МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕР ГРАВИТАЦИОННО-ЗАХВАЧЕННЫХ СУПЕР-ЗЕМЕЛЬ, ВРАЩАЮЩИХСЯ ВОКРУГ МАЛОМАССИВНЫХ РОДИТЕЛЬСКИХ ЗВЕЗД, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

© 2020 г. М. В. Разумовский^{1*}, А. В. Родин^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия ² Институт космических исследований РАН, Москва, Россия Поступила в редакцию 23.09.2019 г. После доработки 18.05.2020 г.; принята к публикации 26.05.2020 г.

Представлены результаты численного моделирования общей циркуляции атмосферы гипотетической супер-Земли в рамках модели, основанной на решении полной системы уравнений гидродинамики. Модель MIPT/PGI GCM, используемая для расчетов, ранее уже была с успехом использована для описания общей циркуляции атмосферы Венеры. Модель характеризуется высоким разрешением и отсутствием линейной схемной вязкости. Атмосферный газ рассматривается как смесь газов в некоторой постоянной пропорции, а влиянием аэрозольной составляющей на уравнение состояния можно пренебречь. Для описания процессов, связанных с переносом тепла, используется релаксационное приближение. В результате моделирования обнаружено, что западная зональная суперротация, которая может проявляться в виде экваториального и двух среднеширотных джетов, является основным механизмом циркуляции в атмосфере. Положение и интенсивность среднеширотных джетов в существенной мере определяются молярной массой атмосферы и контрастом температур "экваторполюс". В работе были продемонстрированы закономерности, отражающие эти изменения. Также в случае гравитационно-захваченной супер-Земли было обнаружено устойчивое струйное экваториальное течение, возмущенное волной Кельвина. Найдено, что интенсивность возмущений возрастает с уменьшением молярной массы атмосферы. Моделирование производилось в рамках простой модели парникового эффекта.

Ключевые слова: экзопланеты, модель общей циркуляции, гидродинамика, атмосферы, метеорология

DOI: 10.31857/S032001082006008X

ВВЕДЕНИЕ

Изначально большинство моделей общей циркуляции для экзопланет разрабатывалось для описания атмосфер горячих Юпитеров, поскольку это были первые экзопланеты, открытые транзитным методом, у которых стало возможным наблюдение и изучение атмосфер (Шарбонно и др., 2000; Генри и др., 2000; Шарбонно и др., 2002; Шоуман и Гийо, 2002). С точки зрения моделирования, состав атмосферы горячих Юпитеров не может поддаваться существенным вариациям, поскольку практически всецело определяется космологическим составом. В то же время последние теоретические термохимические и фотохимические модели предсказывают, что атмосферный состав супер-Земель может быть весьма разнообразным (от легкой водородногелиевой атмосферы до тяжелой углекислой и др.) в зависимости от массы, эффективной температуры планеты, истории ее формирования и прочих параметров (Элкинс-Тантон и Сигер, 2008; Шефер и Фегли, 2009; Мозес и др., 2013; Ху и Сигер, 2014: Мозес и др., 2016). Супер-Земли — особый класс планет, представляющий огромный интерес для современной планетной науки, прежде всего потому, что они представляют собой объекты, потенциально пригодные для существования жизни. Однако, помимо этого, ценность этих планет состоит в возможности моделирования их атмосфер в зависимости от обширного набора параметров (существенно большему, чем у горячих Юпитеров): химического состава атмосфер, состава породы планет, наличия устойчивой воды в различных агрегатных состояниях, парникового эффекта и др. (Элкинс-Тантон, Сигер, 2008; Хенг, Фогт, 2011; Пьеррхумберт, 2011; Чанг, Шоуман, 2017).

^{*}Электронный адрес: razumovskii@phystech.edu

Согласно данным наблюдений телескопа "Kepler", экзопланеты с радиусами от 1 до 4 земных преобладают среди общего количества открываемых планет, обращающихся вокруг звезд спектральных классов G, F, K и M (Ховард и др., 2012; Фрессен и др., 2013; Торрес и др., 2015). На сегодняшний день открыто уже свыше 200 экзопланет, относящихся к типу супер-Земель, и у десятков из них были обнаружены атмосферы, теоретическое изучение которых в совокупности с трактовкой наблюдательных данных в последнее десятилетие превратилось в актуальную область современной планетной науки. Принято предполагать, что такие планеты будут иметь собственное вращение, синхронизированное с орбитальным вращением вокруг звезды за счет приливных сил (случай гравитационного захвата, когда планета повернута к звезде только одним полушарием).

Большое разнообразие потенциально варьируемых параметров супер-Земель приводит к богатому спектру возможных климатических режимов в их атмосферах, что создает потребность применения моделей общей циркуляции. Существуют различные подходы к моделированию в зависимости от того, какая область параметров более предпочтительна. Один из способов (которому следуют авторы работы) состоит в том, чтобы в качестве "реперной точки" рассматривать экзопланетную атмосферу типа земной, марсианской или венерианской (см., например, Сельсис и др., 2007). Иной подход состоит в рассмотрении принципиально других типов атмосфер, радикально отличающихся от тех, что имеются на землеподобных планетах Солнечной системы (см., например, Роджерс, Сигер, 2010). Чанг и Шоуман (2017) использовали динамическое ядро гидростатической модели MIT GCM (Эдкрофт и др., 2004) для исследования влияния химического состава атмосферы на динамику и температурные распределения. Ядро MIT GCM широко распространено в мире и применяется как для атмосфер планет, расположенных в Солнечной системе, так и вне ее (Шоуман и др., 2009; Катариа и др., 2014). Было обнаружено (Чанг, Шоуман, 2017), что при увеличении молекулярного веса происходит повышение температурного контраста день-ночь, уменьшение средней по широте зональной скорости ветра, а также исследовано влияние массы атмосферы на положение и интенсивность ядра экваториального джета.

Исключительное воздействие на режимы атмосферной циркуляции оказывает величина периода обращения планеты вокруг родительской звезды. Эдсон и др. (2011) исследовали обитаемость гравитационно-захваченных супер-Земель. Была применена модель общей циркуляции GENESIS v2.3 (Поллард, Томпсон, 1995) для различных

периодов обращения и поверхностей (только твердой или только водной). Оказалось, что режимы циркуляции претерпевают "фазовый переход" с суперротационного режима на подсолнечнопротивосолнечную циркуляцию при переключении с быстрого вращения на медленное. Согласно (Эдсон и др., 2011), переход возникает в промежутке 4-5 дней для "сухих" (не имеющих на своей поверхности вещества в жидкой фазе) планет и 3-4 дня для планет-океанов. Также был обнаружен еще один переход при T = 100 дней. Кароун и др. (2014) применяли модель МІТ GCM с упрощенным радиационным блоком. Производились моделирования атмосферы гравитационно-захваченной супер-Земли с физическими характеристиками Gliese 581g и атмосферой земного типа для двух различных периодов обращения: 10 и 36.5 земных дней. Выяснилось, что эти значения периодов лежат в промежуточной области, и для них характерны различные типы циркуляции (как подсолнечнопротивосолнечная, так и суперротационная) на разных высотах. Также одним из результатов является обнаружение смещения среднеширотных джетов в зависимости от плотности атмосферы. Нода и др. (2017) использовали упрощенную версию модели DCPAM5 для моделирования атмосферы планеты-океана с физическими Земными характеристиками. Атмосфера предполагалась состоящей из водяного пара и сухого воздуха. Результатом являлись различные режимы циркуляции: подсолнечно-противосолнечная циркуляция, суперротация, сосредоточенная в экваториальном струйном течении, меридиональная циркуляция типа "экватор-полюс" и циркуляция за счет двух среднеширотных суперротационных джетов в зависимости от периода, который варьировался от 0 до 365 земных суток. Были зафиксированы как скачкообразные, так и непрерывные переходы от одного типа циркуляции к другому.

Целью данной работы является изучение влияния различных параметров на динамику атмосферной циркуляции супер-Земель с помощью негидростатической модели общей циркуляции MIPT/PGI GCM. В работе рассматриваются различные химические составы атмосфер — от тяжелой углекислой до легкой водородно-метановой. Мы применяем негидростатическую модель высокого разрешения для описания циркуляции атмосфер супер-Земель. Отметим также, что уже имеется обширный класс трехмерных газодинамических моделей, описывающих приливные разрушения планет, ударные волны в магнитосферах, взаимодействия газовых оболочек с потоками корональных выбросов у горячих Юпитеров (Жилкин, Бисикало, 2019; Черенков и др., 2019; Кайгородов и др., 2019). Однако их отличительной чертой являются относительно малое время интегрирования и нестационарные решения, что делает невозможным их адаптацию к климатическим задачам.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Перечислим основные характеристики венерианской версии модели, которая используется в работе. Атмосфера предполагается состоящей из смеси газов, плотность каждого газа является неизменной во времени и пространстве. Модель основана на численном интегрировании полной системы уравнений гидродинамики для вязкого сжимаемого газа без использования гидростатического приближения. Отметим, что вычисления проводятся на сетке с достаточно высоким разрешением: шаг сетки 0.24° по широте, 0.94° по долготе и 250 м по высоте. Проведение вычислений на сетке с таким разрешением фактически стало осуществимым только начиная с середины 2000-х годов, когда стало возможно применение параллельных вычислений для такого типа моделей. Текущие вычисления проводились на графическом процессоре NVIDIA, поддерживающем технологию CUDA. Для сравнения, в одной из последних версий гидростатической модели IPSL Venus GCM (Гарате-Лопес, Леббонуа, 2018) шаг сетки по углам составляет 3.75° на 1.875° и 2 км по высоте.

Приведем уравнения, составляющие полную гидродинамическую систему:

$$\begin{cases}
p = \rho R_{\text{atm}} T, \\
\partial \rho
\end{cases}$$
(1a)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \tag{1b}$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) =$$
(1c)
= $(-\nabla p + \operatorname{div}\hat{\mathbf{\Pi}}) + \rho \mathbf{g},$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \operatorname{div}((W+p)\mathbf{v}) =$$
(1d)
$$= \operatorname{div}(\hat{\mathbf{\Pi}} \cdot \mathbf{v} - \mathbf{j}) + Q.$$

В нее входят: уравнение состояния атмосферного газа экзопланеты (1а), уравнение непрерывности (1b), уравнение моментов (1c) и уравнение энергетического баланса (1d). В уравнении (1c) **g** представляет собой ускорение внешних сил, которое является суммой ускорения свободного падения, кориолисова и центробежного ускорений. В (1d) W — это сумма внутренней, кинетической и потенциальной энергий единицы объема атмосферного газа, $Q = -\text{div}\mathbf{J}$ — мощность радиационного нагрева-охлаждения в единице объема за счет поглощения или испускания электромагнитного излучения.

Радиационный нагрев в модели описывается с помощью простейшего релаксационного приближения (Мингалев и др., 2012). При его использовании учитывается, что мощность радиационного нагрева-охлаждения Q считается прямо пропорциональной отклонению температуры атмосферного газа от фиксированной, некоторым образом подобранной релаксационной температуры $T_{\rm rel}$:

$$Q = \frac{3}{2}\rho R_{\rm atm} \frac{T_{\rm rel} - T}{\tau_{\rm rel}}.$$
 (2)

Релаксационная температура $T_{\rm rel}$ является функцией времени, высоты, долготы и широты, а время релаксации $\tau_{\rm rel}$ зависит только от высоты. В процессе использования данной модели для экзопланетных атмосфер параметры $T_{\rm rel}$ и $\tau_{\rm rel}$ подбирались таким образом, чтобы максимально приблизить получаемые результаты к экспериментальным данным (Мингалев и др., 2012; Мингалев и др., 2015; Мингалев И.В., 2015). В действительности в модели релаксационная температура представляется в виде суммы трех слагаемых:

$$T_{\rm rel} = T_{\rm av}(h) + T_1(h,\theta) + T_2(h,\beta),$$
 (3)

где $T_{\rm av}(h)$ — некоторый средний температурный профиль на высоте h, заданный по международной модели VIRA (Мингалев, 2015; Засова и др., 2006), $T_1(h, \theta)$ — слагаемое, которое отвечает за нагрев на дневной стороне и выхолаживание на ночной стороне, и, наконец, $T_2(h, \beta)$ — слагаемое, варьированием которого можно менять разницу температур "экватор-полюс". В данной работе были проварьированы параметры $T_2(h, \beta)$ и $R_{\rm atm}$, что фактически означает варьирование разницы температур "экватор-полюс" и молярной массы атмосферы, и получены качественные результаты, отражающие последствия этих изменений в динамике атмосфер супер-Земель.

Такая формулировка релаксационного приближения позволяет в явном виде выделить основные характеристики радиационного баланса атмосферы, влияющие на режим глобальной циркуляции, без привязки к параметрам конкретной планеты и ее родительской звезды. Наибольший интерес для данного исследования представляют супер-Земли, находящиеся в обитаемой зоне маломассивных холодных звезд и характеризующиеся относительно малыми периодами орбитального вращения. Подобные планетные системы могут надежно наблюдаться методом лучевых скоростей, и имеются достаточные основания полагать, что климатические условия на поверхности этих планет допускают существование живой материи (Мерхэд и др. 2012; Дрессинг, Шарбонно, 2013). Поскольку в таких системах планеты являются предположительно приливно захваченными (Фон Блох и др., 2007), в нашей работе мы рассмотрели случай, когда собственное вращение планеты синхронизировано с ее орбитальным движением. В этом случае в системе отсчета, связанной с твердым телом планеты, радиационный режим планеты стационарен и не проявляет суточных и сезонных вариаций. Вместе с тем, поскольку мы рассматриваем планеты, входящие в обитаемую зону, мы не предполагаем наличия экстремальных условий на поверхности или в атмосфере. Иной класс приливно-захваченных внесолнечных планет, так называемые горячие Юпитеры, в данной работе не рассматривается.

Также кратко отметим некоторые важные граничные и начальные условия, которые были использованы в модели. На поверхности планеты полагаются равными нулю гидродинамическая скорость (условие прилипания) и вертикальная компонента вектора потока тепла.

Сам планетарный пограничный слой в модели отдельно не параметризуется, поскольку предполагается, что он разрешается моделью.

В качестве верхней границы выбрана высота 120 км. Поскольку для рассматриваемого нами класса объектов под эту границу попадают тропосфера и мезосфера, то предполагается, что вышележащие слои атмосферы не оказывают влияния на динамику атмосферы ниже. На верхней границе полагаются равными нулю вертикальная компонента гидродинамической скорости (условие непротекания на границе) и производные по высоте от горизонтальных компонент гидродинамической скорости (условие проскальзывания).

Начальное распределение температуры задается профилем $T_{\rm av}(h)$, который уже соответствует суперротационному типу циркуляции атмосферы планеты. Долгота подсолнечной точки в начальный момент времени равняется 180° . Также в начальный момент времени вертикальная и меридиональная компоненты скорости ветра полагаются равными нулю, а зональная компонента зависит только от высоты и широты и задается в виде специально подобранного профиля.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью настоящей работы является моделирование атмосферы гипотетической супер-Земли на основании следующих предположений. Планета обладает венерианскими физическими характеристиками: массой, радиусом, периодом вращения и поверхностью. Плотность газов, входящих в состав атмосферы, предполагается неизменной во времени и пространстве. Не рассматривается аэрозольная составляющая. При моделировании использовалась регулярная неравномерная сетка: 384 шага по долготе и 768 шагов по широте (эта сетка использовалась ранее в венерианской версии модели для расчета струйных течений в полярных вихрях).

Зональная суперротация может по-разному проявляться: в виде экваториального джета и двух среднеширотных. Целью работы является продемонстрировать то, что при варьировании различных параметров атмосферы можно добиться изменения их взаимного расположения и интенсивности. В качестве ключевых результатов моделирования представлены профили зональной скорости ветра при различных соотношениях разницы температур "экватор-полюс" и различных молярных массах атмосферы. Условно результаты моделирования можно представить в виде итогов трех экспериментов. В первом эксперименте (рис. 1) варьировалась разница температур "экватор-полюс" (слагаемое T₂ в формуле (3)). Во втором эксперименте (рис. 2) моделирование производилось при различных составах атмосфер: CO_2 , N_2 , H_2O и водородно-метановой атмосфере с молярной массой 8 г/моль (86% H₂ и 14% CH₄). Отметим, что в рамках второго эксперимента не изменялось значение молярной теплоемкости при постоянном давлении c_p : учет этого эффекта не влияет на качественную картину динамики (Чанг и Шоуман 2017). В третьем эксперименте (рис. 3) был рассмотрен случай гравитационного захвата и получена картина динамики при различных молярных массах атмосфер (тех же, что и во втором эксперименте).

Вариации контраста температур "экватор-полюс"

В первом эксперименте (рис. 1) варьировалась разность температур "экватор-полюс". Обнаружено, что при уменьшении разницы температур "экватор-полюс" понижается скорость циркуляции и затухают среднеширотные джеты. В предельном случае можно добиться полного исчезновения среднеширотных джетов.

Вариации молярной массы атмосферы

Во втором эксперименте (рис. 2) варьировалась молярная масса атмосферы. Из результатов второго эксперимента видно, что ширина и количество джетов зависят от молярной массы. При уменьшении молярной массы наблюдаются постепенное формирование среднеширотных джетов и расширение области суперротации. Отметим дополнительно, что полученные результаты позволили зафиксировать изменения в динамике выше области суперротации. Например, для атмосферы, состоящей из углекислого газа, виден интенсивный экваториальный суперротационный "антиджет" на высоте 100 км (небольшая темно-красная область), а для азотной атмосферы можно заметить его распад на два среднеширотных "антиджета". Отметим, что в гидростатических моделях (Чанг, МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕР



Рис. 1. Результаты первого модельного эксперимента. Представлены профили зональной скорости ветра в зависимости от высоты и широты (усредненные по долготам) для двух значений контраста температур экватор-полюс. На рисунке справа показан результат для случая, когда $T_2(h, \beta) = T^*$, где $T^*(h)$ — начальный модельный профиль, а слева — для случая $T_2(h, \beta) = 0.03T^*$. Уменьшением контраста температур экватор-полюс можно в предельном случае добиться полного исчезновения среднеширотных джетов.



Рис. 2. Результаты второго модельного эксперимента. Представлены профили зональной скорости ветра в зависимости от высоты и широты (усредненные по долготам) для различных атмосфер: углекислой, азотной, состоящей из водяного пара и водородно-метановой. $T_2 = T^*$. Рассмотрен случай медленного вращения с периодом 110 земных суток. Видно, что при уменьшении молярной массы постепенно формируются среднеширотные джеты.

Шоуман, 2017; Кароун и др., 2014; Нода и др., 2017) подобных структур не наблюдается, возможно, в силу недостаточного пространственного разрешения применяемых моделей. Постепенное формирование новых среднеширотных течений с уменьшением молярной массы атмосферы качественно можно объяснить следующим образом. Часть потока энергии излучения звезды преобразуется в кинетическую энергию атмосферы, следовательно, при понижении молярной массы должны образовываться области повышенной зональной



Рис. 3. Результаты третьего модельного эксперимента. Представлены профили зональной скорости ветра в зависимости от высоты и широты для четырех значений долгот: 45°, 135°, 225° и 315° для различных химических составов атмосфер (ряд 1 — CO₂, ряд 2 — N₂, ряд 3 — H₂O, ряд 4 — H₂/CH₄). *T*₂ = *T**. Рассмотрен случай гравитационного захвата. В отличие от второго эксперимента, экваториальное струйное течение оказалось гораздо более устойчивым, среднеширотные джеты не наблюдаются. На рисунке заметно формирование волновых возмущений, интенсивность которых возрастает с понижением молярной массы атмосферы.

скорости, где и формируются новые струйные течения.

Случай гравитационного захвата

В третьем эксперименте рассматривалась динамика атмосферы гравитационно захваченной планеты, когда плотность потока излучения звезды для данной географической широты планеты фиксирована. Наиболее устойчивой картиной циркуляции является экваториальное струйное течение, возмущенное волной Кельвина. Оказалось, что если начать снижать значения молярной массы атмосферы, начиная с состояния, при котором среднеширотные джеты полностью отсутствуют, то их формирование впоследствии не наблюдается. С уменьшением молярной массы можно увидеть лишь усиление волновых возмущений (см. рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качественно полученные результаты в экспериментах 2 и 3 находятся в согласии с исследованием Чанга, Шоумана (2017), которые установили повышение зональной скорости ветра с уменьшением молярной массы. Отметим, что результаты моделирования планетных атмосфер (Чанг и Шоуман, 2017) указывают на возможность появления динамических структур со сверхзвуковыми скоростями, что исключает возможность корректного использования гидростатических моделей.

Количество наблюдательных данных об атмосферах гравитационно-захваченных супер-Земель на сегодняшний день существенно отстают от результатов моделирования. Тем не менее постоянный прогресс в этом направлении создает необходимость применения моделей общей циркуляции (см., например, Хаммонд, Пьеррхумберт, 2017). Было построено температурное распределение в атмосфере планеты 55 Рака е, основанное на данных наблюдений транзитов этой планеты в среднем инфракрасном диапазоне при помощи телескопа "Spitzer" (Винн и др., 2011; Демори и др., 2016). Была сделана попытка объяснения данных с применением модели обшей циркуляции атмосфер: Хаммонд и Пьеррхумберт (2017) использовали динамическое ядро гидростатической модели версии Exo-FMS (Лин 2004). Им удалось подобрать такой состав атмосферы экзопланеты 55 Рака е при различных давлениях на поверхности, который бы оптимально описывал температурный профиль, полученный в результате наблюдений. Было отмечено, что температурное распределение существенно определяется средней молярной массой атмосферы и давлением на поверхности, в то время как оптическая толщина и прозрачность атмосферы не оказывают влияния на качественную картину. Зональная скорость ветра также является наблюдаемой величиной, до сих пор, однако, установленной только для горячих Юпитеров с помощью высокоточных допплеровских измерений (Снеллен и др., 2010, Лоуден, Уитли, 2015). Предполагается, что в скором времени это станет возможно и для супер-Земель. Тогда данные о циркуляции атмосферы можно будет использовать как дополнительный признак химического состава атмосферы.

В настоящей работе было произведено моделирование атмосферы гравитационно-захваченной супер-Земли в рамках модели общей циркуляции MIPT/PGI GCM. Модель MIPT/PGI GCM основана на решении полной системы гидродинамических уравнений, обладает высоким разрешением и характеризуется отсутствием линейной схемной вязкости. MIPT/PGI GCM относится к поколению моделей общей циркуляции, которые еще не получили должного распространения в мире. Экзопланетные атмосферы — в настоящее время весьма актуальная и бурно развивающаяся область астрофизики. Ожидается, что количество наблюдательных данных, полученных в результате наблюдений транзитов супер-Земель, требующих полноценного теоретического обоснования, будет неуклонно расти.

В работе производились вариации температурного контраста "экватор-полюс" и молярной массы атмосферы, и было найдено влияние соответствующих изменений на общую картину динамики атмосферы. Обнаружено, что зональная суперротация является главным механизмом циркуляции в атмосфере в широком интервале высот. Зональная суперротация может проявляться в виде экваториального и двух среднеширотных джетов. При изменении температурного контраста "экватор-полюс" и молярной массы можно добиться различной интенсивности и положения среднеширотных джетов. Также был обнаружен интересный эффект, состоящий в том, что при не очень большом контрасте температур "экватор-полюс" возникает устойчивое экваториальное струйное течение, которое возмущено волной Кельвина. Интенсивность возмущений возрастает с уменьшением молярной массы.

Некоторые из вышеперечисленных результатов ранее не были получены в других моделях атмосфер супер-Земель. Мы полагаем, что применение негидростатической модели позволяет воспроизвести те динамические структуры, которые другими моделями не разрешаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Винн и др. (J.N. Winn, J.M. Matthews, R.I. Dawson, D. Fabrycky, M.J. Holman, T. Kallinger, R. Kushnig, D. Sasselov, et al.), Astrophys. J. 737, 18 (2011).

- 2. Генри и др. (G.W. Henry, G.W. Marcy, R.P. Butler and S. Vogt), Astrophys. J. **529**, 41 (2000).
- Демори и др. (В. Demory, M. Gillon, J. de Wit, N. Madhusudhan, E. Bolmont, K. Heng, T. Kataria, N. Lewis, et al.), Nature 532, 207 (2016).
- 4. Дрессинг, Шарбонно (C.D. Dressing and D. Charbonneau), Astrophys. J. **767**, 95 (2013).
- 5. Жилкин, Бисикало, Астрон. журн. **63**, 7 (2019).
- 6. Засова и др., Косм. исслед. 44, № 4 (2006).
- 7. Кайгородов и др., Астрон. журн. **63**, 5 (2019).
- 8. Кароун и др. (L. Carone, R. Keppens, and L. Decin), MNRAS 445, 930 (2014).
- 9. Катариа и др. (Т. Kataria, A.P. Showman, J.J. Fortney, M.S. Marley and R.S. Freedman), Astrophys. J. **785**, 92 (2014).
- 10. Гарате-Лопес, Леббонуа (I. Garate-Lopez and S. Lebonnois), Icarus **314**, 1 (2018).
- 11. Лин (S.-J. Lin), Monthly Weather Review 132 (2004).
- 12. Лоуден, Уитли (Т. Louden and P.J. Wheatley), Astrophys. J. **814**, 24.
- 13. Мерхед и др. (P.S. Muirhead, K. Hamren, E. Schlawin, B. Rojas-Ayala, K.R. Covey and J.P. Lloyd), Astrophys. J. Lett. **750**, 37 (2012).
- 14. Мингалев и др., Астрон. вестник 46, 4, 282 (2012).
- 15. Мингалев И.В., Докторская диссертация, Полярный геофизический институт, 2015.
- 16. Мингалев и др., Астрон. вестник 49, 1, 27 (2015).
- 17. Мозес и др. (J.I. Moses, M.R. Line, C. Visscher, M.R. Richardson, N. Nettelmann, J.J. Fortney, T.S. Barman, K.B. Stevenson, et al.), Astrophys. J. 777, 34 (2013).
- 18. Мозес и др. (J.I. Moses, M.S. Marley, K. Zahnle, M.R. Line, J.J. Fortney, T.S. Barman, C. Visscher, N.K. Lewis, et al.), Astrophys. J. **829**, 66 (2016).
- 19. Нода и др. (S. Noda, M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y.O. Takahashi, S. Takehiro, M. Onishi, G.L. Hashimoto, K. Kuramoto, et al.), Icarus **282**, 1 (2017).
- 20. Поллард, Томпсон (S.L. Pollard and D. Thompson), Global and Planetary Change **10**, 129 (1995).
- 21. Пьеррхумберт (R.T. Pierrehumbert), Astrophys. J. **726**, 8 (2011).
- 22. Роджерс, Сигер (L.A. Rogers and S. Seager), Astrophys. J. **712**, 974 (2010).
- 23. Сельсис и др. (F. Selsis, J.F. Kasting, B. Levrard, J. Paillet, I. Ribas, and X. Delfosse), Astron. Astrophys. **476**, 1373 (2007).
- 24. Снеллен и др. (I.A.G. Snellen, R.J. de Kok, E.J.W. de Mooij, and S. Albrecht), Nature Lett. **465**, 1049 (2010).
- 25. Торрес и др. (G. Torres, D.M. Kipping, F. Fressin, D.A. Caldwell, J.D. Twicken, S. Ballard, N.M. Batalha, S.T. Bryson, et al.), Astrophys. J. **800**, 99 (2015).
- 26. Фон Блох и др. (W. von Bloh, C. Bounama, M. Cuntz, and S. Franck), Astron. Astrophys. **476**, 1365–1371 (2007).

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 6 2020

- 27. Фрессен и др. (F. Fressin, G. Torres, D. Charbonneau, S.T. Bryson, J. Christiansen, C.D. Dressing, J.M. Jenkins, L.M. Walkowicz, et al.), Astrophys. J. **766**, 81 (2013).
- 28. Хаммонд, Пьеррхумберт (M. Hammond and R.T. Pierrehumbert), Astrophys. J. **849**, 152 (2017).
- 29. Хенг, Фогт (K. Heng and S.S. Vogt), MNRAS **415**, 2145 (2011).
- 30. Ховард и др. (A.W. Howard, G.W. Marcy, S.T. Bryson, J. M. Jenkins, J.F. Rowe, N.M. Batalha, W.J. Borucki, D.G. Koch, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **201**, 15 (2012).
- 31. Ху, Сигер (R. Hu and S. Seager), Astrophys. J. **784**, 63 (2014).
- 32. Чанг, Шоуман (X. Zhang and A.P. Showman), Astrophys. J. **836**, 73 (2017).
- 33. Черенков и др., Астрон. журн. **63**, 2 (2019).
- 34. Шарбонно и др. (D. Charbonneau, T.M. Brown, D.W. Latham, and M. Mayor), Astrophys. J. **529**, 45 (2000).

- 35. Шарбонно и др. (D. Charbonneau, T.M. Brown, R.W. Noyes, and R.L. Gilliland), Astrophys. J. **568**, 377 (2002).
- 36. Шефер, Фегли (L. Schaefer and Jr. Bruce Fegley), Astrophys. J. **703**, 113 (2009).
- 37. Шоуман, Гийо (А.Р. Showman and T. Guillot), Astron. Astrophys. **385**, 166 (2002).
- Шоуман и др. (A.P. Showman, J.J. Fortney, Y. Lian, M.S. Marley, R.S. Freedman, H.A. Knutson, and D. Charbonneau), Astrophys. J. 699, 564 (2009).
- Эдкрофт и др. (A. Adcroft, J.-M. Campin, C. Hill and J. Marschall), Monthly Weather Review 132, 2845 (2004).
- 40. Эдсон и др. (A. Edson, S. Lee, P. Bannon, J.F. Kasting and D. Pollard), Icarus **212**, 1 (2011).
- 41. Элкинс-Тантон, Сигер (L. Elkins-Tanton and S. Seager), Astrophys. J. **685**, 1237 (2008).