

УДК 524.3:523.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБИТАЕМОСТИ ЭКЗОПЛАНЕТ: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ БИОМАРКЕРЫ O₂/O₃ В УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

© 2019 г. Е. М. Сачков^а, В. И. Шематович^{а, *}

^аИнститут астрономии РАН, Москва, Россия

*e-mail: shematov@inasan.ru

Поступила в редакцию 26.03.2019 г.

После доработки 18.04.2019 г.

Принята к публикации 13.06.2019 г.

В настоящее время самым сильным дистанционно обнаруживаемым признаком жизни в земной атмосфере является производимый при фотосинтезе молекулярный кислород (O₂). Однако недавние исследования геохимических признаков на экзопланетах, подобных Земле, предполагают, что для большинства из них атмосферный O₂ был бы не обнаруживаемым для удаленного наблюдателя, кроме как в течение последних ~500 млн лет эволюции. Во время длительного периода в истории Земли (2.0–0.7 млрд лет назад) O₂, вероятно, присутствовал в атмосфере, но с низкими концентрациями, оцениваемыми значениями ~0.1–1% от сегодняшнего уровня. Хотя спектральные проявления O₂ слабы при таких низких содержаниях, однако молекулы озона O₃, находящиеся в фотохимическом равновесии с такими низкими концентрациями O₂, будут вызывать заметные спектральные особенности в УФ-полосе Хартли-Хаггинса (~0.25 мкм), с более слабым проявлением в средней ИК-области около 9.7 мкм. Таким образом, принимая историю Земли как информативный пример (прокси), можно заключить, что, возможно, существует категория экзопланет, для которых обычные атмосферные биомаркеры могут быть идентифицированы лишь в УФ-диапазоне излучения. Соответственно, в статье подчеркивается важность возможности УФ-наблюдений при проектировании будущих космических телескопов для прямых наблюдений экзопланет и их атмосфер, таких как Спектр-УФ (WSO-UV), The Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) или The Large UV/Optical/Infrared Surveyor (LUVOR), для обнаружения озона O₃ в атмосферах планет с промежуточными состояниями окисления. Также обсуждаются стратегии смягчения так называемых “ложных определений”, т.е. детектирования O₃, создаваемого в абиотических процессах. Отмечается важность и широкие последствия изучения истории Земли как окна в понимании потенциальных биомаркеров для экзопланет, и важность наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне для идентификации обитаемых экзопланет космическими телескопами следующего поколения.

Ключевые слова: экзопланеты, космические телескопы, наблюдения в УФ-диапазоне, зоны потенциальной обитаемости, астробиология

DOI: 10.1134/S0320930X19050062

ВВЕДЕНИЕ

Поиск жизни за пределами нашей Солнечной системы является важной целью в науках о космосе. Быстрое развитие наук об экзопланетах — от открытий планет до исследований их характеристик и, в особенности, открытия планет в зонах потенциальной обитаемости соседних звезд — подчеркивает своевременность таких усилий. Ближайший по времени и лучший шанс идентифицировать жизнь на экзопланетах будет обеспечен большими (класса 30-метровых) телескопами наземных обсерваторий и будущих 10-метровых космических телескопов, способных получать прямые изображения экзопланет. В то время как ожидаемые космические телескопы: (а) Джеймса Вебба (JWST), который планируется запустить в 2021 г., и (б) Спектр-УФ (WSO-UV), который планируется запустить в 2024 г., предоставят беспрецедентные возможности характеризовать экзопланеты посредством наблюдений фазовых кривых, вторичных затмений и трансмиссионной

спектроскопии транзитов, то получение характеристик прямых изображений экзопланет земного типа можно ожидать лишь при помощи специальных космических обсерваторий, таких как LUVOR или HabEx (см., например, Menneson и др., 2016; Volcar и др., 2017; Gaudi и др., 2018).

Сейчас имеет место переход от эпохи открытий экзопланет и исследований их демографии к эпохе детальной характеристики атмосфер экзопланет и их поверхностей. В наблюдениях транзитов и измерениях радиальных скоростей звезд подтверждено существование тысяч экзопланет (Batalha, 2014; Morton и др., 2016), причем несколько десятков экзопланет находится в зонах потенциальной обитаемости (ЗПО) их родительских звезд (Kane и др., 2016). Планеты с массами и радиусами, соответствующими скалистому составу, и, возможно, окруженные вторичными, за счет вулканических извержений, атмосферами были обнаружены в близлежащих звездных системах, наиболее известными примерами кото-

рых являются недавно открытые экзопланеты, такие как Proxima Centauri b (Anglada-Escudé и др., 2016); TRAPPIST-1 e, f и g (Gillon и др., 2017); и LHS 1140b (Dittmann и др., 2017).

Планеты, которые проходят по диску своей звезды (явление транзита), являются превосходными кандидатами для характеристики атмосферы с помощью трансмиссионной (просвечивающей) спектроскопии для планируемых в ближайшем будущем проектах — космического телескопа JWST (Stevenson и др., 2016) и космического УФ-телескопа Спектр-УФ (WSO-UV) (Боярчук и др., 2016). Космические телескопы с возможностью измерения непосредственно отображаемых спектров потенциально обитаемых экзопланет находятся в стадии научного определения (например, Mennesson и др., 2016; Gaudi и др., 2018). Наземные наблюдатели также разрабатывают приборы и методы для нынешних и будущих обсерваторий, которые будут способны получать изображения планет размером с Землю вокруг близлежащих звезд (Kawahara и др., 2012; Lovis и др., 2016).

Зоны потенциальной обитаемости

После более чем пяти десятилетий космических исследований и накопления данных различными космическими аппаратами был разработан целый ряд вероятных гипотез для ответа на вопрос, почему Венера и Марс эволюционировали так по-разному по сравнению с Землей. Земля уникальна в том смысле, что она имеет атмосферу с преобладанием азота, сохранила свои водные океаны, на ней имеются континенты и планета проявляет геофизическую активность с момента своего образования. Благодаря этим условиям приблизительно 3.5–3.8 млрд лет назад простые микробные и более поздние сложные многоклеточные формы жизни смогли возникнуть и заселить гидросферу, подповерхностные слои и поверхность планеты. До сих пор Земля является единственным примером известной нам среды обитания, где возникло и смогло обитать такое большое разнообразие форм жизни.

Один важный фактор в этой космической загадке, касающейся эволюции Земли в среду обитания, где смогли развиваться высшие формы жизни, связан с тем, что планета обращается вокруг Солнца, которое является звездой типа G2, в так называемой зоне потенциальной обитаемости (ЗПО). Классическая концепция звездной зоны обитаемости представляет собой сферическую оболочку вокруг звезды главной последовательности, где каменистая планета, окруженная атмосферой, может поддерживать наличие жидкой воды в заданный момент времени (Kasting и др., 1993). Размер и расположение этой области зависят от звездной светимости, которая эволюционирует за время жизни звезды, и, соответственно, ЗПО располагается ближе к родительской звезде, когда звезда является более холодной (M- и K-типы) по сравнению со звездами G-ти-

па, и дальше, когда звезда — более горячая (F-тип) (Коррагару и др., 2013).

По мере распространения методов сравнительной планетологии, развитых для планет Солнечной системы, на внесолнечные планетные системы стало ясно, что классическая концепция обитаемой зоны и связанные с ней вопросы о том, что делает пригодной для жизни планету, намного сложнее, чем наличие большого каменного тела, расположенного на правильном расстоянии от родительской звезды (Коррагару и др., 2013). Поскольку классическая концепция обитаемой зоны на самом деле не указывает, может ли жизнь развиваться на планете земного типа, то возникла необходимость новой классификации потенциальных мест обитания (Lammer и др., 2009). В соответствии с этой новой классификацией были определены четыре потенциальных класса среды обитания (Lammer, 2013):

- Среда обитания класса I представляют собой планетарные тела, на которых звездные и геофизические условия позволяют планетам земного типа эволюционировать так, что сложные многоклеточные формы жизни могут возникнуть и обитать в гидросфере, на поверхности и в подповерхностных слоях планеты.

- В среде обитания класса II входят тела, на которых может возникнуть жизнь, но из-за астрофизических и геофизических условий эти планеты эволюционируют в пределах их обитаемых зон скорее по направлению к мирам, подобным Венере или Марсу, где сложные многоклеточные формы жизни могут не развиваться.

- В среде обитания класса III включены планетные тела, в которых под ледяной поверхностью находятся водные океаны, взаимодействующие непосредственно с обогащенными силикатами ядрами.

- В среде обитания класса IV включены небесные тела, на которых имеются слои жидкой воды между двумя слоями льда или надо льдом.

Однако по мере изучения экзопланетных систем и открытия экзопланет с низкими плотностями (Lissauer и др., 2013; Luger и др., 2015), стало ясно, что такие планеты могут представлять собой дополнительный пятый класс среды обитания. Из соотношения радиус-масса этих планет типа супер-земель следует ожидать, что у них каменистое ядро, скорее всего, покрыто очень глубоким водным слоем, но без континентов (Noack и др., 2016). Таким образом, такой новый тип планет можно классифицировать как:

- Среда обитания класса V, которые соответствуют небесным телам, имеющим огромные слои воды над каменистым ядром, но без твердой поверхности.

Тщательное изучение различных астрофизических и геофизических аспектов эволюции планет указывает на то, что места обитания класса I для подобных Земле планет должны располагаться на правильном расстоянии в зоне потенциаль-

ной обитаемости их родительских звезд, должны терять свои первичные водородно-гелиевые атмосферы в течение необходимого периода времени, должны поддерживать тектонику плит на поверхности за время жизни планеты, должны накопить молекулярный азот в качестве основного атмосферного компонента после того, как звездная активность уменьшилась до умеренных значений, и, наконец, в недрах планеты должны быть созданы условия, при которых могло бы развиваться собственное сильное и глобальное магнитное поле. Недавние открытия многочисленных планетных систем в наблюдениях космической обсерватории NASA Kepler показывают, что в нашей Галактике могут существовать миллионы планет земного типа с орбитами в пределах потенциальных зон обитания их родительских звезд (Kane и др., 2016). Однако предварительные и детальные исследования потенциальных мест обитания указывают на то, что зоны обитания класса I должны встречаться гораздо реже по сравнению с более экзотическими зонами обитания классов II, III, IV и V.

Оценке потенциальной обитаемости экзопланет помогает концепция зоны потенциальной обитаемости, определяемой как диапазон расстояний или кольца вокруг звезды, на которых для планеты с заданной атмосферой существует возможность поддержания на поверхности слоя жидкой воды (рис. 1). Это определение позволяет быстро оценить потенциальную пригодность для жизни, если наблюдаемые параметры системы звезда-планета, такие как большая полуось и звездная светимость, могут быть адекватно оценены. (Яркость звезды может быть измерена непосредственно или оценена из других измеренных звездных параметров, таких как эффективная температура и радиус.) Как отмечалось выше, наиболее распространенное определение ЗПО предполагает наличие N_2 - CO_2 - H_2O атмосферы с углеродно-кремниевым циклом обратной связи (Kasting и др., 1993; Коррагару и др., 2013), который действует как планетный термостат, как это происходит на Земле. В этой концепции ЗПО, планетная температура в первую очередь контролируется поглощением тепла за счет парникового эффекта газов CO_2 и H_2O и общего планетного альбедо, определяемого массой и составом атмосферы, облачным покровом и его составом, а также альбедо поверхности планеты и звездной температурой.

Границы ЗПО в терминах звездной инсоляции будут изменяться как функция звездного типа, так как распределение спектральной энергии звезд разной температуры дает различные эффективные планетные альбедо даже для планетной атмосферы постоянного состава. Важно отметить, что такое простое определение ЗПО зависит от таких факторов, как гравитация планеты и атмосферная масса, которые могут изменить парниковый эффект из-за эффектов уширения линий за счет давления (Коррагару и др., 2014), а также ледяной покров и состав поверхности

(Shields и др., 2014). Другие определения ЗПО намного шире (см., например, Seager, 2013) и включают H_2 -доминантные атмосферы, где за счет поглощения, индуцированного столкновениями H_2 - H_2 , значительно расширяется внешняя граница ЗПО (Pierrehumbert, Gaidos, 2011), возможно, до межзвездного пространства (Stevenson, 1999), и сухие атмосферы, которые сдвигают внутреннюю границу ЗПО ближе к звезде (Abe и др., 2011; Zsom и др., 2013). До недавнего времени большинство оценок ЗПО были сделаны при помощи относительно простых одномерных (1D) радиационно-конвективных моделей. Однако использование более усовершенствованных трехмерных (3D) моделей общей циркуляции (МОЦ), позволило предложить более оптимистичные ограничения на внутреннюю границу ЗПО (Yang и др., 2013; 2014; Коррагару и др., 2016; Shields и др., 2016), с другой стороны, предлагая более пессимистичные результаты для внешней границы по сравнению с результатами 1D моделей (Wolf, 2017).

Дополнительным вызовом для определения внешней границы ЗПО являются так называемые “предельные циклы” — колебания между глобально ледниковыми и климатически теплыми состояниями в результате изменения баланса между потеплением от выделения углекислого газа CO_2 и охлаждением за счет субдукции CO_2 в углеродно-кремниевом цикле и последующими изменениями в альбедо от планетного оледенения и таяния ледников (Haqq-Misra и др., 2016; Paradise, Menou, 2017). Предельные циклы были исследованы при помощи комплекса моделей климата, включающего как простые модели энергетического баланса, 1D радиационно-конвективные модели, так и 3D модели общей циркуляции. Временно обитаемые состояния на внешнем крае ЗПО из-за предельных циклов могут исключить сложную или даже простую жизнь в зависимости от продолжительности периодов теплых и холодных состояний. Возникновение предельных циклов будет зависеть от планетных параметров, таких как скорость дегазации CO_2 , падающий звездный поток излучения и распределение спектральной энергии родительской звезды, причем планеты, вращающиеся вокруг звезд класса F наиболее восприимчивы к таким изменениям (Haqq-Misra и др., 2016). Для выбора целей для поиска биомаркеров в атмосферах экзопланет, консервативные определения ЗПО могут быть более предпочтительными для увеличения вероятности успеха в поисках (Kasting и др., 2013), и, таким образом, предпочтения целям в наиболее ограниченных пределах ЗПО по результатам 1D и 3D моделирования могут быть приняты, в том числе с учетом предельных циклов. В любом случае обитаемая планета должна как минимум обладать жидкой водой на поверхности и одним (или более) неконденсирующимся парниковым газом, достаточным для нагревания поверхности. Наличие планеты в пределах ЗПО является необходимым,

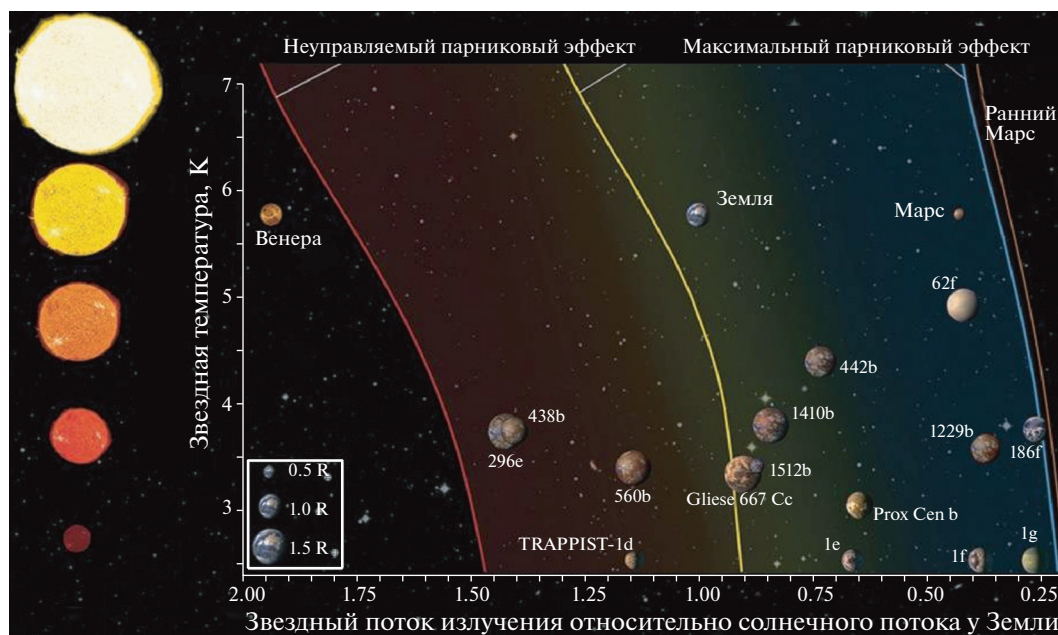


Рис. 1. Околосветовая зона потенциальной обитаемости. Планеты в ЗПО обладают способностью сохранять устойчивый слой жидкой воды на поверхности в предположении вторичной атмосферы N_2 – CO_2 – H_2O и углеродно-кремниевый цикла обратной связи (например, Kasting и др., 1993; Коррагари и др., 2013). Предположение о поверхностном слое жидкой воды важно, потому что оно предполагает наличие биосферы и в случае ее присутствия она будет находиться в прямом контакте с атмосферой, что позволит накапливать потенциально обнаруживаемые биомаркеры в атмосфере и/или на поверхности.

но не достаточным условием для обитаемости по такому определению.

Тип родительской звезды (показанный на рис. 1 слева, или ее эффективная температура) также должен учитываться при оценке потенциальной обитаемости планет. В то время как радиационно-конвективные или более продвинутые МОЦ могут предположить, что данная освещенность планеты подходит для поддержания на поверхности жидкой воды, другие факторы, которые влияют на планетную обитаемость, сильно зависят от звездной массы. Наиболее общим ограничением в этой области является время жизни звезды, так как в настоящее время распространено предположение о том, что дистанционно обнаруживаемые, подобные земной, биосферы требуют от сотен миллионов до миллиардов лет для своего развития. Если время жизни звезды короче, чем это рамочное время, то вряд ли какие-либо планеты, вращающиеся вокруг этих звезд, будут иметь необходимое время для возникновения и поддержания биомаркеров. Это требование сразу исключает звезды на главной последовательности, более яркие, чем спектральный тип F или со звездной массой более $1.4M_{\text{solar}}$.

В нижней части диапазона масс (0.075 – $0.5 M_{\text{solar}}$), звезды M-типа представляют собой наиболее распространенный и долгоживущий тип звезд в нашей Галактике, но также обладают свойствами, которые создают препятствия для обитаемости. К ним относятся катастрофические воздействия на

атмосферы экзопланет за счет ультрафиолетовой (УФ) и потоковой (вспышечной) активности этих звезд (Segura и др., 2003; Davenport и др., 2016; Ribas и др., 2016; Airapetian и др., 2017; Bisikalo и др., 2018), в особенности, на ранних стадиях их эволюции вплоть до прибытия на главную последовательность (Kulikov и др., 2007; Luger, Barnes, 2015; Tian, 2015), и влияние приливного нагрева на планетный климат для экзопланет на тесных орбитах (Driscoll, Barnes, 2015; Bolmont и др., 2017). Кроме того, низкий поток (без звездных вспышек) излучения в ближнем ультрафиолетовом (NUV) спектре M карликов может также резко ограничить скорость пребиотических фотопроцессов, создавая препятствие на пути возникновения жизни в этих мирах (Ranjan и др., 2017). Несмотря на эти опасения, имеется предварительный консенсус, позволяющий заключить, что карликовые звезды типа M действительно могут обладать потенциально обитаемыми планетами (см. Shields и др., 2016, где приведен недавний тщательный обзор пригодности для жизни планет вокруг звезд M-типа). Обычно планеты, вращающиеся в пределах ЗПО вокруг звезд FGKM-типов рассматриваются в качестве потенциальных целей для оценки обитаемости и поиска биомаркеров (см. недавние обзоры Schwieterman и др., 2018; Meadows и др., 2018, Catling и др., 2018, Walker и др., 2018, и Fujii и др., 2018).

Биомаркеры

Наиболее часто упоминаемыми биомаркерами в газовой среде представляются молекулярный кислород, O_2 , и его побочный фотохимический продукт озон O_3 , обусловленный исключительной биологической продукцией O_2 на Земле посредством фотосинтеза кислорода и сильного термодинамического и кинетического неравновесия, которое он вызывает в атмосфере (Des Marais и др., 2002). Альтернативные газы-биомаркеры, биопризнаки на поверхности и другие всеобъемлющие структуры были предложены и остаются важной частью текущих обсуждений данной проблемы (см. обзоры Schwietzman и др., 2018; Meadows и др., 2018; Catling и др., 2018; Walker и др., 2018; Fujii и др., 2018); однако по-прежнему важно полностью сравнить и проверить биомаркеры O_2/O_3 . Можно утверждать, что история Земли говорит нам, что озон O_3 является лучшим биомаркером, наблюдаемым в УФ-диапазоне, более чувствительным и последовательным показателем жизни с фотосинтезом планетарного масштаба, чем O_2 , что сводит к минимуму потенциал ложных определений.

ИСТОРИЯ КИСЛОРОДА НА ЗЕМЛЕ

Хотя молекулярный кислород (O_2) в настоящее время составляет ~20% от массы атмосферы Земли, количество O_2 в нашей атмосфере со временем значительно изменилось. Действительно, для подавляющего большинства истории Земли уровни атмосферного O_2 были на порядок ниже тех значений, которые характерны для современной Земли. Во время архейской эпохи (3.8–2.5 млрд лет назад) сохранение аномальных изотопных аномалий серы в морских осадках свидетельствует о атмосферных концентрациях O_2 значительно ниже 10^{-5} раз по сравнению с настоящим атмосферным уровнем (PAL – present atmospheric level; Farquhar и др., 2001; Pavlov, Kasting, 2002; Claire и др., 2006). Исчезновение аномалий изотопов серы в земной коре около ~2.3 млрд лет назад указывает на увеличение концентрации атмосферного O_2 (Luo и др., 2016), но ряд геохимических находок указывает на длительные периоды очень низкой концентрации атмосферного O_2 после этого первоначального подъема (Lyons и др., 2014; Planavsky и др., 2014; Cole и др., 2016).

Таким образом, возможно, что концентрация атмосферного O_2 была значительно ниже ~1% от современного значения в течение почти 90% эволюционной истории Земли. Подобно тому, как архейская Земля была представлена в качестве аналога для экзопланет подобных Земле (Arney и др., 2016), то последующая протерозойская эра (2.5–0.5 млрд лет назад), сравнимая по длительности, дает дополнительную схему для понимания потенциальных атмосферных состояний обитаемых экзопланет и фундаментальных элементов управления, которые должны определять эволюционирующие

окислительно-восстановительные состояния атмосферы для многих сложных планетных систем.

УДАЛЕННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ БИОМАРКЕРОВ O_2/O_3 В ТЕЧЕНИЕ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Молекулярный кислород (O_2) не показывает значительных спектральных характеристик в средних ИК длинах волн, но сильно поглощает в полосах А и В Фраунгофера (0.76 и 0.69 мкм, соответственно) и на длине волны 1.27 мкм. Наиболее яркой из этих особенностей является полоса А Фраунгофера, но ожидается, что наиболее заметной светимость этой полосы будет только при атмосферном уровне от ~1% PAL или выше (Des Marais и др., 2002; Segura и др., 2003). В результате, прямое обнаружение и/или количественная оценка O_2 были чрезвычайно сложными для всех времен, кроме последних ~500 миллионов лет истории Земли (Reinhard и др., 2017). Однако O_2 может быть обнаружен непосредственно при поиске признаков атмосферного O_3 . На Земле молекулы O_3 образуются в стратосфере путем фотолиза O_2 и последующей рекомбинации атомов О с молекулами O_2 из окружающего атмосферного газа, т.е. посредством сети реакций Чепмена.

Кроме того, фотохимические модели показывают, что атмосферное обилие молекул O_3 демонстрирует сильную зависимость от атмосферного O_2 в состояниях окисления, которые могут быть значительно ниже современных значений (Kasting, Donahue, 1980). Соответственно, обилие O_3 в атмосфере потенциально является очень чувствительным индикатором образования O_2 на поверхности планет земного типа с низким и средним уровнями кислорода по сравнению с существующими сегодня.

Озон обладает рядом значительных спектральных характеристик в УФ-, видимом и ИК-диапазонах длин волн. В частности, молекулы O_3 сильно поглощают излучение в полосах Хартли-Хаггинса ~0.35–0.2 мкм, и полосах Чаппиуса от 0.5 до 0.7 мкм и демонстрируют дополнительную сильную абсорбционную способность на длине волны 9.7 мкм. С точки зрения обнаружения, эта особенность молекул озона – функция поглощения Хартли-Хаггинса в близком УФ с центром при ~0.25 мкм, является наиболее важной, поскольку она чувствительна к чрезвычайно низким уровням атмосферного O_3 . Эта особенность поглощения насыщается при пиковых значениях O_3 менее ~1 ppmv, что соответствует фоновому уровню O_2 в атмосфере около 1% PAL (Reinhard и др., 2017). Это критическое наблюдение указывает на то, что возможно было бы обнаружить присутствие молекул O_2 биогенного происхождения в атмосфере с использованием функции поглощения O_3 в полосах Хартли-Хаггинса для более чем половины эволюции Земли, несмотря на отсутствие прямого обнаружения низких фоновых уровней молекул

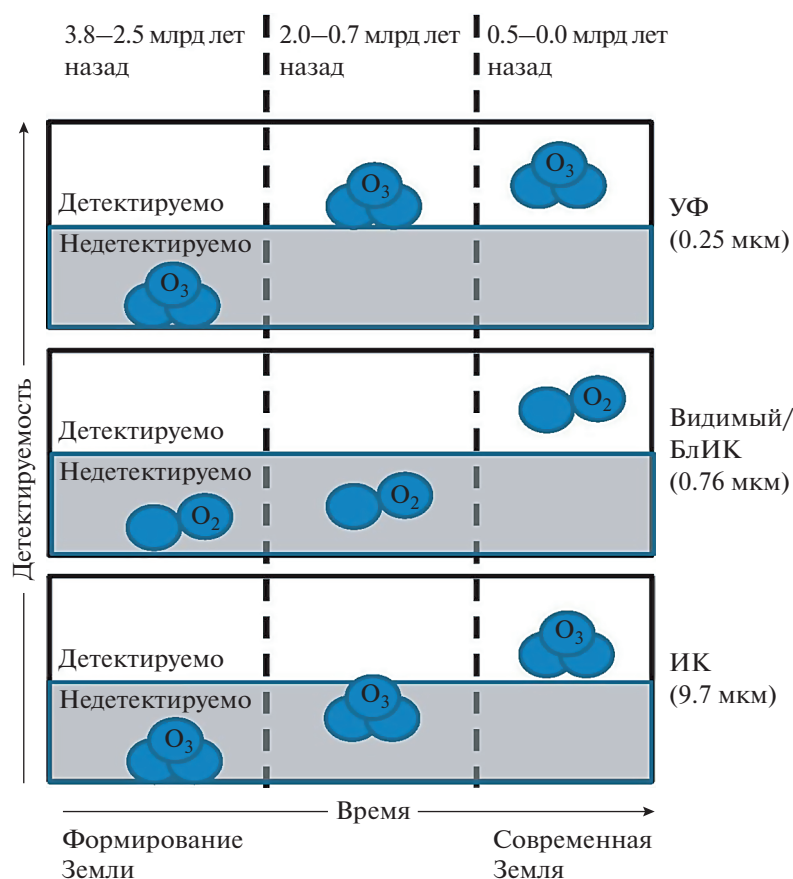


Рис. 2. Иллюстрация возможности обнаружения O_2/O_3 в УФ-, оптическом и ближнем ИК- (видимый/БЛИК) и среднем ИК-диапазонах волн, исходя из истории кислорода на Земле.

кул O_2 . На рис. 2 показано схематическое упрощенное представление о взаимосвязи между концентрациями O_2 и O_3 и консервативными оценочными порогами обнаружения в течение трех эпох истории Земли (архейской, протерозойской и фанерозойской/современной).

СМЯГЧЕНИЕ ПРОТИВ “ЛОЖНЫХ СРАБАТЫВАНИЙ”

Недавние исследования показали существование нескольких сценариев абиотического накопления O_2 и O_3 в планетных атмосферах, например, за счет высокой скорости убегания водорода или быстрого фотолиза молекул CO_2 (см. обзоры в Meadows, 2017; Meadows и др., 2018). Одно из важных наблюдений заключается в том, что в большинстве случаев потенциально обнаруживаемый абиотический O_3 легче образуется и накапливается, чем детектируемый O_2 (например, Domagal-Goldman и др., 2014). Однако наиболее убедительные сценарии для “ложноположительных” биомаркеров O_2/O_3 касаются планет на орбитах вокруг звезд типа М-карликов, которые обладают расширенными фазами перехода на основную последовательность (повышая вероят-

ность потери водорода и образования O_2) и высокими значениями потоков звездного излучения в FUV/NUV диапазонах (повышая скорость фотолиза содержащих кислород молекул, таких как CO_2). К счастью, однако, ограничения внутреннего рабочего угла (IWA) для телескопов с прямым изображением будут способствовать угловому разделению планет в потенциально обитаемых зонах, вращающихся вокруг молодых звезд К, G и F типов, где неэффективны процессы, которые могут вызвать абиотический синтез O_2/O_3 . Кроме того, отсутствие определенных спектральных индикаторов в УФ-, оптическом, ближнем ИК-диапазонах, таких как O_4 и CO , может помочь исключить эти “ложноположительные” механизмы (например, Schwieterman и др., 2016; Meadows, 2017).

Наиболее правдоподобным механизмом для абиотического образования O_2/O_3 на планетах, вращающихся вокруг звезд солнечного типа, является устойчивое убегание водорода из тонких, богатых водой атмосфер, в которых отсутствуют неконденсирующиеся газы (Wordsworth, Pierrehumbert, 2014), и для которых будут важны возможности наблюдения голубых крыльев излучения на близких УФ-длинах волн для оценки массы атмосферы через характеризацию рэлеевского

рассеяния. Эта положительная динамика усиливается за счет более высоких фотосферных температур FGK-звезд, генерирующих более высокий поток ближнего ультрафиолетового излучения и, следовательно, более высокое отношение S/N на длинах волн, относящихся к характеристике молекул O₃. Конечно, уточнение оценок спектра потока УФ излучения звезды также поможет напрямую ограничить вероятные скорости фотолитиза и полученный потенциал для абиотического образования O₂/O₃ (например, France и др., 2016). Таким образом, “ложные срабатывания” могут быть успешно смягчены как выбором цели, так и многоволновой характеристикой планеты и звезды, чему будет способствовать возможность наблюдений в УФ диапазоне излучения. Кроме того, для смягчения против “ложных отрицательных срабатываний” обнаружения O₂ потребуются УФ-наблюдения, например, при помощи космического телескопа Спектр-УФ, или, что менее эффективно, наблюдения на средних ИК длинах волн, недоступные для концепций HabEx/LUVOIR.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА СПЕКТР-УФ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

В настоящее время основным инструментом для УФ-исследований во всех областях астрономии, включая экзопланеты и их атмосферы, является Космический телескоп имени Хаббла (КТХ). Этот уникальный инструмент в течение трех последних десятилетий дает большой поток наблюдательных данных, не ограничиваясь только ультрафиолетом. Однако ресурс КТХ не безграничен, и перспективы УФ-астрономии на период 2025–2035 гг., период после завершения работы КТХ на орбите и до введения в строй крупных орбитальных обсерваторий следующего поколения, связаны с миссией WSO-UV российское название проекта – Спектр-УФ). В указанный период Спектр-УФ будет единственным орбитальным телескопом 2-метрового класса, работающим в УФ-области спектра (Sachkov и др., 2014). Основным инструментом обсерватории является телескоп с диаметром главного зеркала 1.7 м, собирающий свет от небесных объектов для блока спектрографов и блока камер поля. Блок спектрографов (инструмент WUVS, WSO-UV Spectrographs) имеет три канала (спектрографа): спектрограф высокого разрешения ($R \approx 50000$) ближней УФ-области 176–310 нм, спектрограф высокого разрешения ($R \approx 50000$) дальней УФ-области 115–178 нм, и спектрограф низкого разрешения ($R \approx 1000$) с высокой щелью (Sachkov и др., 2016). Блок камер поля служит для получения прямых изображений в ближней УФ-области 176–310 нм и дальней УФ-области 115–178 нм. По своим характеристикам проект соответствует КТХ, но в отличие от КТХ все наблюдательное время Спектр-УФ посвящено УФ-астрономии. Кроме того, проект Спектр-УФ будет работать на геостационарной орбите, практически над радиационными пояса-

ми Земли и земной геосферой, которая сама является источником УФ-излучения и значительно затрудняет проведение таких исследований.

Экзопланетные исследования занимают значительную часть базовой программы Спектр-УФ (Panchuk и др., 2015; Fossati и др., 2014). Если все экзопланетные исследования условно сгруппировать по четырем направлениям: а) обнаружение планет; б) исследование формирования планет в протопланетных дисках; в) определение физических характеристик планет; г) определение химического состава планетных атмосфер, включая биомаркеры, то аппаратура миссии Спектр-УФ идеально подходит для решения последних трех из перечисленных задач. Кроме того, сами экзопланеты являются хорошим инструментом для исследования свойств родительских звезд, и в данном направлении с помощью космического телескопа Спектр-УФ также ожидаются прорывные результаты.

Ограниченность результатов, полученных на КТХ, связана в первую очередь с влиянием радиационных поясов и экзосферы Земли на наблюдательные данные. Как уже было отмечено, Спектр-УФ будет работать на геостационарной орбите и, следовательно, будет свободен от такого негативного влияния. Преимущества орбиты Спектр-УФ, позволяющие проводить детальный длительный мониторинг экзопланеты до и после транзита, будут определяющими. Прямые определения содержания атомарного кислорода по спектральной УФ-линии OI 130.5 нм (Tavrov и др., 2018), практически свободные от влияния земной геокороны, а также прямое определение присутствия озона O₃ по поглощению в ближней УФ-области (<350 нм) с помощью инструментов Спектр-УФ позволят получить прорывные данные для исследования возможности присутствия жизни на экзопланетах.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Удаленные наблюдения Земли не смогли бы обнаружить O₂ на протяжении 90% своей эволюционной истории, если бы они были ограничены только оптической и ближней инфракрасной областями излучения. Напротив, чувствительность к излучению на УФ-длинах волн позволило обнаружить O₃, и таким образом, отпечатать присутствие O₂ в земной атмосфере за половину времени жизни нашей планеты. Нет никакой гарантии в том, что обитаемые или необитаемые экзопланеты будут похожи на Землю или повторяют эволюцию ее атмосферы, но если возьмем нашу планету как информативный пример, то становится ясно, что пороговые значения обнаружения $pO_2 > 1\%$ PAL или выше могут обеспечить потенциал для обнаружения жизни на планетах с промежуточными состояниями окисления (10^{-5} PAL < pO_2 < 1% PAL).

Будущие исследования должны тщательно сочетать моделируемые планетные спектры и реа-

листочные инструментальные характеристики для космических телескопов с возможностями наблюдений в УФ-диапазоне длин волн. В качестве вспомогательного доказательства космический аппарат NASA LCROSS позволил обнаружить молекулы O₃ в дистанционных наблюдениях Земли (Robinson и др., 2014). Кроме того, ультрафиолетовые длины волн обеспечивают более благоприятные требования IWA, чем оптические или вблизи инфракрасных наблюдений как для конструкций с коронографом, так и на основе затмения звезды (Seager и др., 2015; Robinson и др., 2016), позволяя обследовать большее количество планет и вероятно больший выход биомаркеров (например, Stark и др., 2014). Важно отметить, что “ложноположительные” абисинтезы O₃ могут быть смягчены с помощью целевого отбора и многоволновой планетной характеристики (включая УФ-диапазон), а “ложноотрицательные срабатывания” обнаружения O₂ не могут быть устранены без УФ-наблюдений.

Работа В.И. Шематовича выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-00721) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боярчук А.А., Шустов Б.М., Саванов И.С., Сачков М.Е., Бисикало Д.В., Машонкина Л.И., Виле Д.З., Шематович В.И., Шекинов Ю.А., Рябчикова Т.А., Чугай Н.Н., Иванов П.Б., Воинович Н.В., Гомез де Кастро А.И., Ламзин С.А., Пискунов Н., Айрес Т., Штрамммайер К.Г., Джеффри С., Цвинциц С.К., Шуляк Д., Жерар Ж.-К., Хуберт Б., Фоссати Л., Ламмер Х., Вернер К., Жилкин А.Г., Кайгородов П.В., Сичевский С.Г., Устамуич С., Канев Е.Н., Кильпио Е.Ю. Научные задачи космического проекта “Спектр-УФ” (“Всемирная Космическая Обсерватория – Ультрафиолет”) // *Астрон. журн.* 2016. Т. 60. С. 3–48.
- Abe Y., Abe-Ouchi A., Sleep N.H., Zahnle K.J. Habitable zone limits for dry planets // *Astrobiology*. 2011. V. 11. P. 443–460.
- Airapetian V.S., Glocer A., Khazanov G.V., Loyd R.O.P., France K., Sojka J., Danchi W.C., Liemohn M.W. How hospitable are space weather affected habitable zones? The role of ion escape // *Astrophys. J.* 2017. V. 836. P. L3–L8.
- Anglada-Escude G., Amado P.J., Barnes J., Berdinas Z.M., Butler R.P., Coleman G.A.L., de la Cueva I., Dreizler S., Endl M., Giesers B., Jeffers S.V., Jenkins J.S., Jones H.R.A., Kiraga M., Kuerster M., Lopez-Gonzalez M.J., Marvin C.J., Morales N., Morin J., Nelson R.P., Ortiz J.L., Ofir A., Paardekooper S.-J., Reiners A., Rodriguez E., Rodriguez-Lopez C., Sarmiento L.F., Strachan J.P., Tsapras Y., Tuomi M., Zechmeister M. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri // *Nature*. 2016. V. 536. P. 437–440.
- Arney G., Domagal-Goldman S.D., Meadows V.S., Wolf E.T., Schwieterman E., Charnay B., Claire M., Hebrard E., Trainer M.G. The pale orange dot: the spectrum and habitability of hazy Archean Earth // *Astrobiology*. 2016. V. 16. P. 873–899.
- Batalha N.M. Exploring exoplanet populations with NASA’s Kepler mission // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2014. V. 111. P. 12647–12654.
- Bisikalo D.V., Shematovich V.I., Cherenkov A.A., Fossati L., Moestl C. Atmospheric mass loss from hot Jupiters irradiated by stellar superflares // *Astrophys. J.* 2018. V. 869. P. id. 108.
- Bolcar M.R., Aozos S., Bly V.T., Collins C., Crooke J., Dressing C.D., Fantano L., Feinberg L.D., France K., Gochar G., Gong Q., Hylan J. E., Jones A., Linares I., Postman M., Pueyo L., Roberge A., Sacks L., Tompkins S., West G. The Large UV/Optical/Infrared Surveyor (LUVOIR): Decadal Mission concept design update // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10398. P. id. 1039809 (24 p).
- Bolmont E., Gallet F., Mathis S., Charbonnel C., Amard L., Alibert Y. Tidal dissipation in rotating low-mass stars and implications for the orbital evolution of close-in massive planets // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 604. P. A113.
- Catling D.C., Krissansen-Totton J., Kiang N.Y., Crisp D., Robinson T.D., DasSarma S., Rushby A.J., Del Genio A., Bains W., Domagal-Goldman S. Exoplanet biosignatures: A framework for their assessment // *Astrobiology*. 2018. V. 18. P. 709–738.
- Claire M., Catling D., Zahnle K. Biogeochemical modelling of the rise in atmospheric oxygen // *Geobiology*. 2006. V. 4. P. 239–269.
- Cole D.B., Reinhard C.T., Wang X., Gueguen B., Halverson G.P., Gibson T., Hodgskiss M.S., McKenzie N.R., Lyons T.W., Planavsky N.J. A shale-hosted Cr isotope record of low atmospheric oxygen during the Proterozoic // *Geology*. 2016. V. 44. P. 555–558.
- Davenport J.R.A., Kipping D.M., Sasselov D., Matthews J.M., Cameron C. MOST observations of our nearest neighbor: Flares on Proxima Centauri // *Astrophys. J.* 2016. V. 829. P. L31–L36.
- Des Marais D.J., Harwit M.O., Jucks K.W., Kasting J.F., Lin D.N.C., Lunine J.I., Schneider J., Seager S., Traub W.A., Woolf N.J. Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets // *Astrobiology*. 2002. V. 2. P. 153–181.
- Dittmann J.A., Irwin J.M., Charbonneau D., Bonfils X., Astudillo-Defru N., Haywood R.D., Berta-Thompson Z.K., Newton E.R., Rodriguez J.E., Winters J.G., Tan, T., Almenara J., Bouchy F., Delfosse X., Forveille T., Lovis C., Murgas F., Pepe F., Santos N.C., Udry S., Wunsche A., Esquerdo G.A., Latham D.W., Dressing C.D. A temperate rocky super-Earth transiting a nearby cool star // *Nature*. 2017. V. 544. P. 333–336.
- Domagal-Goldman S.D., Segura A., Claire M.W., Robinson T.D., Meadows V.S. Abiotic ozone and oxygen in atmospheres similar to prebiotic Earth // *Astrophys. J.* 2014. V. 792. P. article id. 90 (15 p).
- Driscoll P., Barnes R. Tidal heating of earth-like exoplanets around m stars: thermal, magnetic, and orbital evolutions // *Astrobiology*. 2015. V. 15. P. 739–760.
- Farquhar J., Savarino J., Airieau S., Thieme M.H. Observation of wavelength-sensitive mass independent sulfur isotope effects during SO₂ photolysis: Implications for the early atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 829–839.
- France K., Loyd R.O.P., Youngblood A., Brown A., Schneider P.C., Hawley S.L., Froning C.S., Linsky J.L., Roberge A., Buccino A.P., Davenport J.R.A., Fontenla J.M., Kaltenegger L., Kowalski A.F., Mauas P.J.D., Miguel Y., Redfield S., Rugheimer S., Tian F., Vieytes M.C., Walkowicz L.M., Weisenburger K.L. The MUSCLES Treasury Survey. I. Motivation and Overview // *Astrophys. J.* 2016. V. 820. P. id. 89, (24 p).
- Fossati L., Bisikalo D., Lammer H., Shustov B., Sachkov M. Major prospects of exoplanet astronomy with the World

- Space Observatory-Ultraviolet mission // *Astrophys. and Space Sci.* 2014. V. 354. P. 9–19.
- Fujii Y., Angerhausen D., Deitrick R., Domagal-Goldman S.D., Grenfell J.L., Hori Y., Kane S.R., Pallé E., Rauer H., Siegler N., Stapelfeldt K., Stevenson B. Exoplanet biosignatures: observational prospects // *Astrobiology*. 2018. V. 18. P. 739–778.
- Gaudi B.S., Mennesson B., Seager S., Cahoy K., Clarke J., Domagal-Goldman S., Feinberg L., Guyon O., Kasdin J., Marois C., Mawet D., Tamura M., Mouillet D., Prusti T., Quirrenbach A., Robinson T., Rogers L., Scowen P., Somerville R., Stapelfeldt K., Stark C., Stern D., Still M., Turnbull M., Booth J., Kiessling A., Kuan G., Warfield K. The Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10698. P. id. 106980P (9 p).
- Gillon M., Triaud A.H.M.J., Demory B.-O., Jehin E., Agol E., Deck K.M., Lederer S.M., de Wit J., Burdanov A., Ingalls J.G., Bolmont E., Lecote J., Raymond S.N., Selsis F., Turbet M., Barakoui K., Burgasser A., Burleigh M.R., Carey S.J., Chaushev A., Copperwheat C.M., Delrez L., Fernandes C.S., Holdsworth D.L., Kotze E.J., Van Grootel V., Almléaky Y., Benkhaldoun Z., Magain P., Queloz D. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1 // *Nature*. 2017. V. 542. P. 456–460.
- Haqq-Misra J., Kopparapu R.K., Batalha N.E., Harman C.E., Kasting J.F. Limit cycles can reduce the width of the Habitable Zone // *Astrophys. J.* 2016. V. 827. P. article id. 120 (10p).
- Kane S.R., Hill M.L., Kasting J.F., Kopparapu R.K., Quintana E.V., Barclay T., Batalha N.M., Borucki W.J., Ciardi D.R., Haghighipour N., Hinkel N.R., Kaltenegger L., Selsis F., Torres G. A Catalog of Kepler Habitable Zone Exoplanet Candidates // *Astrophys. J.* 2016. V. 830. Article id. 1 (10 p).
- Kasting J.F., Donahue T.M. The evolution of atmospheric ozone // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 3255–3263.
- Kasting J.F., Whitmire D.P., Reynolds R.T. Habitable zones around main sequence stars // *Icarus*. 1993. V. 101. P. 108–128.
- Kasting J.F., Kopparapu R., Ramirez R.M., Harman C.E. Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2013. V. 111. P. 1–6.
- Kawahara H., Matsuo T., Takami M., Fujii Y., Kotani T., Murakami N., Tamura M., Guyon O. Can ground-based telescopes detect the oxygen 1.27 mm absorption feature as a biomarker in exoplanets? // *Astrophys. J.* 2012. V. 758. P. 13.
- Kopparapu R.K., Ramirez R., Kasting J.F., Eymet V., Robinson T.D., Mahadevan S., Terrien R.C., Domagal-Goldman S., Meadows V., Deshpande R. Habitable zones around main-sequence stars: new estimates // *Astrophys. J.* 2013. V. 765. P. 131 (16p).
- Kopparapu R.K., Ramirez R.M., Schotte-Kotte J., Kasting J.F., Domagal-Goldman S., Eymet V. Habitable zones around main-sequence stars: dependence on planetary mass // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. P. L29–L33.
- Kopparapu R.K., Wolf E.T., Haqq-Misra J., Yang J., Kasting J.F., Meadows V., Terrien R., Mahadevan S. The inner edge of the habitable zone for synchronously rotating planets around low-mass stars using general circulation models // *Astrophys. J.* 2016. V. 819. P. article id. 84 (14 p).
- Kulikov Yu.N., Lammer H., Lichtenegger H.I.M., Penz T., Breuer D., Spohn T., Lundin R., Biernat H.K. A comparative study of the influence of the active young Sun on the early atmospheres of Earth, Venus, and Mars // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 129. P. 207–243.
- Lammer H. Origin and Evolution of Planetary Atmospheres: Implications for Habitability. Springer Briefs in Astronomy. Berlin: Springer, 2013.
- Lammer H., Bredehoeft J.H., Coustenis A., Khodachenko M.L., Kaltenegger L., Grasset O., Prieur D., Raulin F., Ehrenfreund P., Yamauchi M., Wahlund J.-E., Grießmeier J.-M., Stangl G., Cockell C.S., Kulikov Y.N., Grenfell J.L., Rauer H. What makes a planet habitable? // *Astron. and Astrophys. Rev.* 2009. V. 17. P. 181–249.
- Lissauer J., Jontof-Hutter D., Rowe J., Fabrycky D.C., Lopez, E.D., Agol E., Marcy G.W., Deck K.M., Fischer D.A., Fortney J.J., Howell S.B., Isaacson H., Jenkins J. M., Kolbl R., Sasselov D., Short D.R., Welsh W.F. All six planets known to orbit Kepler-11 have low densities // *Astrophys. J.* 2013. V. 770. P. 1–15.
- Lovis C., Snellen I., Mouillet D., Pepe F., Wildi F., Astudillo-Defru N., Beuzit J.-L., Bonfils X., Cheetham A., Conod U., Delfosse X., Ehrenreich D., Figueira P., Forveille T., Martins J.H.C., Quanz S., Santos N.C., Schmid H.-M., Segransan D., Udry S. Atmospheric characterization of Proxima b by coupling the SPHERE high contrast imager to the ESPRESSO spectrograph // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 599. P. A16.
- Luger R., Barnes R. Extreme water loss and abiotic O₂ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs // *Astrobiology*. 2015. V. 15. P. 119–143.
- Luger R., Barnes R., Lopez E., Fortney J., Jackson B., Meadows V. Habitable evaporated cores: Transforming mini-Neptunes into super-Earths in the habitable zones of M dwarfs // *Astrobiology*. 2015. V. 15. P. 57–88.
- Luo G., Ono S., Beukes N.J., Wang D.T., Xie S., Summons R.E. Rapid oxygenation of Earth's atmosphere 2.33 billion years ago // *Science Advances*. 2016. V. 2. P. e1600134–e1600134.
- Lyons T.W., Reinhard C.T., Planavsky N.J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere // *Nature*. 2014. V. 506. P. 307–315.
- Meadows V.S. Reflections on O₂ as a biosignature in exoplanetary atmospheres // *Astrobiology*. 2017. V. 17. P. 1022–1052.
- Meadows V.S., Reinhard C.T., Arney G.N., Parenteau M.N., Schwieterman E.W., Domagal-Goldman S.D., Lincowski A.P., Stapelfeldt K.R., Rauer H., DasSarma S., Hegde S., Narita N., Deitrick R., Lustig-Yaeger J., Lyons T.W., Siegler N., Grenfell J.L. Exoplanet Biosignatures: Understanding Oxygen as a Biosignature in the Context of Its Environment // *Astrobiology*. 2018. V. 18. P. 630–662.
- Mennesson B., Gaudi S., Seager S., Cahoy K., Domagal-Goldman S., Feinberg L., Guyon O., Kasdin J., Marois C., Mawet D., Tamura M., Mouillet D., Prusti T., Quirrenbach A., Robinson T., Rogers L., Scowen P., Somerville R., Stapelfeldt K., Stern D., Still M., Turnbull M., Booth J., Kiessling A., Kuan G., Warfield K. The Habitable Exoplanet (HabEx) Imaging Mission: preliminary science drivers and technical requirements // *Proc. SPIE*. 2016. V. P. 99040L.
- Morton T.D., Bryson S.T., Coughlin J.L., Rowe J.F., Ravichandran G., Petigura E.A., Haas M.R., Batalha N.M. False positive probabilities for all kepler objects of interest: 1284 newly validated planets and 428 likely false positives // *Astrophys. J.* 2016. V. 822. P. 86.
- Noack L., Höning D., Rivoldini A., Heistracher C., Zimov N., Journaux B., Lammer H., Van Hoolst T., Bredehoeft J.H. Water-rich planets: How habitable is a water layer deeper than on Earth? // *Icarus*. 2016. V. 277. P. 215–236.

- Panchuk V.E., Klochkova V.G., Sachkov M.E., Yushkin M.V.* Doppler methods of search and monitoring of exoplanets // *Sol. Syst. Res.* 2015. V. 49. P. 420–429.
- Paradise A., Menou K.* GCM simulations of unstable climates in the habitable zone // *Astrophys. J.* 2017. V. 848. P. article id. 33 (10 p).
- Pavlov A.A., Kasting J.F.* Mass-independent fractionation of sulfur isotopes in Archean sediments: strong evidence for an anoxic Archean atmosphere // *Astrobiology.* 2002. V. 2. P. 27–41.
- Pierrehumbert R., Gaidos E.* Hydrogen greenhouse planets beyond the habitable zone // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 734. P. L13–L17.
- Planavsky N.J., Reinhard C.T., Wang X., Thomson D., McGoldrick P., Rainbird R.H., Johnson T., Fischer W.W., Lyons T.W.* Low mid-proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals // *Science.* 2014. V. 346. P. 635–638.
- Ranjian S., Wordsworth R.D., Sasselov D.D.* The surface UV environment on planets orbiting M-dwarfs: implications for prebiotic chemistry & need for experimental follow-up // *LPI Contribution* 2018. № 2083. P. id. 2021 (arXiv:preprint 1705.02350).
- Reinhard C.T., Olson S.L., Schwieterman E.W., Lyons T.W.* False negatives for remote life detection on ocean-bearing planets: lessons from the early earth // *Astrobiology.* 2017. V. 17. P. 287–297.
- Ribas I., Bolmont E., Selsis F., Reiners A., Leconte J., Raymond S.N., Engle S.G., Guinan E.F., Morin J., Turbet M., Forget F., Anglada-Escude G.* The habitability of Proxima Centauri b // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 596. P. A111.
- Robinson T.D., Ennico K., Meadows V.S., Sparks W., Bussey D.B.J., Schwieterman E.W., Breiner J.* Detection of ocean glint and ozone absorption using LCROSS Earth Observations // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. P. 171.
- Robinson T.D., Stapelfeldt K.R., Marley M.S.* Characterizing rocky and gaseous exoplanets with 2m class space-based coronagraphs // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2016. V. 128. P. 025003.
- Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I.* Instrumentation of the WSO-UV project // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9144. P. id. 914402 (7 p.).
- Sachkov M., Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T.* Optical design of WUVS instrument: WSO-UV spectrographs // *Proc. SPIE.* 2016. V. 9905. P. id.990537 (6 p).
- Schwieterman E.W., Meadows V.S., Domagal-Goldman S.D., Deming D., Arney G.N., Luger R., Harman C.E., Misra A., Barnes R.* Identifying planetary biosignature impostors: spectral features of CO and O₄ resulting from abiotic O₂/O₃ production // *Astrophys. J.* 2016. V. 819. P. L13–L17.
- Schwieterman E., Kiang N., Parenteau M., Harman C.E., DasSarma S., Fisher T.M., Arney G.N., Hartnett H.E., Reinhard C.T., Olson S.L., Meadows V.S., Cockell C.S., Walker S.I., Grenfell J.L., Hegde S., Rugheimer S., Hu R., Lyons T.W.* Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life // *Astrobiology.* 2018. V. 18. P. 663–708.
- Seager S.* Exoplanet habitability // *Science.* 2013. V. 340. P. 577–581.
- Seager S., Turnbull M., Sparks W., Thomson M., Shaklan S.B., Roberge A., Kuchner M., Kasdin N.J., Domagal-Goldman S., Cash W., Warfield K., Lisman D., Scharf D., Webb D., Trabant R., Martin S., Cady E., Heneghan C.* The Exo-S probe class starshade mission // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9605. P. 96050W.
- Segura A., Krelove K., Kasting J.F., Sommerlatt D., Meadows V., Crisp D., Cohen M., Mlawer E.* Ozone concentrations and ultraviolet fluxes on Earth-like planets around other stars // *Astrobiology.* 2003. V. 3. P. 689–708.
- Shields A.L., Bitz C.M., Meadows V.S., Joshi M.M., Robinson T.D.* Spectrum-driven planetary deglaciation due to increases in stellar luminosity // *Astrophys. J.* 2014. V. 785. P. L9–L12.
- Shields A.L., Ballard S., Johnson J.A.* The habitability of planets orbiting M-dwarf stars // *Phys. Rep.* 2016. V. 663. P. 1–38.
- Stark C.C., Roberge A., Mandell A., Robinson T.D.* Maximizing the ExoEarth candidate yield from a future direct imaging mission // *Astrophys. J.* 2014. V. 795. P. article id. 122 (20p.).
- Stevenson D.* Life-sustaining planets in interstellar space? // *Nature.* 1999. V. 400. P. 32.
- Stevenson K.B., Lewis N.K., Bean J.L., Beichman C., Fraine J., Kilpatrick B.M., Krick J.E., Lothringer J.D., Mandell A.M., Valenti J.A., Agol E., Angerhausen D., Barstow J.K., Birkmann S.M., Burrows A., Charbonneau D., Cowan N.B., Crouzet N., Cubillos P.E., Curry S.M., Dalba P.A., de Wit J., Deming D., Desert J.-M., Doyon R., Dragomir D., Ehrenreich D., Fortney J.J., Muñoz A.G., Gibson N.P., Gizis J.E., Greene T.P., Harrington J., Heng K., Kataria T., Kempton E.M.-R., Knutson H., Kreidberg L., Lafreniere D., Lagage P.-O., Line M.R., Lopez-Morales M., Madhusudhan N., Morley C.V., Rocchetto M., Schlawin E., Shkolnik E.L., Shporer A., Sing D.K., Todorov K.O., Tucker G.S., Wakeford H.R.* Transiting exoplanet studies and community targets for JWST's Early Release Science Program // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 2016. V. 128. P. 94401.
- Tian F.* History of water loss and atmospheric O₂ buildup on rocky exoplanets near M dwarfs // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 432. P. 126–132.
- Tavrov A., Kameda S., Yudaev A., Dzyuban I., Kiselev A., Shashkova I., Korablev O., Sachkov M., Nishikawa J., Tamura M., Go M., Keigo E., Ikoma M., Narita N.* Stellar Imaging Coronagraph and Exoplanet Coronal Spectrometer: Two Additional Instruments for Exoplanet Exploration Onboard The WSO-UV 1.7 Meter Orbital Telescope // *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Systems.* 2018. V. 4. P. 044001.
- Walker S.I., Bains W., Cronin L., DasSarma S., Danielache S., Domagal-Goldman S., Kacar B., Kiang N.Y., Lenardic A., Reinhard C.T., Moore W., Schwieterman E.W., Shkolnik E.L., Smith H.B.* Exoplanet biosignatures: future directions // *Astrobiology.* 2018. V. 18. P. 779–824.
- Wolf E.T.* Assessing the habitability of the TRAPPIST-1 system using a 3D climate model // *Astrophys. J.* 2017. V. 839. P. L1–L9.
- Wordsworth R., Pierrehumbert R.* Abiotic oxygen dominated atmospheres on terrestrial habitable zone planets // *Astrophys. J.* 2014. V. 785. P. L20–L24.
- Yang J., Boue G., Fabrycky D.C., Abbot D.S.* Strong dependence of the inner edge of the habitable zone on planetary rotation rate // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. P. L2–L6.
- Yang J., Cowan N.B., Abbot D.S.* Stabilizing cloud feedback dramatically expands the habitable zone of tidally locked planets // *Astrophys. J. Lett.* 2013. V. 771. P. L45–L49.
- Zsom A., Seager S., de Wit J., Stamenkovic V.* Toward the minimum inner edge distance of the habitable zone // *Astrophys. J.* 2013. V. 778. P. article id. 109(17p.).