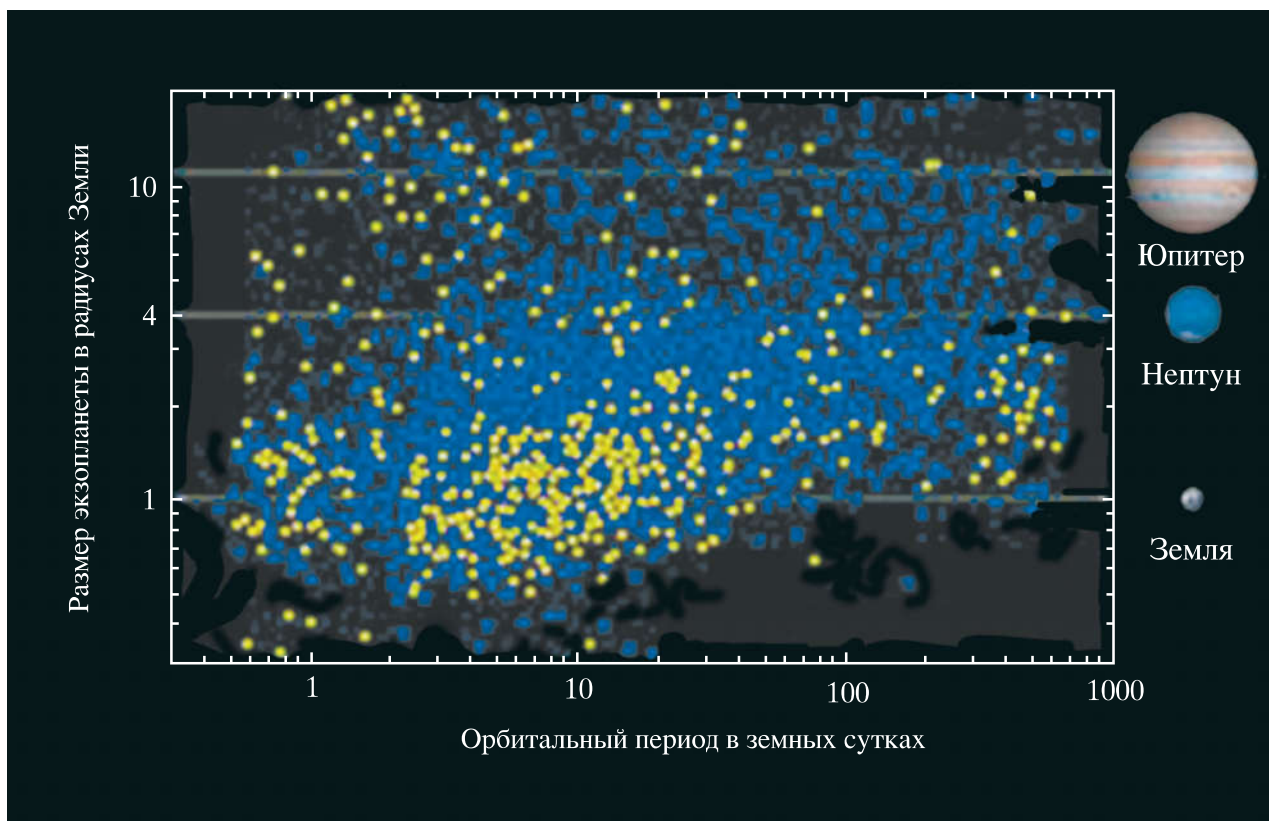
Схема строения Солнечной системы. Включает внешние газовые гиганты – Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и внутренние каменные планеты – Меркурий, Венеру, Землю, Марс. Пояс астероидов показан серым цветом, зона обитаемости – голубым.

низкая плотность, чтобы состоять только из железа и силикатов. Также обнаружено, что планеты с массами ядра менее $1 M_3$, которые подвергаются воздействию звездного мягкого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения от средней молодой звезды солнечного типа, иногда теряют свои первичные газовые водородные оболочки, захваченные их протопланетной туманностью во время активной фазы насыщения этим излуче-

нием. Однако скалистые ядра в пределах множества суперземель с массами ядра более $1 M_3$, скорее всего, не избавятся от первичной водородной атмосферы.

Планеты, у которых были слишком низкие массы во время роста (когда газ туманности еще не испарился), но они закончили аккрецию на несколько десятков миллионов лет позже, – производят паровые атмосферы за счет катастрофической дегазации при затвердевании магматических океанов. Тот же сценарий ожидает скалистые планеты, теряющие свои захваченные из туманности водородные оболочки. Энергия, достаточная для плавления мантии планеты и создания океана жидкой магмы, формируется за счет

столкновений с крупными планетезиμαлиями или планетарными зародышами или распада короткоживущих радиоактивных изотопов. Со временем тепло планеты постоянно излучается в космос, позволяя магме остыть и, в конечном итоге, затвердеть. Жидкая магма содержит большое количество летучих веществ, накопленных в процессе аккреции. Поскольку H_2O и CO_2 не могут быть захвачены в больших количествах твердой фазой, то эти летучие испаряются при затвердевании вместе с небольшим процентом других летучих, таких как углеродные соединения CO_2 и, по-видимому, CH_4 , N_2 и NH_3 . Все они входят в состав атмосфер и тем самым вносят изменения в уже существующие.



ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТЫ

Отправной точкой в поиске других планетных систем считается хорошо известная структура Солнечной системы. Ближе к Солнцу располагаются четыре каменные планеты – Меркурий, Венера, Земля с Луной и Марс. Все они высокой средней плотности – $3,5\text{--}5,5\text{ г/см}^3$, и, за исключением Меркурия и Луны, обладают атмосферами. Они удалены от Солнца на расстояние $0,4\text{--}1,5\text{ а.е.}$, в то время как планеты-гиганты газовой природы находятся гораздо дальше – до $5\text{--}30\text{ а.е.}$ Эту группу возглавляет Юпитер массой $318 M_{\oplus}$ и $1/1047 M_{\odot}$. Все гиганты обладают кольцами разной плот-

ности и огромным числом лун: у Сатурна их 62. Между орбитами Марса и Юпитера размещается Главный пояс астероидов – многие тысячи тел небольших размеров – от сотен метров до нескольких километров, но преимущественно около сотни километров. Орбиты транснептуновых объектов в поясе Койпера начинаются с 39 а.е. до 50 а.е. и дальше; их характерным примером служит двойная система Плутон – Харон (Земля и Вселенная, 1979, № 2; 2006, № 2; 2007, № 2; 2008, № 6). Многочисленная “группа населения” Солнечной системы – кометы с типичными размерами небольших астероидов – находятся на очень вытянутых орбитах

Диаграмма распределения 4696 кандидатов в экзопланеты, обнаруженных космической обсерваторией “Кеплер” к июлю 2015 г. Синими кружками отмечены экзопланеты, открытые к январю 2015 г.; желтыми – за полгода 2015 г. По данным В. Станцел, NASA.

с перигелием часто даже ниже орбиты Меркурия и с афелием в десятки тысяч астрономических единиц (у долгопериодических комет). Там, вдалеке, подобные тела образуют Облако Оорта, откуда под действием гравитационных полей разного происхождения они иногда (или периодически) отправляются к Солнцу. Если орбиты планет располагаются

примерно в одной плоскости, близкой к плоскости эклиптики, то кометы могут прилетать откуда угодно.

Планеты (в отличие от звезд) не излучают собственный свет, а их отраженный свет настолько слаб, что увидеть его можно лишь в исключительных случаях. Поэтому для поиска экзопланет преимущественно используются два косвенных метода — доплеровский и транзитный (Земля и Вселенная, 2015, № 5). Первый основан на обнаружении смещения звезды вокруг общего с планетой центра массы, а второй фактически сводится к поиску тени планеты.

Доплеровский метод полагается на высокоточные спектрометры, которые фиксируют колебание звезды вдоль оси, направленной на наблюдателя. Если звезда удаляется, то ее свет смещается в красную область, если приближается — то в синюю. На оптический спектр практически не оказывает влияния атмосфера, поэтому “ловить планеты” доплеровским методом можно с Земли с помощью обычных телескопов. Однако значительные колебания могут быть вызваны только очень массивными объектами, расположенными вблизи звезды, поэтому большинство открытых таким способом экзопланет неминуемо оказыва-

ются гигантами. Если же нам интересны скорее небольшие, более схожие с Землей планеты — тогда этот метод поиска нам не подойдет. Транзитный метод основан на анализе интенсивности света (блеска) звезды, а не спектра. Это значит, что телескоп, охотящийся за экзопланетами транзитным методом, необходимо вывести не только за пределы атмосферы, но и за окрестности Земли, которая, в противном случае, будет мешать прибору своим постоянно меняющимся отраженным светом.

Настоящий прорыв в поисках экзопланет достигнут после запуска на гелиоцентрическую орбиту космической обсерватории “Кеплер” (Земля и Вселенная, 2009, № 4, с. 44–45). Большая удаленность от Земли обусловила исключительную чувствительность прибора. С 2009 г. “Кеплер” искал следы планет, измеряя уровень яркости свечения звезд на относительно небольшом участке неба, расположенном между созвездиями Лебедя и Лиры, одновременно наблюдая за 150 тыс. звезд. При прохождении планеты на фоне звезды яркость и уровень получаемого сигнала падают. По величине падения яркости судят о размерах планеты, вычисляется температура на ее поверхности и состав атмосферы по изме-

нениям спектра свечения и другим характеристикам света. По периодичности фиксируемых явлений делаются выводы об орбитальном периоде. “Кеплер” использует метод транзитов: следя за малейшими “провалами” в яркости звезд, выбранных на небольшом участке неба, астрономы выявляют кандидатов в экзопланеты, затем методом спектроскопии подтверждают их статус. Среди всего многообразия планет наибольший интерес представляют два их параметра: сходство с Землей и близость к зоне обитаемости — области пространства вокруг звезды, внутри которой на планете может существовать жидкая вода.

Внесолнечные планеты занимают широкий диапазон значений по массе и эффективной температуре. Выделим следующие группы:

– горячие (экстремально горячие) юпитеры с планетными радиусами $6\text{--}15 R_3$ и эффективными температурами $1300\text{--}3000\text{ K}$ на близких к звезде орбитах:

– газовые гиганты с эффективными температурами $500\text{--}1500\text{ K}$, удаленные от звезды на несколько а.е.;

– горячие нептуны и мини-нептуны с радиусами $2\text{--}6 R_3$ и эффективными температурами $700\text{--}1200\text{ K}$;

Система Kepler-62



– суперземли с радиусами в диапазоне 1–2 R_3 и эффективными температурами около 500 К.

Хотя у некоторых из перечисленных объектов нет прямых аналогов в нашей планетной системе, однако обилие первичных элементов (Н, С и О) в их атмосферах сравнимо с данными для планет Солнечной системы. Одной из наиболее интересных групп представляются суперземли (Земля и Вселенная, 2015, № 6, с. 13). Так, например, совсем недавно во внесолнечной планетной системе Kepler-62 (созвездие Лиры, расстояние – 1200 световых лет) были открыты сразу

пять планет, из них около родительской звезды вращаются суперземли Kepler-62e и Kepler-62f, расположенные в потенциальной зоне обитаемости и наиболее близкие к Земле по своим параметрам.

Звезда Kepler-62 классифицируется как карлик K2. Она значительно старше Солнца (около 7 млрд лет) и на 1/5 по яркости и почти на треть по размеру меньше его. Планеты Kepler-62e и Kepler-62f обладают массой, равной примерно 1,6 и 1,4 M_3 , периодом обращения 122,4 и 267,3 земных суток. Kepler-62e получает на 20% больше тепла и радиации,

Сравнительные размеры обитаемых зон системы у звезды с землеподобными экзопланетами Kepler-62e, Kepler-62f (вверху) и Солнечной системы (внизу).

чем Земля от Солнца, на Kepler-62f в принципе климатические условия должны соответствовать необходимым для существования жизни.

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И СТАТИСТИКА

Прямое получение изображений, а, тем более, спектров внесолнечных планет – очень трудная задача, доступ-

ная только крупнейшим современным телескопам, и то только для горячих молодых планет, удаленных на десятки астрономических единиц от своей звезды. Однако существует сильный не прямой метод, позволяющий получать грубые спектры транзитных экзопланет. Если это транзитная планета (регулярно проходит по диску звезды), то становится

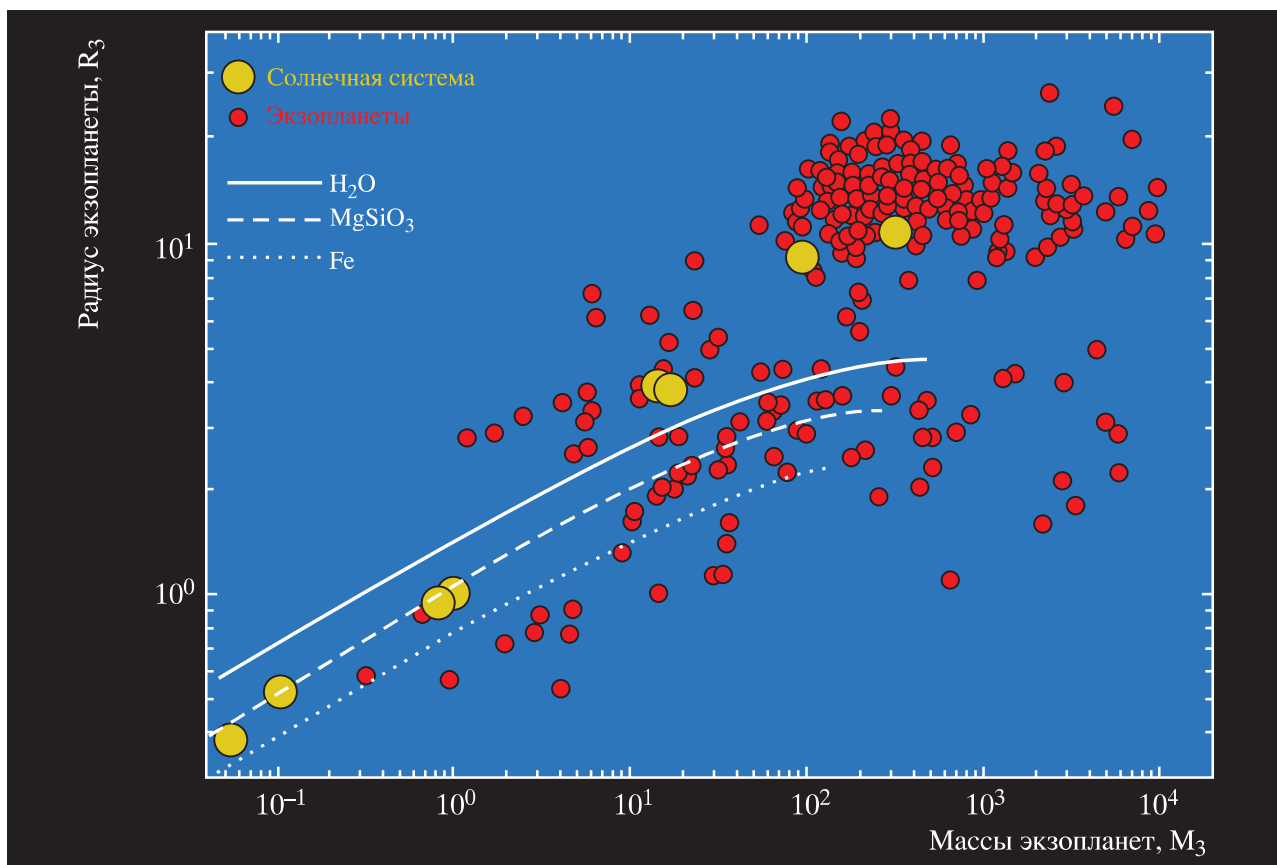
возможным измерить зависимость глубины транзита (а также вторичного минимума) – от длины волны, то есть провести трансмиссионную (эмиссионную) спектроскопию планеты. Подобные наблюдения уже были проведены для ряда горячих юпитеров, что позволило обнаружить в их составе натрий, водяной пар, метан и другие летучие вещества, измерить температуру дневного полушария.

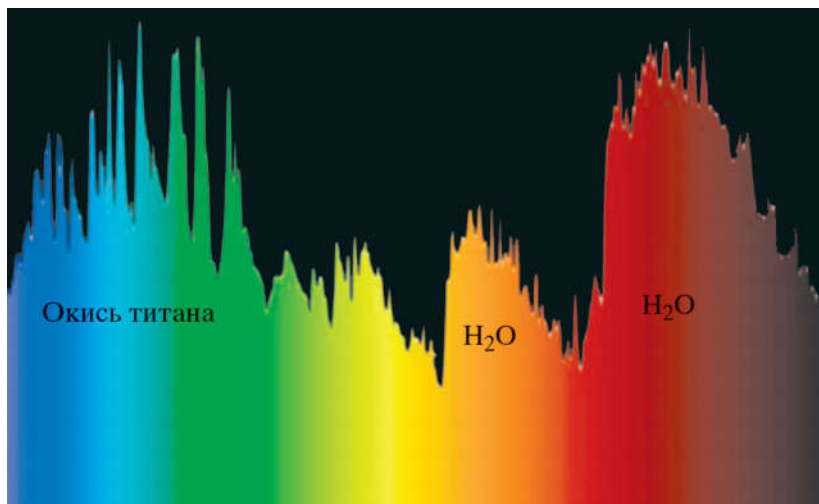
Трансмиссионная спектроскопия (анализ зависимости глубины транзитов от длины волны) – мощный метод изучения транзитных экзопланет. С его помощью астрономы уже идентифицировали множество различных атомов

и молекул в атмосферах транзитных планет-гигантов. Однако если атмосфера экзопланеты затянута облаками или дымкой, то этот метод не действует: облака закрывают собой более плотные слои атмосферы, и спектр планеты становится лишенным каких-либо деталей. Обнаружение экзопланеты с чистой, безоблачной атмосферой считается большой удачей, поскольку отсутствие облаков позволяет определить ее химический состав.

Метод измерения радиальной скорости звезды позволяет оценить минимальную массу планеты $M_p \sin i$, наблюдение транзитов – радиус планеты, так как глубина

Диаграмма зависимости массы от радиуса для каменных и газовых экзопланет. Желтыми кружками обозначены планеты Солнечной системы, красными – экзопланеты. По данным Л. Зенг и Э. Сассел, 2013 г.





Спектр пропускания горячего юпитера HD 189733b массой $1,13 \pm 0,03 M_{\text{Ю}}$, находящегося в созвездии Лисички на расстоянии 63 св. лет от нас.

АТМОСФЕРЫ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ

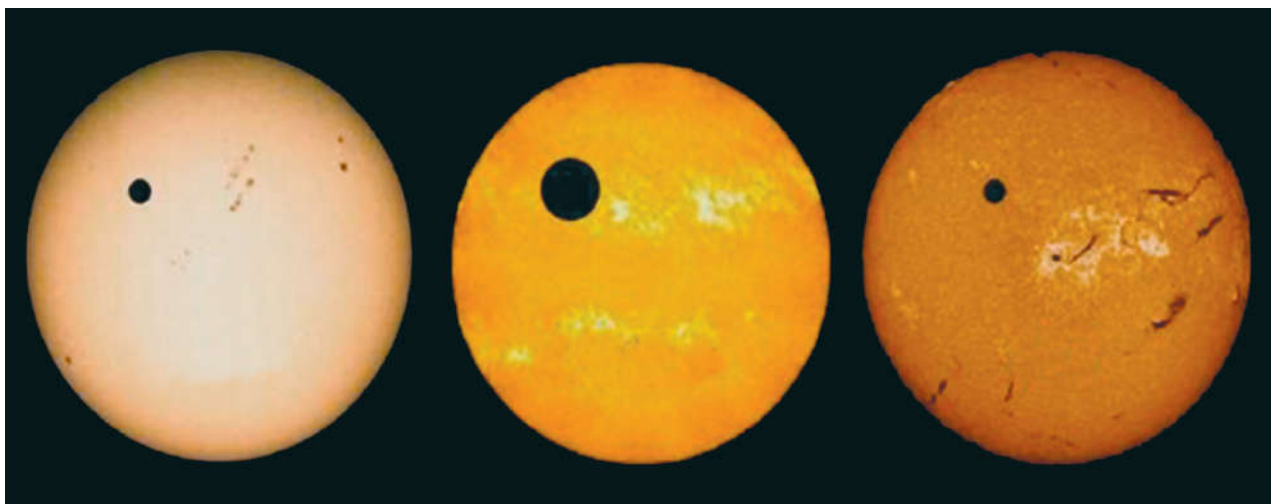
затмения звезды в видимом свете пропорциональна соотношению $(R_p/R^*)^2$, где R^* – радиус звезды. Этих данных достаточно для получения средней массовой плотности. Если построить по всей доступной статистике для экзопланет с известными параметрами диаграмму масса – радиус планеты относительно параметров Земли, то можно увидеть, что выше сплошной кривой располагается область газовых планет, ниже – область каменных планет. Для этих экзопланет по формуле $T_{\text{eq}} = T^* (R^*/2p)^{1/2}$ определяется равновесная температура планеты, где T^* – температура звезды, p – перицентр орбиты планеты. Из диаграммы масса – равновесная температура планеты следует возможный тип атмосферы: водородно-гелиевая и/или паровая $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$.

К настоящему времени спектры поглощения и

свечения получены лишь для нескольких экзопланет, преимущественно из группы горячих юпитеров и непутов. Например, для горячих юпитеров HD 209458b и HD 189733b идентифицированы атомы H, He, C, O, Mg, Si, Na, K и молекулы H_2 , H_2O , CH_4 , CO, CO_2 , а также замечены облака и дымки из силикатов и окислов металлов.

Рассмотрим, как менялись наши представления об атмосферах экзопланет на примерах следующих объектов: горячие юпитеры HD 209458b, HD 189733b и WASP-12b; теплый нептун Gliese 436b (GJ 436b); и суперземля GJ 1214b. Выбранные экзопланеты активно наблюдаются с помощью наземных и космических телескопов, разработаны теоретические атмосферные модели для характерных объектов из перечисленных выше групп.

Наиболее интенсивно исследуются экзопланеты, относящиеся к классу горячих юпитеров (Земля и Вселенная, 2002, № 5, с. 110). Дело в том, что эти массивные газовые гиганты массой порядка $M_{\text{Ю}}$ расположены в непосредственной близости от звезды на низких орбитах, не превышающих 0,1 а.е., что обеспечивает возможность получения наиболее качественных данных. Наблюдение горячих юпитеров с использованием КТХ свидетельствует о наличии сложных физических процессов в газовых оболочках (атмосферах) этих планет. Недавние исследования показали, что поглощение в линии Ly_α во время транзита для экзопланеты HD 209458b достигает 9–15%. Между тем, диск планеты вызывает уменьшение блеска звезды всего на 1,8%. Это означает, что планета окружена протяженной оболочкой нейтрального водорода, выходящей за пределы полости Роша. Позднее это явление было подтверждено фик-



Транзит экзопланеты HD 209458b по диску родительской звезды в видимом свете и водородных линиях L_{α} и H_{α} . Наблюдения проводились в 2003–2004 гг.

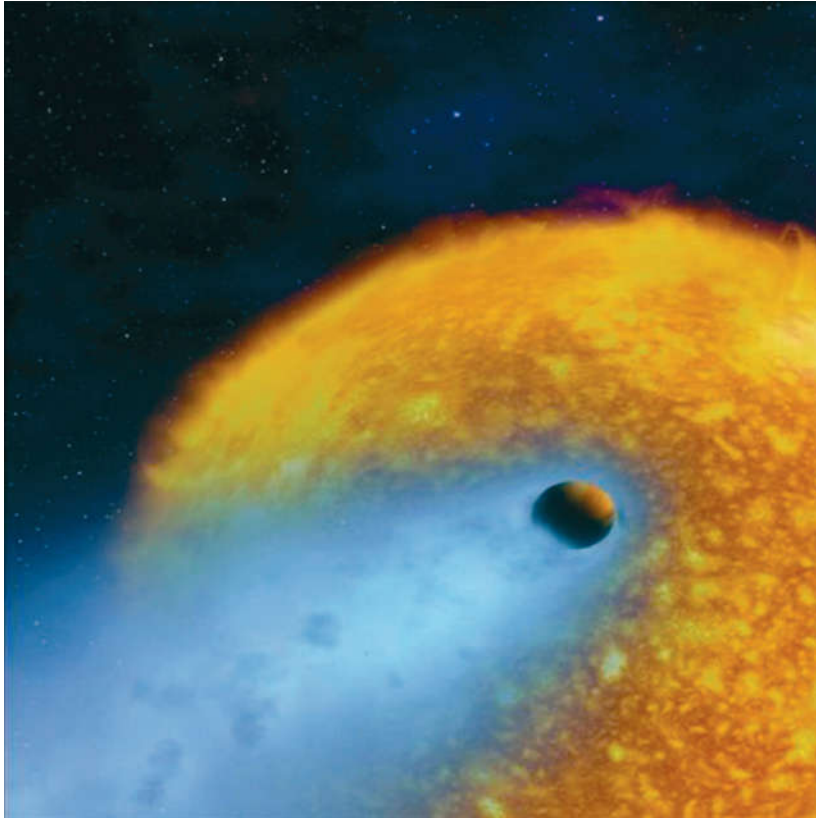
сацией транзита глубиной 8–9% в линиях углерода, кислорода и кремния. Для объяснения существования такой оболочки было выдвинуто две основных гипотезы: расширение атмосферы за счет ее нагрева излучением звезды, что порождает отток вещества со скоростью 10^7 т/с; механизм перезарядки ионов звездного ветра на атомах короны планеты. Возникающие при этом атомы обладают достаточно высокой энергией, чтобы покинуть гравитационное поле планеты, а, значит, могут образовать вокруг нее протяженную оболочку.

Получены детальные данные в УФ-диапазоне лишь только для трех

горячих юпитеров HD 209458b, HD 189733b и WASP-12b. Эти гиганты находятся на расстояниях 60–900 св. лет от Солнца, температуры на их поверхностях изменяются от 500 до 2 тыс. кельвинов. На этих трех планетах зафиксирован гидродинамический отток протяженных, испаряющихся верхних атмосфер. В результате атмосфера начинает динамически расширяться, распространяя верхние слои атмосферы планеты за пределы полости Роша или защищающей от звездного ветра магнитосферы, что приводит к последовательной потере ее массы. Тяжелые атомы (например, C, O, Mg, и Fe) обнаружены в экзосферах этих планет, доказывая, что тяжелые элементы, присутствующие в нижних слоях атмосферы, могут быть захвачены при испарении в экзосферу. Факт атмосферного испарения – главный итог последних

исследований, и модели предсказывают, что многие из планет на низких орбитах должны быть затронуты таким процессом.

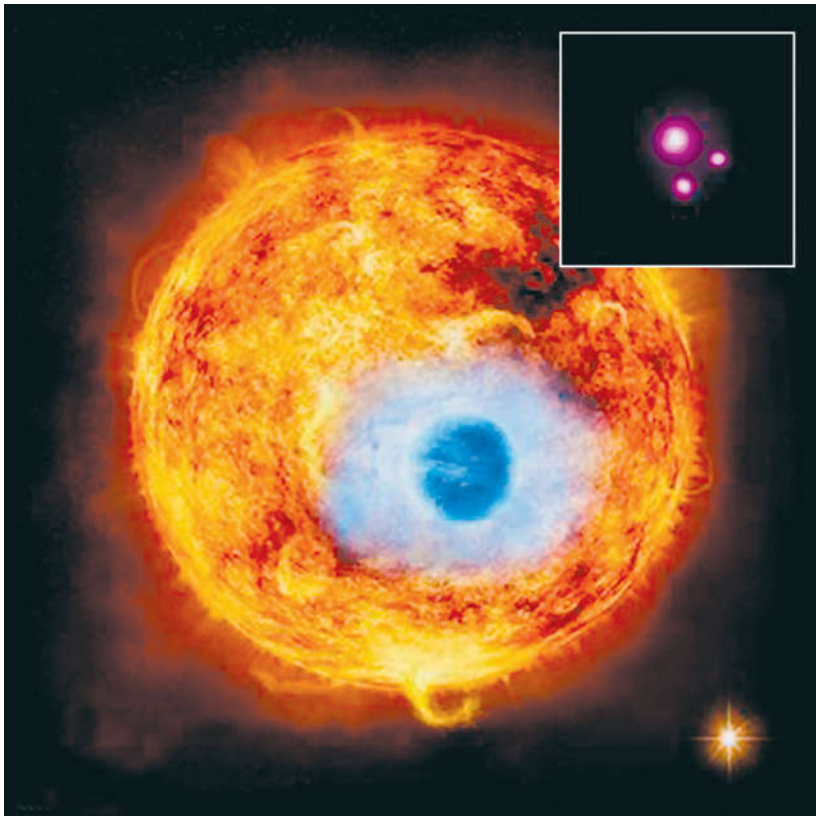
HD 209458b ($p = 0,045$ а.е., $T_{\text{eff}} = 1300$ K) постоянно находится в центре внимания планетологов (Земля и Вселенная, 2007, № 4, с. 65), так как с ней связаны открытия: затмение (транзит) родительской звезды, испаряющейся водородной атмосферы и тяжелых атомов (C, O, Mg, Si, Fe). В спектрах ее нижней атмосферы КТХ и космическая обсерватория “Спитцер” обнаружили основные химические элементы для развития биосферы – молекулы двуокси углерода, метана и водяного пара. Конечно, горячий юпитер на низкой орбите с периодом 3,5 сут не может быть обитаемым, но если будет найдена атмосфера с тем же химическим составом вокруг скалистой планеты, то



*Испарение атмосферы экзопланеты HD 209458b (со-
звездие Пегаса, 153 св. лет
от Солнца) в представле-
нии художника. Планета
расположена от родите-
льской звезды на расстоянии
0,047 а.е. (около 7 млн км).*

это будет указанием на возможное присутствие жизни. Измерения показали, что, например, на HD 209458b содержится только до 0,0024% воды от предсказываемого стандартной теорией формирования планет. Одним из ее следствий является то, что относительные доли некоторых элементов, в частности, кислорода, на планете должны быть значительно выше, чем у звезды. Это самые точные измерения содержания химических соединений за пределами Солнечной системы, поэтому их результаты заставят специалистов пересмотреть свои взгляды на вопросы образования и эволюции экзопланет, похожих на Юпитер.

С момента своего открытия в 2005 г., экзопланета HD 189733b ($p = 0,031$ а.е., $T_{\text{eff}} = 1300$ K) является одной

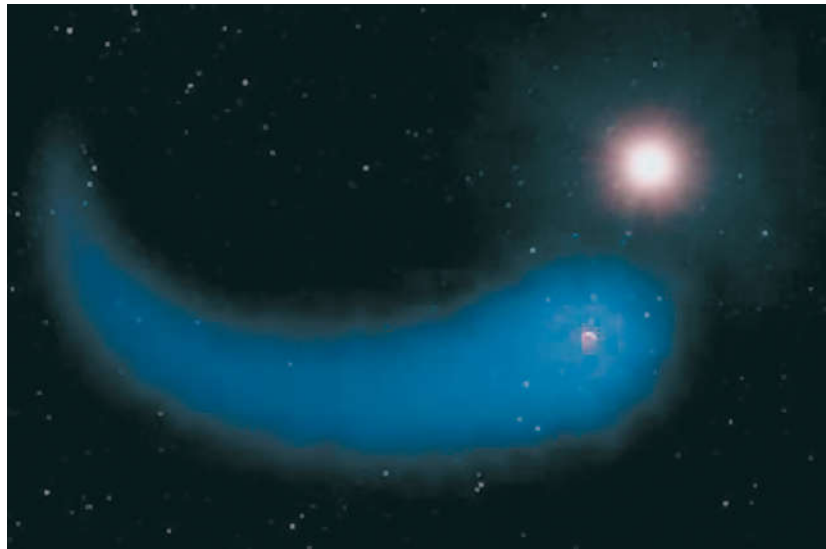


*Транзит экзопланеты
HD 189733b по диску роди-
тельской звезды. В правом
верхнем углу – изображе-
ние транзита в рентгенов-
ских лучах. По данным кос-
мической рентгеновской
обсерватории "Swift".*

Кометообразная оболочка планеты Gliese 436b (со-звездие Льва, 33 св. лет от Солнца). Вверху – родительская звезда (в представлении художника).

из наиболее изученных внесолнечных планет из-за своего размера, компактной (очень низкой) орбиты, близости к Земле и атмосферы с заманчивым голубым цветом. Недавние наблюдения с помощью КТХ и космической обсерватории “Swift” показали драматические изменения в верхних слоях ее атмосферы, вызванные внезапной и мощной вспышкой на родительской звезде, которая подвергла планету интенсивному потоку рентгеновского излучения. Удалось увидеть поразительный момент изменения климата и погоды на экзопланете.

Так почему так сильно меняется состояние атмосферы? Несмотря на экстремальные температуры, атмосфера не достаточно горячая, чтобы испаряться со скоростью порядка 10^7 т/с, выявленной в 2011 г. Полагают, что такой мощный выброс атмосферного вещества вызван вспышкой рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения родительской звезды – в 20 раз более мощной, чем у нашего Солнца. Учитывая также, что экзопланета

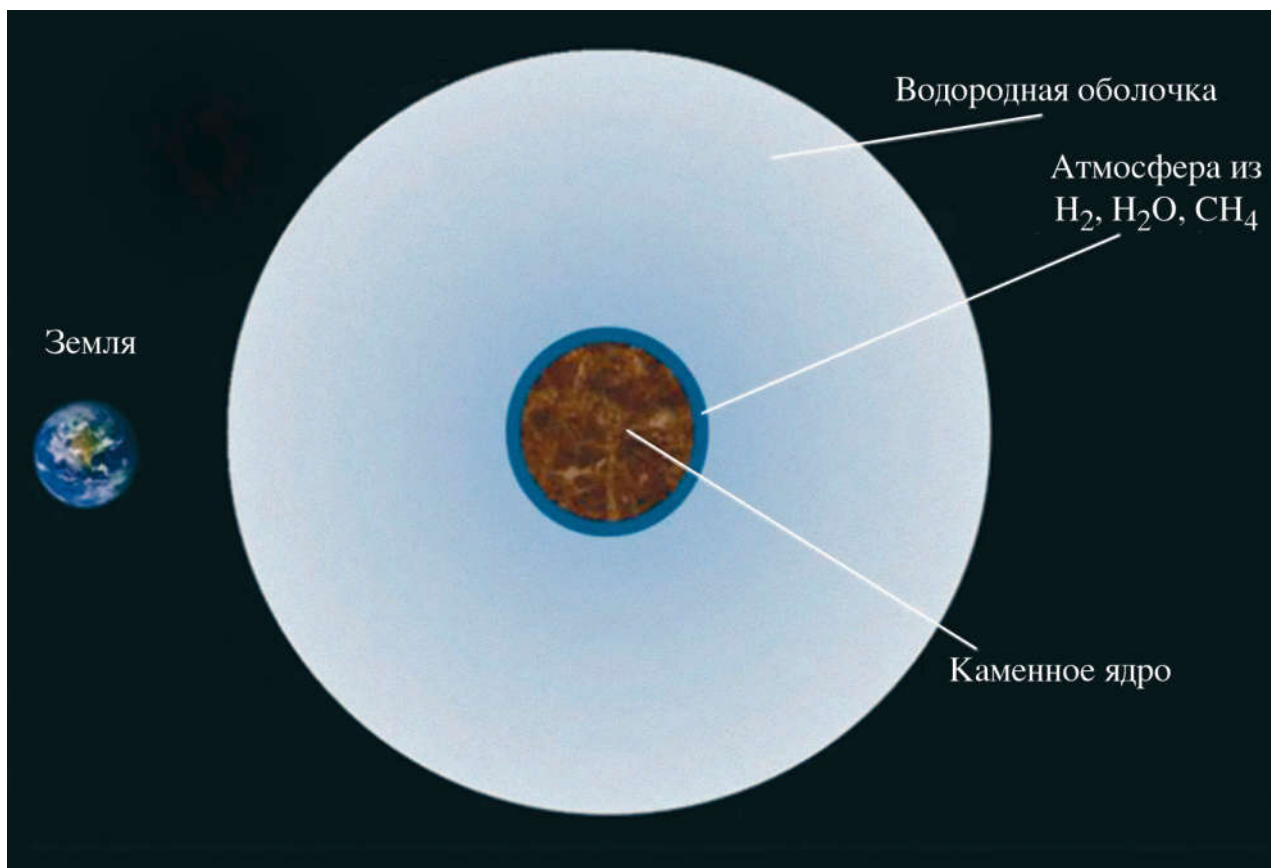


HD 189733b находится очень близко к своей звезде, то ее атмосфера была подвержена дозе рентгеновского излучения в 3 млн раз более высокой, чем во время солнечных вспышек X-класса для Земли. Хотя рентгеновское излучение составляет лишь небольшую часть от общего излучения звезды, но именно поглощение рентгеновских фотонов с высокими энергиями определяет скорость потери атмосферы планетой.

Хотя родительская звезда HD 189733 немного меньше и холоднее, чем Солнце, но из-за низкой орбиты атмосфера слишком нагрета и подвержена воздействию крайнего ультрафиолетового и рентгеновского излучения звезды. Это приводит к ее существенному расширению, что позволило астрономам заглянуть в глубокие слои атмосферы HD 189733b. Установлено,

что в ней содержатся пары воды и метан; составлена карта распределения температуры по всей планете. Дополнительные исследования показали, что тонкий слой частиц присутствует в верхней атмосфере HD 189733b, создавая отражающие облака. Из-за силикатных частиц атмосфера имеет яркосиний оттенок. Недавно с помощью спектрографа HARPS Обсерватории Ла-Силья в Чили удалось измерить скорость ветра (до 2 км/с) на дневной и ночной сторонах HD 189733b, составлена карта распределения ветров в ее атмосфере.

Данные о протяженных атмосферах у планет-гигантов на близких к родительской звезде орбитах и их интерпретации привели к полному осознанию того, что атмосферное испарение относится к ключевым факторам, определяющим их эволюцию.



АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ-ОКЕАНОВ – ГОРЯЧИХ НЕПТУНОВ

Экзопланета Gliese 436b вращается вокруг красного карлика. Она расположена на расстоянии 33 св. года от нас в созвездии Льва и близка к Нептуну: масса – $22,2 M_{\oplus}$, радиус – $4,327 R_{\oplus}$. В ходе ее изучения с помощью КТХ был открыт колоссальный водородный шлейф, возникший из-за излучения родительской звезды, так как планета в основном состоит из воды, находящейся в твердом состоянии при температуре около 300°C и под большим давлением. Атмосферу планета теряет под действием рентгеновского

излучения родительской звезды, а обнаружить этот эффект удалось благодаря изменению яркости светила во время прохождения Gliese 436b по его диску. Современная скорость потери атмосферы достигает тысячи тонн в секунду, однако в прошлом, вероятно, она была выше. Всего, по расчетам ученых, за миллиард лет планета потеряла 0,1% своей массы. Подобный процесс обнаружен впервые. Несмотря на очень впечатляющие размеры кометообразной оболочки, скорость испарения атмосферы сейчас не угрожает планете. Однако, в прошлом звезда была более активной. Следовательно, газовая

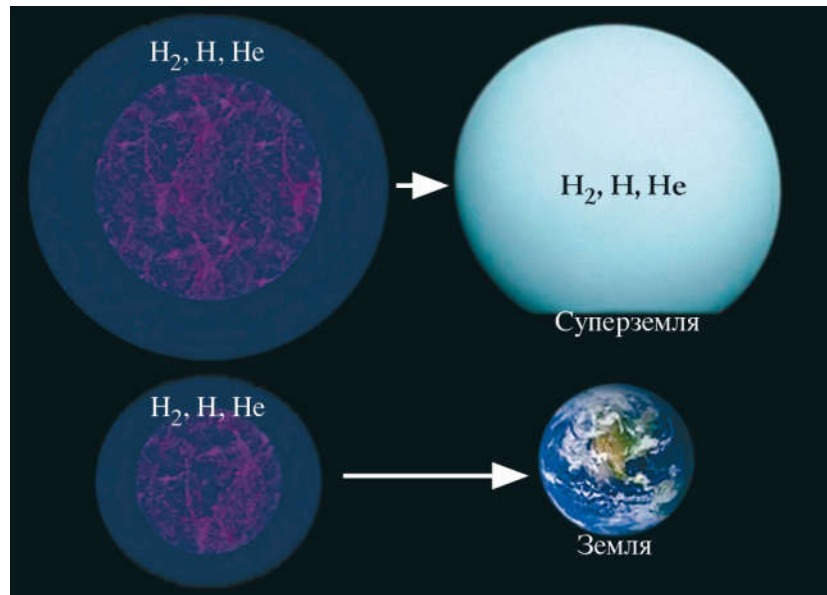
Схематическое изображение структуры атмосферы мини-нептуна.

оболочка планеты испарялась быстрее в течение первых миллиардов лет. Как отмечают специалисты, многие каменные экзопланеты начинали свою эволюцию как горячие нептуны, до сих пор астрономам удалось находить только такие, с которых их светила уже “сорвали” всю атмосферу.

АТМОСФЕРЫ СУПЕРЗЕМЕЛЬ

Внимание специалистов сейчас сосредоточено на планетарных системах красных карликов – относительно

Образование атмосфер из H_2 , H и He у суперземель и каменных планет земного типа за счет миграции газовых мини-нептунов на низкие орбиты. Слева на рисунке показаны газовые мини-нептуны разной массы, а справа – потенциально возможные суперземли или скалистые планеты, образованные при испарении атмосфер мини-нептунов при их миграции к родительской звезде.

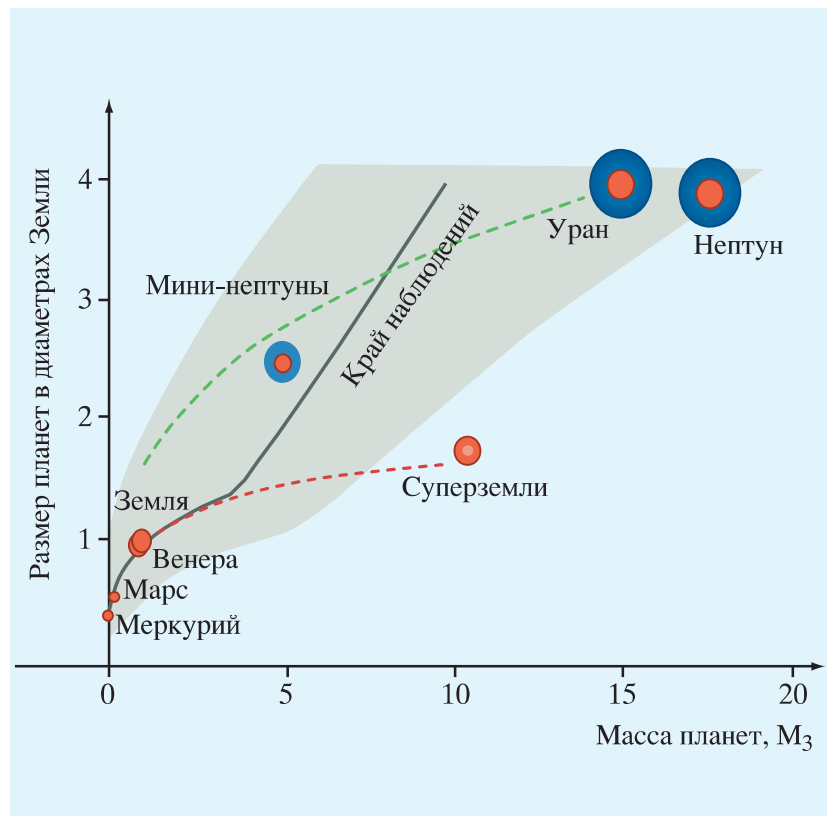


тусклых и холодных светил массой около половины Солнца, чей срок жизни – почти десять миллиардов лет. Считается, что каждая такая звезда должна обладать спутником-планетой, что делает их главным кандидатом для поисков “двойника Земли”, способного поддерживать жизнь. Их надо искать в окрестностях красных карликов, так как они изначально рождаются как газовые гиганты, чьи разрушающиеся оболочки

защищают будущую планету от потери атмосферы и воды под воздействиями излучения и плазмы звездного ветра молодого светила. Но есть сомнения в их существовании, этому мешают несколько факто-

ров – приливные силы, заставляющие планеты повернуться на светиле одной стороной и разогревающие их недра, чрезмерно сильное магнитное поле красных карликов, подавляющее “магнитный щит” планет.

График зависимости массы от размера экзопланет. Серая зона – возможное распределение открытых суперземель, зеленая и красная пунктирные линии – типы суперземель (мини-нептуны или каменные планеты земного типа). По данным космической обсерватории NASA “Кеплер”. Дж. Вейсс и Дж. Марси, 2014 г.



Кроме того, красный карлик излучает мощное рентгеновское излучение и ультрафиолет в первый миллиард лет, которые фактически уничтожают атмосферу двойника Земли. Выяснено, что эти же самые силы, препятствующие рождению нормальных подобных Земле планет, способствуют их появлению в результате метаморфоза небольших газовых гигантов – мини-нептунов, формирующихся на большом расстоянии от красного карлика. Изначально мини-нептуны представляют собой чрезвычайно холодные и негостеприимные миры. Но планеты не всегда находятся на одном и том же месте. Приливные силы могут заставить их мигрировать в сторону светила, которые выведут мини-нептун в зону потенциальной обитаемости, где он попадет под рентгеновскую и ультрафиолетовую бомбардировку, постепенно уносящую его газовую оболочку в открытый космос. В результате останется только каменное ядро, сопоставимое по размерам с Землей или малыми планетами. На поверхности, скорее всего, появится много воды, так как ядра планет-гигантов содержат вкрапления льда. Если она окажется в зоне обитаемости данной звездной системы, то вода растает, возникнут океаны, а, возможно, и жизнь. Превращение

гиганта в двойник Земли происходит не со 100% гарантией – есть множество факторов, которые мешают подобному метаморфозу.

К примеру, если светило будет испарять мини-нептун слишком медленно, то планета сохранит толстую газовую оболочку. В обратной ситуации ядро выйдет на поверхность раньше нужного времени, и все его водные запасы будут унесены в космос.

Анализ данных космической обсерватории “Кеплер” показывает, что суперземли, скорее всего, эволюционно связаны с мини-нептунами, сохранившими в атмосфере первичный водород, захваченный из протопланетной туманности, то есть суперземли это скорее – мини-нептуны. Для одной из наиболее активно наблюдавшихся суперземель – GJ 1214b анализ данных широкой наблюдательной кампании показал, что плотные слои атмосферы скрыты облаками и дымкой. Вопрос – есть ли океаны и материки под облаками – остается открытым.

БЛИЖАЙШИЕ ЗАДАЧИ НАБЛЮДЕНИЙ

Научные задачи наблюдений атмосфер экзопланет с помощью наземных и космических телескопов нацелены на решение ряда актуальных проблем современной астрофизики:

– эволюция планеты путем испарения, которое оказывает существенное воздействие на эволюцию атмосферы. Поскольку кривые блеска УФ-излучения транзитов во множестве планет на тесных орбитах с различными характеристиками представляют нам наилучшую возможность для изучения их атмосфер;

– структура и состав атмосферы планеты (в особенности при анализе спектральных линий УФ-диапазона) позволяет оценить температуру, давление и динамику верхних слоев. Так как различные длины волн позволяют зондировать атмосферы на различных глубинах, то оптический, ИК- и УФ-диапазоны дают нам уникальную возможность последовательно усовершенствовать наши представления о природе атмосфер экзопланет;

– на ранних стадиях эволюции планетных систем, атмосферы планет в обитаемой зоне будут испытывать расширение термосферы. Испарение атмосфер – ключевой процесс в определении актуальной обитаемости планет. С помощью УФ-наблюдений можно оценить и ограничить многочисленные модели эволюции атмосферы планеты, используемые в настоящее время для исследования и определения потенциальной обитаемости.

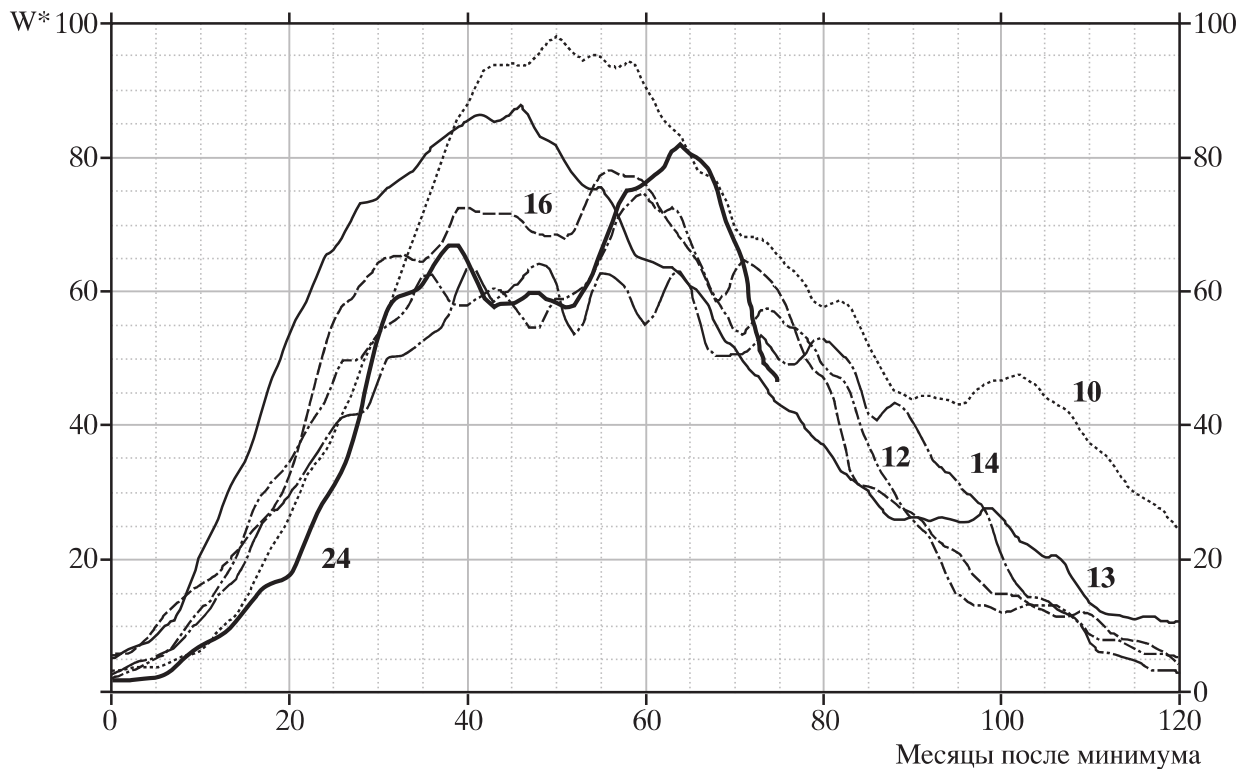
Солнце в октябре – ноябре 2015 г.

В эти месяцы солнечная пятнообразовательная активность держалась на среднем уровне, иногда опускаясь до низкого (7 сут в октябре и 1 сут в ноябре). Число групп пятен на видимом диске Солнца менялось от 1 до 6. В подавляющем большинстве они были небольшими и спокойными,

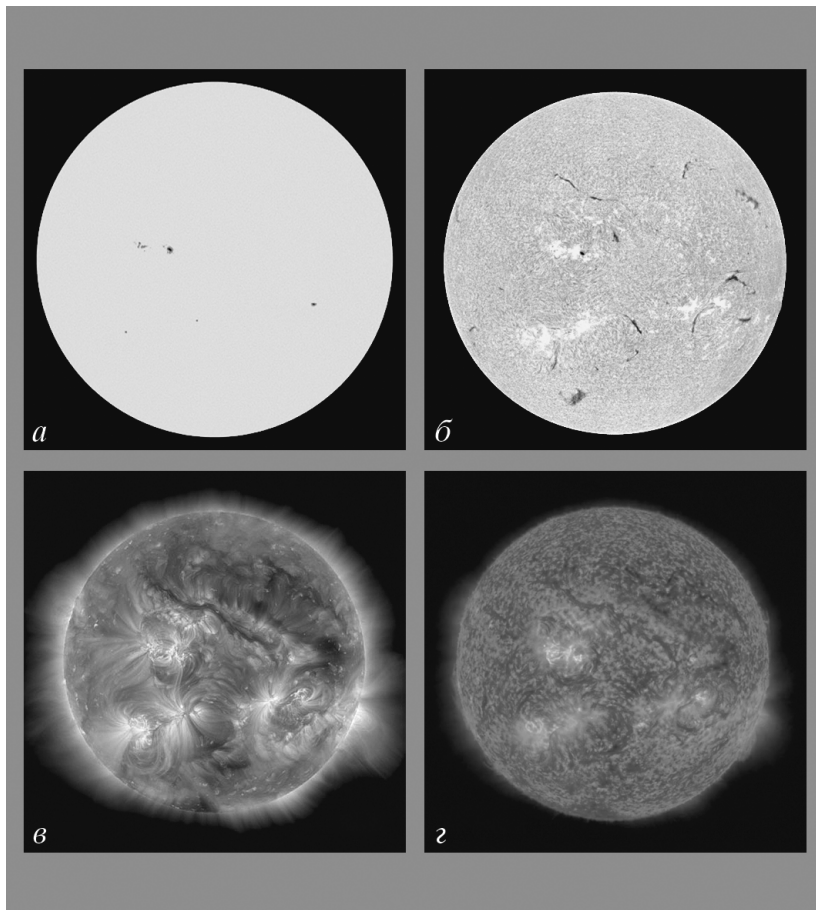
из 32 групп пятен 16 появились в Северном полушарии. Кривая роста сглаженных за год значений относительного числа пятен уверенно идет на спад. Текущие среднемесячные значения чисел Вольфа: $W_{\text{окт.}} = 37,0$ и $W_{\text{нояб.}} = 38,0$. Сглаженное значение этих индексов составило: в апреле 2015 г. – $W^* = 47,3$, в мае 2015 г. – $W^* = 45,6$. Эти данные приведены по классической (старой) системе, согласно Службе состояния околоземного пространства (www.swpc.noaa.gov).

В первую декаду октября пятнообразовательная активность упала до низкого уровня, с 11 октября вышла на средний и 22 октября достигла высшего значения, оставаясь на среднем уровне. 27 октября из-за восточ-

ного лимба появилась единственная большая группа пятен, 1 ноября она достигла максимального значения площади – 650 миллионов долей полусферы. Магнитная конфигурация этой активной области сохранялась достаточно простой, поэтому в ней в основном происходили только слабые вспышки. Однако 3 октября в ней произошла вспышка большого оптического балла 2В рентгеновского класса М3.7, сопровождавшаяся значительными динамическими явлениями, что сделало ее геоэффективной. Другая вспышка среднего балла возникла в этой группе пятен 31 октября. После 22 октября несколько снизилось образование новых пятен. Минимальное ежеднев-



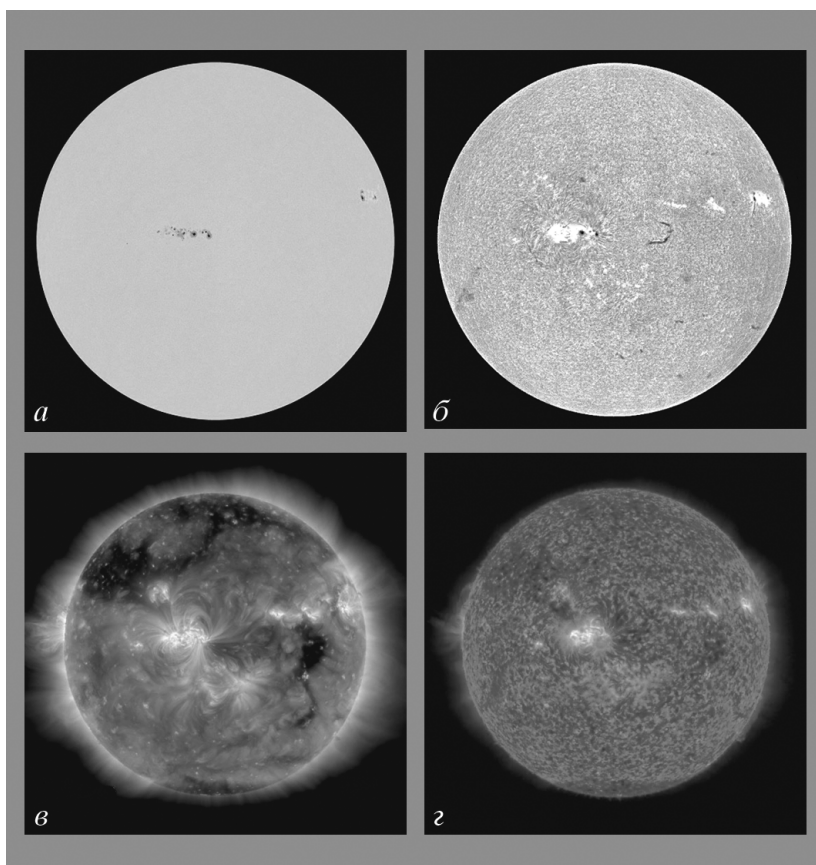
Ход развития (75 месяцев) текущего, 24-го цикла солнечной активности среди всех достоверных (с 1849 г.) солнечных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен в старой классической системе.



Солнце 22 октября:

а) фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$); б) в самой сильной водородной линии H_α ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в) в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$); г) в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$). Космическая солнечная обсерватория "SDO" (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).

ное значение относительных чисел солнечных пятен отмечено 10 октября ($W = 12$), максимальное – **22 октября ($W = 104$)**. 2 октября в большой сентябрьской группе пятен Южного полушария случилась вспышка класса M5.5/1N. Средний уровень вспышечной активности наблюдался 1, 4 октября (большая группа Южного полушария), 15–17 октября (маленькие группы Южного полушария) и 31 октября (крупная группа Северного полушария). В остальные дни вспышечная активность была на низком и очень низком уровне. Выбросы солнечных волокон (17 событий) появлялись 2 (5), 6, 8, 11, 14 (2), 17, 20, 21 и 28 (3) октября. Коронаграфы космической обсерватории "SOHO" зарегистрировали 113 корональных выбросов



Солнце 3 ноября: а) фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$); б) в самой сильной водородной линии H_α ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$); в) в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$); г) в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$). Космическая солнечная обсерватория "SDO" (<http://spaceweather.com>)

вещества разной интенсивности, среди которых один типа “частичное гало III” (угол раствора $180^\circ-270^\circ$) и четыре типа “частичное гало II” (угол раствора $90^\circ-180^\circ$). По видимому диску Солнца проходили 6 рекуррентных корональных дыр, высокоскоростные потоки от четырех из них внесли весомый вклад в магнитные бури. На средних широтах Земли отмечены 4 малые магнитные бури (4, 5, 12 и 13–14 октября) и протяженная по времени умеренная (6–10 октября). Всего же в геомагнитном поле зарегистрировано 10 возмущенных дней. Малые солнечные протонные события в околоземном космическом пространстве произошли 1, 22 и 29 октября. На геостационарных орбитах очень высокий поток (более 10^7 частиц на квадратный метр) релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ зарегистрирован 5, 17 и 20 октября.

В начале **ноября** уровень пятнообразовательной активности Солнца держался

на среднем уровне, постепенно понижаясь, 12 ноября стал низким. С 13 ноября он устойчиво находился на среднем уровне. На видимом диске Солнца образовалось от 5 до 2 групп солнечных пятен, одна из них большая, 13 групп локализовались в Северном полушарии и 3 – в Южном. Максимальное наблюдаемое число солнечных пятен было **4 ноября** ($W = 63$), минимальное – 18 ноября ($W = 17$). Средний уровень вспышечной активности отмечен 1, 3, 4 и 9 ноября, он связан со вспышками в небольших группах пятен Северного полушария. Корональный выброс вещества одной из вспышек 3 ноября вызвал в околоземном космическом пространстве умеренную магнитную бурю 6–7 ноября. Выбросы солнечных волокон (6 событий) наблюдались 11, 15, 16, 18 (2) и 22 ноября. Коронографы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали 66 корональных выбросов вещества разной интенсивности, среди которых одно “частичное

гало III” (угол раствора $180^\circ-270^\circ$) и 5 типа “частичное гало II” (угол раствора $90^\circ-180^\circ$). В ноябре образовались две рекуррентные и три новые корональные дыры, которые произвели геомагнитную возмущенность околоземного космического пространства. Состоялись 4 малых магнитных бури (3–4, 8, 11 и 13 ноября) и одна умеренная (7 ноября). Всего за месяц отмечено 10 сут с возмущенной геомагнитной обстановкой. В околоземном космическом пространстве возникло одно малое протонное событие. На геостационарных орбитах очень высокий поток релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ был 4–16 ноября.

Текущее состояние солнечной активности и ее прогноз на русском языке можно найти в Интернете (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>). Страница обновляется каждый понедельник.

*В.Н. Ишков
ИЗМИРАН*