

ЗОНЫ ОБИТАЕМОСТИ. ОТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ К ЭКЗОПЛАНЕТАМ



АНАНЬЕВА Владислава Игоревна

ТАВРОВ Александр Викторович,

доктор технических наук

ПЕТРОВА Елена Владимировна,

кандидат физико-математических наук

КОРАБЛЁВ Олег Игоревич,

член-корреспондент Российской академии наук

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394820030044

Поиск внеземной жизни, особенно разумной – сложная междисциплинарная проблема на стыке астрономии, биологии, социологии и теории информации. Поскольку до сих пор зарождение жизни до конца еще не понято и не воспроизведено в лаборатории, остается неясной доля случайности в этом процессе. Возможно, жизнь зарождается всегда в подходящих для этого условиях, и тогда задача молекулярной биологии – предсказать эти условия. Однако не исключено, что самозарождение жизни – крайне маловероятное событие, счастливая случайность, произошедшая только раз на древней Земле. Поэтому поиск внеземной жизни имеет и огромное мировоззренческое значение, помогая определить место Человека во Вселенной.

Не касаясь проблем, находящихся в компетенции биологии, очертим круг задач, стоящих в поисках внеземной жизни перед астрономией. Прежде всего – это поиск потенциально обитаемых планет, то есть планет, подходящих для жизни в той форме, которая нам известна, и оценка их распространенности.

К настоящему моменту открыто более 4000 экзопланет, обращающихся по орбитам вокруг других звезд. Среди них – планеты-гиганты, напоминаю-

щие Юпитер и Сатурн; аналоги Урана и Нептуна; планеты размером с Землю, но настолько горячие, что их поверхность представляет собой сплошной

лавовый океан. Также известно множество планет, не имеющих аналога в Солнечной системе: например, суперземли и мининептуны, то есть планеты, чьи масса и радиус оказываются промежуточными между массой и радиусом Земли и Урана. Точной копии Земли до сих пор не найдено, но это не удивительно – мир планет оказался гораздо разнообразнее мира звезд.

Какие же планеты принято считать потенциально обитаемыми?

Для того, чтобы на планете могла существовать жизнь, необходимо, чтобы на ней была жидкая вода, – та жизнь, которую мы знаем, без воды немыслима. Но вода может быть жидкой лишь в определенном диапазоне температур и давлений. Область вокруг звезды, где на поверхности планеты может существовать жидкая вода, называется обитаемой зоной. В англоязычной литературе ее принято называть *habitable zone* или «зоной Златовласки», в честь английской сказки *Goldilocks and the Three Bears*. По ее сюжету Златовласка пытается воспользоваться несколькими наборами из трех однородных предметов, в каждом из которых один из предметов оказывается по какому-либо параметру избыточным (большим, твердым, горячим), другой – недостаточным (маленьким, мягким, холодным), а третий, промежуточный, приходится «в самый раз».



Так и тут: чтобы оказаться в обитаемой зоне, планета не должна находиться ни слишком далеко от звезды, ни слишком близко к ней, а на «правильном» удалении. Отметим, что условие «жидкой воды» является необходимым, но не достаточным – кроме воды для жизни необходима органика и ряд критически важных элементов (азот, калий, фосфор, сера, цинк, марганец и ряд других), а также источник энергии.

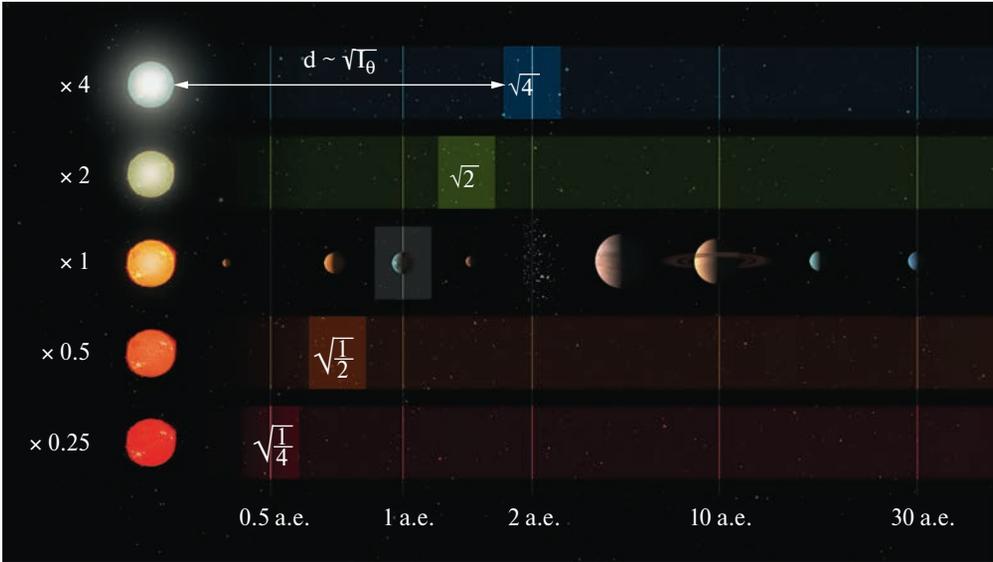
Проще всего оценить расположение обитаемой зоны можно, извлекая квадратный корень из светимости звезды, выраженной в единицах светимости Солнца.

Если звезда вчетверо ярче Солнца, то ее обитаемая зона расположена вдвое дальше, чем Земля от Солнца. А если звезда светит в сто раз слабее, ее обитаемая зона будет в десять раз ближе к звезде.

Более 70% звезд Галактики являются тусклыми красными карликами, и их обитаемые зоны «тесно прижаты» к своим (родительским) звездам, что создает определенные трудности. В частности, на таких малых расстояниях велики приливные силы, приводящие к захвату планет в орбитально-вращательный резонанс 1:1 – то есть планеты повернуты к своим звездам только одной стороной, как Луна к Земле. Одно полушарие приливо захваченной планеты погружено

в вечную ночь, на другом царит вечный день.

Понятие обитаемой зоны позволяет быстро оценивать потенциальную обитаемость планеты (попадает ли она в климатический оптимум, или же на ней слишком жарко или холодно). Однако это понятие куда сложнее, чем кажется на первый взгляд.



Положение зоны обитаемости у звезды, рассчитанное на основе ее светимости в единицах светимости Солнца ($3,86 \cdot 10^{26}$ Вт или $3,86 \cdot 10^{33}$ эрг/с). Источник: Википедия

Обычно неявно подразумевается, что планета, потенциальную обитаемость которой мы обсуждаем, – точная копия Земли. Однако свойства планет очень разнообразны, и планеты неизбежно отличаются друг от друга массой, размерами, составом и плотностью атмосферы, наличием или отсутствием магнитного поля, скоростью вращения, и т.п. Свойства планеты значительно влияют на ее климат даже при условии заданного уровня освещенности. Так, планета может обладать плотной атмосферой, создающей мощный парниковый эффект (хороший пример тому – Венера). Планета может содержать мало воды, а может быть покрыта глобальным океаном глубиной в сотни километров. Если все это учесть, окажется, что размеры и положение обитаемой зоны зависят не только от светимости звезды, но и от свойств планеты.

Итак, первое. Планета должна обладать оптимальными размерами и массой.

Маломассивная планета не удержит атмосферу, или же эта атмосфера будет слишком разреженной, чтобы вода на ней смогла находиться в жидком состоянии. В качестве примера можно привести Луну, расположенную в обитаемой зоне, но каменистую, безводную и безжизненную. Минимально возможная масса планеты, еще способной удержать атмосферу и воду в обитаемой зоне, оценивается в 2,7% от массы Земли (что меньше массы Марса!). Однако такая планета должна иметь химический состав, отличный от планет земной группы, но близкий к составу крупных спутников планет-гигантов – примерно 40% ее массы должно приходиться на воду. Такая планета будет покрыта глобальным океаном глубиной в сотни километров.

Планета, расположенная в зоне обитаемости, не должна быть и слишком большой. За последнее десятилетие космические телескопы «Кеплер» и TESS обнаружили тысячи транзитных планет с радиусами 1,8–3 радиуса

Земли. В подавляющем большинстве это мини-нептуны с протяженными и плотными водородно-гелиевыми атмосферами. Даже если такая планета расположена в обитаемой зоне и окутана облаками из водяного льда (например, K2-18 b), она не может быть обитаемой из-за колоссального давления и мощного парникового эффекта, создаваемого у поверхности такой атмосферой. Мининептуном может оказаться даже планета с массой 3–5 масс Земли (Kepler-29 b, Kepler-79 e, Kepler-47 c и др.). Известен «зазор Фултона» – резкий дефицит планет с радиусами в интервале от 1,5 до 2 радиусов Земли, который маркирует переходную зону между планетами земного типа и мининептунами (см. стр. 12 – *Прим. ред.*). Уже при радиусе больше 1,5 земных планеты сохраняют первичные протяженные водородно-гелиевые атмосферы и не могут считаться потенциально обитаемыми. По всей видимости, Земля по своим размерам и массе находится недалеко от верхней границы потенциально обитаемых планет.

Пусть масса и радиус планеты близки к массе и радиусу Земли, а ее атмосфера имеет ту же плотность. Какой уровень освещенности еще допустим, чтобы вода на поверхности планеты оставалась жидкой? Оказалось, что положение внутренней границы обитаемой зоны зависит от запасов воды. Как показали расчеты, выполненные в 2019 г. Т. Кодамой (сотрудник Центра по исследованию системной динамики поверхности Земли, атмосферы и океана Токийского университета, Япония) и коллегами, если планета покрыта океанами, уже при освещенности, на 30% превышающей земную, начинается катастрофический парниковый эффект, обусловленный водяным паром. Испарение океанов увеличивает парниковый эффект, а возросшие температуры способствуют дальнейшему испа-

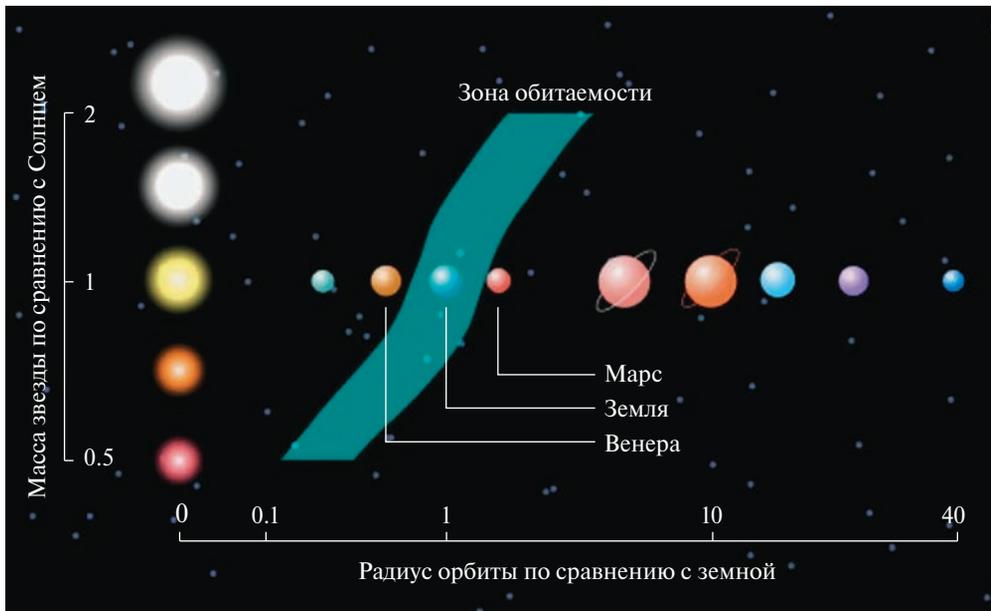
рению океанов, в результате все океаны выкипают, и планета превращается в безжизненный аналог Венеры.

С другой стороны, если воды на планете мало (на два порядка меньше, чем на Земле), и она собрана в отдельные озера, срыв климата в катастрофический парниковый эффект происходит только при освещенности, на 55% превышающей освещенность на орбите Земли. В числе прочего это означает, что, хотя в настоящее время Венера находится за пределами даже оптимистической обитаемой зоны, в течение первого миллиарда лет существования Солнечной системы, когда светимость молодого Солнца была на 30% меньше нынешней, она находилась внутри нее и могла быть населена микроорганизмами.

Какова внешняя граница обитаемой зоны?

На этот счет мнения ученых расходятся. Плотная углекислотная атмосфера на планете земного типа способна обеспечить мощный парниковый эффект. Однако при низком уровне освещенности углекислота начинает выпадать на поверхность сухим льдом, увеличивая альбедо планеты и уменьшая температуру. По расчетам Р.К. Коппарату (университет штат Пенсильвания, США) и его коллег, максимальное расстояние, на котором планета земного типа еще может сохранить на поверхности жидкую воду, составляет ~1,7 а.е., то есть там, где освещенность составляет ~0,343 от инсоляции на орбите Земли. Давление углекислотной атмосферы при этом должно достигать ~8 атм. Дальнейшее увеличение количества углекислого газа не увеличит, а, напротив, уменьшит температуру поверхности планеты из-за конденсации сухого льда (нечто похожее происходит ежегодно в зимнем полушарии Марса).

Но самое удивительное в том, что внешней границы обитаемой зоны может не быть вовсе!



Положение зоны обитаемости в зависимости от массы звезды в единицах массы Солнца ($1,989 \cdot 10^{30}$ кг)

В недрах многих ледяных спутников планет-гигантов скрывается подледный океан. Из трещин в ледяной коре Энцелада, спутника Сатурна, непрерывно бьют гейзеры.

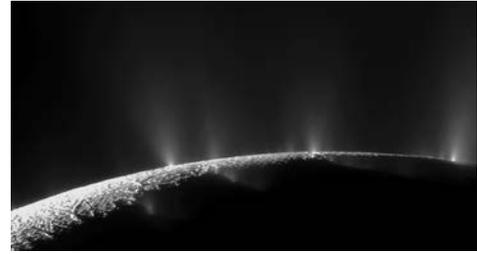
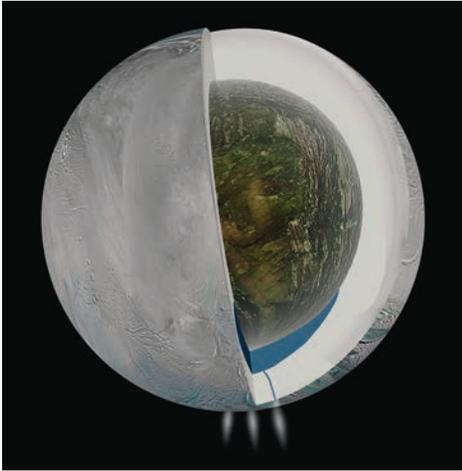
Состав гейзеров говорит о том, что океан Энцелада теплый, соленый и насыщен органикой, а на дне и сейчас происходит гидротермальная активность. Похожие гейзеры, бьющие не постоянно, а время от времени, обнаружены также на Европе, спутнике Юпитера. Соленые океаны, укрытые многокилометровым слоем льда, предполагают в недрах Ганимеда, Каллисто, Титана и Плутона, возможно, они еще не замерзли в недрах Дионы, Харона, Тритона и других крупных ледяных спутников.

Есть ли жизнь (хотя бы микробная) в этих океанах – вопрос пока открытый. Если есть и нам удастся ее обнаружить, то у обитаемой зоны будет только внутренняя граница, очерчивающая пространство вокруг звезды, где слишком горячо для существования жизни.

Но если подледные океаны стерильны, обитаемую зону придется значительно сузить, сосредоточившись в своих поисках внеземной жизни на планетах, подобных Земле.

Как же обнаружить внеземную жизнь? Земная биосфера является мощной геологической силой, преобразующей гидросферу, литосферу и атмосферу Земли. Современный состав земной атмосферы (преобладание азота, значительная доля молекулярного кислорода и малое количество углекислого газа), обусловленный живыми организмами, резко отличается от состава атмосфер Венеры и Марса. Можно предположить, что и биосферы экзопланет подвергнут их атмосферы столь же глубоким преобразованиям. Особенности химического состава атмосфер обитаемых планет в сравнении с необитаемыми носят название биомаркеров.

Сегодня основным биомаркером считается одновременное присутствие в атмосфере планеты молекулярного

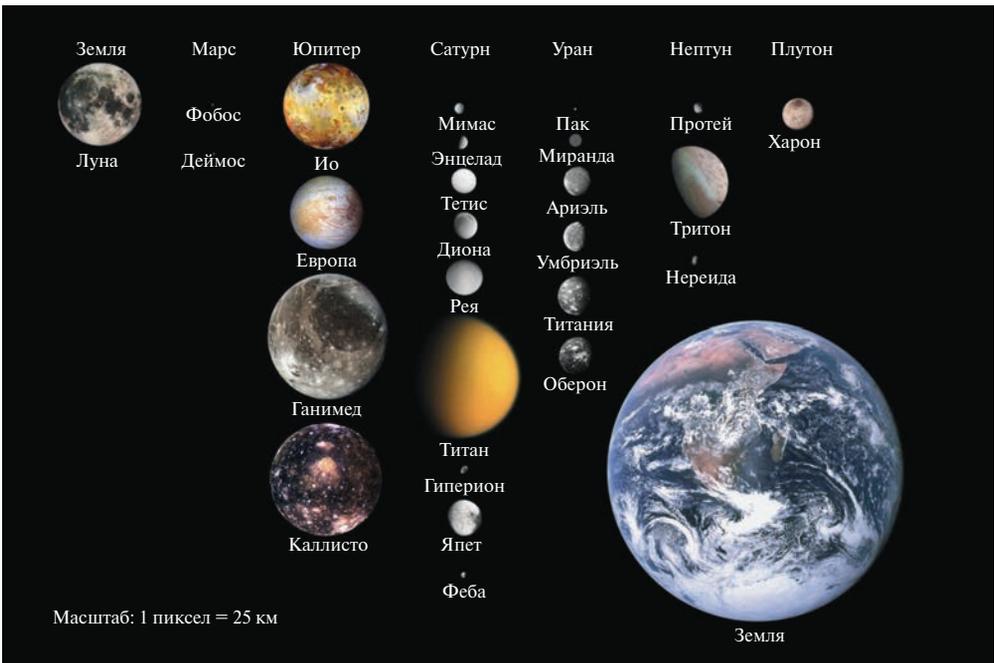


Гейзеры, бьющие из-под ледяной поверхности Энцелада, спутника Сатурна. Слева – схематическое представление, справа – изображение, полученное АМС «Кассини» (NASA). Изображения: NASA/JPL-Caltech и NASA/JPL/Space Science Institute

кислорода и метана. По отдельности и кислород, и метан могут образовываться не биологическим, а геологическим путем, но условия, в которых это происходит, несовместимы друг с другом. Так, молекулярный кислород мо-

жет накапливаться в паровых атмосферах суперземель-океанид в результате фотодиссоциации водяного пара и последующего улетучивания водорода, но это возможно лишь при наличии глобального водного океана глубиной

Размеры некоторых лун планет Солнечной системы. Для масштаба приведена Земля (радиус 6371 км). Источник: NASA



сотни километров, изолированного от силикатных пород слоем высокотемпературного льда. Наличие значительного количества молекулярного кислорода в атмосфере планеты земного типа, расположенной в зоне обитаемости, можно объяснить только наличием окиснющего фотосинтеза – варианта фотосинтеза, в котором происходит образование органических веществ на свету с выделением молекулярного кислорода.

При этом отсутствие молекулярного кислорода в атмосфере такой планеты еще не означает отсутствия на ней жизни! В архее (4,0–2,5 млрд лет назад) кислород в атмосфере Земли практически отсутствовал и процветала анаэробная одноклеточная жизнь. В работе Дж. Криссансена-Тоттона (Вашингтонский университет, США) и его коллег в 2018 г. было показано, что в отсутствии молекулярного кислорода биомаркером может быть также одновременное наличие в атмосфере планеты углекислого газа, метана и паров воды при резком дефиците угарного газа.

Сегодня мы можем изучать свойства атмосфер экзопланет, если планета является транзитной, то есть периодически проходит по диску своей звезды. Измерение глубины транзита, то есть степени ослабления светового потока от звезды при заходе планеты на звездный диск, в зависимости от длины волны, на которой ведутся наблюдения, позволяет построить так называемый трансмиссионный спектр экзопланеты. К сегодняшнему дню получены трансмиссионные спектры десятков экзопланет, преимущественно горячих юпитеров (большие размеры таких планет и их протяженные атмосферы с большой шкалой высот облегчают измерения). В трансмиссионных спектрах, полученных в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, уже обнаружены линии натрия и калия, полосы водяного пара и углекислого газа. Но получить трансмиссионные спектры экзопланеты небольшого размера (с радиусом менее

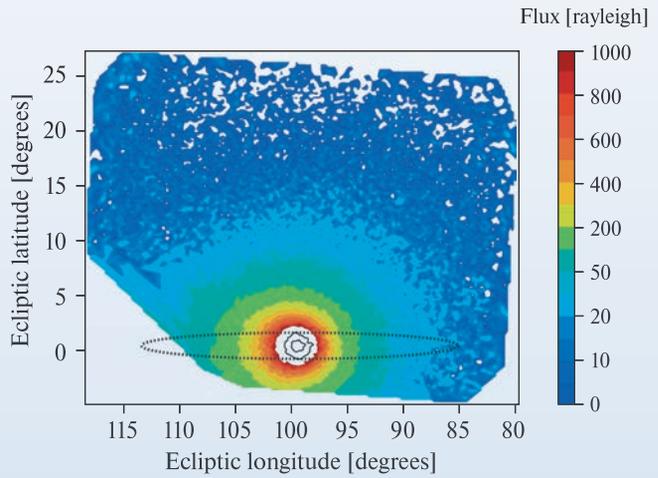
2 радиусов Земли) сегодня мы можем, только если эти планеты вращаются вокруг сравнительно близких и ярких красных карликов, и даже в этом случае необходим или космический телескоп им. Хаббла, или крупнейшие наземные телескопы. Большие надежды астрономы возлагают на запуск James Webb Space Telescope, запланированный на 2021 г.

Однако существует еще один изящный способ обнаружить планету с кислородной атмосферой. Известно, что Земля окружена геокороной из атомарного кислорода, радиус которой (при оптической толщине, равной 1 в середине линии O I 130 нм) достигает ~8 радиусов Земли. Геокорона из атомарного водорода простирается еще дальше – до 38 радиусов Земли. При этом размеры геокорон Венеры и Марса значительно меньше из-за низкой температуры их экзосфер (200–300 К против ~1000 К), вызванной интенсивным выхолаживанием посредством ИК-излучения молекул углекислого газа. Наблюдения транзитов планет земного типа в линиях Лайман-альфа (121,6 нм) и O I (130 нм) позволят измерить размеры геокорон и отличить аналоги Земли от аналогов Венеры. Так, при наблюдениях в середине линии O I глубина транзита аналога Земли у красного карлика может достигать 70%! Для наблюдений такого рода необходимо вынести ультрафиолетовый телескоп за пределы земной геокороны (например, во вторую точку Лагранжа системы Солнце-Земля или эллиптическую орбиту). Для обнаружения аналогов Земли прорабатывается установка японского ультрафиолетового спектрографа UVSPeX на российский орбитальный ультрафиолетовый телескоп «Спектр-УФ». Детектирование УФ-спектральной линии O I кислорода ~130 нм позволит по транзиту идентифицировать экзопланету земной группы с геокороной (экзосферой) типа Земли от экзосферы Марса или Венеры, так как последние имеют неконтрастный транзит в линии O I.

Известные экзопланеты в зоне обитаемости с минимальной массой менее 4 масс Земли или радиусом менее 1,5 радиусов Земли

Название планеты	Минимальная масса, масс Земли	Радиус планеты, радиусов Земли	Освещенность, в ед. земной	Орбитальный период, земных суток	Расстояние от Солнца, пк	Спектральный класс родительской звезды	Примечания
Проксима Центавра b (GJ 551 b)	1,27 ± 0,19	?	0,65	11,186	1,33	M5,5 Ve	Планета у ближайшей к Солнцу звезды
GAT-1370 b, c	1,05 ± 0,13 1,11 ± 0,16	? ?	1,15 ± 0,08 0,37 ± 0,03	4,91 11,41	3,83	M7 V	Звезда Тигардена, ультрахолодный карлик, находится вблизи предела Кумара
GJ 1061 d	1,68 ± 0,25	?	0,6 ± 0,1	13,03	3,67	M5,5 V	
GJ 273 b	2,89 ± 0,27	?	1,06	18,65	3,8	M3,5 V	Звезда Лейтена
K2-3 d	< 2,8	1,52 ± 0,21	1,5	44,56	45	M0 V	Средняя плотность планеты менее 5,62 г/см ³
K2-72 e	?	0,82 ± 0,22	0,76	24,17	49	M2-3 V	
Kepler-186 f	?	1,11 ± 0,14	0,32	130	177,6	M1 V	
Kepler-62 f	?	1,41 ± 0,07	0,47	267	301	K2 V	
TOI-700 d	?	1,19 ± 0,11	0,86	37,43	31,13	M2 V	
TRAPPIST-1 e	0,62 ± 0,58	0,92 ± 0,04	0,66	18,77	12,1	M8 V	Эффективная температура при альбедо Земли 251К

Интенсивность излучения атомарного водорода в геокороне – верхней части атмосферы Земли, по данным прибора SWAN на борту космического аппарата SOHO. Голубым обозначена малая интенсивность, красным – высокая. По данным SOHO было установлено, что геокорона простирается гораздо дальше орбиты Луны, которая обозначена на графике пунктирной линией. По вертикали и горизонтали указаны широта и долгота в эклиптических координатах. Изображение ESA/NASA/SOHO/SWAN; I. Baliukin et al (2019)



Так космический аппарат SOHO наблюдал геокорону – облако атомарного водорода, окружающее Землю. Красная линия – луч зрения прибора SWAN на борту SOHO. Желтая стрелка указывает направление на Солнце. Изображение (с) ESA