

# Тема 1. Солнечная и внесолнечные планетные системы

**В.И. Шематович**

*Институт астрономии РАН*



# **Солнечная система: *содержание***

**Лекция 1 (2 часа): Основные характеристики планет Солнечной системы.**

**Лекция 2 (2 часа): Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет.**

**Лекция 3 (2 часа): Кометы и астероиды.**

**Лекция 4 (2 часа): Атмосферы планет и малых небесных тел.**

**Лекция 5 (2 часа): Экзопланеты.**

**Лекция 6 (2 часа): Атмосферы экзопланет. Зона обитаемости.**

# **Биомаркеры в атмосферах экзопланет:** *содержание*

**Образование и эволюция атмосфер в Солнечной и внесолнечных планетных системах:**

- **Экзопланеты – суб-нептуны, суперземли и экзоземли**
- **Атмосферы экзопланет – наблюдения и модели химии**
- **Классические биомаркеры для планет земного типа**
- **Биомаркеры для экзопланетных атмосфер – проблемы, модели и перспективы**
- **Заключение**

# Экзопланеты: эпоха характеристики

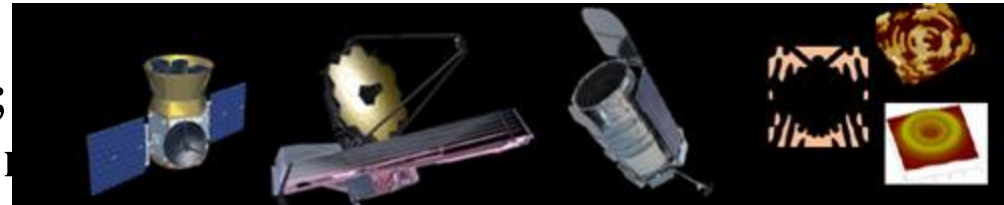
## 1. Открытия планет: как много планет в нашей галактике?

- измерения радиальных скоростей;
- фотометрия транзитов.



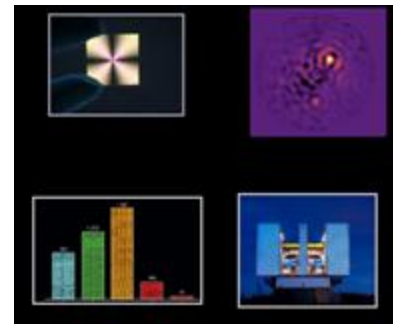
## 2. Характеристики планет: на что похожи экзопланеты?

- спектроскопия транзитов;
- прямые изображения планет;
- внутреннее строение планет и атмосферы.



## 3. «Тусклые голубые точки»: Обитаемы ли экзопланеты? Есть ли признаки жизни?

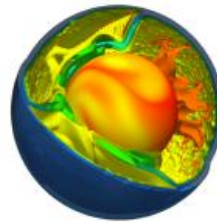
- спектроскопия транзитов;
- прямые изображения планет;
- эволюция планетных атмосфер;
- биомаркеры.



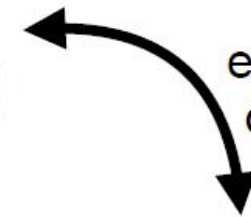
# Внесолнечные планеты: эпоха характеристики

From a discovery to a characterisation era:  
(from a collector's approach to a physicist's studies)

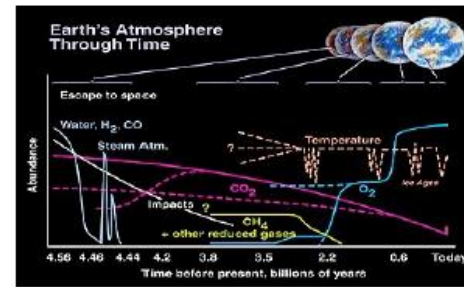
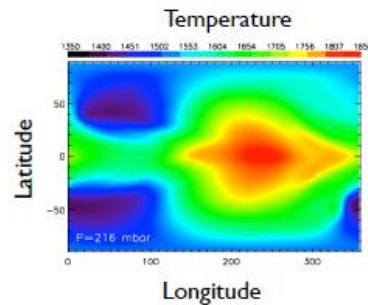
- Interior structure



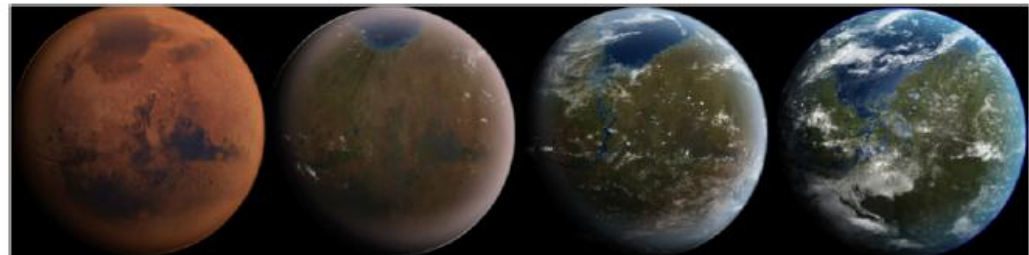
exchanges  
over time



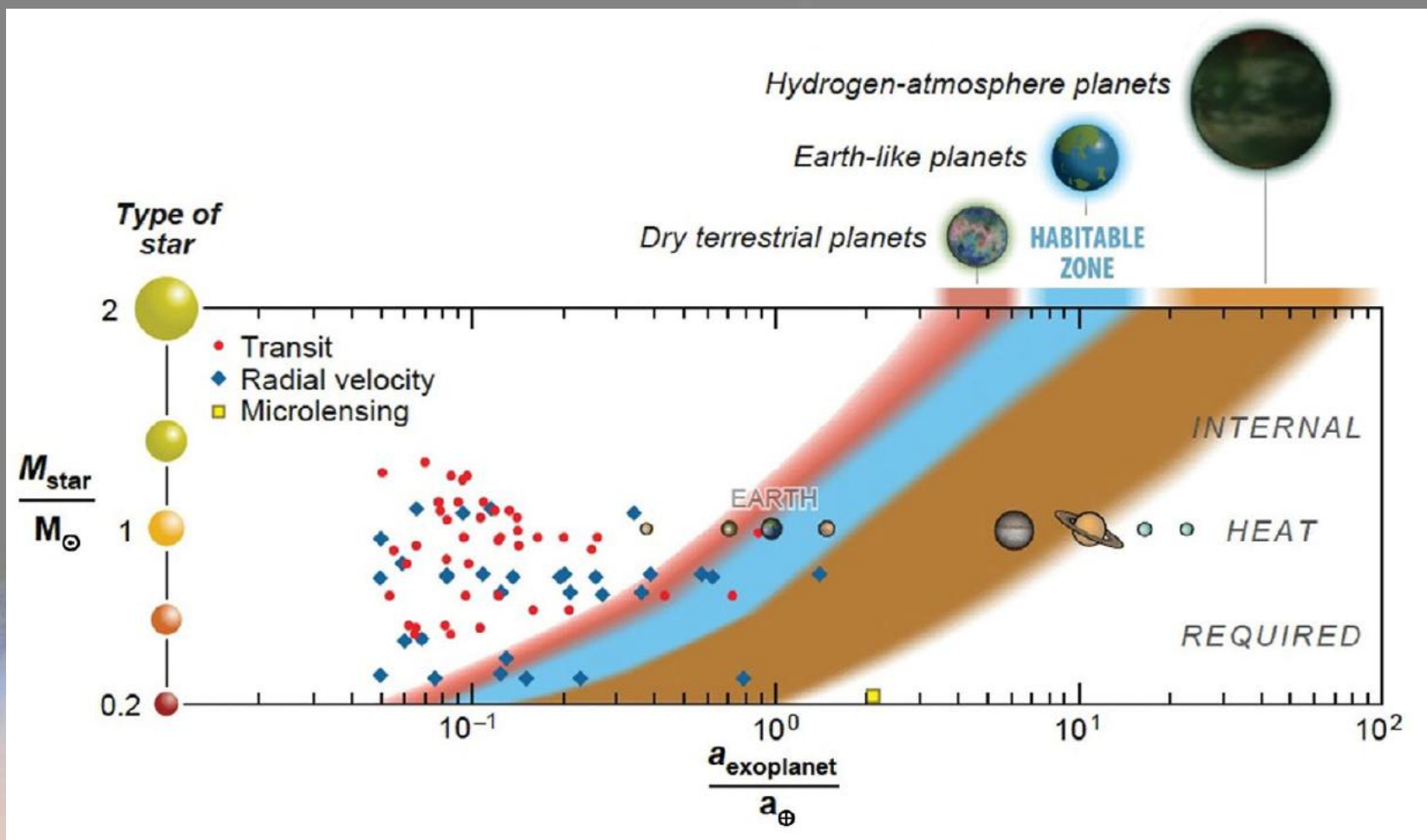
- Atmosphere



- Evolution over time



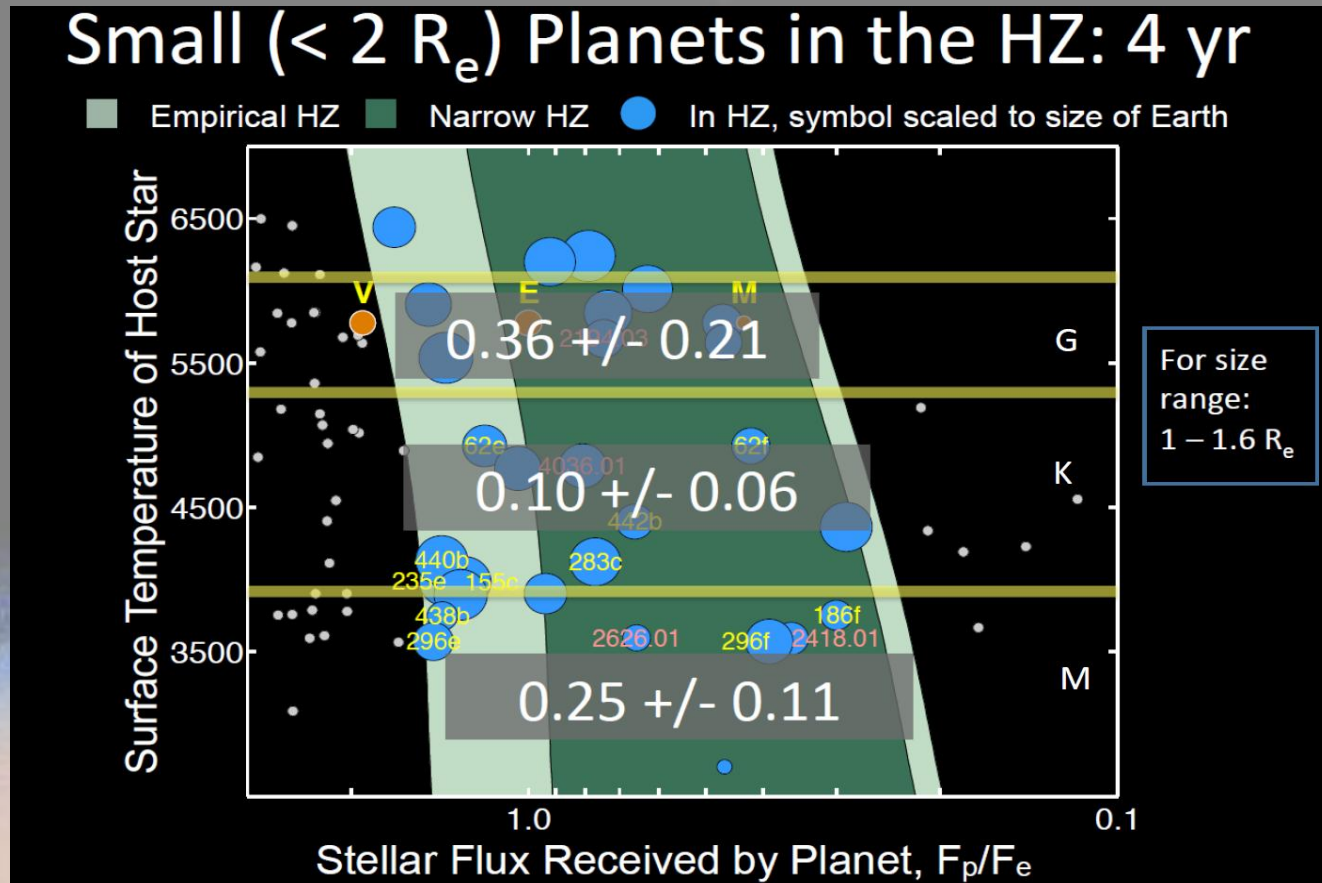
# Зоны потенциальной обитаемости (ЗПО)



Голубым выделена стандартная зона обитаемости для каменных планет с  $N_2$ - $CO_2$ - $H_2O$  атмосферами;  
Темно-коричневым – расширенная зона для планет в переходной области от каменных планет к мини-нептунам.



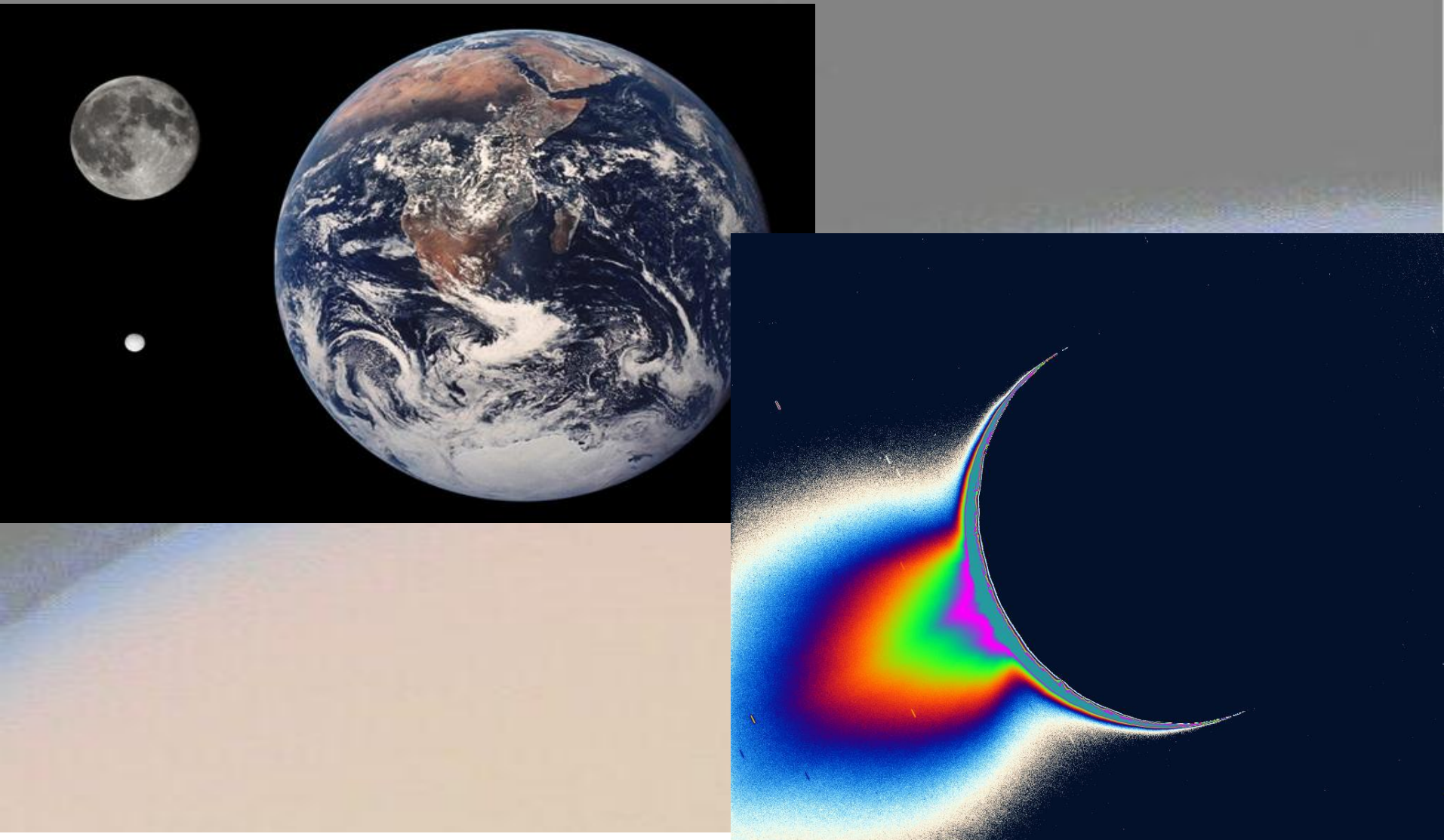
# Экзопланеты: сколько планет?



Размер зоны потенциальной обитаемости зависит от:

- светимости родительской звезды, в особенности в XUV диапазоне;
- состава атмосферы и наличия парниковых газов –  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и т.д.;
- вулканизма и тектоники плит;
- планетного магнитного поля;
- ....

# Атмосферы планет и лун: *Энцелад*

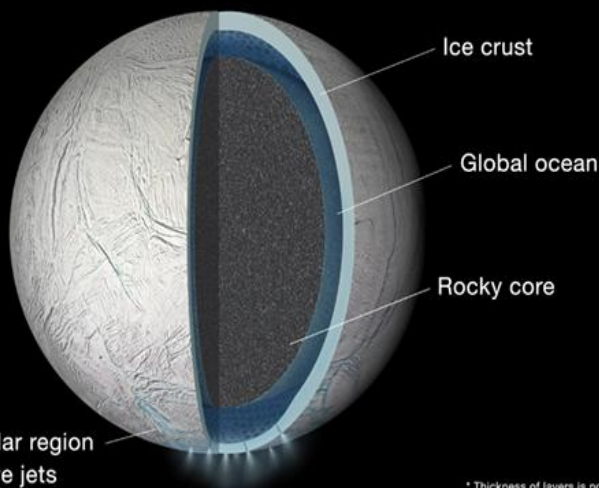


Снимки КА Cassini 2005 г. - показаны подсвеченные сзади Солнцем подобные фонтанам источники, выбрасывающие тонкие струи вещества на южном полюсе спутника Сатурна Энцелад.



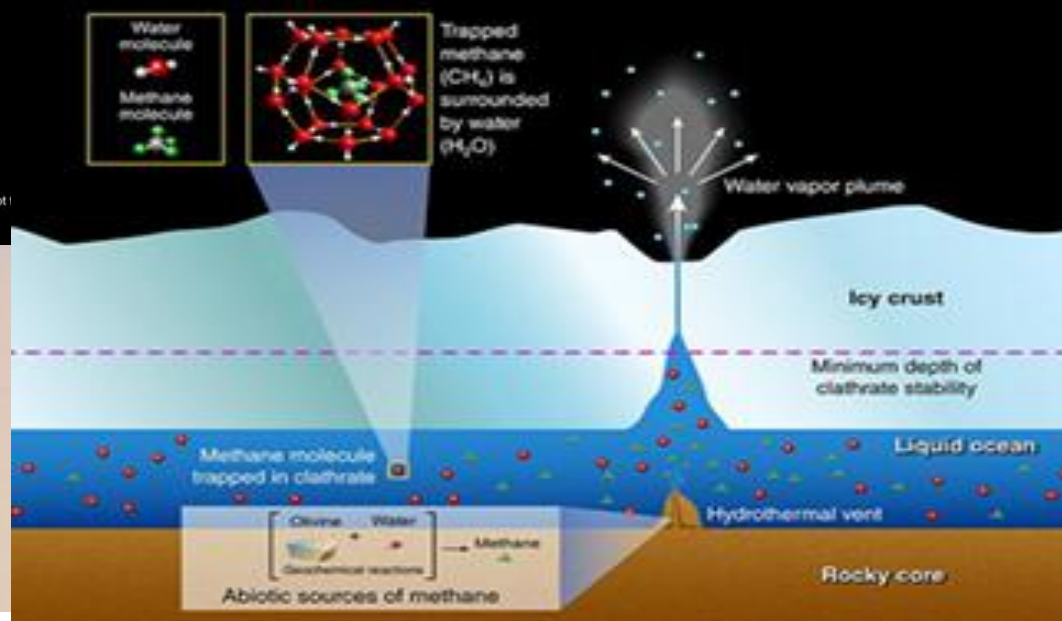
# Атмосферы планет и лун: *Энцелад*

Global Ocean on  
Saturn's Moon  
ENCELADUS



\* Thickness of layers is not 1

## Trapping of Methane in Enceladus' Ocean

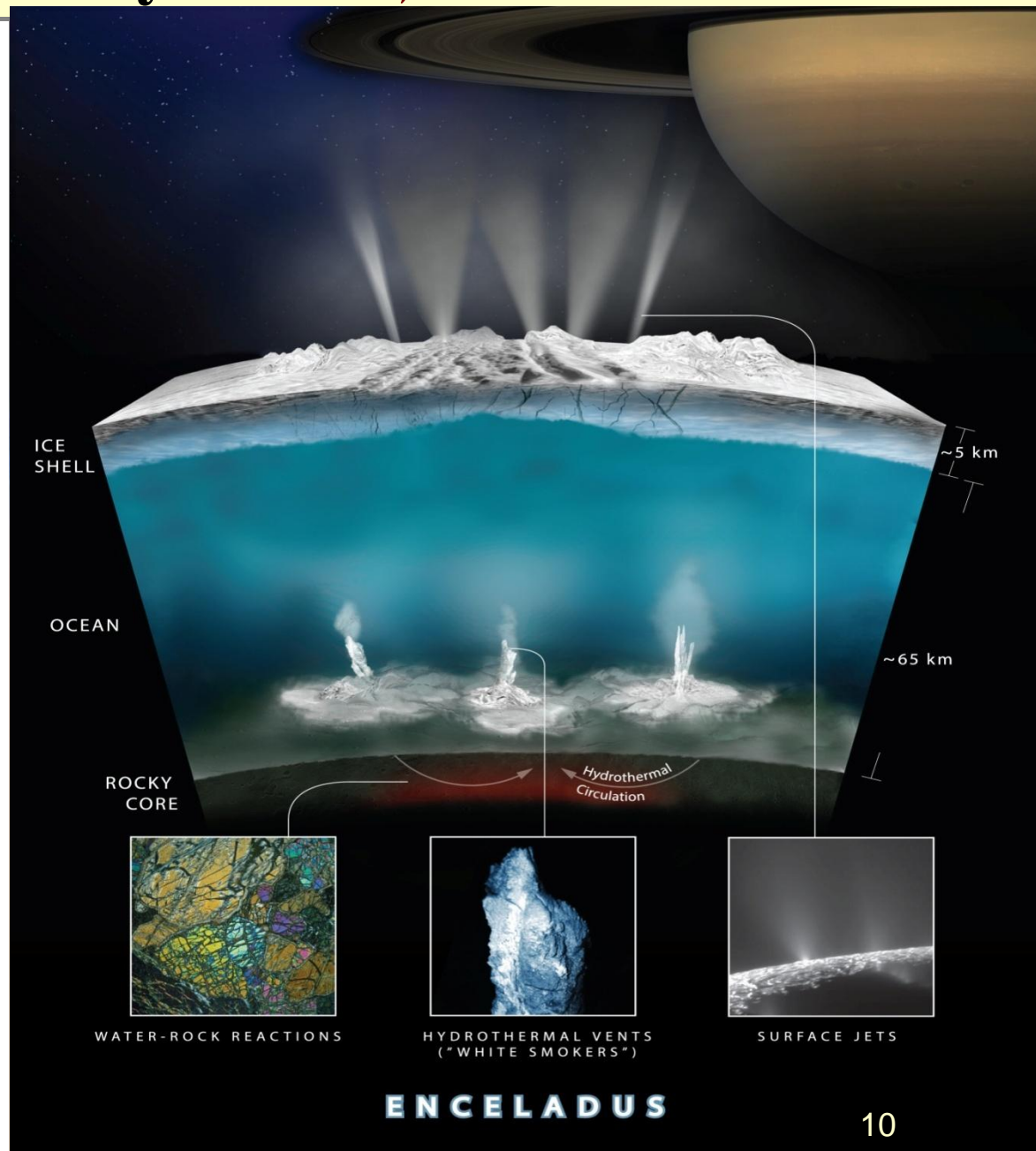


Эта иллюстрация изображает потенциальное происхождение метана, который был обнаружен в шлейфе из газа и частиц льда, выброшенного гейзером на южном полюсе Энцелада (данные INMS Cassini). Гидротермальная активность происходит когда морская вода проникает и реагирует с каменной корой спутника и проявляется как теплый и насыщенный минералами раствор. Это естественное явление в земных океанах.

# Атмосферы планет и лун : Энцелад

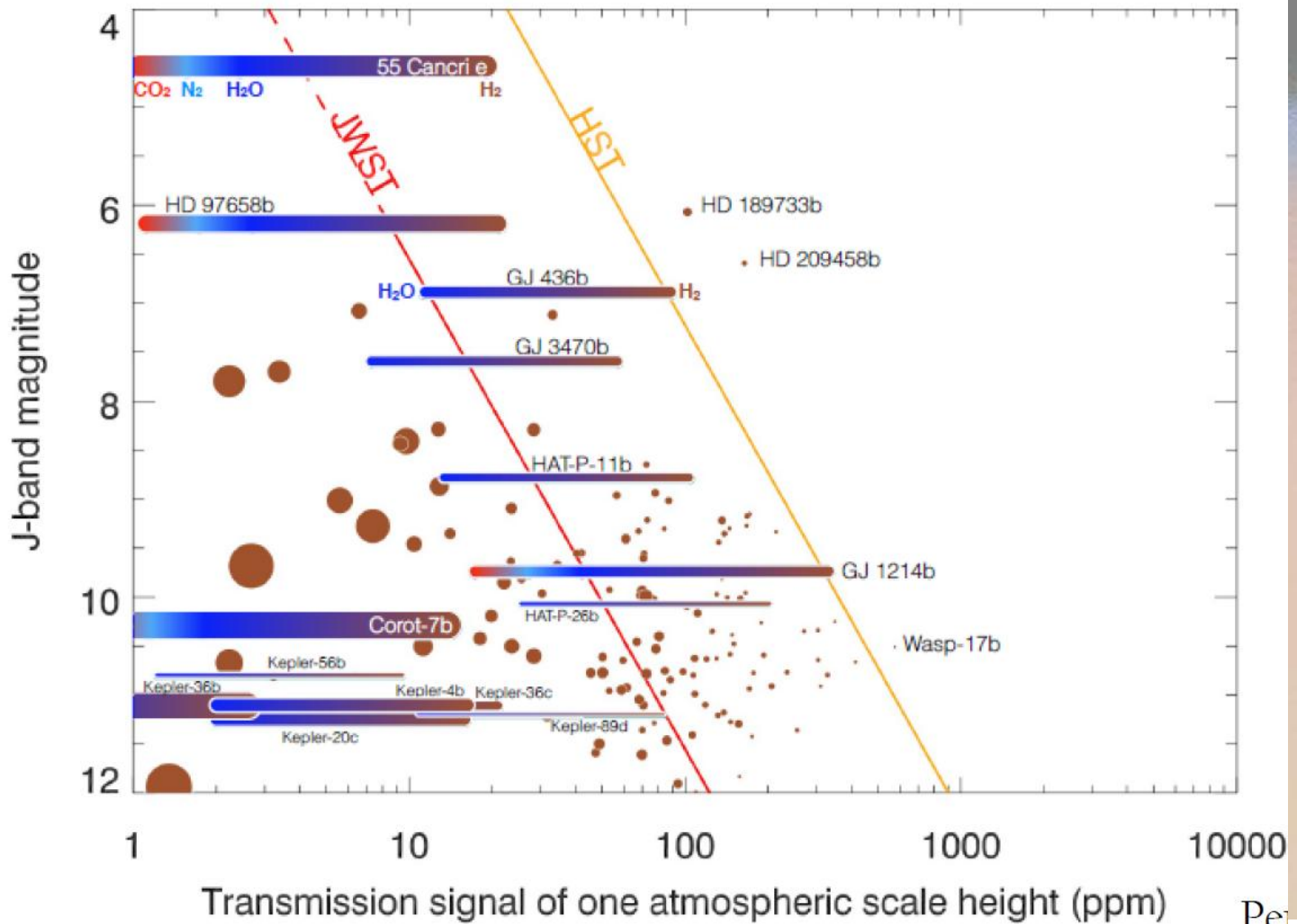
Источники и потоки энергии в системе: силикатное ядро- глобальный океан- ледяная кора на поверхности Энцелада.

«Все указывает на то, что водород непрерывно рождается внутри ядра Энцелада. Мы просчитали разные варианты того, как водород может покидать его породы, и пришли к выводу, что самый его вероятный источник – гидротермальные реакции между водой и каменистым дном океана, содержащим в себе органику и щелочные породы» (Н. Waite et al., 2017).



# Внесолнечные планеты: эпоха характеризации

Detection of a planetary atmosphere during transit (transmission) with HST and JWST



Возможности детектирования атмосфер экзопланет во время наблюдений транзитов

# Планетные атмосферы в Солнечной системе:

**Водородные атмосферы H/He планет-гигантов (H<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>):**

- Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун;
- Температура (К): 128, 98, 56, 57 К.

**Атмосферы планет земной группы (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O):**

- Венера, Земля, Марс, Титан, Тритон;
- Температура (К): 750, 280, 240, 94, 38.

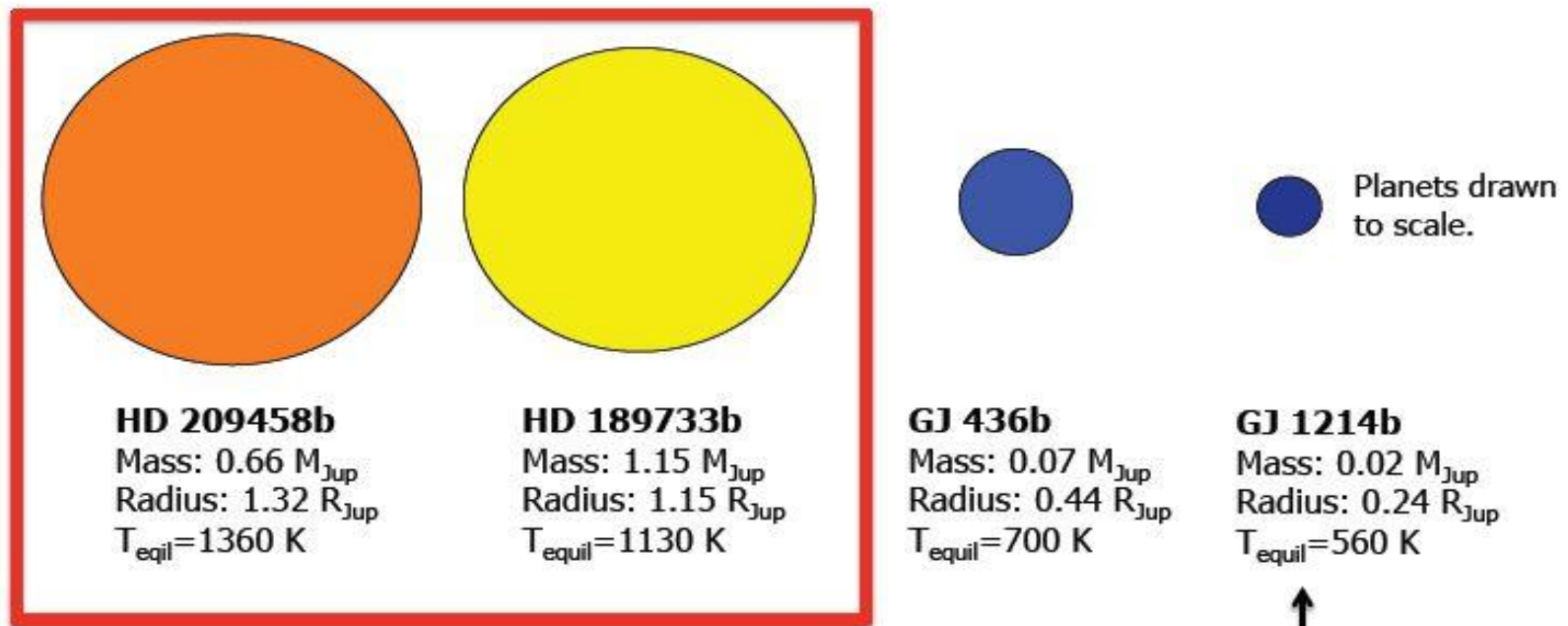
**Убегающие атмосферы (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O):**

- Ио, Европа, Ганимед, Энцелад, Плутон, кометы, KBOs,....:
- Температура (К): 130, 120, 140, 150, 36, ....

**Бесстолкновительные экзосферы: Меркурий, Луна, и другие спутники.**



## Four Exoplanets: A Comparison



These are four of the **brightest** transiting planet systems known today.

Also some of the **best-studied**.

↑  
Equilibrium temperature assumes planet absorbs all incident flux and re-radiates as a blackbody



# Атмосферы экзопланет: *из чего состоят?*

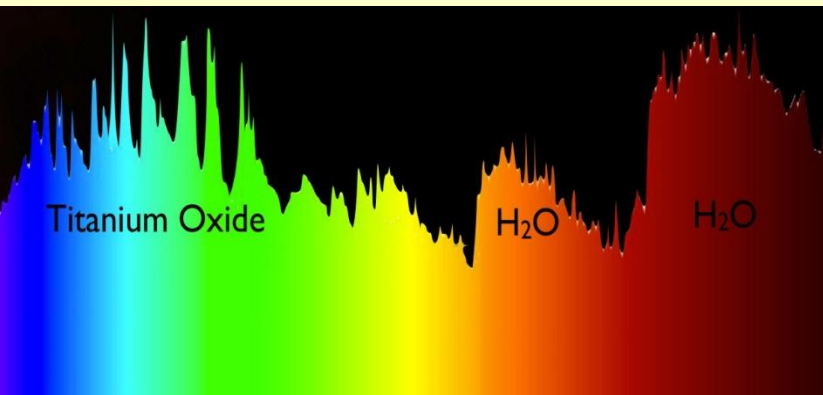
В настоящее время спектры поглощения и свечения получены лишь для нескольких экзопланет, преимущественно из группы горячих юпитеров и нептоунов.

Например, для горячих юпитеров HD 209458b и HD 189733b идентифицированы следующие:

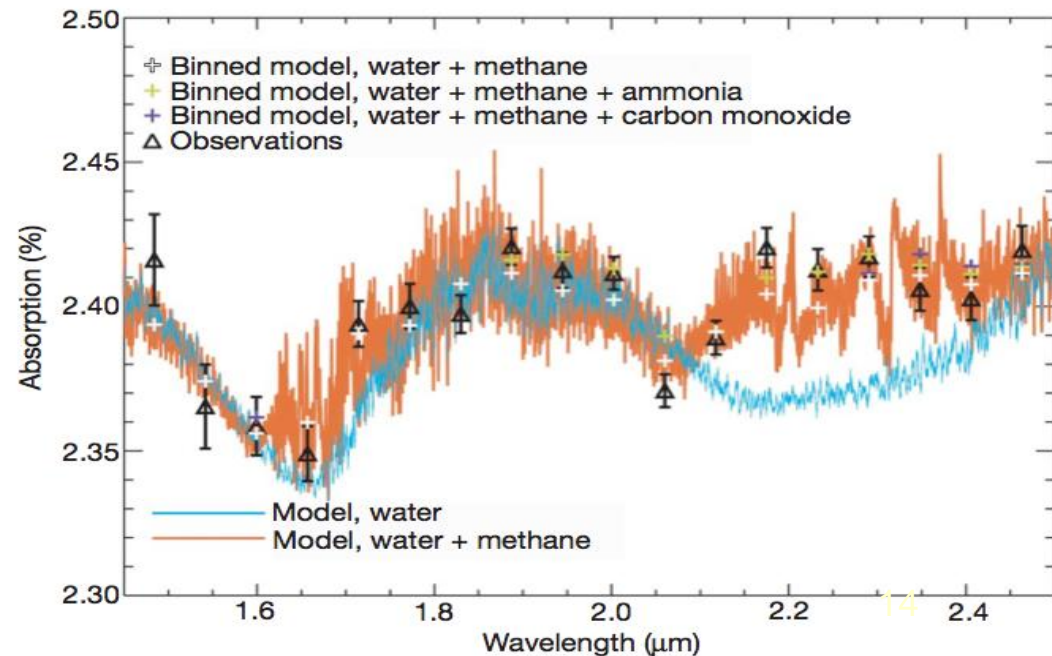
атомы – H, He, C, O, Mg, Si, Na, K, ...

молекулы – H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, ...

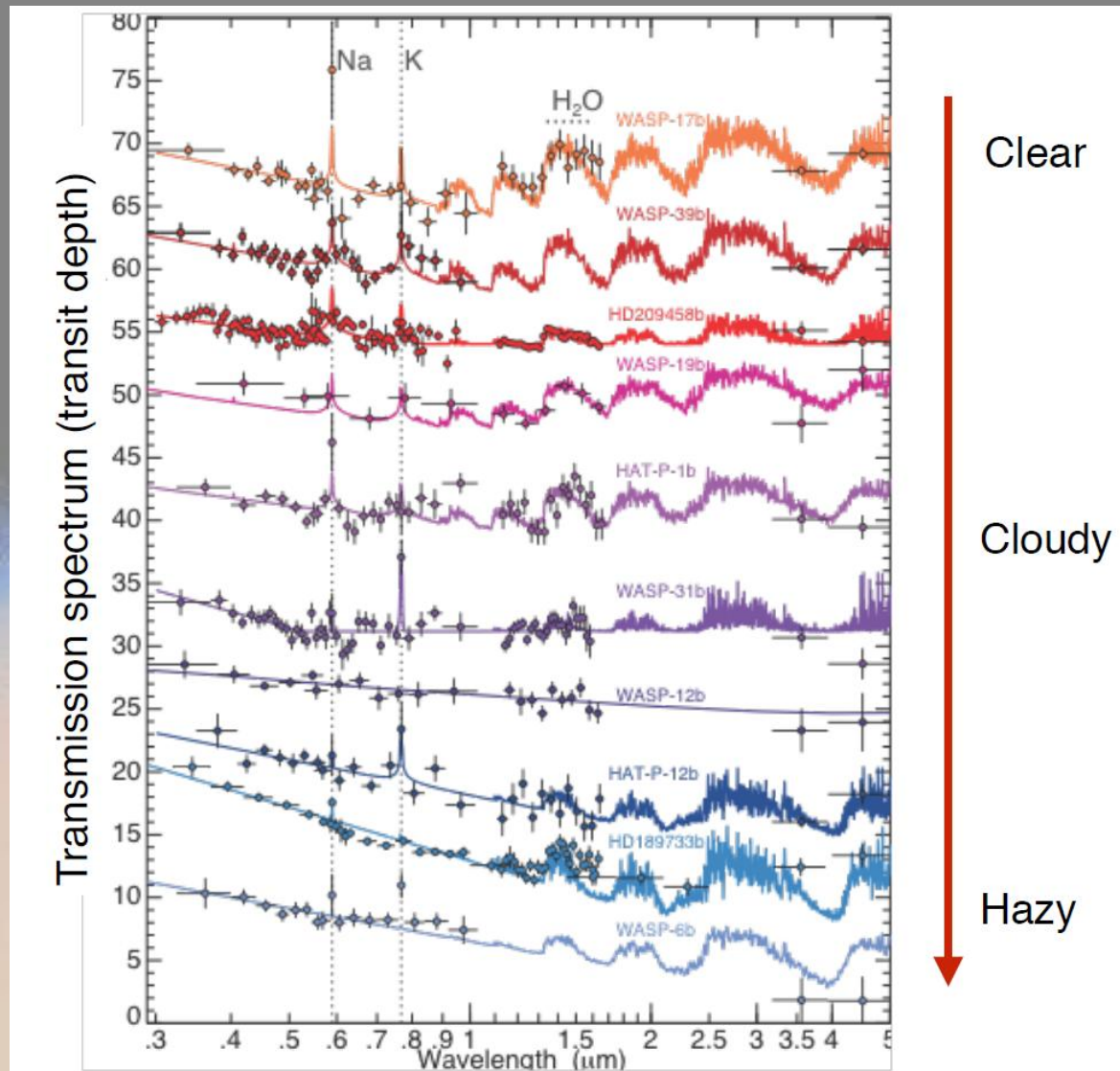
облака и дымки из силикатов и окислов металлов ...



Спектр пропускания  
HD 189733b (Swain et al., 2008)

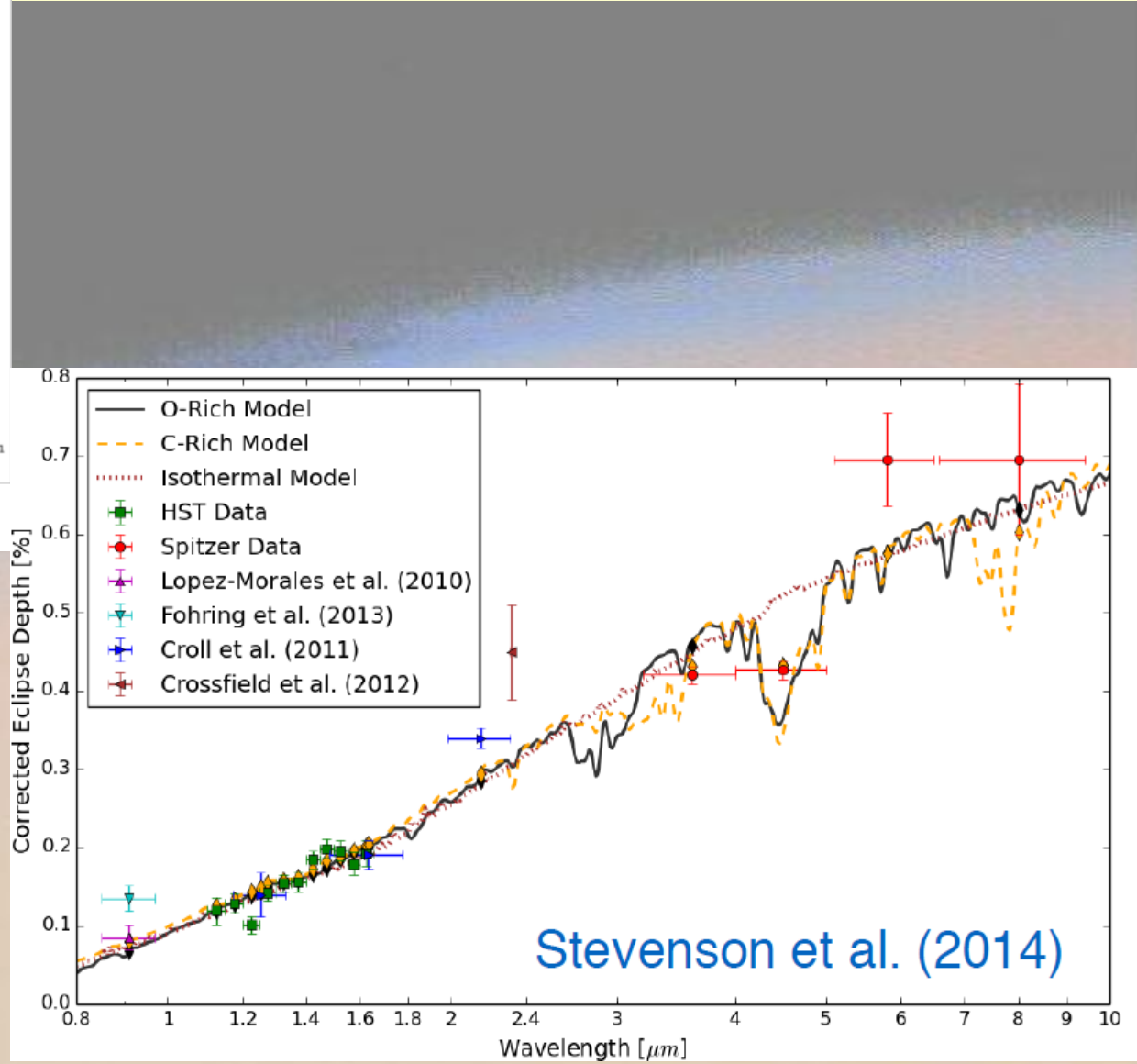
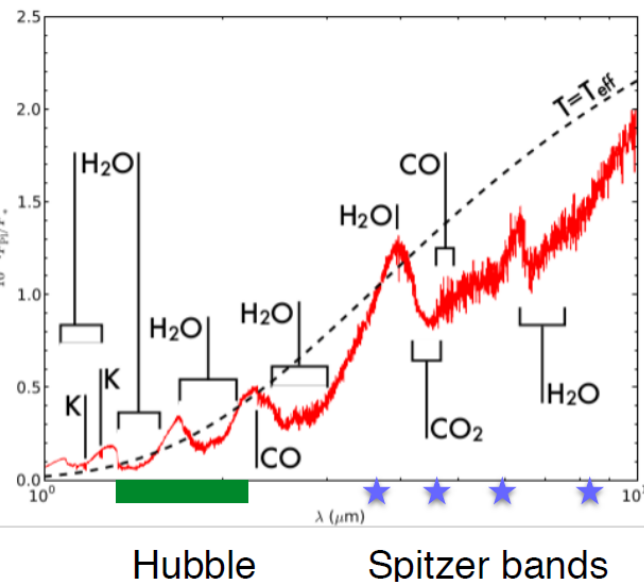


# Атмосферы экзопланет: спектры



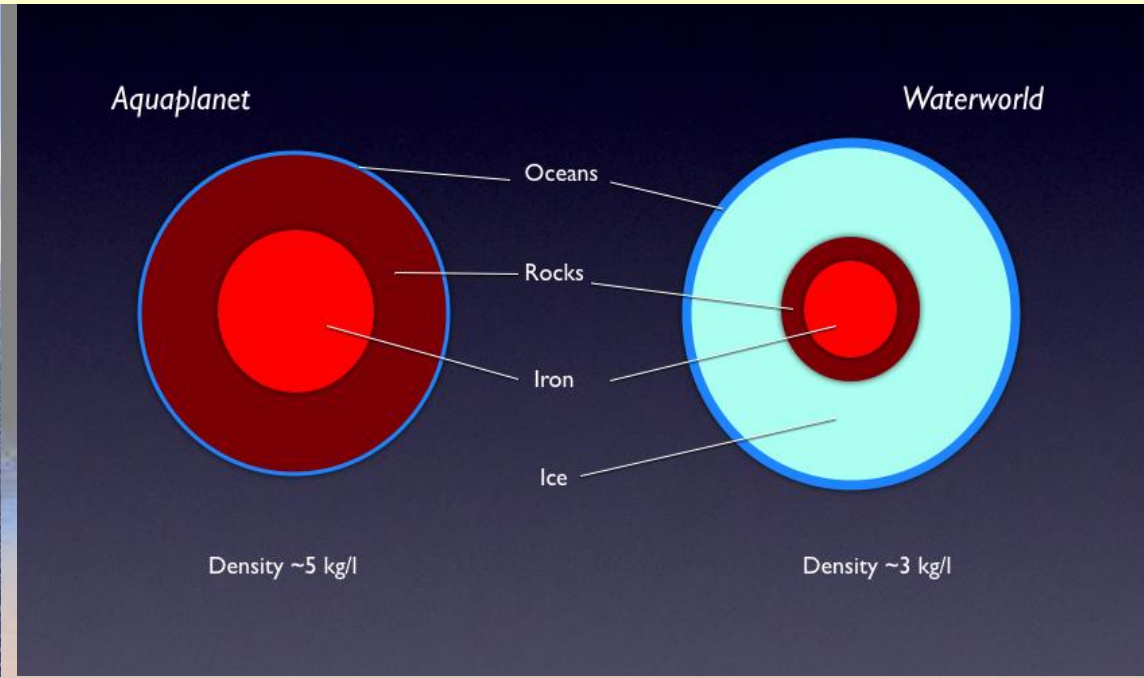
Спектры пропускания (трансмиссионные) экзопланет-гигантов по данным HST и Spitzer ST.

# Атмосферы экзопланет: эмиссионные спектры



Спектр свечений (эмиссий) для WASP-12b по данным HST и Spitzer ST.

# Суперземли и суб-нептуны

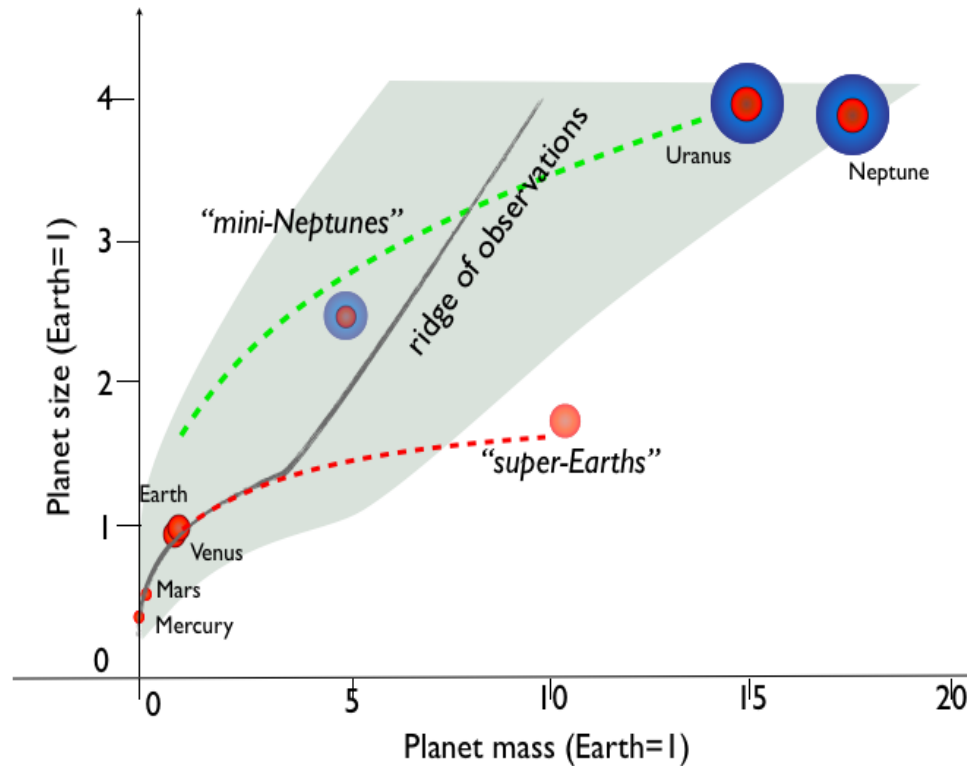


## Суперземли - водный мир или планета-океан?

- Водный мир – когда вода в форме льда является основной составляющей планеты;
- Планета-океан – каменная планета, покрытая глобальным водным океаном;
- Планета-океан более пригодна для возникновения жизни.



# Суперземли - каменные планеты или суб-нептуны?

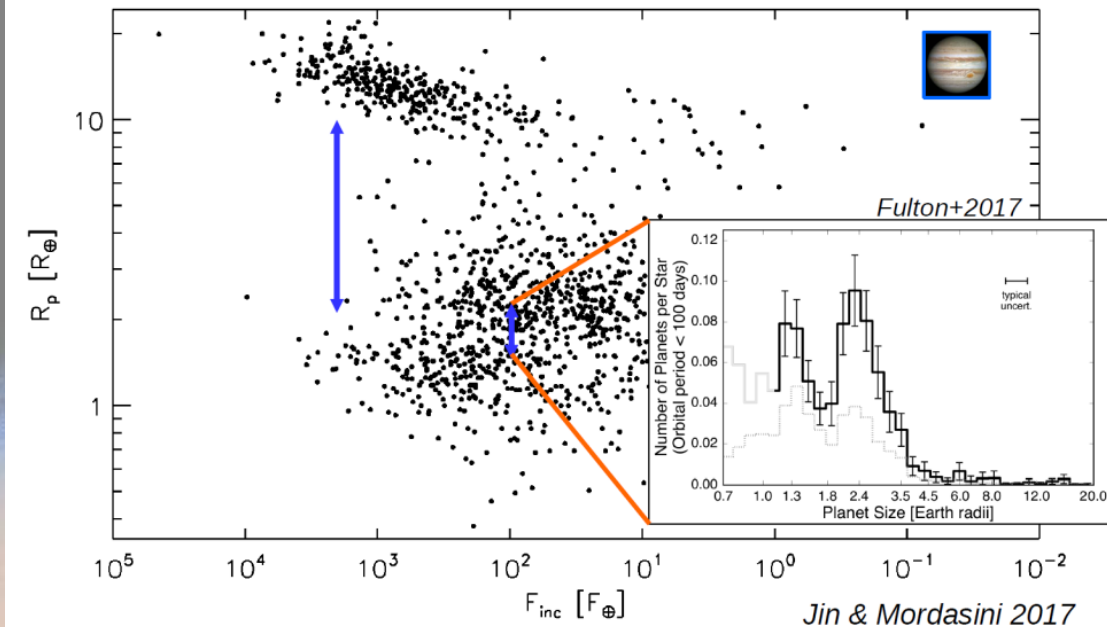
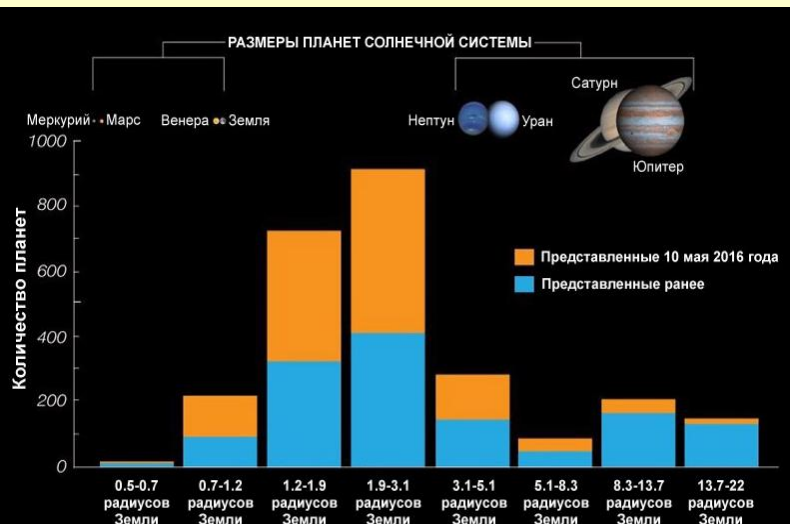


Данные анализа наблюдений КТ Kepler (Wiess and Marcy, 2014). Серая зона – показывает возможное распределение открытых суперземель. Зеленая и красная линии – возможные типы суперземель – суб-нептуны или каменные планеты земного типа. Скорее – суб-нептуны!



# Экзопланеты: распределение планет по данным КТ

## Кеплер



Экзопланеты занимают широкий диапазон значений

по массе планеты и ее эффективной температуре:

- Умеренные земли и суб-земли ( $T \sim 300 \text{ K}$ ;  $R < 1.25 R_E$ );

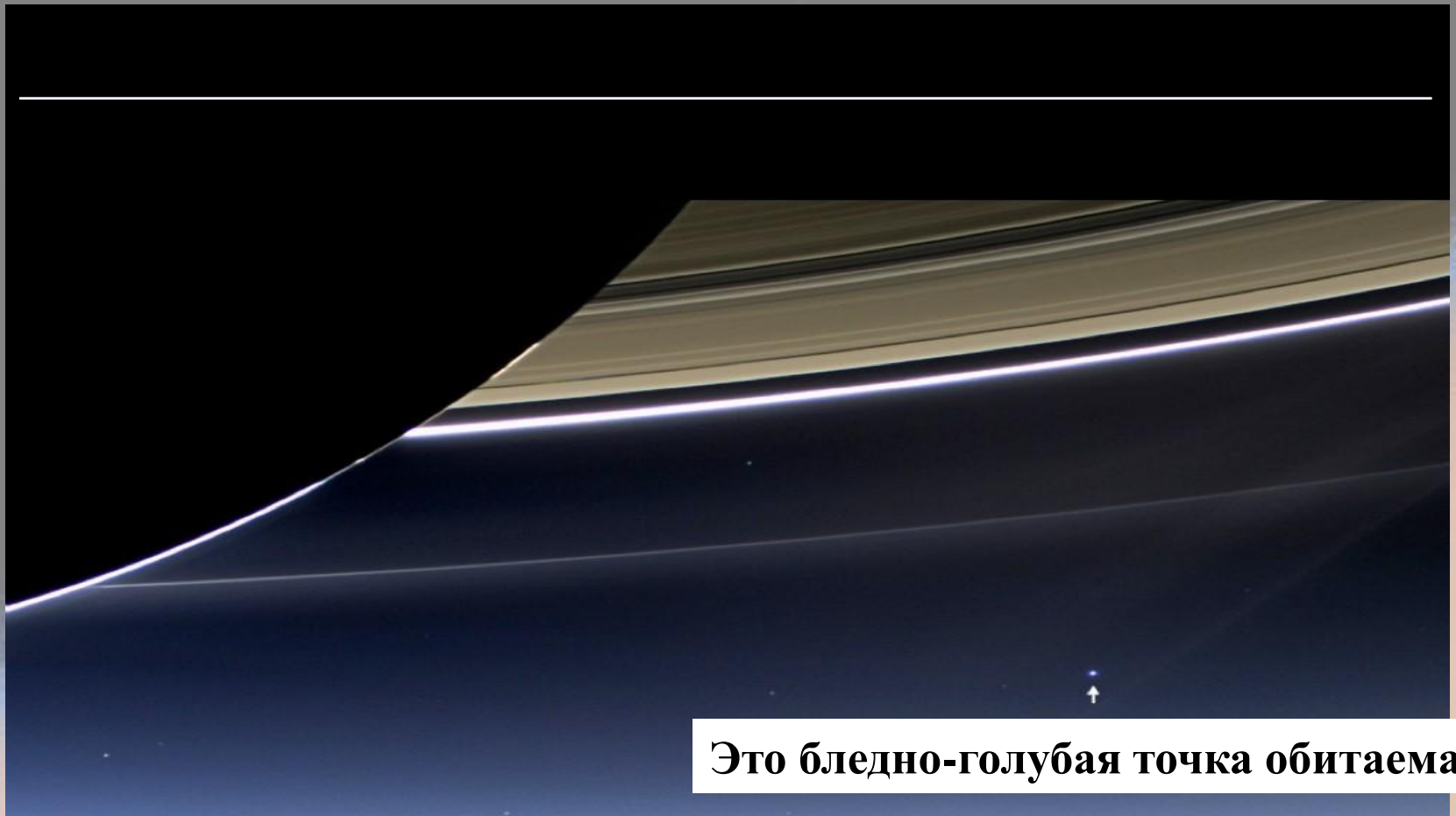
- Супер-земли ( $T \sim 500 \text{ K}$ ;  $R \sim (1.25 - 2.0) R_E$ );

- Горячие нептунуны и суб-нептунуны ( $T \sim 700 - 1200 \text{ K}$ ;  $R \sim (2.0 - 6.0) R_E$ );

- Горячие (экстремально горячие) юпитеры ( $T \sim 1300 - 3000 \text{ K}$ ) на близких к звезде орбитах;

- Теплые газовые гиганты ( $T \sim 500 - 1500 \text{ K}$ ;  $R \sim (6.0 - 15.0) R_E$ ), относительно удаленные от звезды.

# Биомаркеры: *глобальное воздействие жизни*



Это бледно-голубая точка обитаема?

**Как мы можем определить влияние жизни на атмосферы внесолнечных планет?**

**Как мы отличить влияние жизни от влияния окружающей среды?**

**Планетарный биомаркер это признак или путь, показывающий как жизнь изменила планетную среду с потенциально обнаружимым проявлением.**

# Атмосферы экзопланет: *химические модели*

Много групп, проводящих детальные исследования атмосферной химии экзопланет. Недавние обзоры:

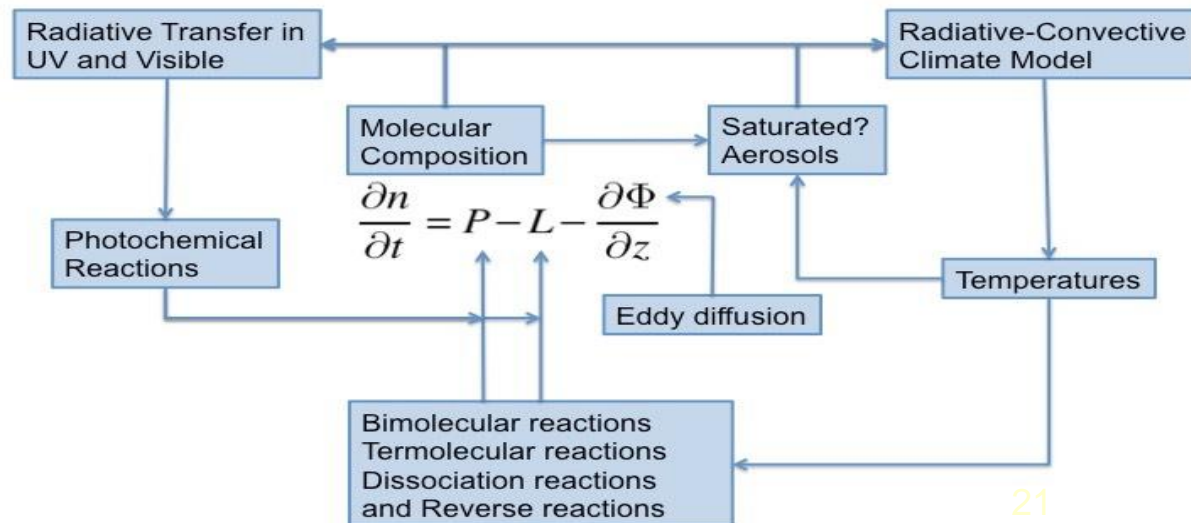
- Sara Seager and Drake Deming. *Exoplanet Atmospheres*. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2010. 48:631–72

- N. Madhusudhan, H. Knutson, J. Fortney, T. Barman. *Exoplanetary atmospheres*, in *Protostars and Planets VI*, H. Beuther, R. Klessen, Eds. (University of Arizona Press, Tucson, AZ, 2014).

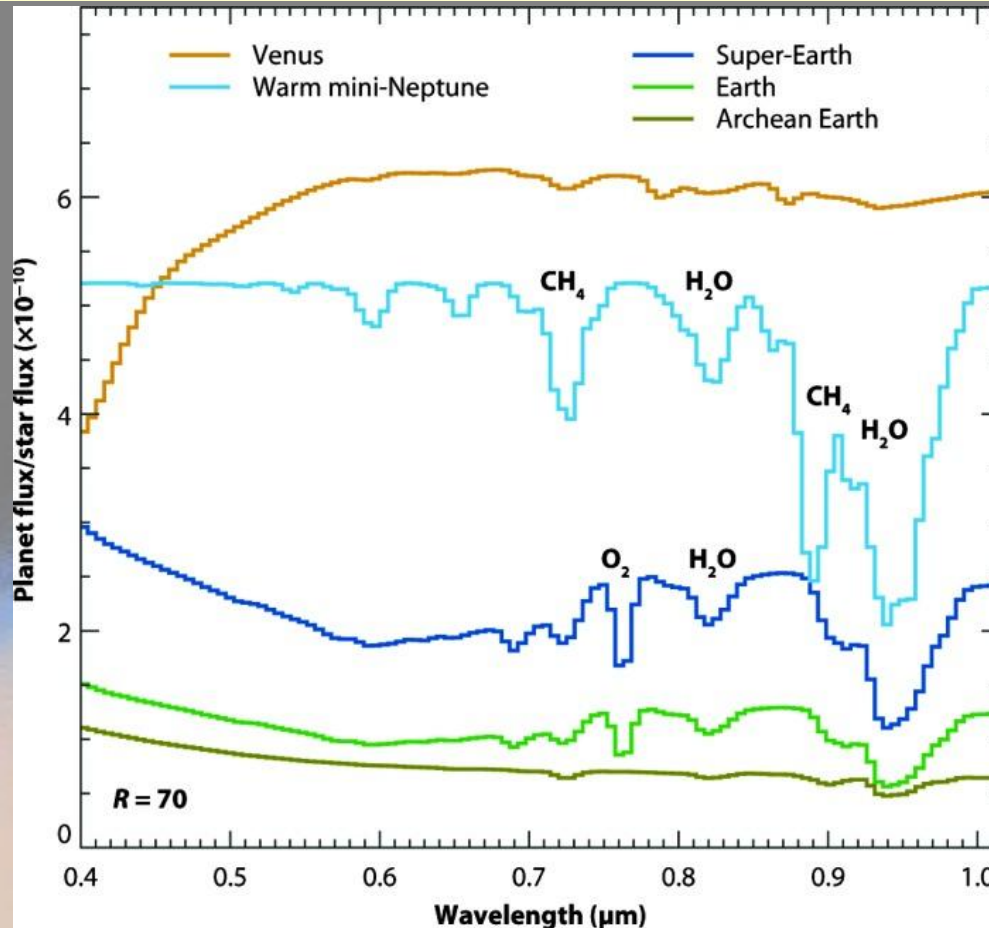
См., например, R. Hu & S. Seager (2014), [Photochemistry in Terrestrial Exoplanet Atmospheres III: Photochemistry and Thermochemistry in Thick Atmospheres on Super Earths](#), *ApJ*, 784, 63.



## Photochemistry-Thermochemistry Model



# Атмосферы экзопланет: модели



Модельные спектры атмосфер малых экзопланет. Спектры отраженного света представлены в единицах отношения потока от планета/звезда и их спектральное разрешение предполагается для экзоземель в наблюдениях с будущими космическими телескопами способными подавлять излучение звезды (Seager & Bains, 2015).

# Классические биомаркеры:

Жизнь на Земле проявляется в глобальных изменениях среды:

- атмосферы – молекулярный кислород;
- поверхности – red edge (Sagan et al., 1993);
- изменений во времени - сезонные изменения растительного покрова, сезонная периодичность в содержании атмосферных  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  связана с газовым обменом (дыханием) биосферы Земли;
- Термодинамическое неравновесие атмосферы,  $\text{O}_2 / \text{CH}_4$ , и т.д.

Наиболее важными молекулами являются следующие:

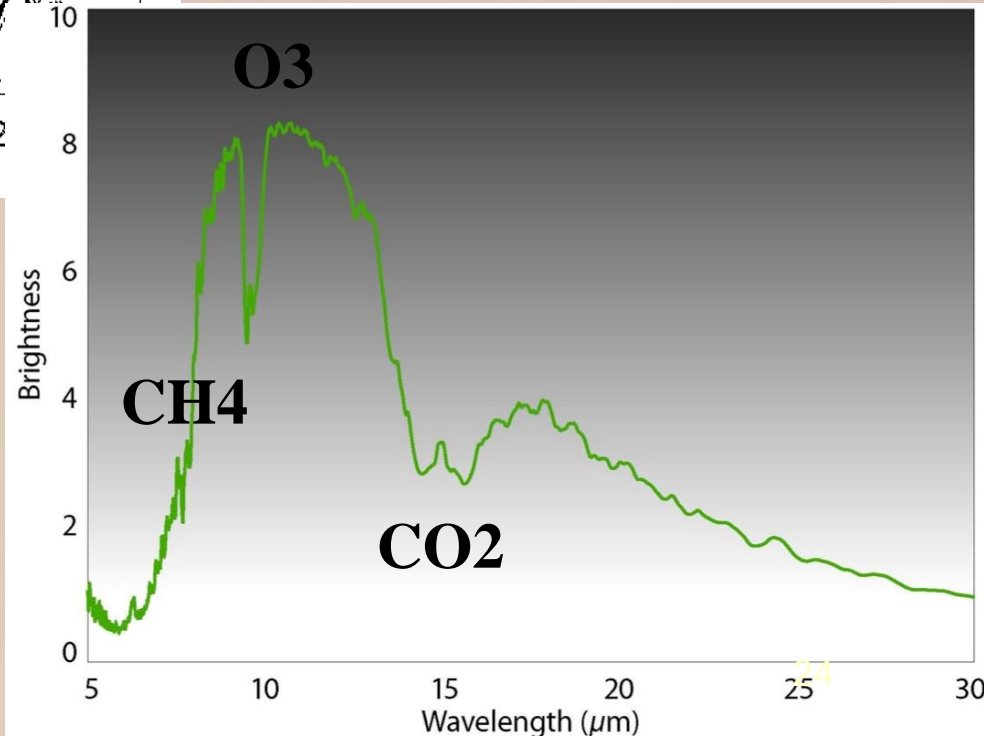
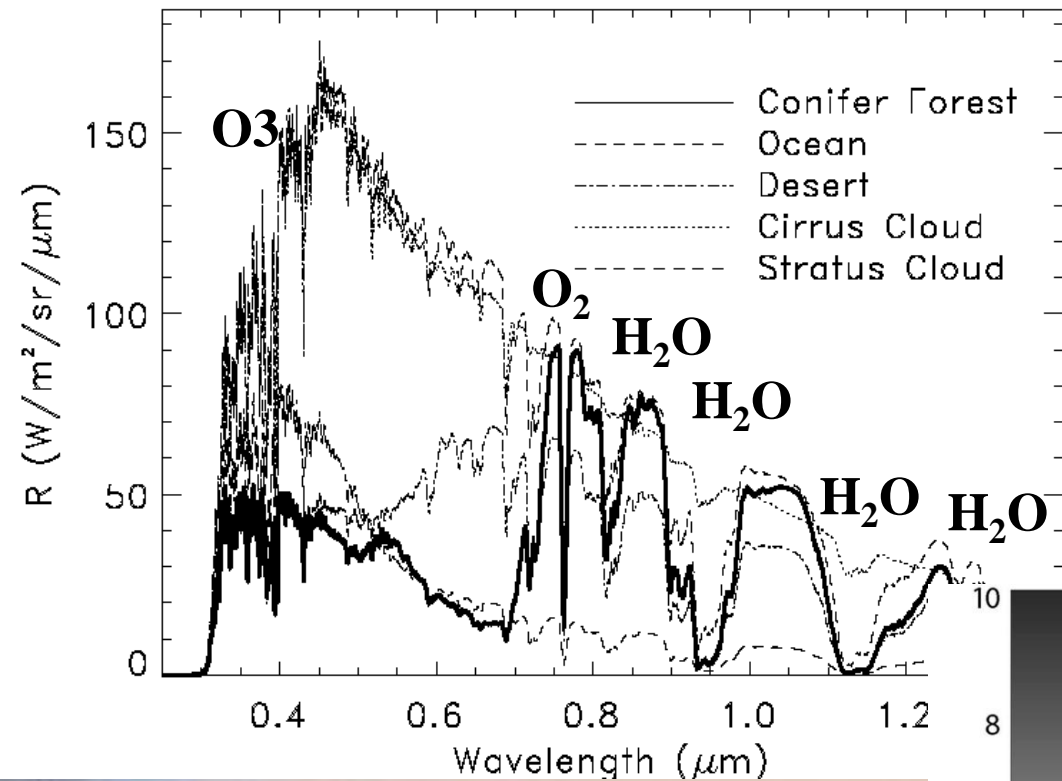
- $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  в качестве маркеров обитаемости;
- $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  в качестве потенциальных биомаркеров.
- Кислород и его производная - озон считаются устойчивыми продуктами, а их известные фотохимические механизмы образования работают лишь вне пределов зоны потенциальной обитаемости.

Для подобной Земле планеты, которая находится в зоне обитаемости, свободный  $\text{O}_2$  - это надежный показатель жизни!!!

Des Marais et al., Remote Sensing of Planetary Properties and Biosignatures on Extrasolar Terrestrial Planets. *Astrobiology*, 2002.



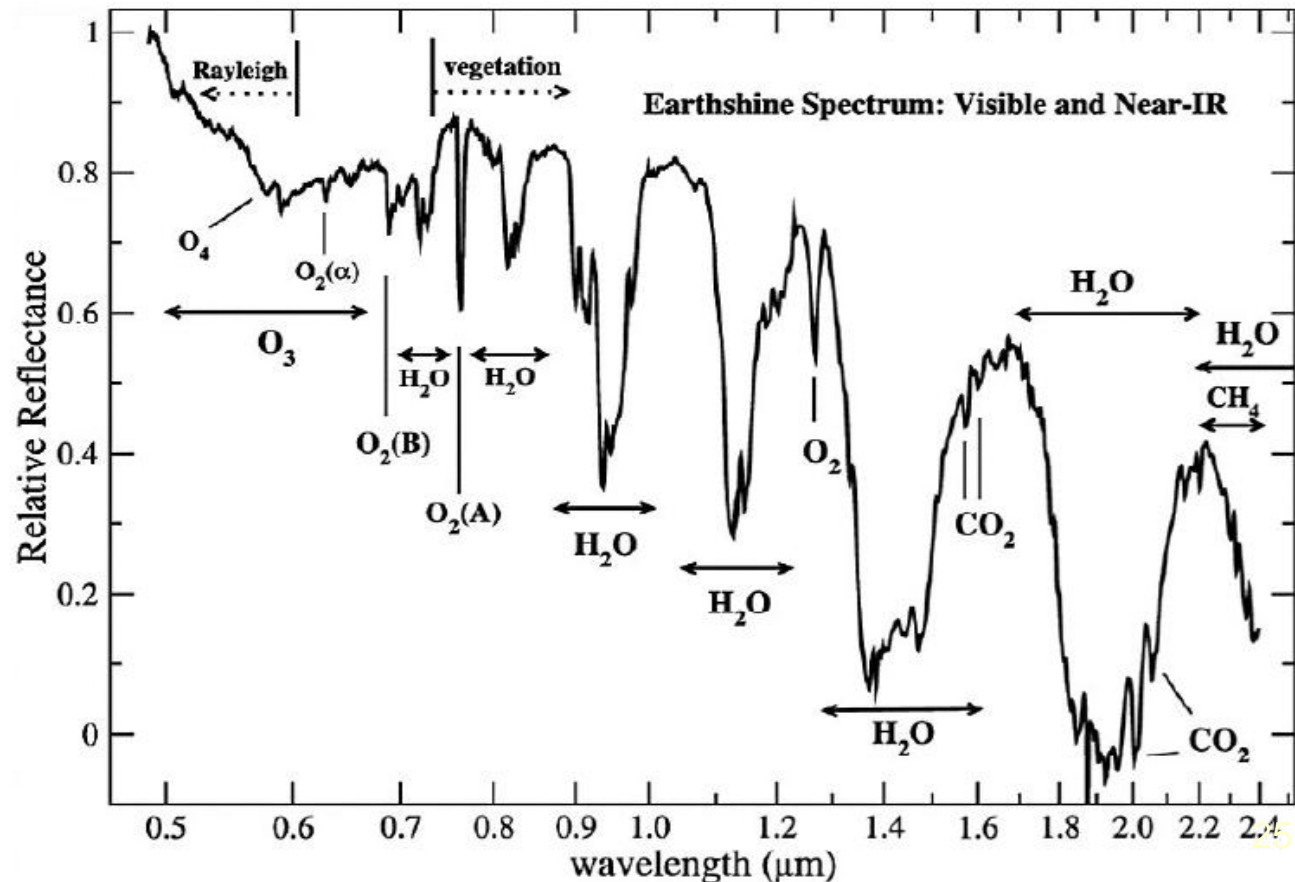
# Классические биомаркеры:



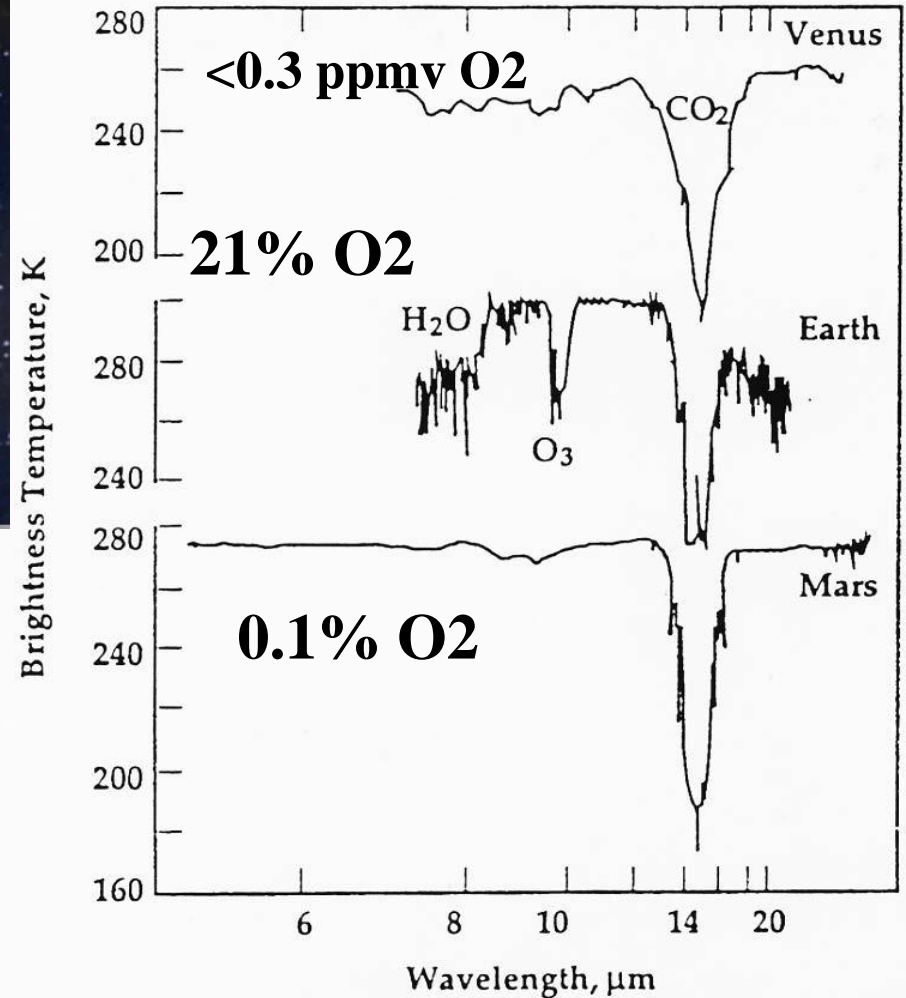
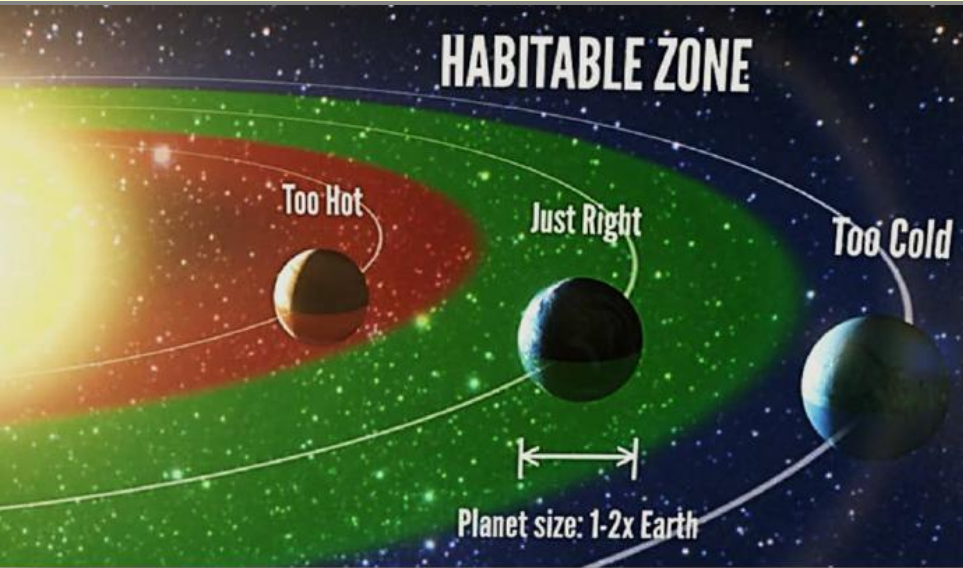
(Meadows, 2006)

# Биомаркеры: Земля как «экзопланета»

Отраженный спектр Земли в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн по измерениям при лунном затмении (Turnbull et al. 2006). Спектр интегрирован по диску, т. е., пространственно неразрешен, и показывает, как бы выглядела Земля для удаленного наблюдателя. Отражение нормализовано на единицу; наблюдаются относительно высокий континуум и присутствие паров воды, кислорода, и озона в видимом диапазоне длин волны.



# Биомаркеры: атмосферы земного типа



Если фотосинтез прекращается, то содержание  $\text{O}_2$  уменьшится экспоненциально до  $<0,4\%$  в течение  $\sim 10$  млн. лет. Предлагается поиск подобных Земле экзопланет с  $\text{O}_2$  и  $\text{CH}_4$  в качестве биомаркеров.



# Внесолнечные планеты: эпоха характеризации

## Planets, planetary systems and their host stars evolve

→ Need to derive accurate planetary system age → asteroseismology

Formation in proto-planetary disk, migration

Loss of primary, atmosphere

Stellar radiation, wind and magnetic field

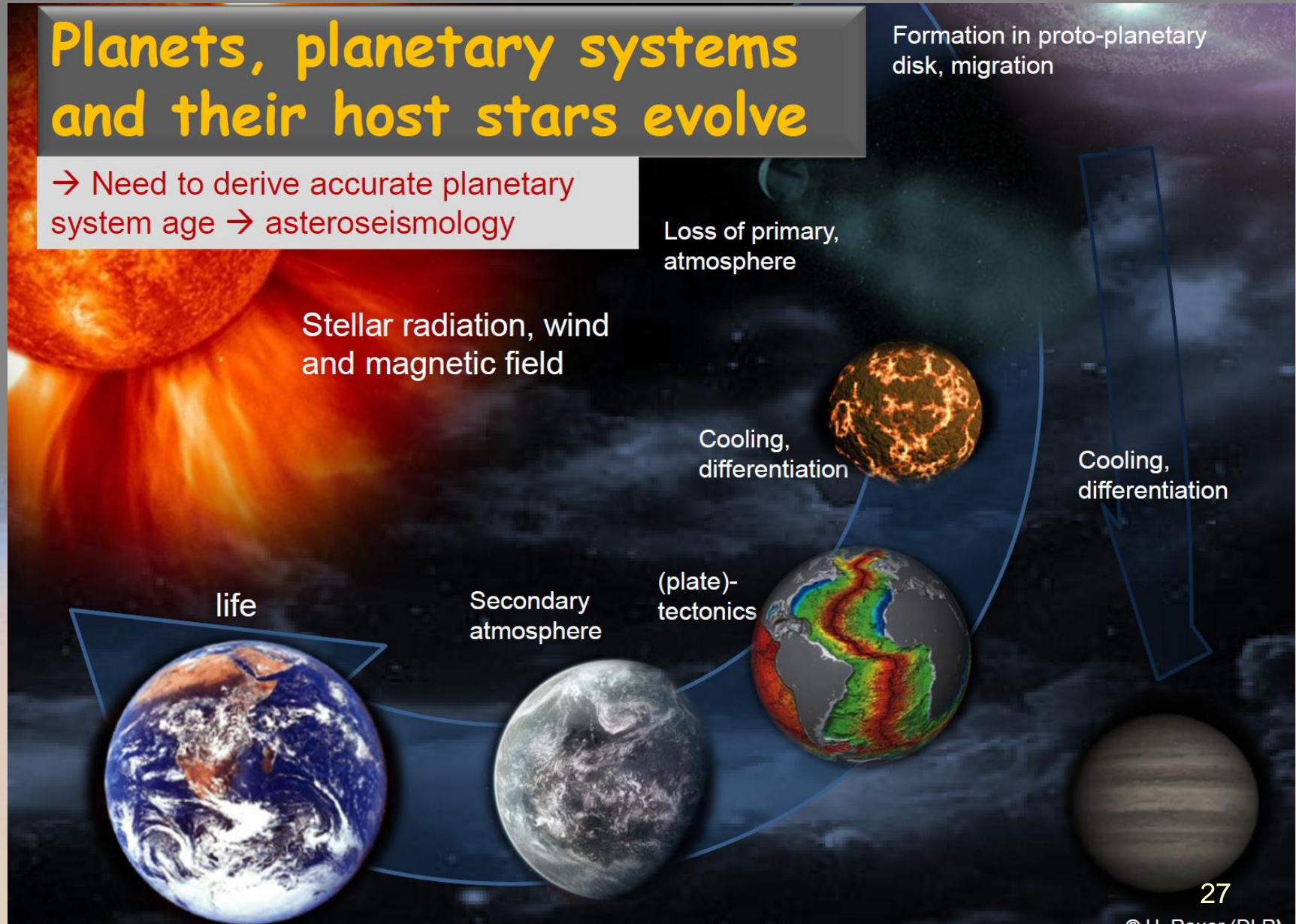
Cooling, differentiation

Cooling, differentiation

life

Secondary atmosphere

(plate)-tectonics



# **Биомаркеры: *открытые вопросы***

**False positive** - ложно положительный маркер, ложное срабатывание-это небιологический процесс, который имитирует характеристики биомаркера.

Эти процессы могут иметь следующую природу:

- Геологическую и геохимическую (вулканизм, серпентинизация)
- Минералогическую (отражательная способность поверхности)
- Фотохимическую (фотолитическое образование O<sub>2</sub>, сезонные изменения в газе)
- Атмосферной эволюции (производство O<sub>2</sub> за счет потери воды)

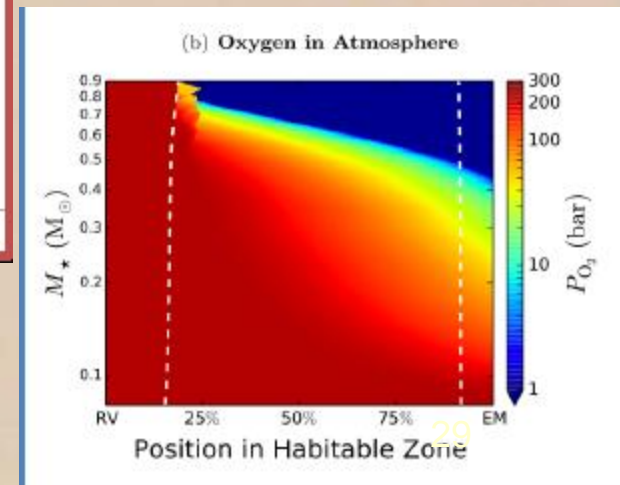
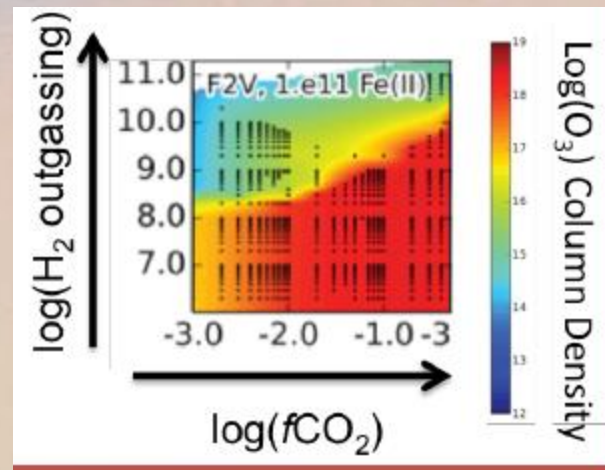
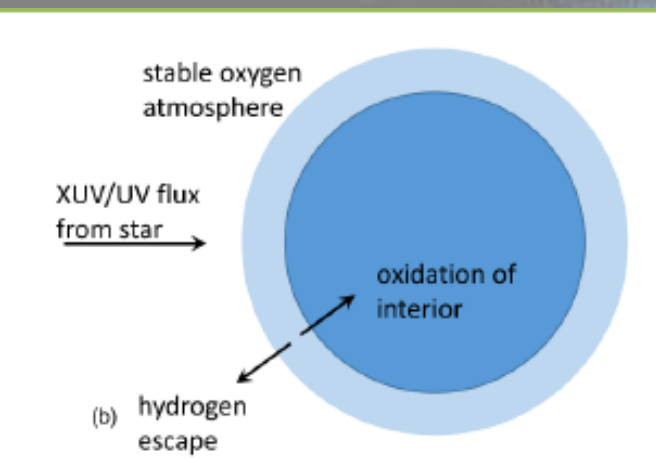
**Как мы определяем ложные срабатывания? Как же определить ложно отрицательные срабатывания?**

**Какие планетные процессы будут доминировать, при каких условиях? Что мы должны искать?**



# Биомаркеры: *примеры ложных срабатываний*

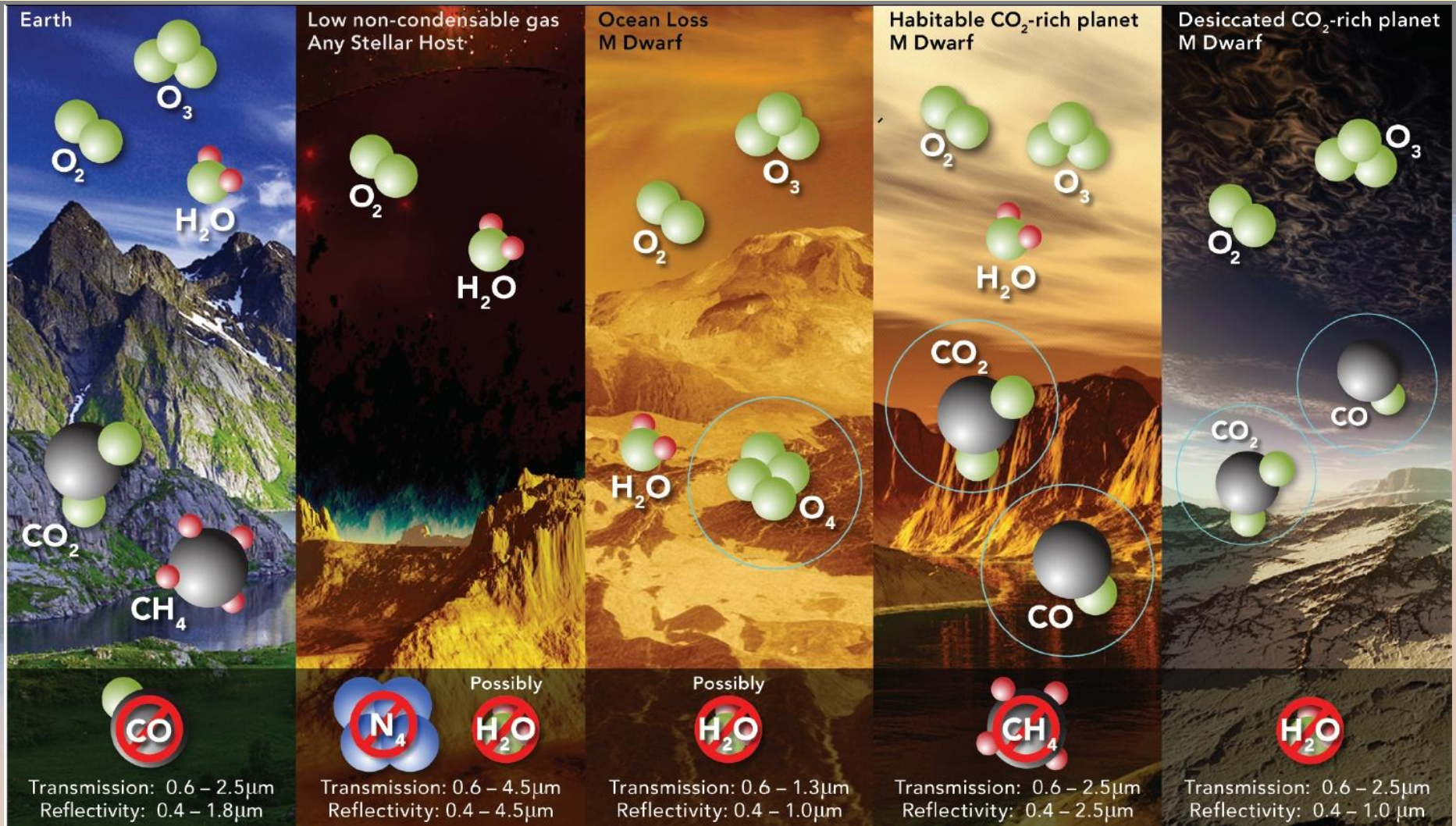
1. H Escape from thin N-depleted atmospheres (Wordsworth & Pierrehumbert 2014)
2. Photochemical production of O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> (Domagal-Goldman et al.; Tian et al., 2014, Harman et al., 2015)
3. O<sub>2</sub>-dominated post-runaway atmospheres from XUV-driven H loss (Luger & Barnes 2014)
4. CO<sub>2</sub> photolysis in dessicated atmospheres (Gao, Hu, Robinson, Li, Yung, 2015)



# **Биомаркеры:** *Дискриминанты ложных положительных маркеров*

- 1. H escape from thin N-depleted atmospheres**  
**(N<sub>2</sub>)<sub>2</sub> collisional pairs near 4.1μm (Schwieterman et al., 2015b)**
- 2. Photochemical production of O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>**  
**Weak signal, presence of CO, CH<sub>4</sub> (Domagal-Goldman et al., 2014; Schwieterman et al., 2016)**
- 3. O<sub>2</sub>-dominated post---runaway atmospheres from XUV---driven H loss**  
**O<sub>4</sub> dimers present for massive O<sub>2</sub> atmospheres (Misra et al., 2014; Schwieterman et al., 2016)**
- 4. CO<sub>2</sub> photolysis in desiccated atmospheres**  
**Lack of H<sub>2</sub>O vapor and presence of CO<sub>2</sub> (Gao et al., 2015)**

# Биомаркеры: диссипация атмосферы



Ложные срабатывания для кислорода, их спектральные дискриминанты и нужные диапазоны длин волн для наблюдений (Meadows, 2016).



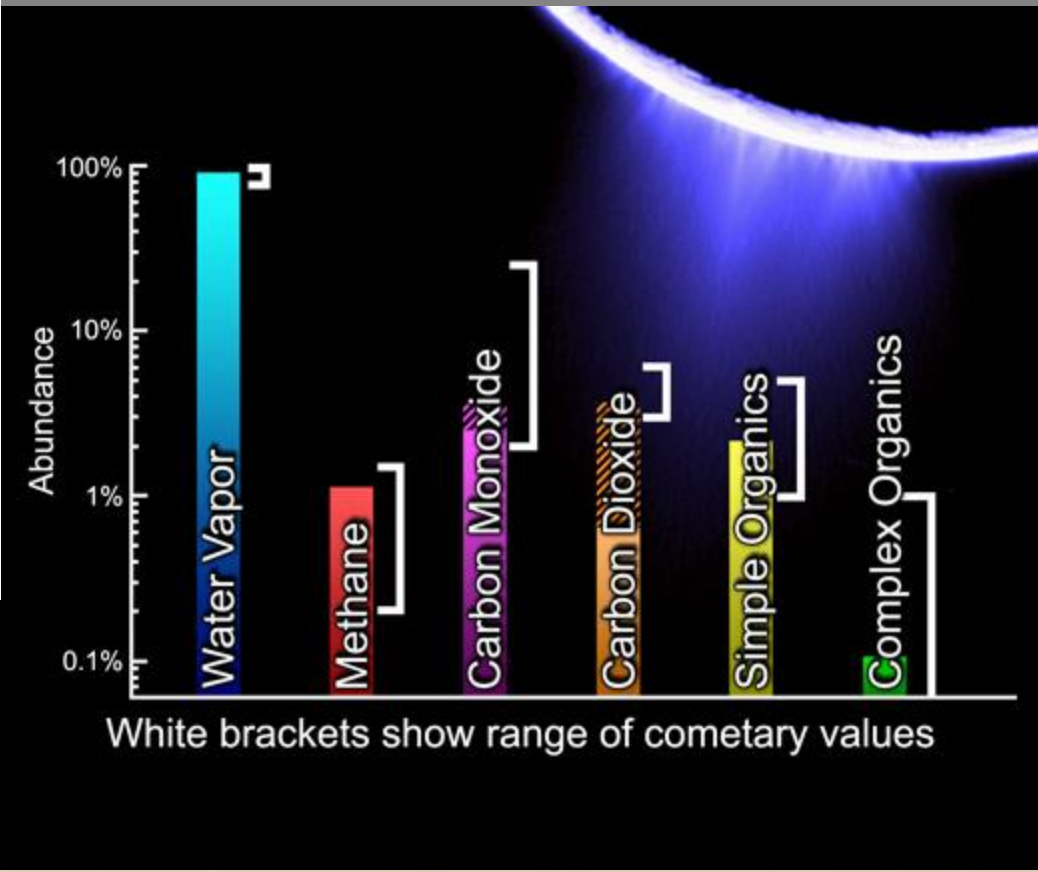
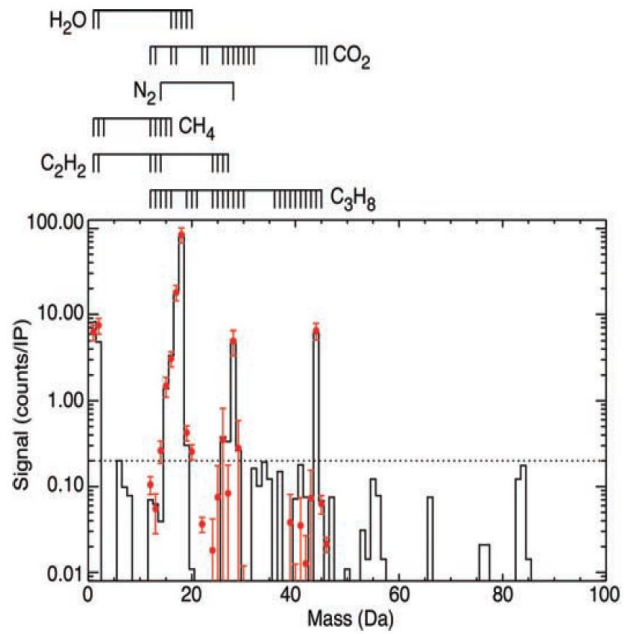
# Атмосферы планет и лун: *Церера*



Присутствие большого количества льда в коре Цереры говорит о том, что вода может широко встречаться в недрах еще неизученных астероидов, обитающих между орбитами Марса и Юпитера. Эти запасы льда помогают нам узнать, откуда взялась вода на Земле, а также могут служить ценным ресурсом для будущих проектов по добыче ископаемых на астероидах. Кроме того, это открытие размывает грань между астероидами и кометами.

# Атмосферы планет и лун: *Энцелад*

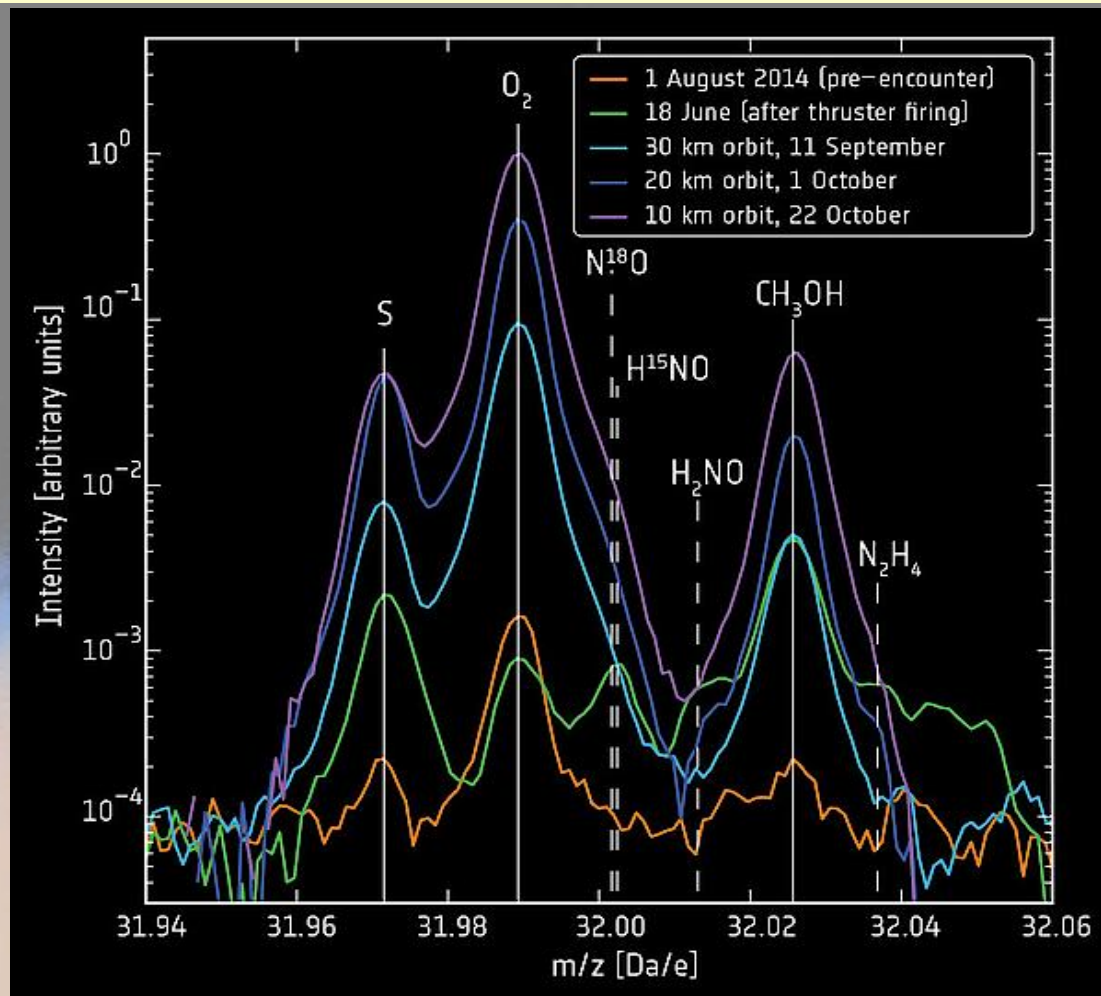
**Fig. 2.** Average mass spectrum for altitudes below 500 km. The solid black line indicates the measured average spectrum and the red symbols represent the reconstructed spectrum. The error bars displayed are the larger of the 20% calibration uncertainty or the 1σ statistical uncertainty. The dotted line is indicative of the 1σ noise level. The dissociative ionization products produced by the electron ionization source for each constituent are shown above the figure. Da, daltons; IP, integration period.



**Химический состав выбросов гейзеров на Энцеладе, измеренный при помощи масс-спектрометра INMS во время пролетов КА Cassini (Waite et al., Science, 2006).**

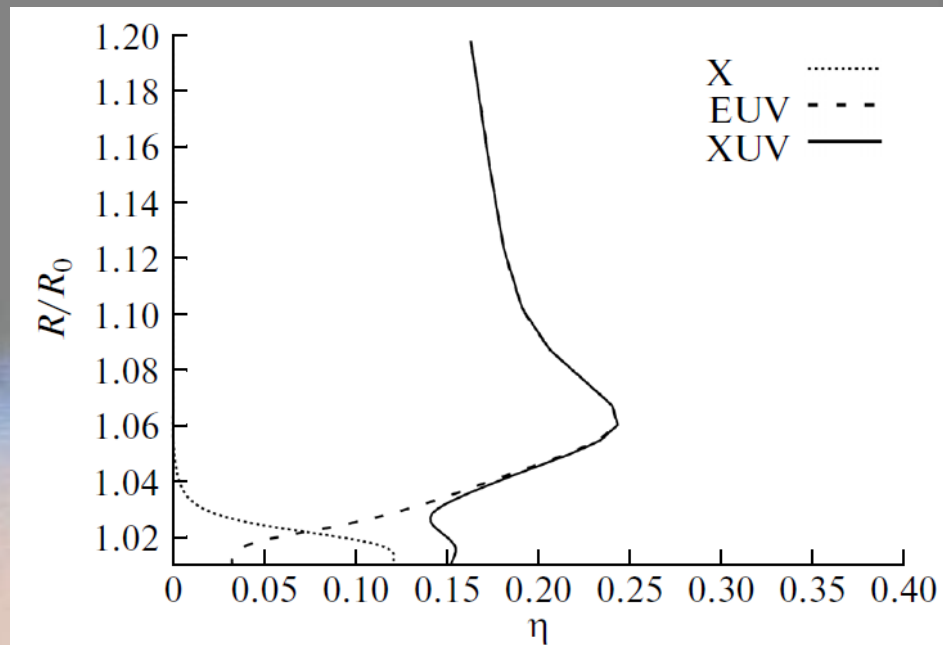
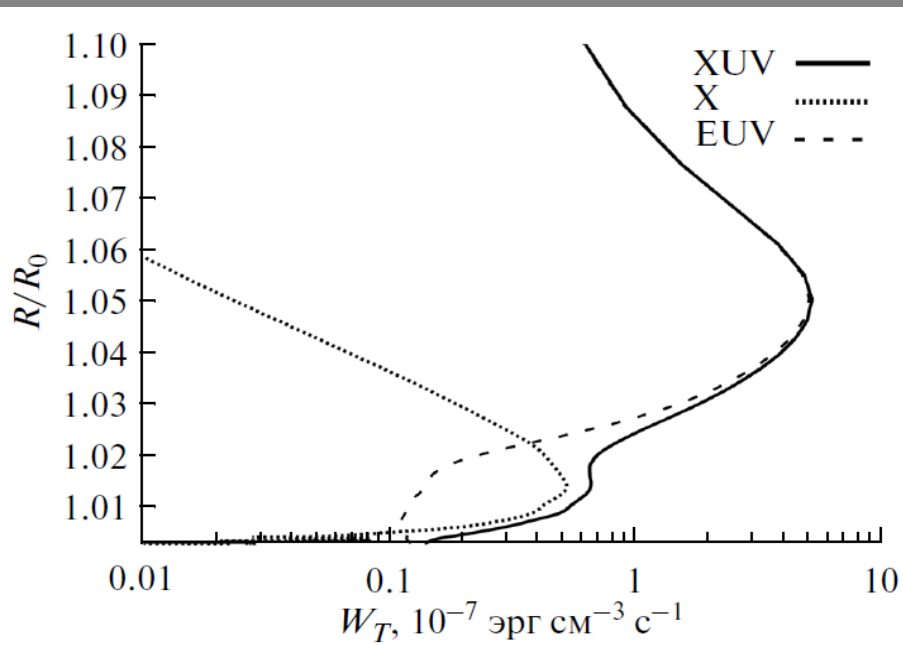


# Атмосферы планет и лун: *комета 67/P CG*



**Молекулярный кислород в спектрах, полученных ROSINA. Точное измерение отношения массы молекулы к элементарному заряду  $m/Z$  позволило разделить молекулы кислорода, метанола и атомы серы, имеющие очень близкую молекулярную массу ( $\sim 32$  а.е.м.).**

# Экзоатмосферы: эффективность нагрева



(а) Профиль интенсивности нагрева  $H_2$ -доминантной атмосферы излучением родительской звезды, рассчитанный для солнечного спектра и отдельно для рентгеновского и крайнего УФ диапазона. Пунктирной линией показана интенсивность нагрева рентгеновским излучением.

(б) Общая эффективность нагрева для базовой модели XUV (сплошная линия) и ее составляющие – модель EUV (штриховая линия) и модель X (мягкий рентгеновский диапазон, пунктирная линия).

Из работ Shematovich et al., A&A, 2014; Ионов & Шематович, АВ, 2015.

# Экзоатмосферы: модель атмосферы (Ионов+ 2017)

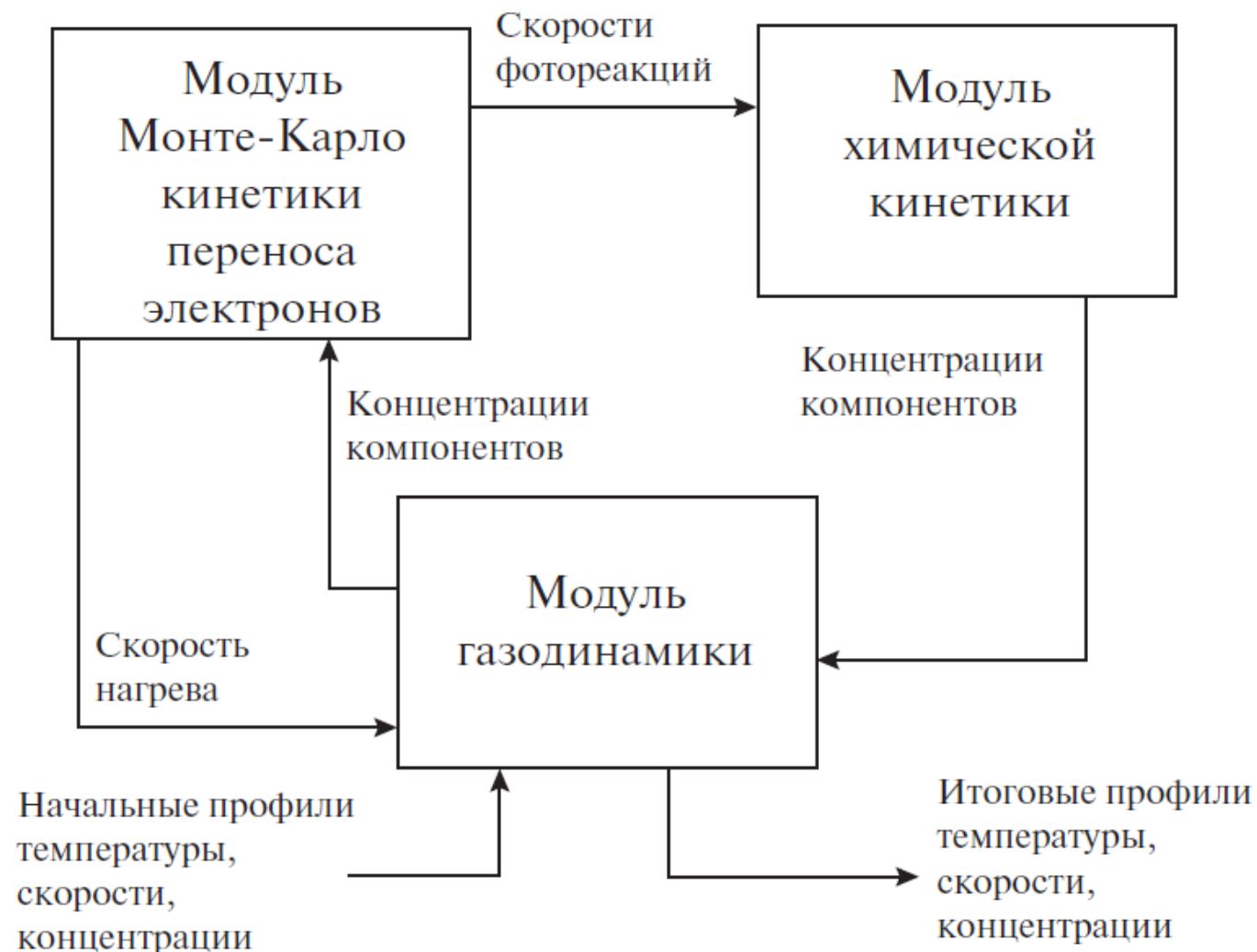
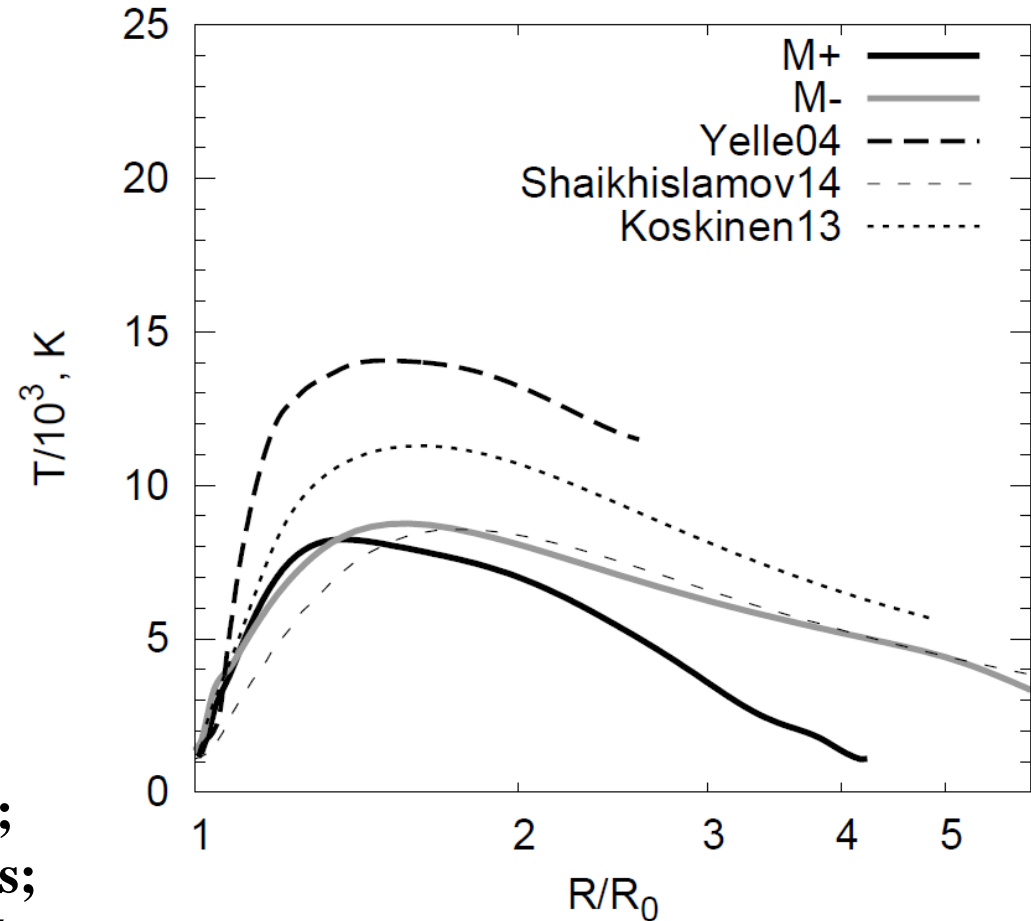


Рис. 1. Блок-схема используемой модели.

# Экзоатмосферы: модель атмосферы (Ионов+ 2017)

Radial profiles of gas temperature for model atmosphere of hot jupiter HD209458b with (M+) and without (M-) photoelectron kinetics and transport. Comparison with recent hydrodynamical models of Yelle (2004), Koskinen et al. (2013) and Shaikhislamov et al. (2014) is also shown.



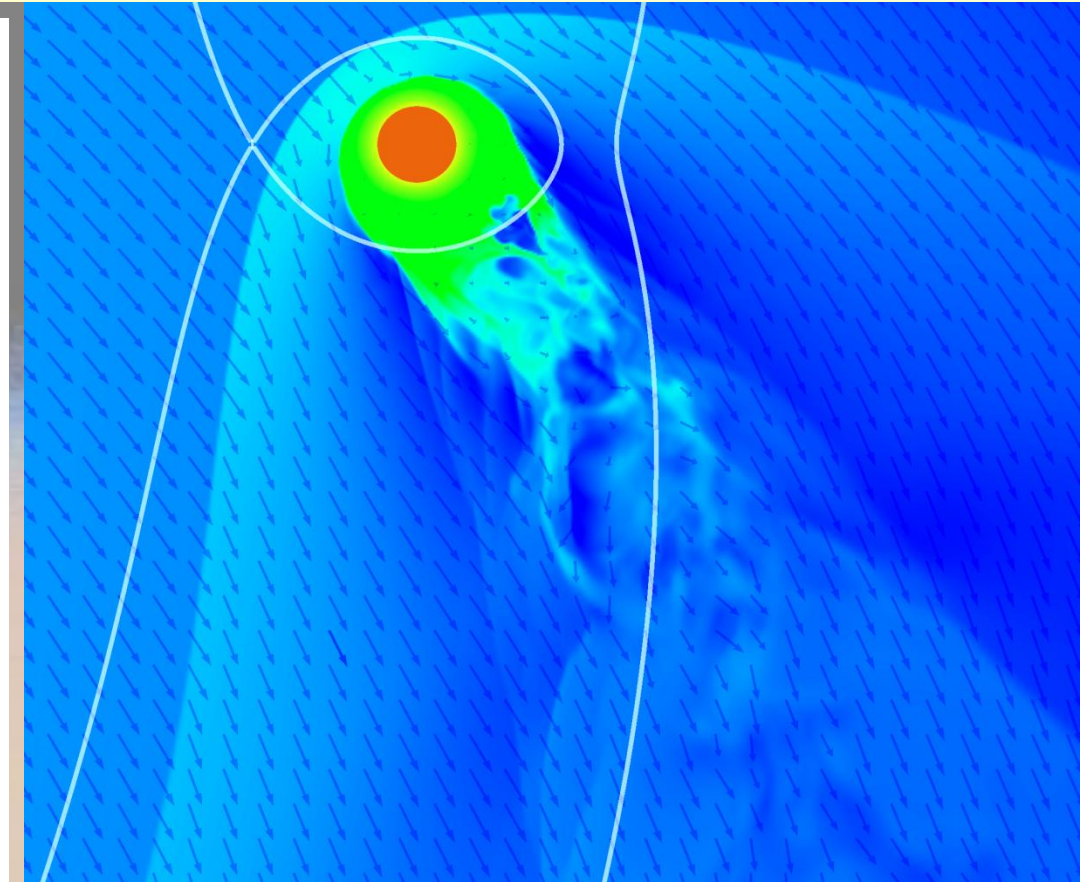
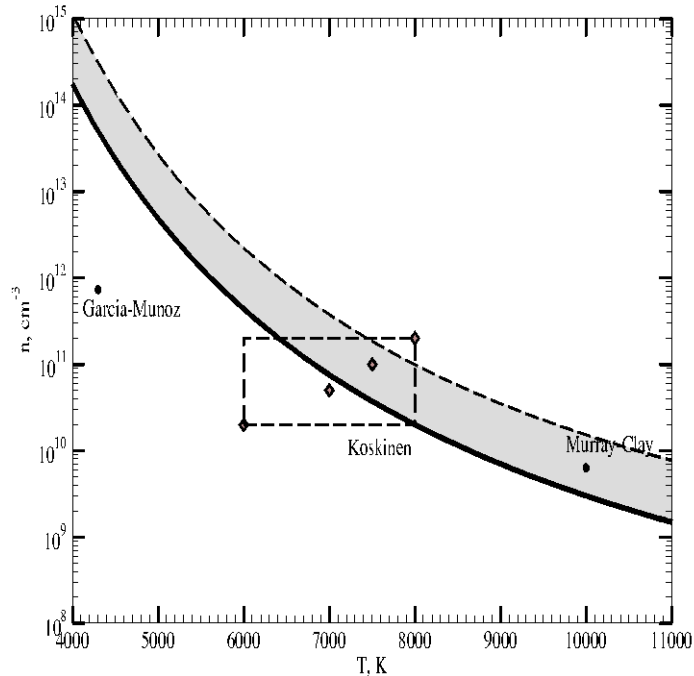
Темп потери атмосферы:  
Estimate from HST

observations	$\sim 10^{10}$ g/s;
Koskinen et al. (2013)	- $4 \times 10^{10}$ g/s;
Shaikhislamov et al. (2014)	- $7 \times 10^{10}$ g/s;
Model M-	- $4 \times 10^{10}$ g/s;
Model M+	- $8 \times 10^9$ g/s;

.....

# Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b ( $a=0.045$ а.е.)

$T_{\text{э}} = 6000$  К



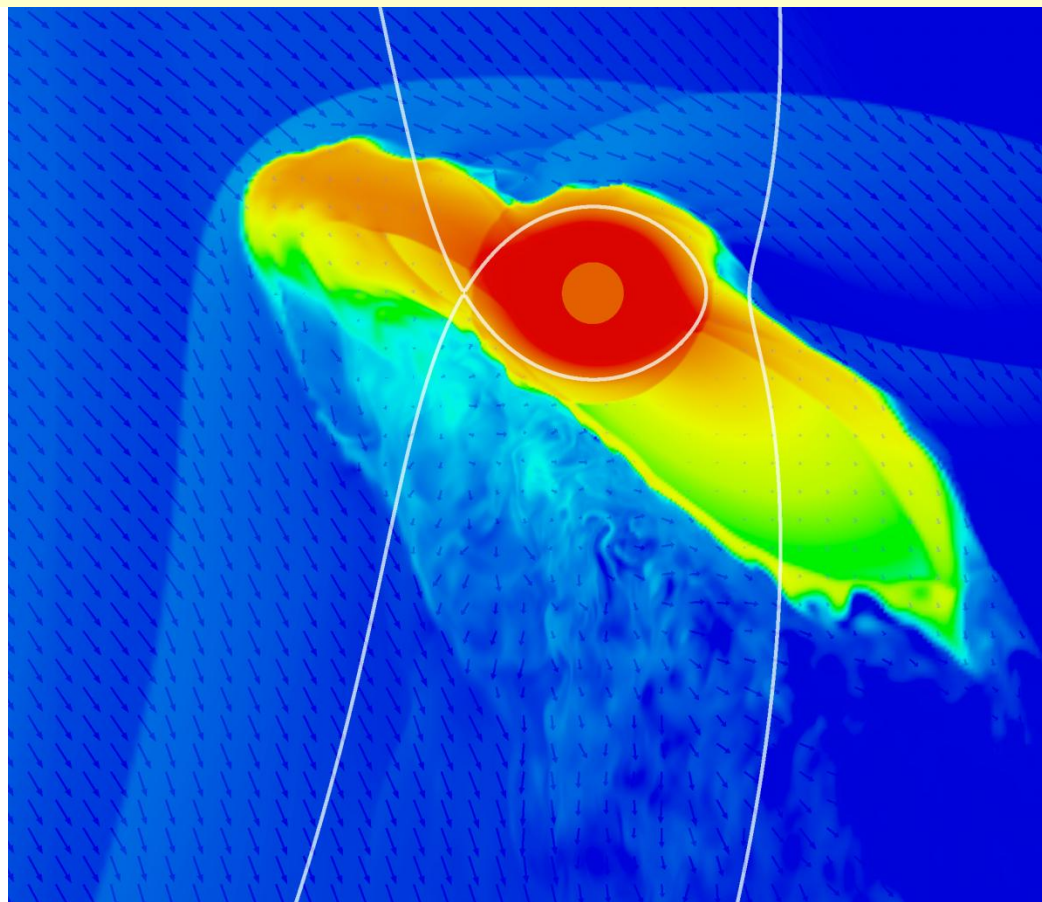
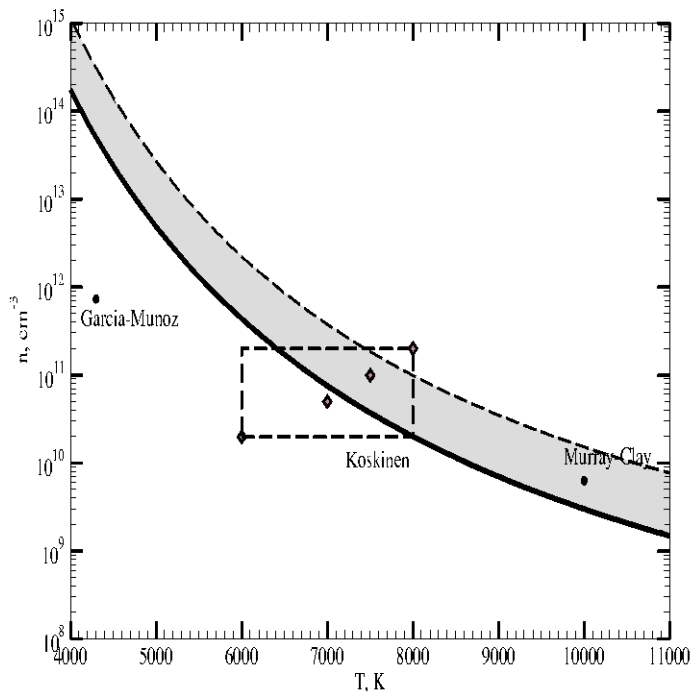
**В зависимости от положения точки лобового столкновения все газовые оболочки вокруг горячих юпитеров можно разделить на два класса (Бисикало и др., 2013):**

**(а) если точка лобового столкновения лежит внутри полости Роша планеты, то оболочки имеют почти сферическую форму классической атмосферы, слегка искаженную воздействием звезды и взаимодействием с газом**



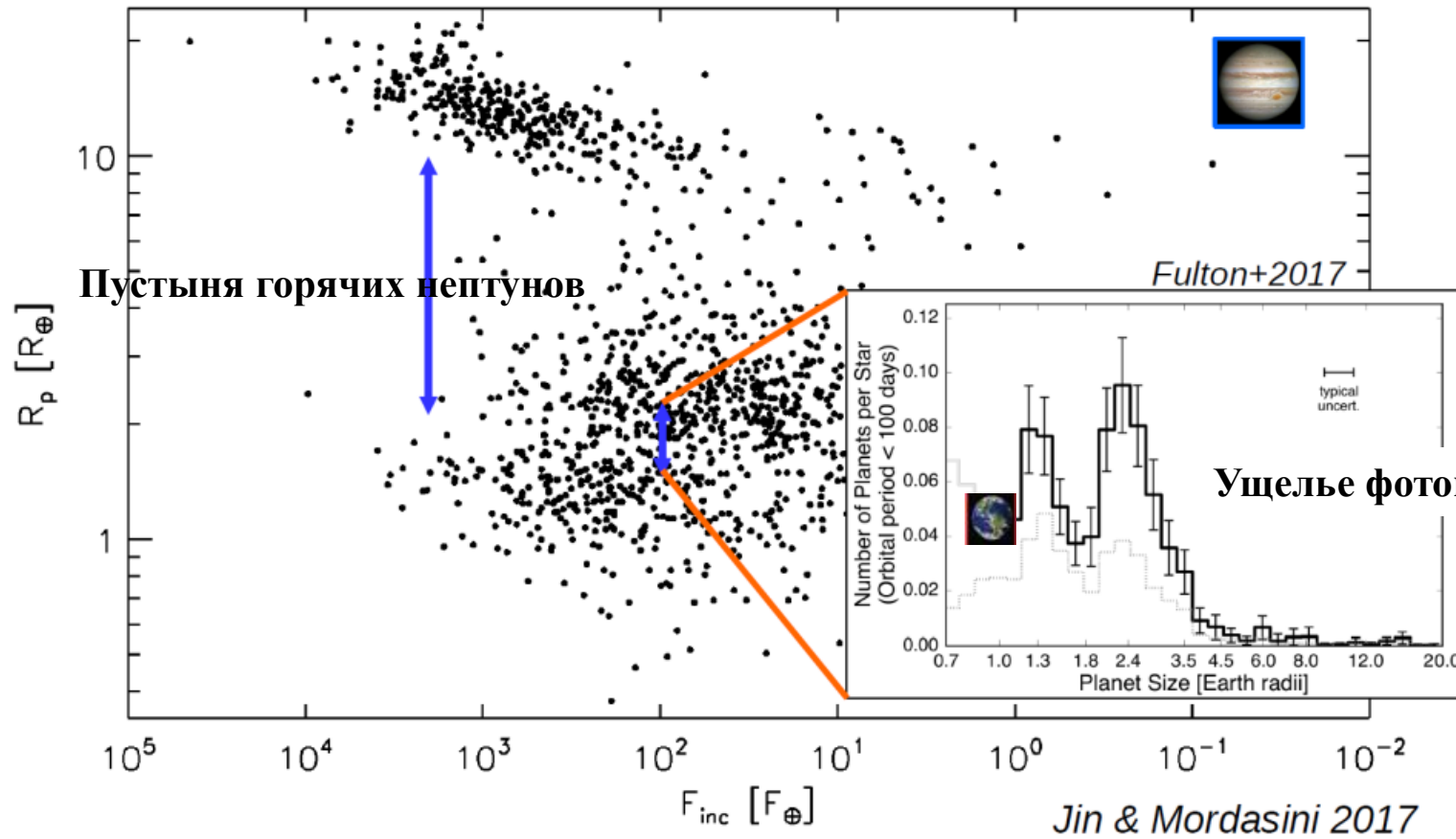
# Интерпретации наблюдений на КТХ протяженной водородной атмосферы HD209458b

$$T_{\text{э}} = 8000 \text{ К}$$



**(б) если точка лобового столкновения находится за пределами полости Роша, то начинается истечение через окрестности точек Лагранжа L1 и L2, и оболочка становится либо замкнутой, либо незамкнутой, и существенно несимметричной.**

# Экзопланеты: распределение планет по данным КТ Кеплер



Экзопланеты занимают широкий диапазон значений по радиусу планеты и потоку излучения от родительской звезды. Выявлены следующие структуры:

- А) пустыня горячих нептун ( $T \sim 700 - 1200 \text{ K}$ ;  $R \sim (2.0 - 6.0)R_E$ );
- Б) ущелье фотоиспарения, разделяющее каменные экзоземли и супер-земли ( $R < 1.8R_E$ ) и суб-нептун и водные миры ( $R > 2.0R_E$ ).

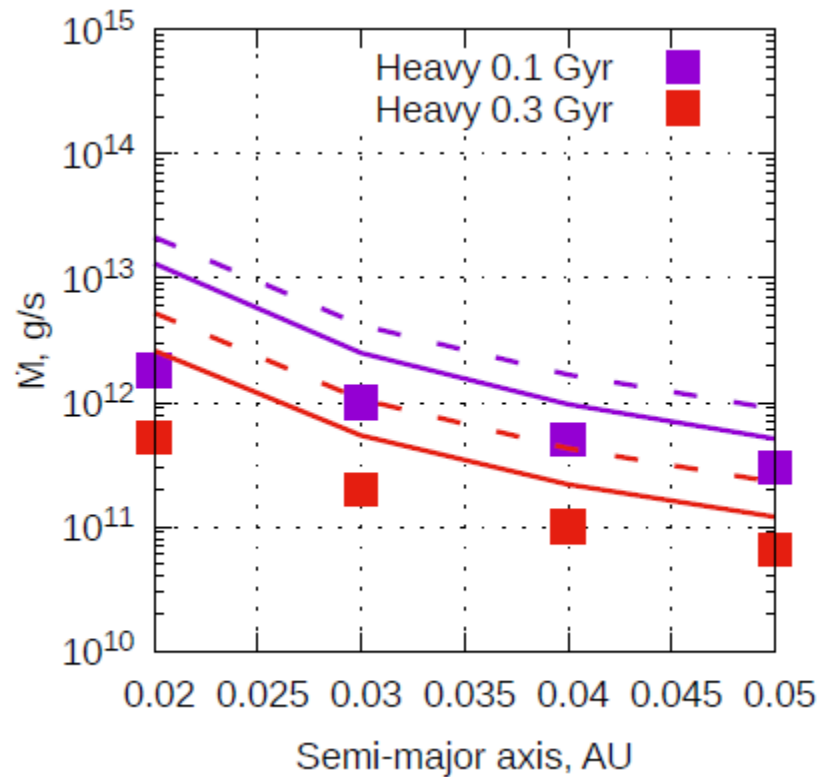
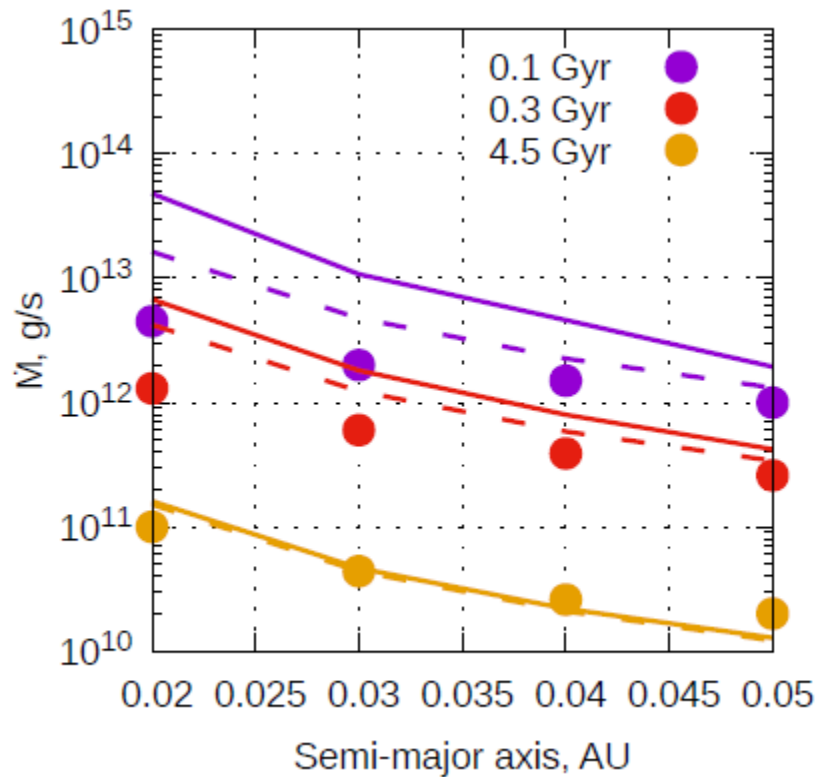
# Экзопланеты: пустыня горячих нептун

Наши недавние исследования (Ionov et al., MNRAS, 2018) показали, что:

А) скорости потери атмосферы в зависимости от перицентра орбиты горячего нептона. Разный возраст родительской звезды показан разным цветом. Легкие нептуны – слева, тяжелые – справа.

Прерывистые линии – ранее используемые приближенные формулы для потери массы за счет фотоиспарения (Lopez et al., 2012, 2016):

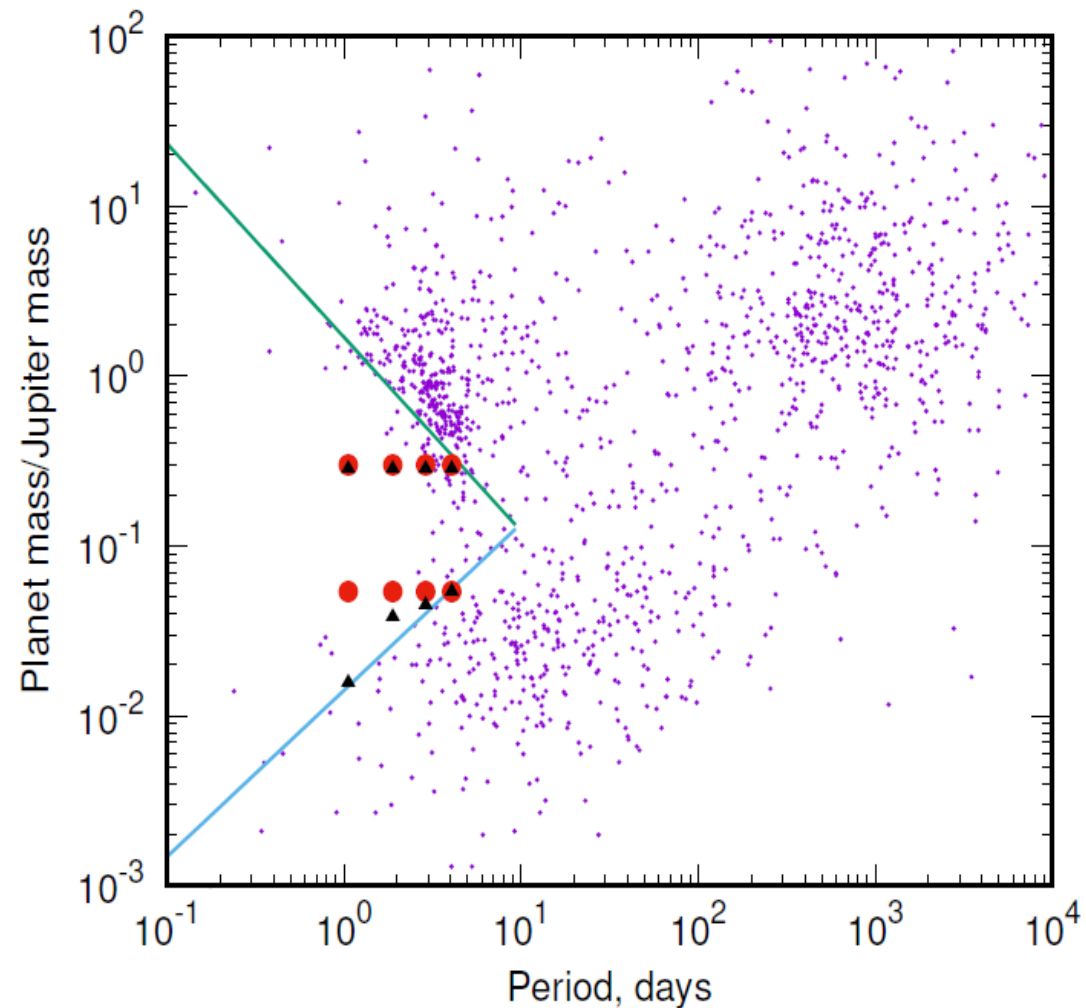
$$\frac{dM_p}{dt} \approx \frac{\epsilon_{XUV} \pi F_{XUV} R_p R_{XUV}^2}{GM_p K_{\text{tide}}(\xi)}$$



# Экзопланеты: пустыня горячих нептунов

Наши недавние исследования (Ionov et al., MNRAS, 2018) показали, что:

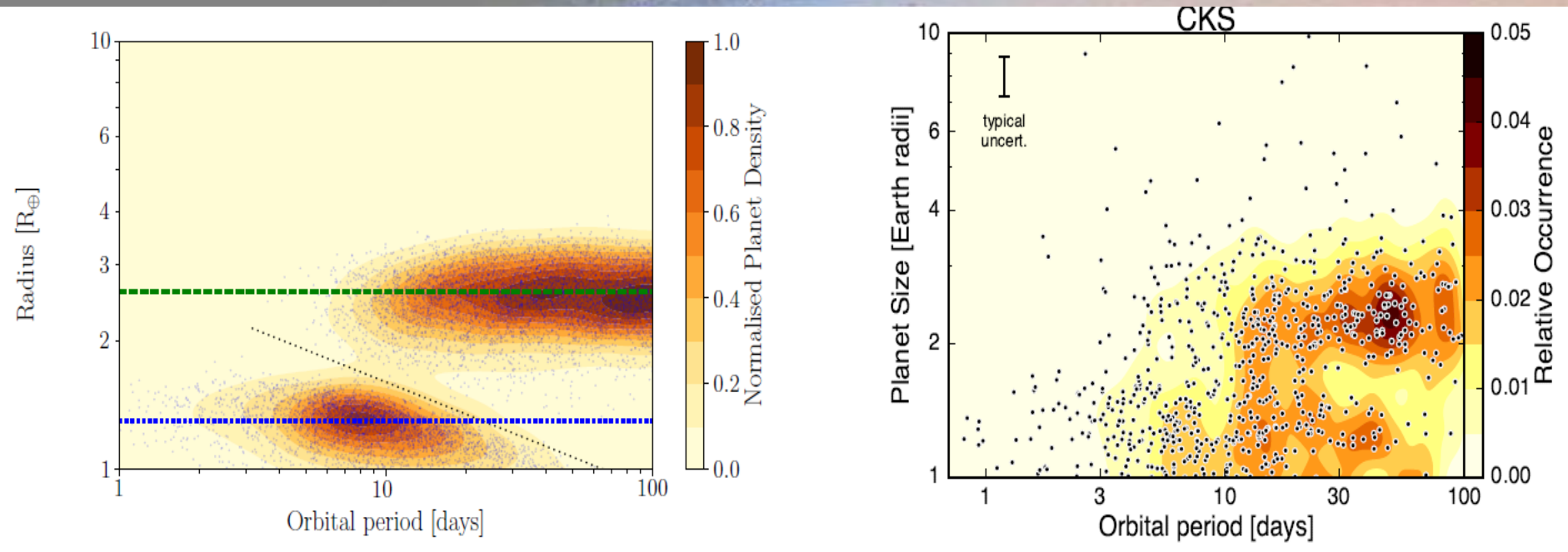
б) фотоиспарение H-He оболочек горячих нептунов (Owen & Wu, 2013, 2016; Lopez et al., 2012, 2016) не в полной мере позволяет объяснить образование этой структуры – пустыни горячих нептунов (Mazeh et al., 2016). Результаты наших расчетов показаны на диаграмме период-масса – красные круги – начальное, а черные треугольники – финальное состояния атмосфер горячих нептунов разной массы.



В случае легкого нептона ( $M_{\text{N}}$ ) оцененные верхние пределы потери атмосферы согласуются с приблизительными расчетами, но в случае тяжелой планеты ( $6 \cdot M_{\text{N}}$ ) механизм фотоиспарения атмосфер горячих экзопланет не позволяет потерять значительную долю атмосферы планеты.

# Экзопланеты: *ущелье фотоиспарения*

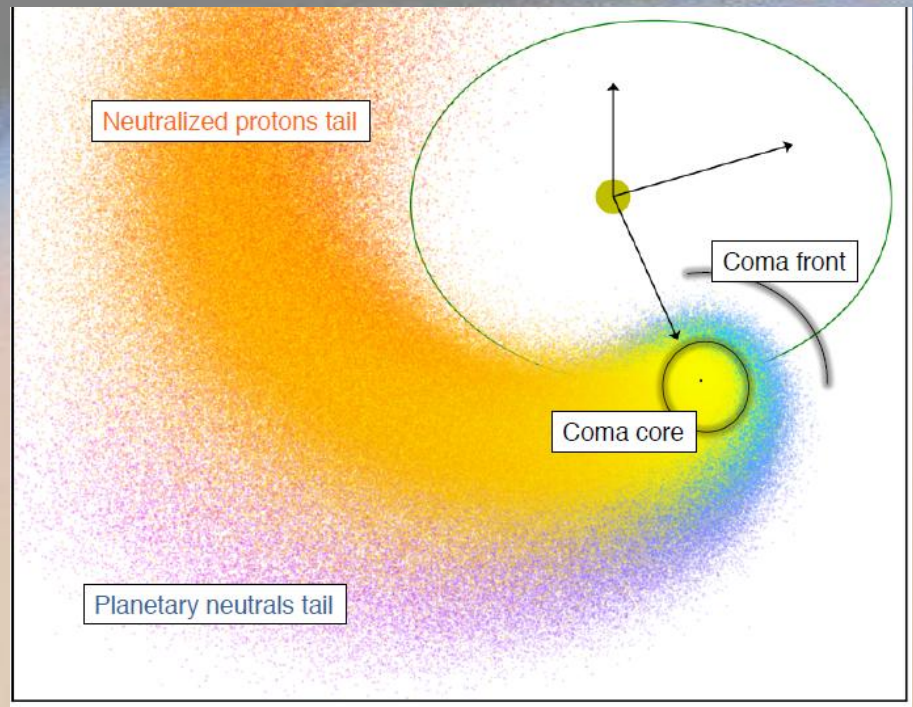
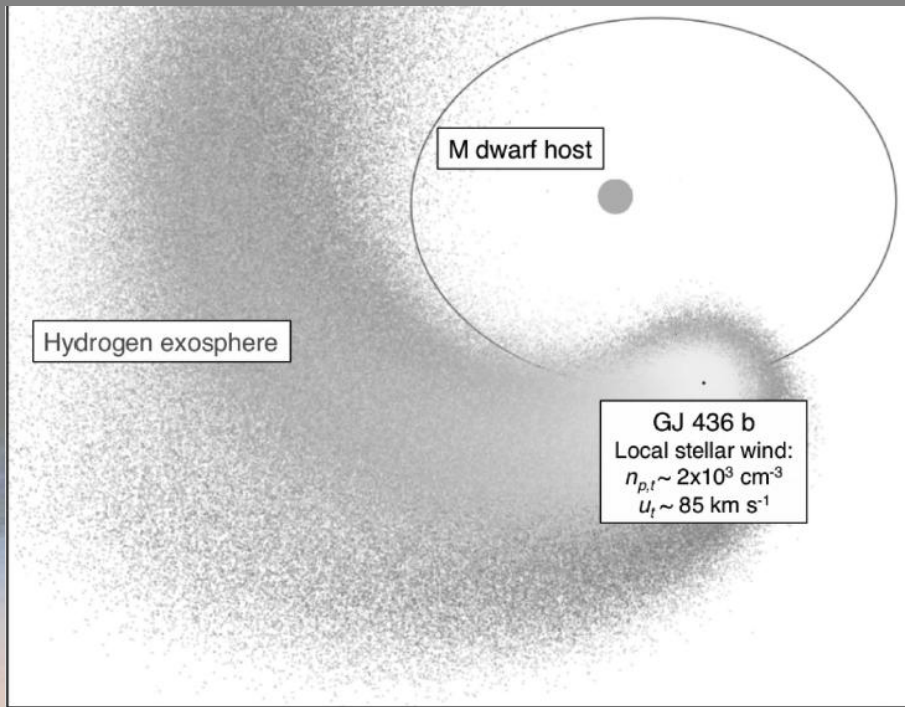
The final radius distribution, now plotted as 2-D contours to display the period dependence (Owen & Wu, ApJ, 2017). The model largely reproduces the observed one (right side, taken from Fulton et al., AJ, 2017), with the exception of an absence of small planets at long periods in the model. The black dotted line is the analytical result (eq. 28) for the size of the most massive planet that can be stripped bare, at a given period. This marks the lower boundary of the “evaporation valley”.



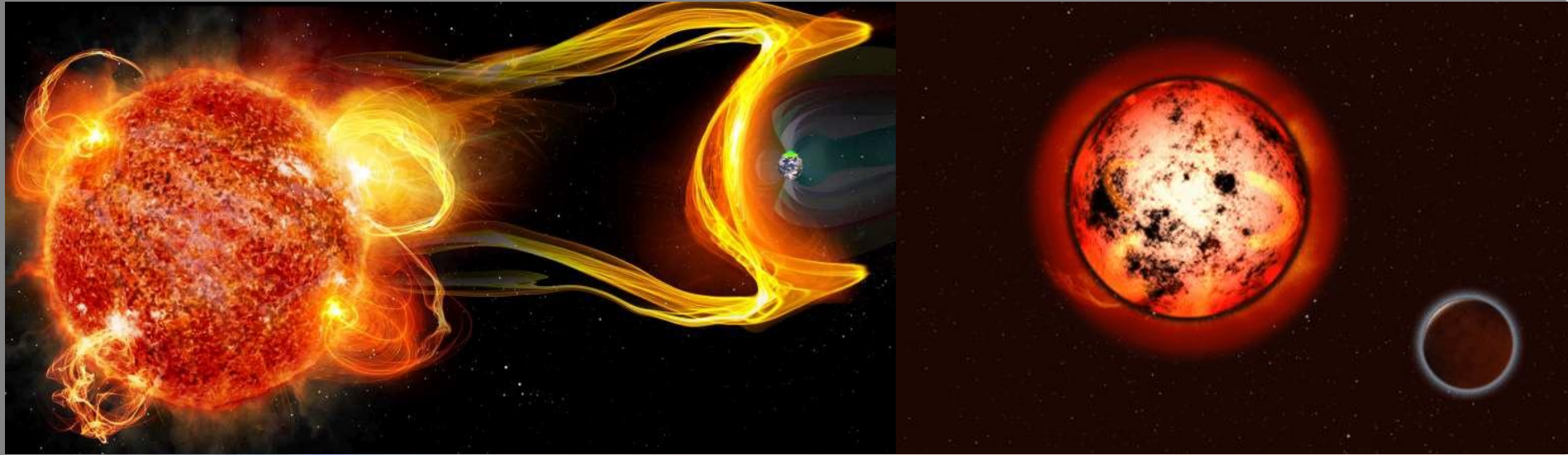


# Экзопланеты: ущелье фотоиспарения

Schematic representation of the neutral hydrogen cloud surrounding hot sub-neptune GJ 436 b, displaying the different regions of the exosphere. Colors distinguish between the two populations of hydrogen atoms with different origins that compose the cloud (Bourrier et al., A&A, 2016; Vidotto & Bourrier, MNRAS, 2017).

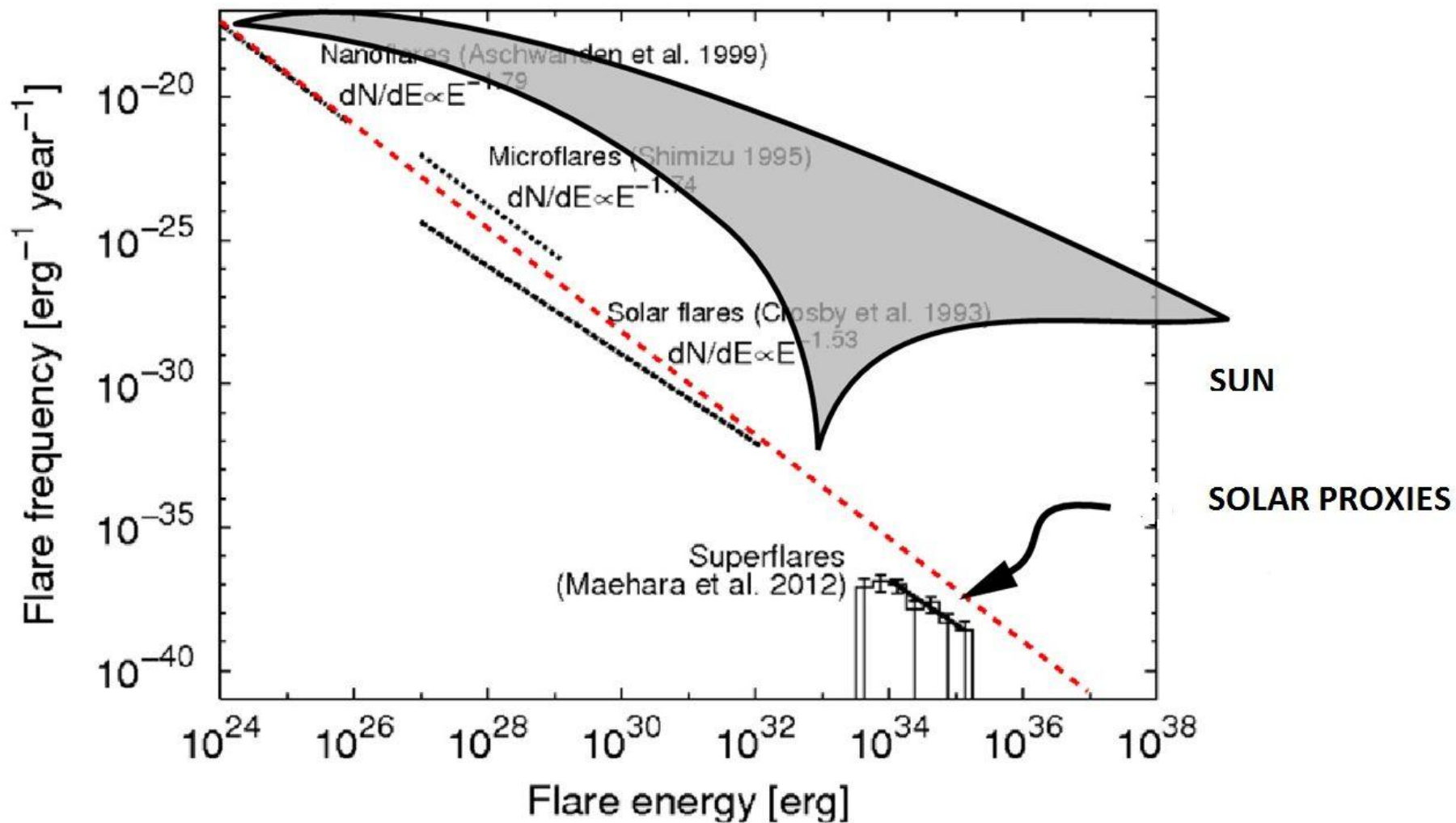


# Экзопланеты: *спорадические воздействия звезды*



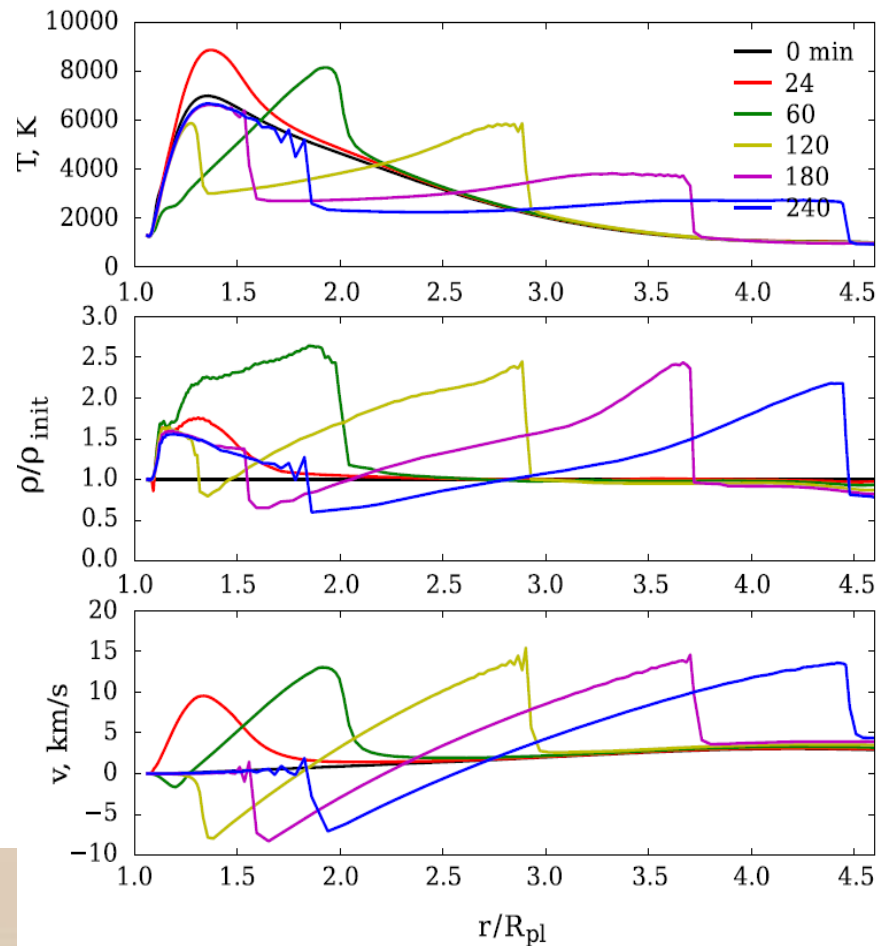
**Спорадическая активность звезды - вспышки и выбросы корональной массы, - оказывает важное влияние на эволюцию атмосфер планет, особенно если планеты на близких орбитах (например, Luger et al., 2015; Cherenkov et al. 2017; Tilley et al., 2018). Поскольку звездная активность возрастает с уменьшением звездного возраста, последствия этих экстремальных явлений для атмосфер планет особенно важны для молодых систем.**

## Energy-frequency distribution



# Экзопланеты: воздействия звездных вспышек

1D аэрономическая модель применена для изучения реакции верхней атмосферы горячего юпитера HD 209458b, вызванной звездной вспышкой со 100-кратным ростом энергии ( $100 \cdot 10^{32}$  эрг/с). Атмосферное поглощение дополнительной энергии во время вспышки, приводит к локальному нагреву атмосферы, сопровождаемому образованием двух распространяющихся ударных волн. (Бисикало и др, АЖ, 2018)

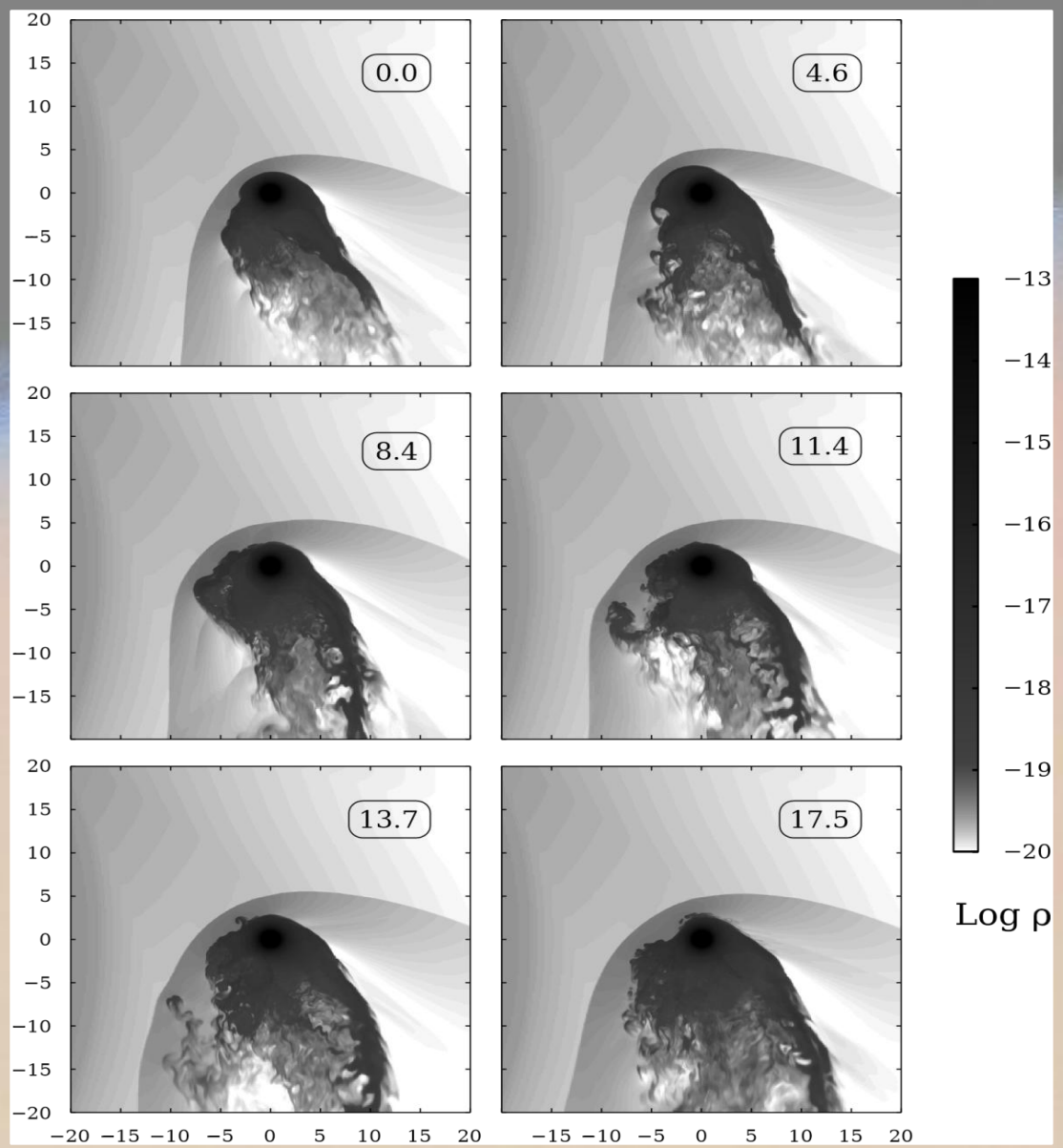


Показаны радиальные профили температуры (верхняя панель), отношение массовой плотности текущего состояния к плотности газа до вспышки (средняя панель) и скорости (нижняя панель) в атмосфере горячего юпитера HD 209458b до начала (тонкая сплошная линия), во время звездной вспышки после (60 минут - штрихпунктирная линия; 180 минут - пунктирная линия) ее завершения.

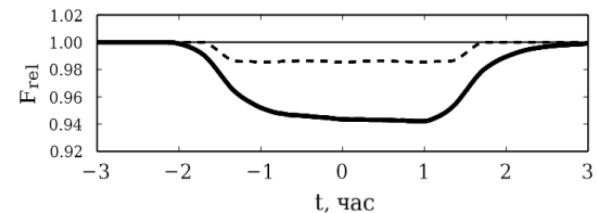
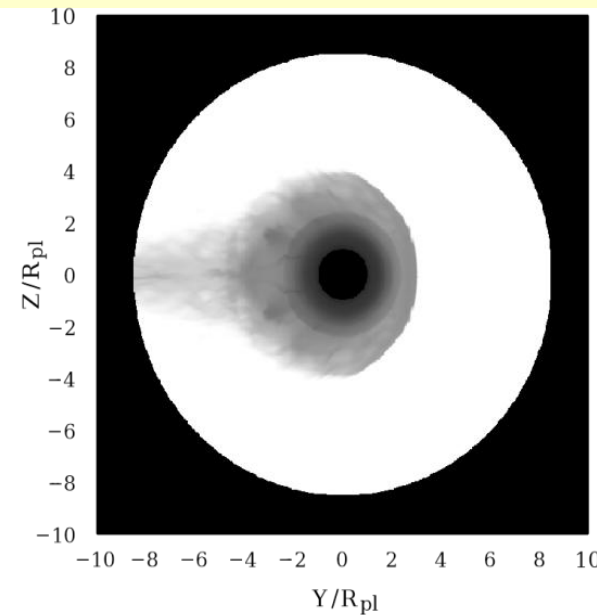
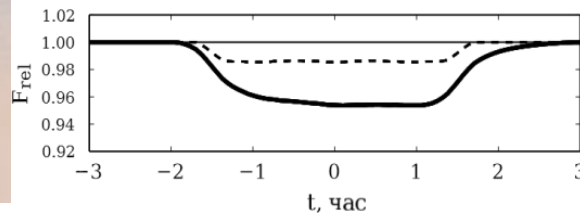
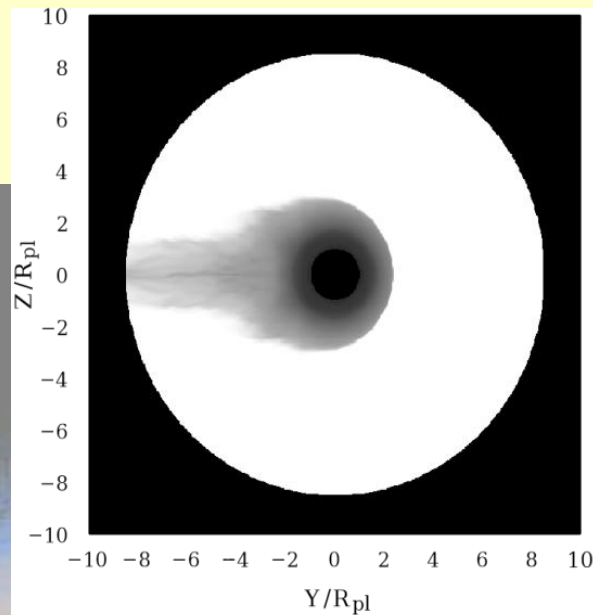


# Экзопланеты: воздействия звездных вспышек

Динамика атмосферы с потерей массы атмосферы из-за нагрева, вызванной 100-кратной вспышкой. Показано распределение плотности в плоскости орбиты системы в логарифмическом масштабе, все расстояния указаны в планетных радиусах. Для каждой панели время в часах после начала вспышки отображается в верхнем правом углу.



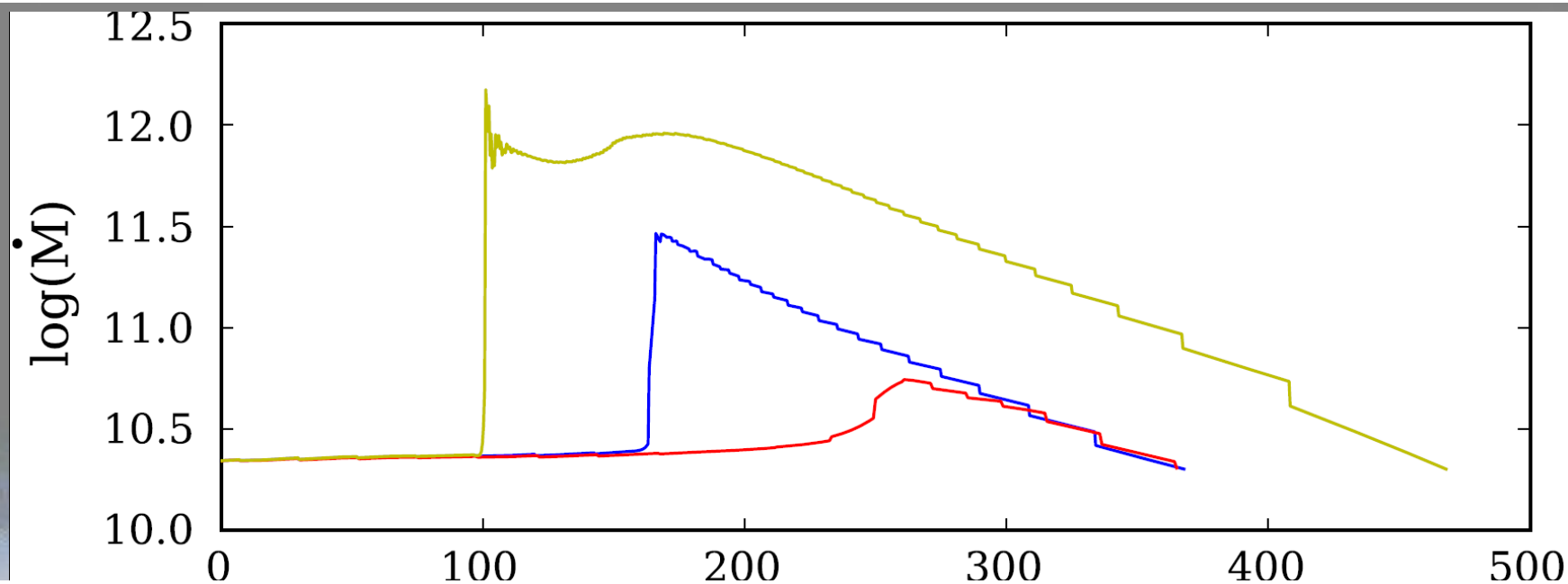
# Экзопланеты: наблюдательные проявления воздействия звездных вспышек



Увеличение поглощения в линии Ly- $\alpha$  вследствие выброса вещества из атмосферы при вспышке 100-кратной силы. Слева показано затмение в линии Ly- $\alpha$  для стационарного решения, справа – для момента с максимальным затмением, соответствующим времени  $t = 5h$  с начала вспышки. Затмение увеличивается на несколько процентов на время порядка нескольких часов. Пунктирной линией показано затмение, даваемое только диском планеты в оптическом диапазоне (1.8%).

# Экзопланеты: спорадические потери атмосферы

Временная эволюция скорости потери массы (в г/с), рассчитанная на экзобазе атмосферы горячего юпитера HD 209458b, во время вспышек 10-, 100-, и 1000-кратной силы (красная, синяя и зеленая линии).



Атмосферные потери в течение и после вспышки:

•  $\Delta M_{10} = 4 \times 10^{13} \text{ g}$ ;  $\Delta M_{100} = 2 \times 10^{14} \text{ g}$ ;  $\Delta M_{1000} = 2 \times 10^{15} \text{ g}$

• Общие потери массы атмосферы планеты-гиганта за 1 млрд. лет:

•  $M_{st} = 2 \times 10^{10} \text{ g/s} * 3 \times 10^{16} \text{ s} \approx 10^{27} \text{ g}$

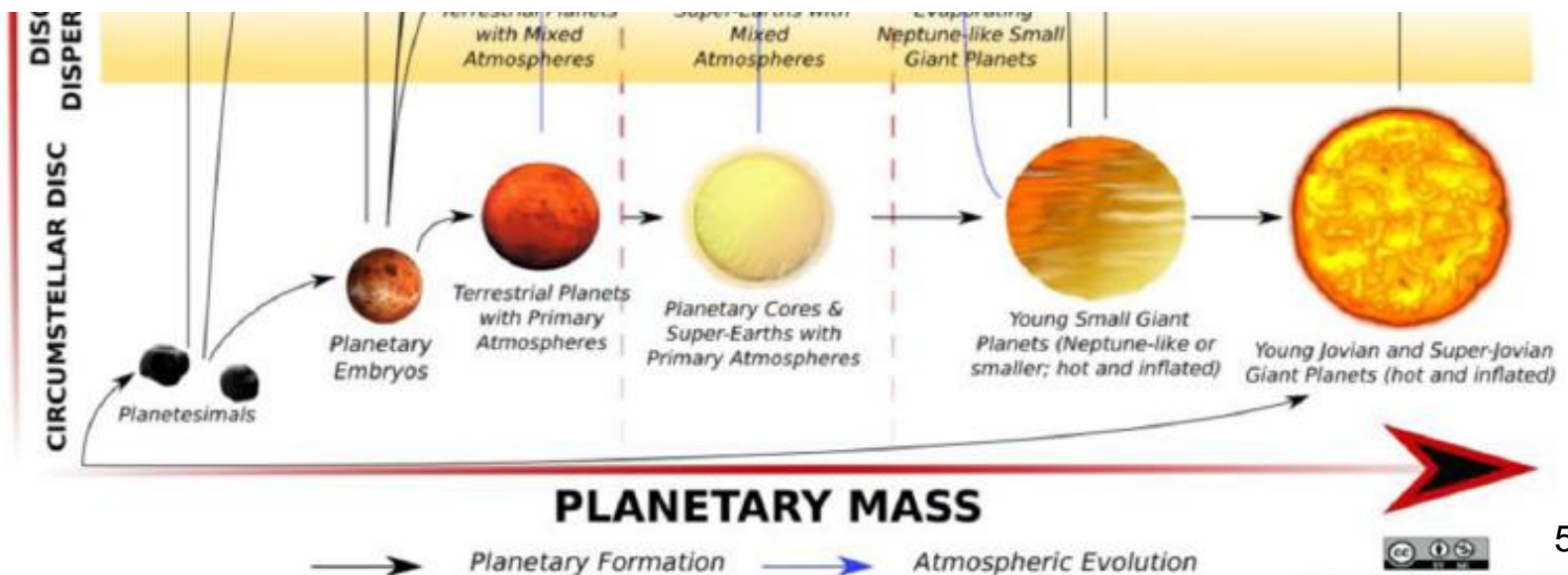
•  $\Delta M_{10} = 5 \times 10^{13} \text{ g/s} * 1 \times 10^8 \text{ s} \approx 10^{22} \text{ g}$

•  $\Delta M_{100} = 8 \times 10^{14} \text{ g/s} * 1 \times 10^7 \text{ s} \approx 10^{22} \text{ g}$

•  $\Delta M_{1000} = 8 \times 10^{15} \text{ g/s} * 1 \times 10^6 \text{ s} \approx 10^{22} \text{ g}$

# Экзопланеты: эволюция атмосфер

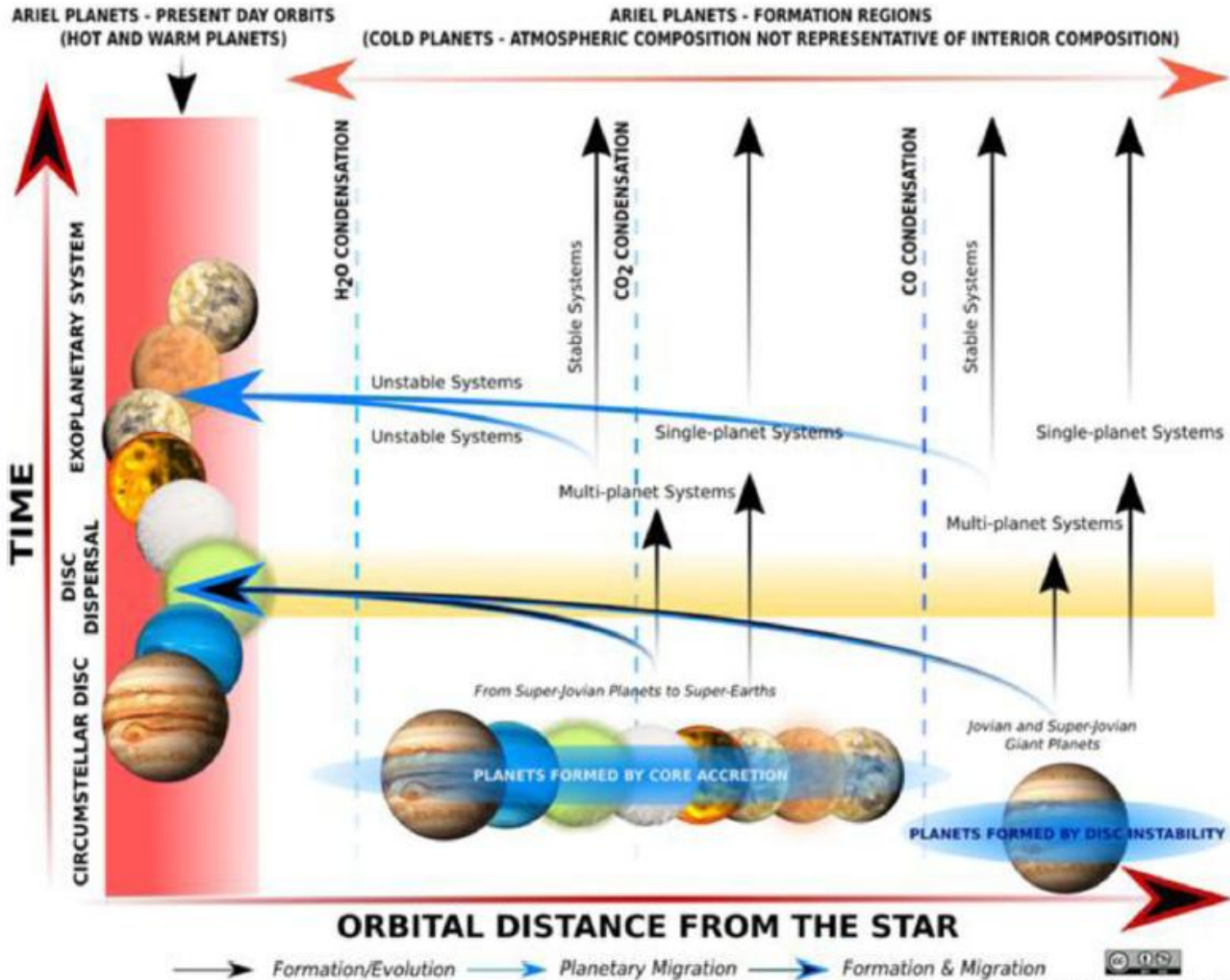
Схематическое представление путей образования и эволюции планет, посредством которых, начиная с газо-пылевой фракции в околозвездных дисках, образуются различные виды планет. *Черные стрелки* указывают пути, связанные с процессами образования (например, неустойчивость диска, аккреция пыли, захват газа), а *синие стрелки* указывают пути, задаваемые атмосферной эволюцией (например, атмосферное убегание, эрозия атмосферы, дегазация). Планеты делятся на три широкие категории: скальные/ледяные планеты (в основном состоящие из Si, Mg, Fe, C, O), газовые планеты-гиганты (для которых H и He представляют значительную часть их массы) и переходные планеты (охватывающие переход между крупнейшими скалистыми и ледяными планетами и самыми маленькими богатыми газом планетами). Солнечная система предлагает нам примеры скалистых и ледяных планет и газовых гигантов, но в ней нет переходных планет.



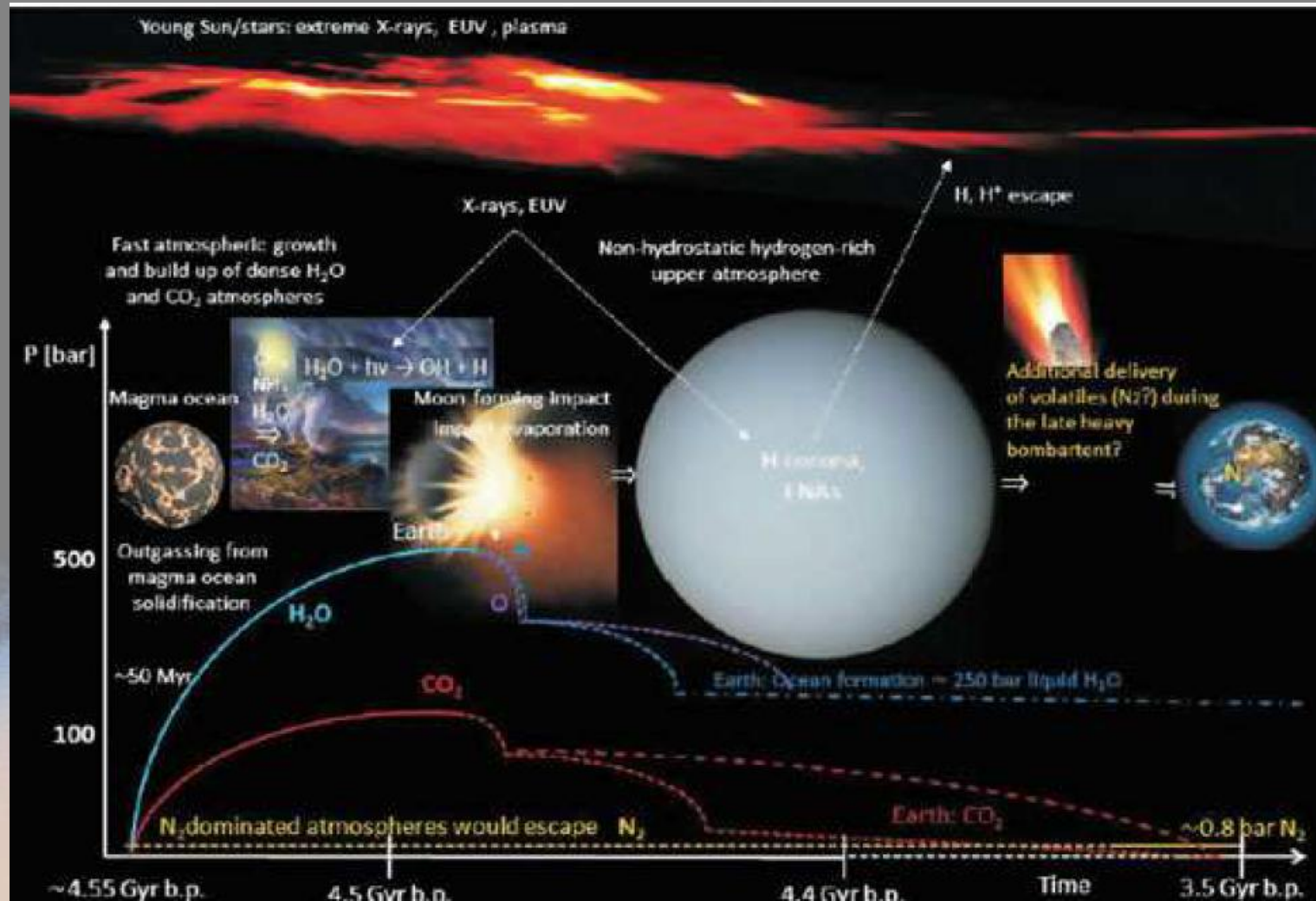


# Экзопланеты: эволюция атмосфер

Планеты-гиганты, а также большинство малых планет образуют во внешних, более холодных областях околозвездных дисков, где присутствует большая часть газа, пыли и льдов. Миграция доставляет значительную часть планет ближе к звезде.

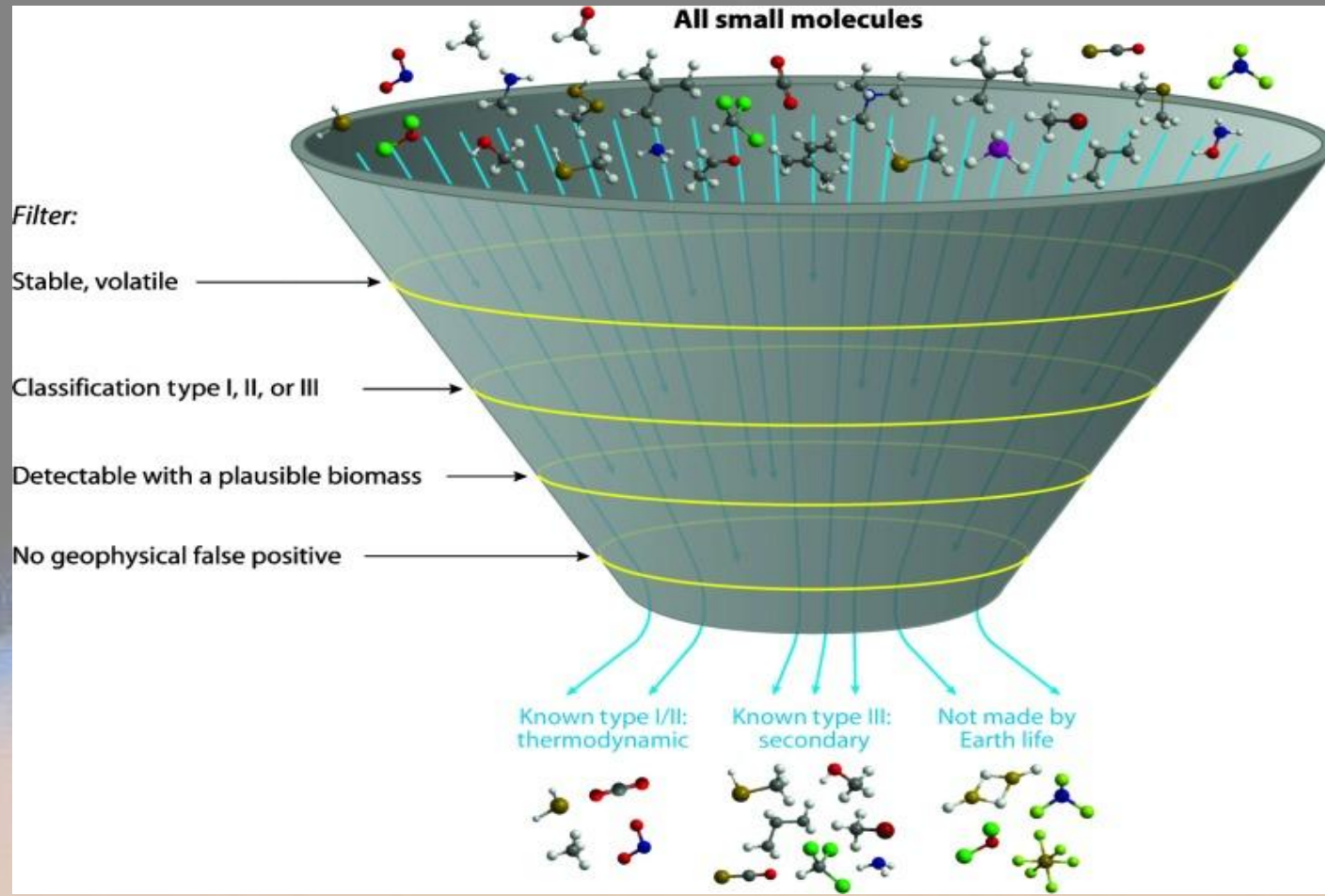


# Экзоатмосферы: эволюция - Земля



Сходный сценарий изменения атмосферы для ранней Земли после образования плотной паровой атмосферы в течение процесса затвердевания океана магмы.

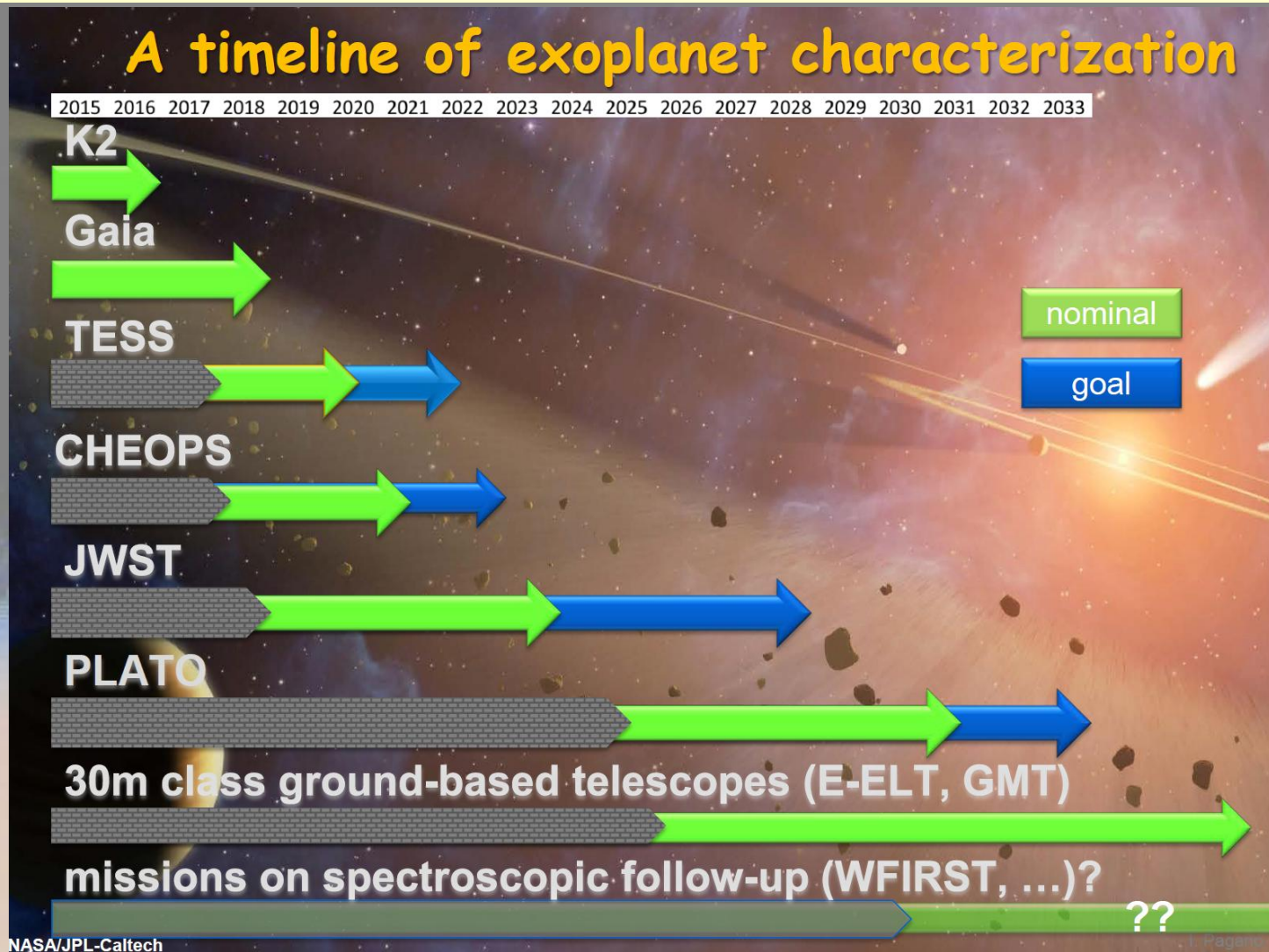
# Атмосферы экзопланет: возможные биомаркеры



Ставится общая цель—рассмотреть все малые молекулы, а не только те, которые образуются за счет жизни на Земле, но все те, которые являются стабильными и устойчивыми в широком диапазоне атмосферных температур и давлений в условиях обитаемости (Seager & Vains, 2015).



# Биомаркеры: *будущие наблюдения атмосфер экзопланет*

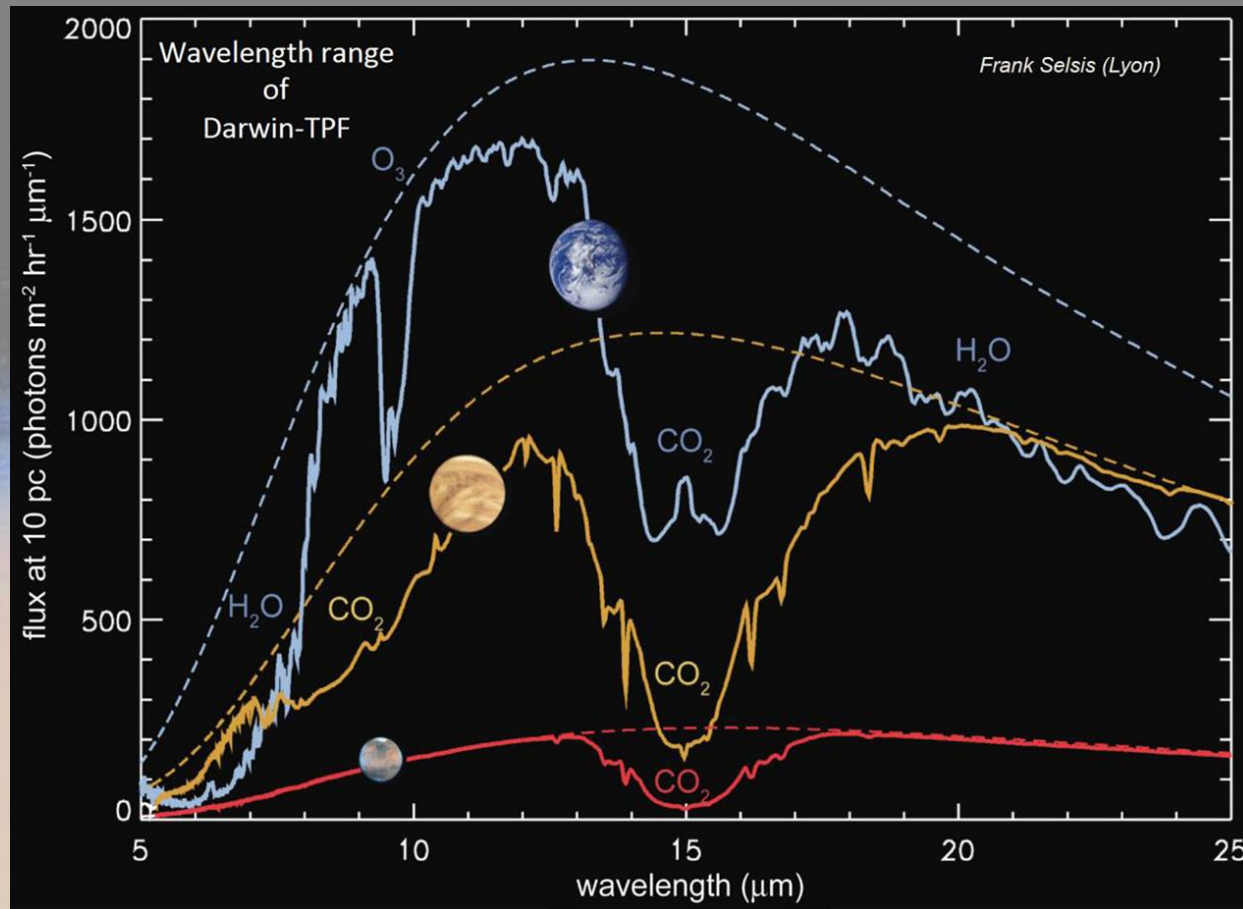


**СПЕКТР-УФ → 2024 - основная программа Проекта включает наблюдения атмосфер планет в Солнечной и внесолнечных планетных системах!**



# Заключение:

Надеюсь, что в ближайшем будущем будут получены сходные наблюдения для экзoЗемли



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!**