



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Всероссийская конференция с международным участием

Физика звёзд: теория и наблюдения

26-30 июня 2023 года

МГУ, ГАИШ

О ГРАНИЦАХ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ БИОМАРКЕРА ПО ДЛЯ РАЗНЫХ РОДИТЕЛЬСКИХ ЗВЕЗД И ЭКЗОПЛАНЕТ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТР-УФ

Цуриков Г. Н., аспирант, ИНАСАН

Бисикало Д. В., НЦФМ, ИНАСАН

По материалам статей: *Цуриков Г.Н., Бисикало Д.В., АЖ, 100, 2, 2023*

Цуриков Г.Н., Бисикало Д.В., АЖ (на рецензировании)

Проблематика

1. (Kasting et. al., 1993): ЗПО – область, в которой на поверхности планеты может существовать жидкая вода и отсутствует сильный парниковый эффект

Проблематика

1. (Kasting et. al., 1993): ЗПО – область, в которой на поверхности планеты может существовать жидкая вода и отсутствует сильный парниковый эффект



2. (Lammer et. al., 2019), (Stüeken et al., 2016a) : Единовременное существование в атмосфере планеты молекул N_2 и O_2 - может служить индикатором биологической и геологической активности

Проблематика

1. (Kasting et. al., 1993): ЗПО – область, в которой на поверхности планеты может существовать жидкая вода и отсутствует сильный парниковый эффект



2. (Lammer et. al., 2019), (Stüeken et al., 2016a) : Единовременное существование в атмосфере планеты молекул N_2 и O_2 - может служить индикатором биологической и геологической активности



3. (Nakayama et. al., 2023) : $N_2 - O_2$ атмосфера – устойчива к высоким XUV потокам родительской звезды

Проблематика

1. (Kasting et. al., 1993): ЗПО – область, в которой на поверхности планеты может существовать жидкая вода и отсутствует сильный парниковый эффект



2. (Lammer et. al., 2019), (Stüeken et al., 2016a) : Единовременное существование в атмосфере планеты молекул N_2 и O_2 - может служить индикатором биологической и геологической активности



4. (Sproß L., Lammer H., et. al., 2021) : N_2O , NO , NO_2 - индикаторы $N_2 - O_2$ доминантной атмосферы

Проблематика

1. (Kasting et. al., 1993): ЗПО – область, в которой на поверхности планеты может существовать жидкая вода и отсутствует сильный парниковый эффект



2. (Lammer et. al., 2019), (Stüeken et al., 2016a) : Единовременное существование в атмосфере планеты молекул N_2 и O_2 - может служить индикатором биологической и геологической активности



4. (Sproß L., Lammer H., et. al., 2021) : N_2O , NO , NO_2 - индикаторы $N_2 - O_2$ доминантной атмосферы



Задача: Оценить возможность обнаружения NO в NUV диапазоне в атмосферах экзо-земель, супер-земель, суб-нептунов с помощью Спектр-УФ

Наблюдения γ -полос NO ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$, 203 – 248 нм)

- Геофизическая обсерватория Ogo 4
(*Rusch, D. W. et. al., 1975*)
- Спутники AE-C и AE-D (Atmosphere Explorer satellites)
(*Earth C. A. et. al., 1973*)
- Спутник SME (Solar Mesosphere Explorer)
(*Barth, C. A., 1992*)
- Спутник SNOE (Student Nitric Oxide Explorer)
(*Barth, C. A., et. al., 2003*)

Наблюдения γ -полос NO ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$, 203 – 248 нм)

- Геофизическая обсерватория Ogo 4
(*Rusch, D. W. et. al., 1975*)
- Спутники AE-C и AE-D (Atmosphere Explorer satellites)
(*Earth C. A. et. al., 1973*)
- Спутник SME (Solar Mesosphere Explorer)
(*Barth, C. A., 1992*)
- Спутник SNOE (Student Nitric Oxide Explorer)
(*Barth, C. A., et. al., 2003*)

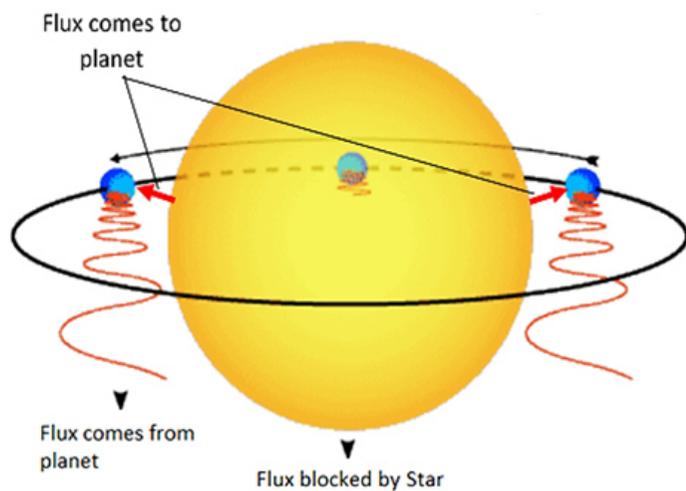
Источники, влияющие на формирования NO

1. Излучение Солнца в мягком рентгене (20 – 70 Å) → $\max(N_{NO})$ в экваториальной области
2. Высыпание электронов с энергиями 1 – 10 keV → $\max(N_{NO})$ в авроральных областях
(*Barth C. A., et. al., 2003*)
3. Надтепловые атомы азота $N_{hot}({}^4S)$
(*Shematovich V. I., et. al., 1991, 1992, 1994*)
4. Джоулев нагрев во время геомагнитных штормов в верхней атмосфере (> 120 км)
(*Siskind et al., 1989a, 1989b*)

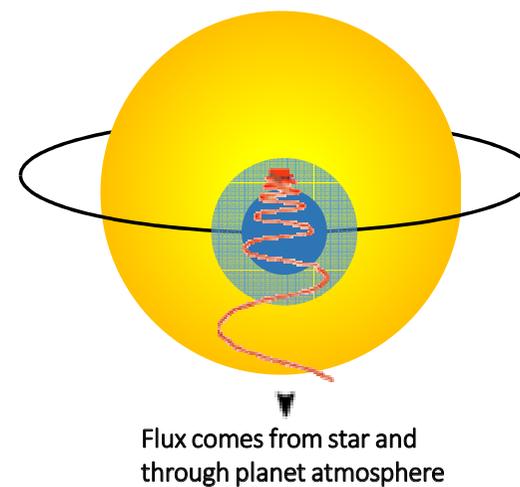
Задача: Оценить возможность обнаружения NO в γ -полосах в атмосферах экзо-земель, супер-земель, суб-нептунов с помощью КА Спектр-УФ

Задача: Оценить возможность обнаружения NO в γ -полосах в атмосферах экзo-земель, супер-земель, суб-нептунов с помощью КА Спектр-УФ

2 метода



Вторичное затмение



Первичный транзит

Задача: Оценить возможность обнаружения NO в γ -полосах в атмосферах экзоземель, супер-земель, суб-нептунов с помощью КА Спектр-УФ

1. Построение модели пропускания в γ -полосах NO для Земли

2. Масштабирование на рассматриваемые экзопланеты

3. Расчет времени экспозиции для обнаружения NO в атмосферах экзопланет с помощью Спектр-УФ (SNR = 3, $t_{opt} < 120$ часов)

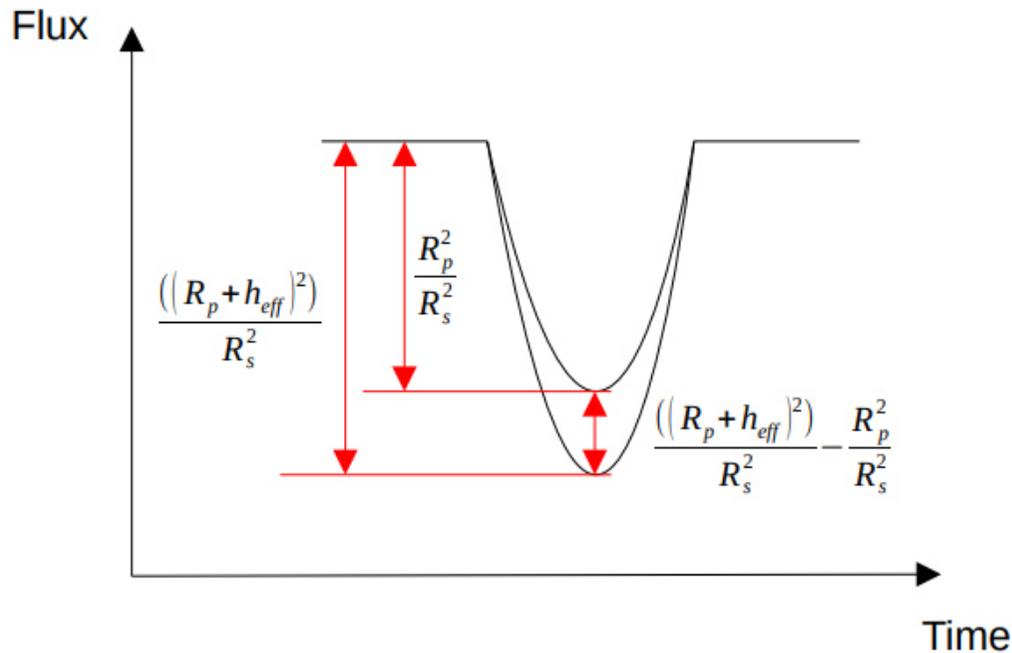
Расчет пропускания в γ -полосах NO

1. Эффективная высота атмосферы

$$h_{eff}(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} (1 - e^{-\tau(\lambda)}) dz \text{ [км]}$$

2. Глубина транзита (учет атмосферы планеты)

$$f_A(\lambda) = \frac{F_{out} - F_{in}}{F_{out}} = \frac{R_p^2}{R_s^2} \left(\frac{(R_p + h_{eff}(\lambda))^2}{R_p^2} - 1 \right)$$



$\frac{R_p^2}{R_s^2}$ - вклад только планеты

$\frac{(R_p + h_{eff})^2}{R_s^2}$ - вклад планеты и атмосферы

$\frac{(R_p + h_{eff})^2}{R_s^2} - \frac{R_p^2}{R_s^2}$ - вклад только атмосферы

Расчет пропускания в γ -полосах NO

1. Эффективная высота атмосферы

$$h_{eff}(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} (1 - e^{-\tau(\lambda)}) dz \text{ [км]}$$

Используется
модифицированная
модель Py4CATS (GARLIC)
(Schreier et al., 2021)

1.1. Оптическая толща

$$\tau(\lambda) = \sum_m \sigma_m(\lambda) * N_m dz$$

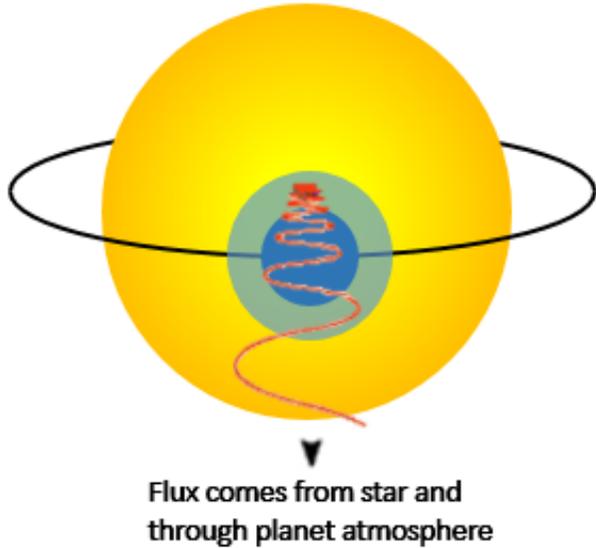
m – молекулы O_2 , O_3 , N_2O , NO_2 , SO_2 + рэлеевское рассеяние (N_2 , O_2 , CO_2 , Ar) + γ -полосы NO

(Betremieux & Kaltenegger, 2013) + (Bates, 1984) + (Trad et al., 2005)

Расчет пропускания в γ -полосах NO

3. Сигнал к шуму для пропускания в атмосфере планеты

(Rauer et al., 2011)

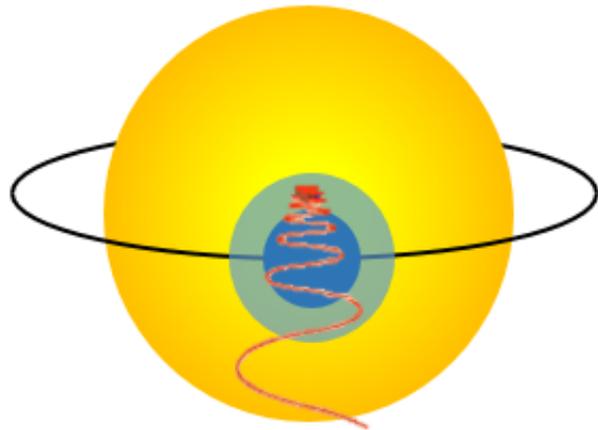


$$SNR_{planet} = \frac{1}{\sqrt{2}} f_A(\lambda) \sqrt{SNR_{stellar}} = \frac{1}{\sqrt{2}} f_A(\lambda) \sqrt{\frac{R_s^2}{d^2} I_s A_{eff} t \frac{\lambda_c}{R}}$$

$$f_A(\lambda) = \frac{F_{out} - F_{in}}{F_{out}} = \frac{R_p^2}{R_s^2} \left(\frac{(R_p + h_{eff}(\lambda))^2}{R_p^2} - 1 \right)$$

Расчет пропускания в γ -полосах NO

(Rauer et al., 2011)



Flux comes from star and through planet atmosphere

3. Сигнал к шуму для пропускания в атмосфере планеты

$$SNR_{planet} = \frac{1}{\sqrt{2}} f_A(\lambda) \sqrt{SNR_{stellar}} = \frac{1}{\sqrt{2}} f_A(\lambda) \sqrt{\frac{R_s^2}{d^2} I_s A_{eff} t \frac{\lambda_c}{R}}$$

$$f_A(\lambda) = \frac{F_{out} - F_{in}}{F_{out}} = \frac{R_p^2}{R_s^2} \left(\frac{(R_p + h_{eff}(\lambda))^2}{R_p^2} - 1 \right)$$

Также учитывается флуоресценция света в γ -полосах NO

$$f_A = \frac{F_{out} - (TF_{out} - F_{fluorescence})}{F_{out}}$$

Вклад флуоресценции в глубину транзита при больших лучевых концентрациях $NO < 1\%$ (эффект резонансного самопоглощения)

Набор предположений

1. На экзопланетах (экзо- супер-землях, суб-нептунах) образовалась устойчивая вторичная атмосфера;
2. Химический состав данной атмосферы эквивалентен химическому составу атмосферы Земли;
3. Хим. состав атмосферы остается неизменным для родительских звезд различных спектральных классов;
4. Составляющая шума определяется только статистическим шумом;
5. Активность звезды не меняется во время транзита и между транзитами;
6. Расстояние до экзопланеты и звезды – одинаковы.

Экзопланеты

Диапазон концентраций NO зависит от:

1. Геомагнитной активности (*интенсивности выпадения электронов*)

- Модели (Gerard и Barth, 1977);
- Наблюдения (Barth et al., 2003)

2. Условий обитания (*на уровне моря; в самой глубокой шахте Mponeng*)

ВАЖНО! Предполагаем, что:

1. На планетах образовалась устойчивая вторичная $N_2 - O_2$ доминантная атмосфера
2. Хим. состав этой атмосферы подобен хим. составу атмосферы Земли

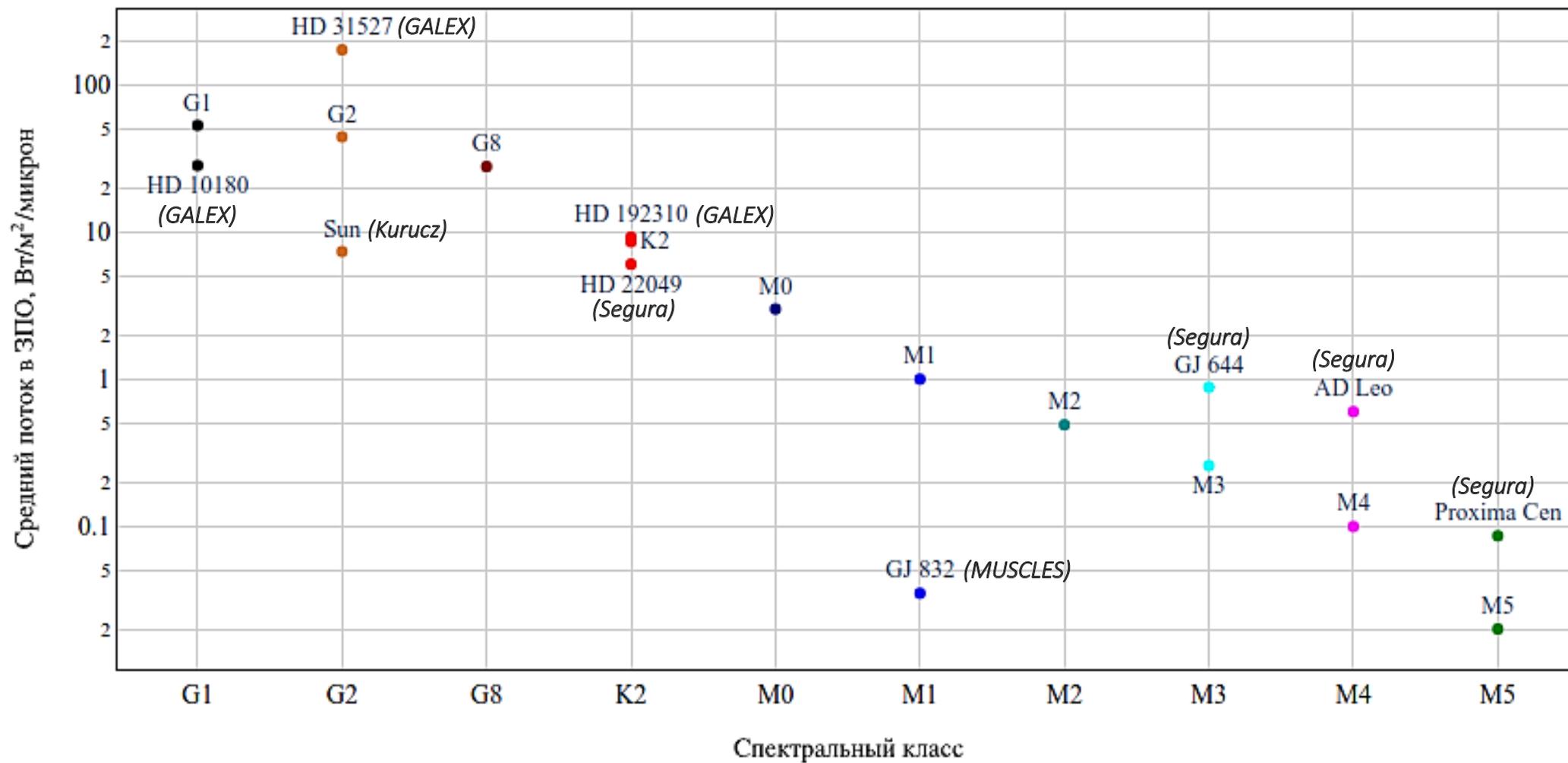
Наименование планеты	Диапазон лучевых концентраций NO, cm^{-2}
экзо-земля: $1R_E, 1 M_E$	$1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{17}$
супер-земля – 1: $2R_E, 4 M_E$	$4 \times 10^{15} - 4 \times 10^{18}$
суб-нептун – 1: $3R_E, 8 M_E$	$1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{19}$
суб-нептун – 2: $4R_E, 15 M_E$	$2 \times 10^{16} - 2 \times 10^{19}$

Родительские звезды.

Используются спектры звезд:

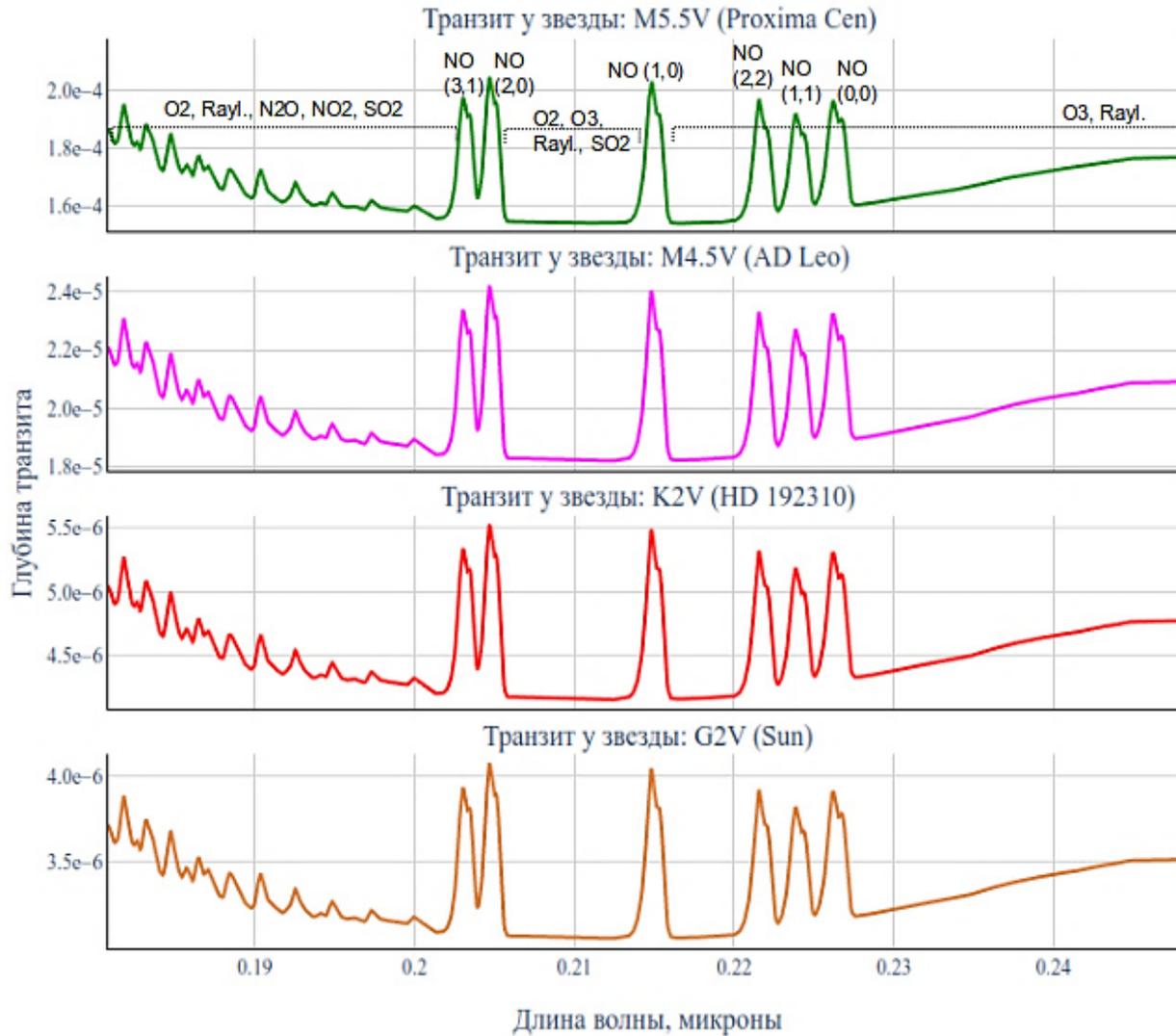
1. GJ 832 (M1.5V) – База данных MUSCLES (24 спектра звезд M- и K спектральных классов с экзопланетами) (*France et al., 2016*)
2. HD 22049 (K2V), GJ 644 (M3V), AD Leo (M4.5V), Proxima Cen (M5.5V), Солнце (G2V) – работы (*Segura et al., 2003, 2005*), (*Meadows et al., 2018*)
3. Tau Cet (G8V) – атлас Pickles (спектр взят из работы (Sviderskiene, 1988))
4. HD 192310 (K2V), HD 10180 (G1V), HD 31527 (G2V) – средние потоки GALEX (полоса 170 — 300 нм) на $\lambda_{\text{eff}} = 231.5$ нм (каталог (Lloyd et al., 2020) для звезд с экзопланетами)
6. Функция Планка для звезд M5 — M0, K2, G8, G1 спектральных классов
7. Также есть каталог StarCat – спектры HST для 117 – 320 нм (звезды F, G, K классов и немного класса M)

Родительские звезды.



Результаты. Глубина транзита. Супер-земля (2 R_E)

$$f_A(\lambda) = \frac{F_{out} - F_{in}}{F_{out}}$$

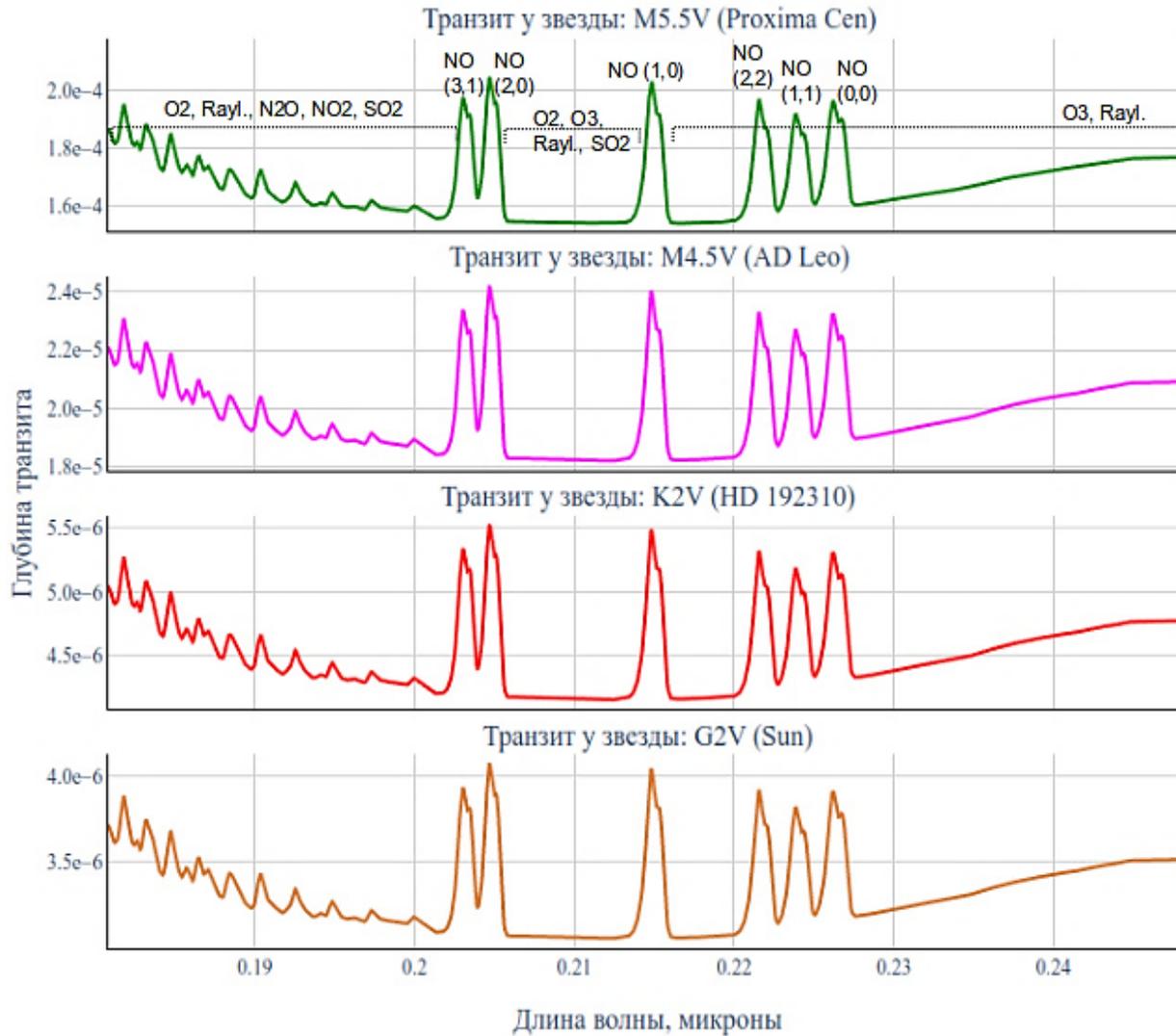


Используется разрешение спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Лучевая концентрация NO = $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Результаты. Глубина транзита. Супер-земля (2 R_E)

$$f_A(\lambda) = \frac{F_{out} - F_{in}}{F_{out}}$$



Используется разрешение спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Лучевая концентрация NO = $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$

Следствие:

1. В диапазоне образования γ -полос NO находится своеобразное окно (200 – 230 нм) ($\sigma_{NO} > \sigma_m$) на 1 порядок величины.

2. Глубина транзита для маломассивных звезд позднего спектрального класса –

больше, $C_T = \frac{R_p^2}{R_s^2}$

Результаты. Граничные расстояния

Используются параметры спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Граничные расстояния – расстояния на которых можно потенциально зарегистрировать сигнал в полосах при $SNR = 3$, $t_{exposure} = 120$ ч

Родительская звезда	Граничные расстояния ¹ , пк		
	супер-земля, $N_{NO} = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$	суб-нептун – 1, $N_{NO} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$	суб-нептун – 2, $N_{NO} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$
G1	<1 ^{a,b}	1 ^a (<1 ^b)	2 ^a (1 ^b)
Солнце	<<1 ^j	1 ^a (<1 ^j)	2 ^a (1 ^j)
G8	<<1 ^a	1 ^a	1 ^a
K2	<<1 ^{a, c, d}		1 ^{a,d} (<1 ^c)
M4-5	<<1 ^{l, m}		

^a используется чернотельный спектр;

^b используется средний поток GALEX для HD 10180 (G1V)

^c используется спектр HD 22049 (K2V)

^d используется средний поток GALEX для HD 192310 (K2V)

^j используется спектр Солнца (G2V)

¹ Обозначение «<<1 пк» соответствует расстояниям, меньшим 0.1 пк

Результаты. Граничные расстояния

Используются параметры спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Граничные расстояния – расстояния на которых можно потенциально зарегистрировать сигнал в полосах при $SNR = 3$, $t_{exposure} = 120$ ч

Родительская звезда	Граничные расстояния ¹ , пк		
	супер-земля, $N_{NO} = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$	суб-нептун – 1, $N_{NO} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$	суб-нептун – 2, $N_{NO} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$
G1	<1 ^{a,b}	1 ^a (<1 ^b)	2 ^a (1 ^b)
Солнце	<<1 ^j	1 ^a (<1 ^j)	2 ^a (1 ^j)
G8	<<1 ^a	1 ^a	1 ^a
K2	<<1 ^{a, c, d}		1 ^{a,d} (<1 ^c)
M4-5	<<1 ^{l, m}		

^a используется чернотельный спектр;

^b используется средний поток GALEX для HD 10180 (G1V)

^c используется спектр HD 22049 (K2V)

^d используется средний поток GALEX для HD 192310 (K2V)

^j используется спектр Солнца (G2V)

¹ Обозначение «<<1 пк» соответствует расстояниям, меньшим 0.1 пк

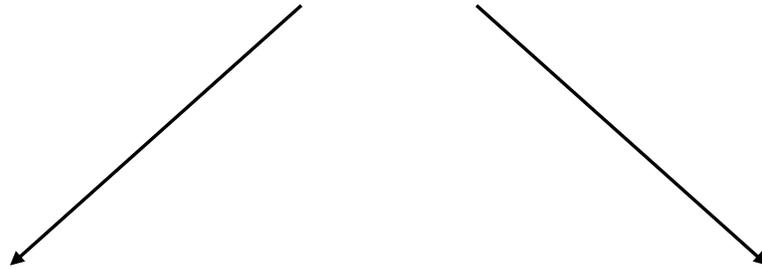
Следствие:

1. Для наблюдений - более выгодны планетные системы с родительскими звездами типа Солнца.

$$SNR_{\odot}^{NUV} > SNR_{M-Kstar}^{NUV}$$

2. При данных условиях в N_2 - O_2 атмосферах экзопланет — предельное расстояние для регистрации NO составляет 2 пк.

Пути увеличения SNR



1. Изменение условий в N_2-O_2 атмосферах экзопланет

2. Искать маломассивные звезды поздних спектральных классов с большими потоками в NUV

Результаты. Граничные расстояния. Путь 2

Граничные расстояния – расстояния на которых можно потенциально зарегистрировать сигнал в полосах при $SNR = 3$, $t_{exposure} = 120$ ч

Используются параметры спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Родительская звезда	Граничные расстояния, пк, супер-земля, $N_{NO} = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$			
	$1 \times I_S$	$10 \times I_S$	$1 \times I_{SUN}$	$100 \times I_{SUN}$
Proxima Cen	$\ll 1$	< 1	5	25

Результаты. Граничные расстояния. Путь 2

Используются параметры спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Граничные расстояния – расстояния на которых можно потенциально зарегистрировать сигнал в полосах при $SNR = 3$, $t_{exposure} = 120$ ч

Родительская звезда	Граничные расстояния, пк, супер-земля, $N_{NO} = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$			
	$1 \times I_S$	$10 \times I_S$	$1 \times I_{SUN}$	$100 \times I_{SUN}$
Proxima Cen	$\ll 1$	< 1	5	25

Следствие:

1. Нужны звезды с большими NUV потоками в спектральном диапазоне > 200 нм. (Ho, (Linsky and Gudel, 2015): «обычно > 170 нм наблюдается излучение фотосферы, хромосферная эмиссия < 170 нм»)
2. При данных условиях ($1 \times I_{SUN}$), за 120 часов – можно зарегистрировать сигнал NO в атмосфере Proxima Cen b ($1.8 R_E$)

Результаты. Граничные расстояния. Путь 1.

Увеличение температуры в верхней атмосфере

Граничные расстояния – расстояния на которых можно потенциально зарегистрировать сигнал в полосах при $SNR = 3$, $t_{exposure} = 120$ ч

Используются параметры спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Родительская звезда	Граничные расстояния, пк;			
	$T _{h>200\text{км}} = 3000 \text{ K}$		$T _{h>200\text{км}} = 5000 \text{ K}$	
	супер-земля	суб-нептун – 2	супер-земля	суб-нептун – 2
G1	1 ^{a,b}	3 ^b	2 ^b	7 ^b
Солнце	<1 ^j , 3 ^k	3 ^j , 10 ^k	1 ^j , 5 ^k	6 ^j , 20 ^k
G8	1 ^a	5 ^a	3 ^a	10 ^a
K2	<1 ^{a, c, d}	<1 ^c , 2 ^d	<1 ^c , 1 ^d	1 ^c , 5 ^d
M4-5	<1 ^{l, m}			1 ^{l, m}

^a используется чернотельный спектр;

^b используется средний поток GALEX для HD 10180 (G1V)

^c используется спектр HD 22049 (K2V)

^d используется средний поток GALEX для HD 192310 (K2V)

^j используется спектр Солнца (G2V)

^k используется средний поток GALEX для HD 31527 (G2V)

^l используется спектр AD Leo (M4.5V)

^m используется спектр Proxima Cen (M5.5V)

Результаты. Граничные расстояния. Путь 1.

Увеличение температуры в верхней атмосфере

Граничные расстояния – расстояния на которых можно потенциально зарегистрировать сигнал в полосах при $SNR = 3$, $t_{exposure} = 120$ ч

Используются параметры спектрографа LSS ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$)

Родительская звезда	Граничные расстояния, пк;			
	$T _{h>200\text{км}} = 3000 \text{ K}$		$T _{h>200\text{км}} = 5000 \text{ K}$	
	супер-земля	суб-нептун – 2	супер-земля	суб-нептун – 2
G1	1 ^{a,b}	3 ^b	2 ^b	7 ^b
Солнце	<1 ^j , 3 ^k	3 ^j , 10 ^k	1 ^j , 5 ^k	6 ^j , 20 ^k
G8	1 ^a	5 ^a	3 ^a	10 ^a
K2	<1 ^{a, c, d}	<1 ^c , 2 ^d	<1 ^c , 1 ^d	1 ^c , 5 ^d
M4-5	<1 ^{l, m}			1 ^{l, m}

^a используется чернотельный спектр;

^b используется средний поток GALEX для HD 10180 (G1V)

^c используется спектр HD 22049 (K2V)

^d используется средний поток GALEX для HD 192310 (K2V)

^j используется спектр Солнца (G2V)

^k используется средний поток GALEX для HD 31527 (G2V)

^l используется спектр AD Leo (M4.5V)

^m используется спектр Proxima Cen (M5.5V)

Следствие:

1. Границы наблюдаемости расширяются до 5 пк - для супер-земель ($2 R_E$); до 20 пк – для суб-нептунов ($4 R_E$)

2. Tau Cet e - 96 часов или 7 транзитов
HD 192310 c - 115 часов или 12 транзитов

Результаты. Граничные расстояния. Путь 1.

Увеличение концентрации NO

Рассмотрение дополнительных источников пополнения NO в верхней атмосфере:

1. Надтепловые атомы азота $N(4S)_{hot}$, образующиеся при диссоциации N_2 электронным ударом (Shematovich et al., 1992) (Bisikalo et al., 2022). Т.е. увеличение интенсивности выпадения электронов – эффективное нетепловое образование NO ($N(4S)_{hot} + O_2 \rightarrow NO + O$) (Shematovich et al., 2023).

Что на это влияет?

- Активность родительской звезды
- Орбитальное расстояние планеты
- Отсутствие собственного магнитного поля планеты и наличие только наведенного (Венера, Марс) (напр. диффузные выпадения на Марсе (Gerard et al., 2017))

3. Вулканизм и биологическая активность (бактерии) - более крупномасштабные по времени источники формирования, не столько NO, сколько $N_2 - O_2$ доминантной атмосферы

Выводы

С помощью обсерватории Спектр-УФ (спектрограф LSS, $R = 1000$) можно потенциально зарегистрировать сигнал пропускания в γ -полосах NO за 120 часов с $SNR = 3$ – в следующих случаях:

1. При условиях на экзопланете приближенных к условиям на Земле - на планетных системах: суб-нептун – звезда солнечного типа. Граничные расстояния – до 2-х пк.
2. При увеличении температуры в верхней атмосфере экзопланеты. Планетные системы: супер-земля, суб-нептун – звезда солнечного типа – до 5-ти и 20-ти пк. ($T|_{h>200\text{км}} = 5000\text{ K}$)
 - Tau Cet e - 96 часов или 7 транзитов
 - HD 192310 c - 115 часов или 12 транзитов
3. При увеличении концентрации NO в верхней атмосфере (влияние электронных высыпаний, биологической и геологической активности)
4. При рассмотрении в качестве родительских звезд – маломассивных звезд позднего спектрального класса с большими потоками в NUV. Proxima Cen b – 120 часов или 120 транзитов ($F = 1 \times F_{\text{SUN}}$)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Всероссийская конференция с международным участием

Физика звёзд: теория и наблюдения

26-30 июня 2023 года

МГУ, ГАИШ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Цуриков Г. Н., аспирант, ИНАСАН

Бисикало Д. В., НЦФМ, ИНАСАН

Работа была поддержана Российским Научным Фондом (Проект № 22-12-00364)

По материалам статей: *Цуриков Г.Н., Бисикало Д.В., АЖ, 100, 2, 2023*

Цуриков Г.Н., Бисикало Д.В., АЖ (на рецензировании)

ДОП. СЛАЙДЫ

Расчет пропускания в γ -полосах NO

1. Эффективная высота атмосферы

$$h_{eff}(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} (1 - e^{-\tau(\lambda)}) dz \text{ [км]}$$

Используется
модифицированная
модель Py4CATS (GARLIC)
(Schreier et al., 2021)

1.1. Оптическая толща

$$\tau(\lambda) = \sum_m \sigma_m(\lambda) * N_m dz$$

m – молекулы O₂, O₃, N₂O, NO₂, SO₂ + рэлеевское рассеяние (N₂, O₂, CO₂, Ar) + γ -полосы NO

(Betremieux & Kaltenegger, 2013) + (Bates, 1984) + (Trad et al., 2005)

1.2. Сечение поглощения

$$\sigma(\lambda) = S(T)g(\lambda, p, T) \text{ [см}^2\text{]}$$

$$g_L = \left(\frac{\gamma_L/\pi}{(\nu - \check{\nu})^2 + \gamma_L^2} \right) \quad g_D = \frac{1}{\gamma_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{\nu - \check{\nu}}{\gamma_D} \right)^2 \right) \quad g = \int_{-\infty}^{\infty} g_L(\nu - \nu', \check{\nu}, \gamma_L) \times g_D(\nu - \nu', \check{\nu}, \gamma_D) d\nu'$$

Экзопланеты



работы
(Rauer et al., 2011)
(Wunderlich et al., 2019)



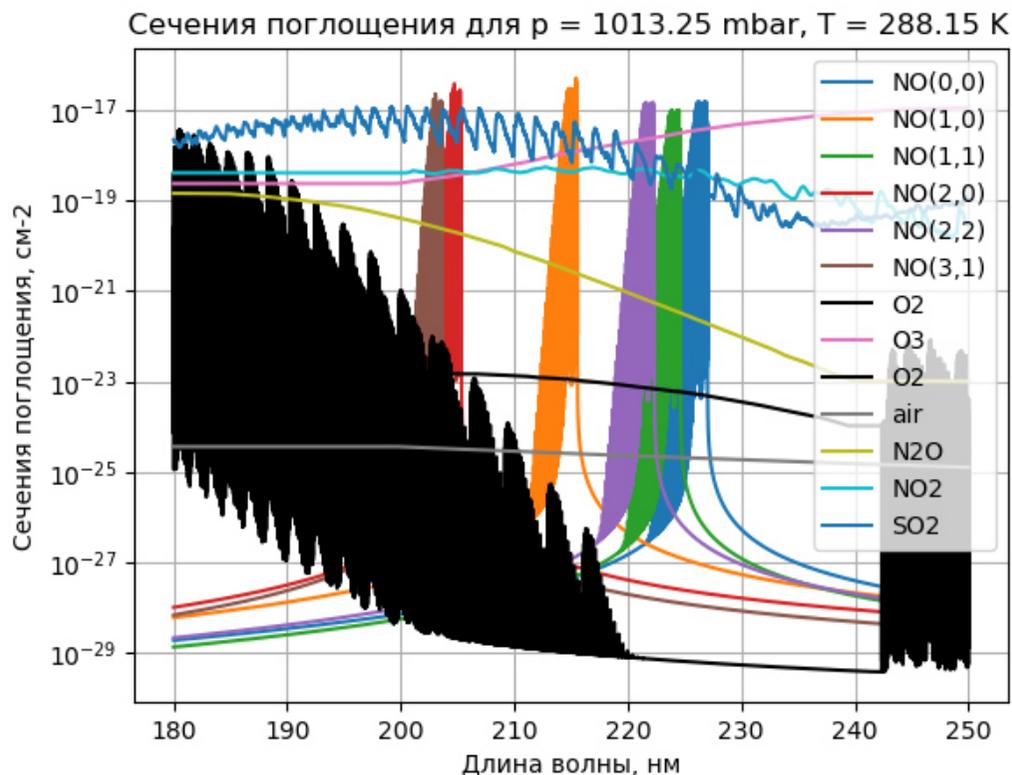
каталог экзопланет в ЗПО
(Hill et al., 2023)



работа
(Kopparapu et al., 2013)

Планета	Родительская звезда	d, пк	R_E	a, а.е.
GJ 229 A c	M1V	5.756	2.6	0.339
GJ 514 b	M0.5-1V	7.618	2.13	0.422
HD 192310 c	K2V	8.797	4.27	0.326
GJ 682 c	M3.5V	5.007	2.89	0.176
GJ 687 b	M3V	4.549	4.32	0.163
GJ 832 c	M1.5V	4.964	2.18	0.163
HD 31527 d	G2V	38.447	4.0	0.81
HD 10180 g	G1V	38.961	4.91	1.427
Proxima Cen b	M5.5V	1.3	1.08	0.0485
Tau Cet e	G8V	3.603	1.8	0.538

Сечения поглощения



1. До 200 нм доминирующую роль в поглощении света занимает молекулярный кислород (система полос Шумана-Рунге) (HITRAN2020).

Также, незначительное влияние в данном спектральном диапазоне (< 200 нм) оказывает поглощение молекул N_2O , NO_2 , SO_2 (MPI-Mainz UV/VIS Spectral Atlas) и рэлеевское рассеяние (Bates, 1984) - (Betremieux & Kaltenecker, 2013).

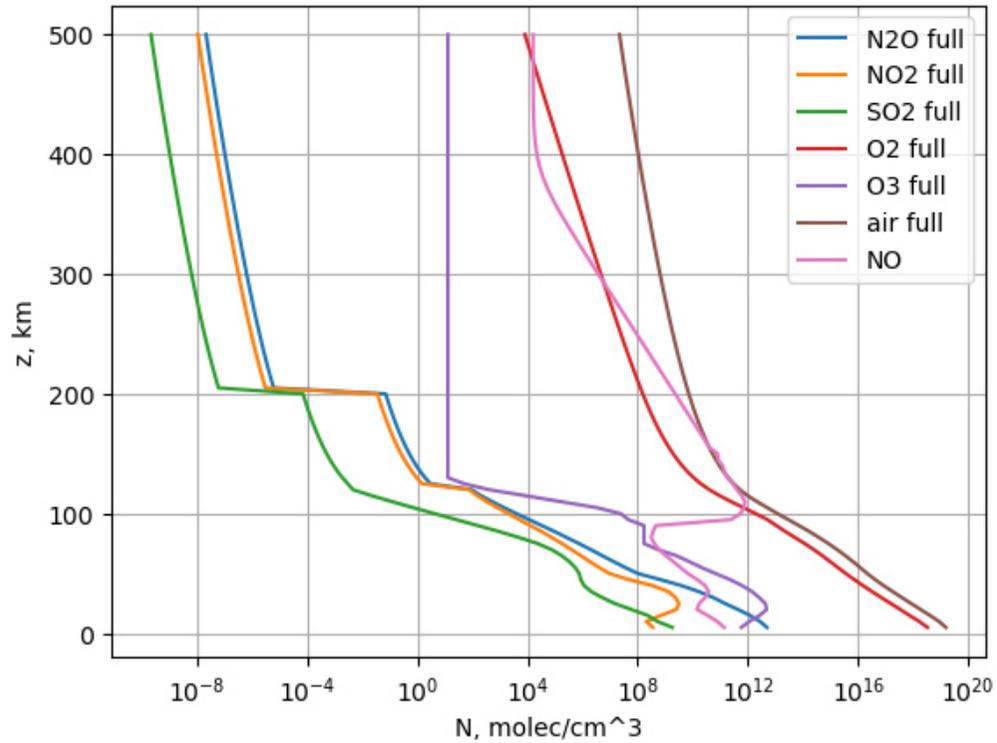
2. С другой стороны, минимум поглощения света озоном O_3 в полосах Хартлеи достигается на 210 нм (Cann et al., 1979).

3. Таким образом, в диапазоне образования γ -полос NO (LIFBASE) находится своеобразное окно, где данные полосы практически не блендируются.

P.s. Данные для O_2 в континууме фото-диссоциации – из (Cann et al., 1979).

Данные для O_2 в системе полос Герцберга – из HITRAN2020.

Объемные концентрации



1. Для молекул O_3 , N_2O , NO_2 , SO_2 (< 120 км) использовались распределения по высоте из (Anderson, et al., 1986) – USS atmosphere.

2. Для O_2 , N_2 высотные профили были взяты из модели NRLMSIS 2.0 (AP > 12)

3. Для молекулы NO данные для высот < 95 км взяты из (Anderson, et al., 1986).

Для высот ≥ 95 км - из наблюдений спутника SNOE [14 Barth, et al., 2003] при высокой геомагнитной активности.

Расчет эмиссии в γ -полосах NO (оптически тонкий случай)

1. Флуоресценция в молекулярной полосе,
(электронный переход $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$):

$$4\pi I = g_{v'v''} N \left[\frac{\text{ФОТОНЫ}}{\text{с} \cdot \text{см}^2} \right]$$

2. $g_{v'v''}$, $\left[\frac{\text{переизлученный фотон}}{\text{молекула} \cdot \text{с}} \right]$:

$$g_{v'v''} = \omega_{v'v''} \sum_v \sum_J \sum_B \left\{ \frac{\pi e^2}{mc^2} \cdot \lambda^2 \cdot \pi F_\lambda \cdot f \cdot \frac{S}{2J+1} \cdot \frac{N_J}{N_0} \right\}$$

NO полоса	$\lambda_c, \text{\AA}$	$g_{v'v''}, 10^{-6} \frac{\text{ФОТОНЫ}}{\text{с} \cdot \text{молекула}}$				Доля на каждую полосу, %
		Настоящая работа	Barth (1966, 1992)	Pearce (1969)	Cravens (1977)	
(0,0)	2262	2.524	2.58	1.744	2.724	15.61
(0,1)	2363	3.251	3.59	3.173	3.773	20.11
(1,0)	2150	5.779	6.36	3.931	7.678	35.74
(1,1)	2239	2.398	2.08	1.305	2.094	14.83
(2,0)	2047	0.861	2.02	0.962	2.043	4.70
(2,2)	2216	1.179	-	-	0.859	7.29
(3,1)	2030	0.279	0.293	0.0539	0.299	1.73

Расчет эмиссии в γ -полосах NO (оптически толстый случай)

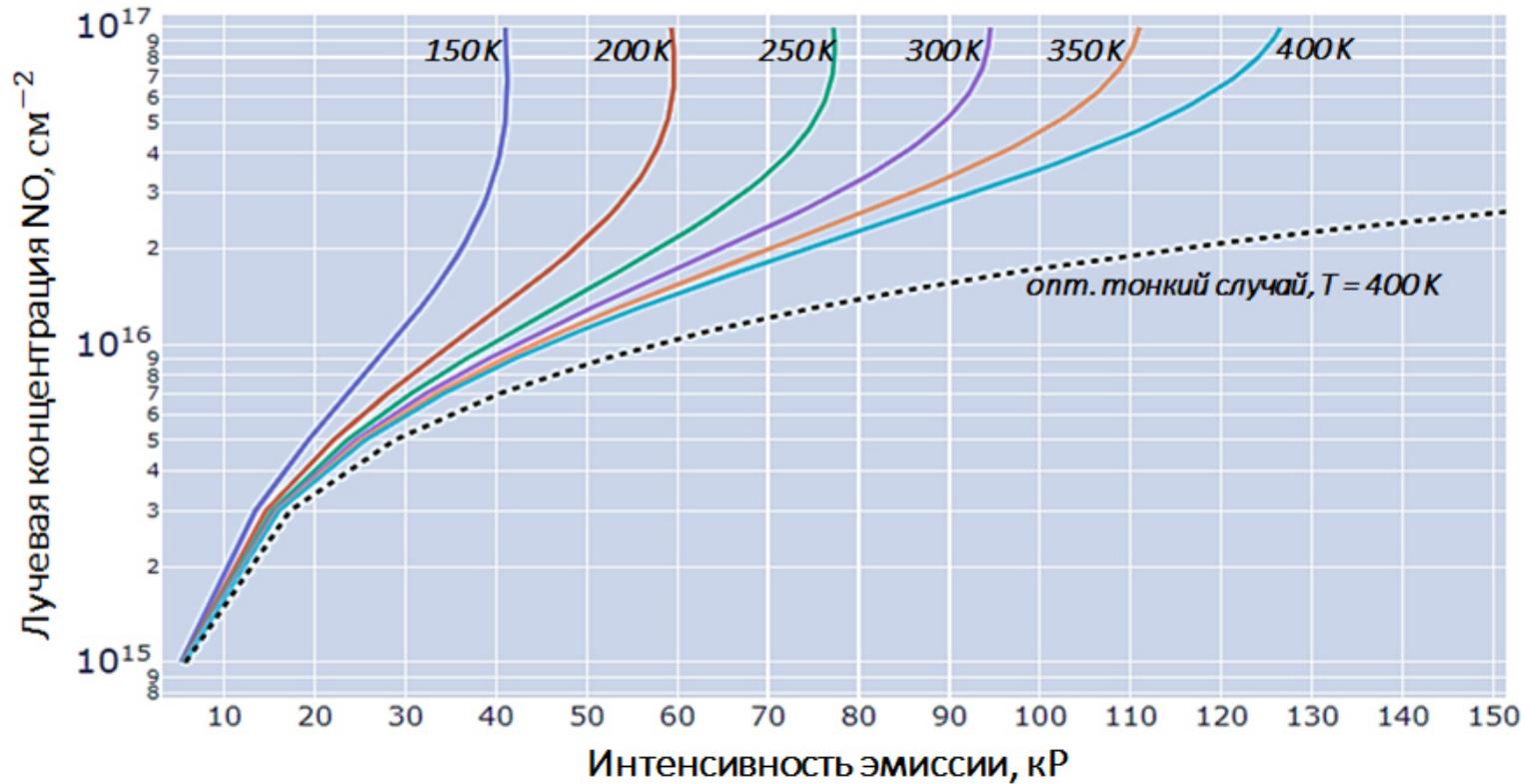
1. Учет самопоглощения в линии:

$$g^{sa}_{J'J''} = g^0_{J'J''} T(\tau_{J'J''})$$

2. $T(\tau_{J'J''})$ - функция трансмиссии Хольштейна

$$T(\tau_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-y^2 - \tau_0 \exp(-y^2)] dy$$

$$\sigma_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad y = \frac{v - v_0}{\sigma_D \sqrt{2}}$$



Масштабирование на экзо-Земли, супер-Земли, суб-Нептуну

Диапазон концентраций NO зависит от:

1. Геомагнитной активности (интенсивности выпадения электронов)

- (J. C. Gerard и C. A. Barth, 1977): При любой авроре объемная концентрация NO не превысит 10^{10} см^{-3}

2. Начальной плотности (на уровне моря; в самой глубокой шахте Mponeng)

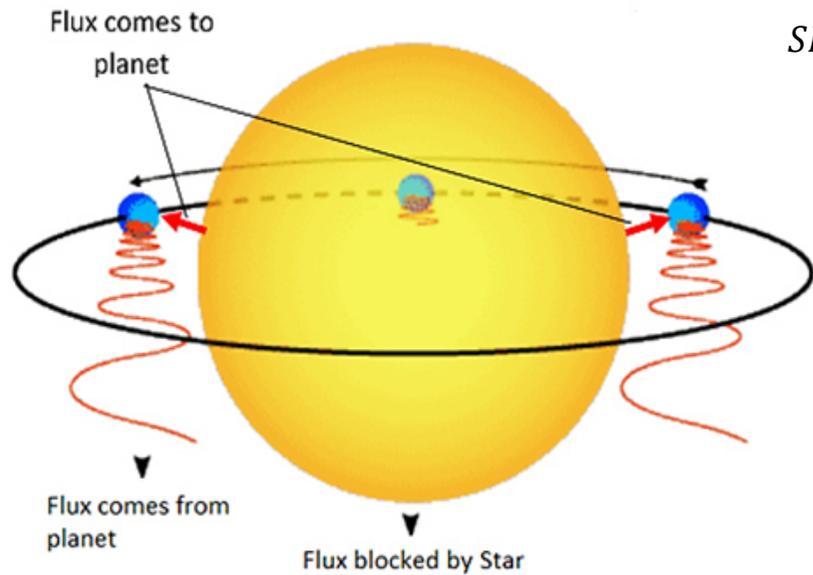
ВАЖНО! Предполагаем, что:

1. На планетах образовалась устойчивая вторичная $\text{N}_2 - \text{O}_2$ доминантная атмосфера
2. Хим. состав этой атмосферы подобен хим. составу атмосферы Земли

Наименование планеты	Диапазон отношений $\frac{M_{atm_{pl}}}{M_{atm_E}}$, $M_{atm_E} \approx 5.15 \times 10^{21} \text{ г}$	Диапазон лучевых концентраций NO, см^{-2}
Земля: $1R_E, 1 M_E$	1 – 1.75	$1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16}$
супер-Земля – 1: $2R_E, 4 M_E$	4 – 7	$4 \times 10^{15} - 4 \times 10^{17}$
суб-Нептун – 1: $3R_E, 8 M_E$	10.4 – 18	$1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{18}$
суб-Нептун – 2: $4R_E, 15 M_E$	17.4 – 30.3	$2 \times 10^{16} - 2 \times 10^{18}$

Наблюдения: вторичные затмения

Косвенно наблюдать эмиссию атмосферы планеты можно при регистрации потоков от родительской звезды во время вторичного затмения планеты и вне его, т.е. $F_{\text{planet}} = (F_{\text{stellar}} + F_{\text{planet}}) - F_{\text{stellar}}$



$$SNR_{\text{planet}} = \frac{F_{\text{planet}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{stellar}}^2 + \sigma_{\text{planet}}^2}} = \frac{F_{\text{planet}}}{F_{\text{stellar}}} \frac{F_{\text{stellar}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{stellar}}^2}} = \frac{F_{\text{planet}}}{F_{\text{stellar}}} \frac{SNR_{\text{stellar}}}{\sqrt{2}}$$

$$SNR_{\text{planet}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{R_p^2 I_p}{R_s^2 I_s} \sqrt{\frac{R_s^2}{d^2} I_s A t \frac{\lambda_c}{R} q}$$

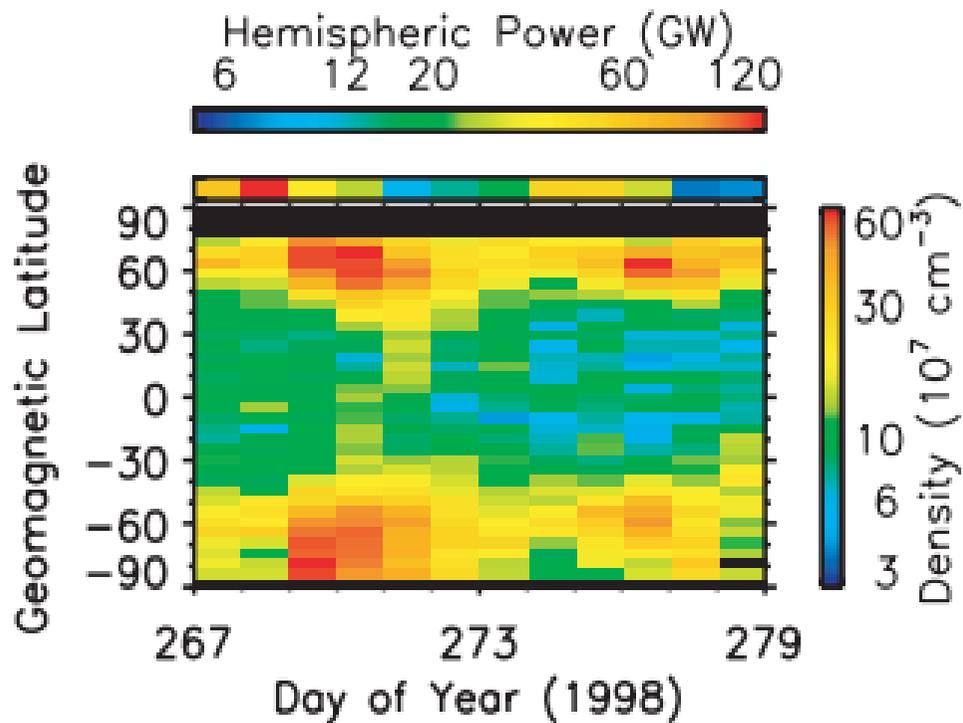
$$T_d = \frac{P}{2\pi} 2 \arcsin\left(\frac{R_s}{a}\right)$$

$$t = T_d \left(\frac{SNR_{\text{set}}}{SNR_{\text{planet}}}\right)^2$$

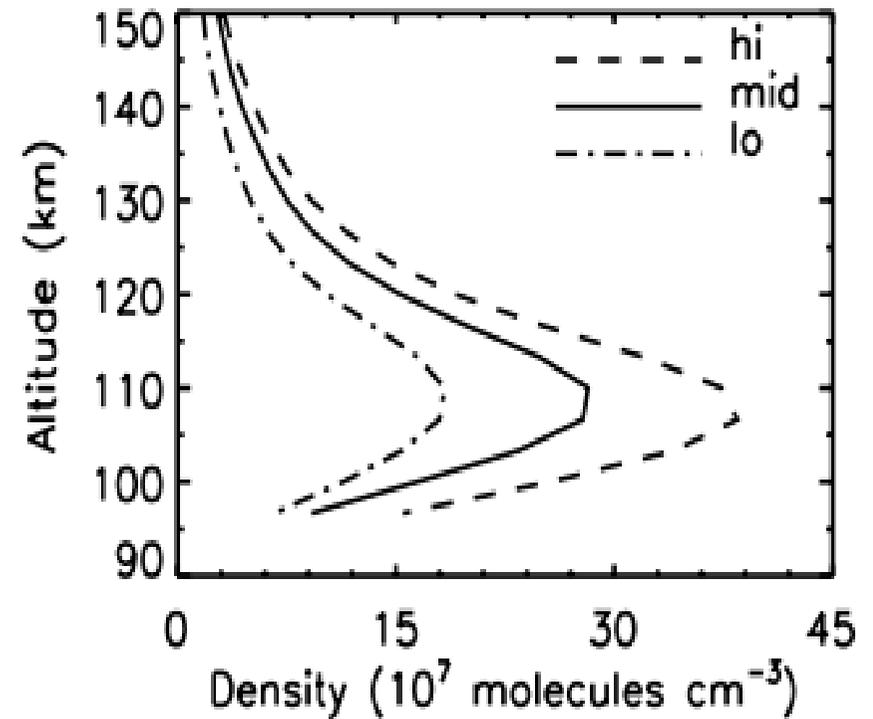
(Rauer, H., et. al. 2011)

!!! Будем оценивать только верхний предел возможности наблюдения эмиссии NO, т.е. в качестве источника шума будем использовать только статистический шум и пренебрежем: темновым током, шумом считывания, зодиакальным светом и свечением Земли !!!

Наблюдения γ -полос NO



Barth, C. A., et. al., 2003



Barth, C. A., et. al., 2003

Наблюдения NO в межзвездной среде

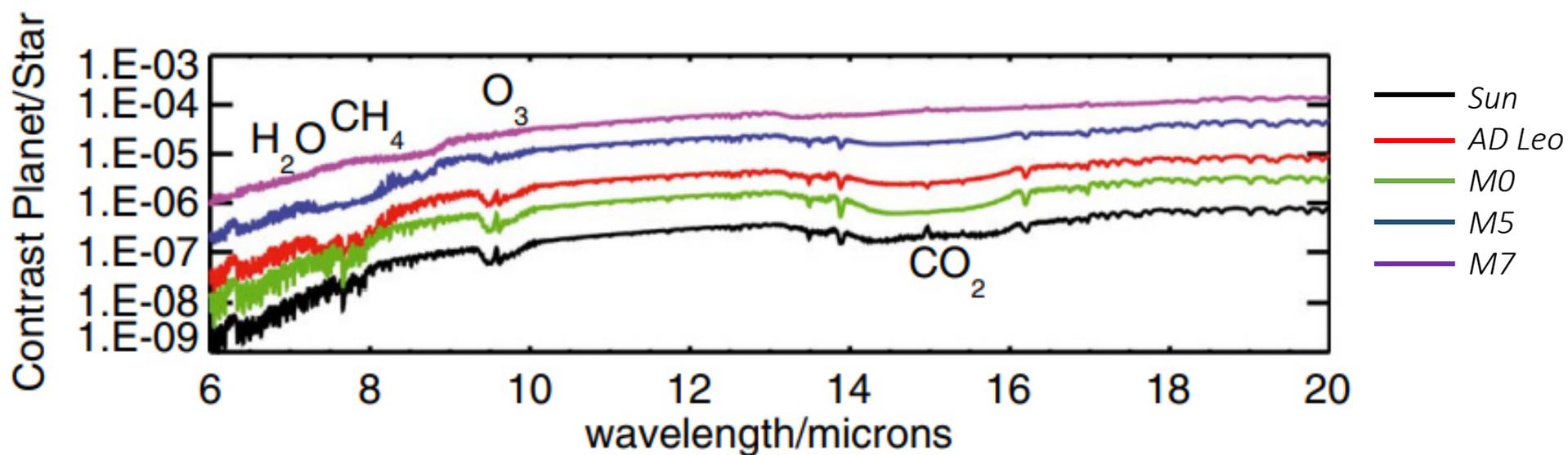
Линии NO	Объекты	Инструмент (Авторы)
150.2, 150.5 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 3/2 \rightarrow 1/2$	SgrB2	NRAO (Liszt & Turner, 1978)
150.4 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 3/2 \rightarrow 1/2$ 250.5 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 5/2 \rightarrow 3/2$	L134N, OMC1, W51, SgrB2, SgrA	IRAM (Gerin et al., 1992)
250.5 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 5/2 \rightarrow 3/2$	IRC+10420	IRAM (Quintana-Lacaci et al., 2013)
150.2, 150.5 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 3/2 \rightarrow 1/2$	Orion-KL, Sgr B2, W33A, W51M, DR21	NRAO (Ziurys et al., 1991)
150.4 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 3/2 \rightarrow 1/2$ 250.5 ГГц: ${}^2P_{1/2}: J' \rightarrow J'' = 5/2 \rightarrow 3/2$	Barnard 1-b	IRAM (Cernicharo et al., 2014)
73 – 430 МГц: ${}^2P_{3/2}; {}^2P_{1/2}$?	MWA (Tremblay et al., 2020)

Транзитные наблюдения

Косвенно наблюдать эмиссию атмосферы планеты можно при регистрации потоков от родительской звезды во время вторичного транзита планеты и вне его, т.е. $F_{planet} = (F_{stellar} + F_{planet}) - F_{stellar}$

$$C_E = \frac{R_p^2 I_p}{R_s^2 I_s} - \text{contrast between planetary and stellar signal in the secondary eclipse emission spectrum}$$

(Rauer, H., et. al. 2011)



Транзитные наблюдения. Влияние спектров родительских звезд

Конфронтация

- (Jhonstone et. al., 2021): N_2-O_2 доминантная атмосфера с примесью CO_2 - нестабильна для потоков X-ray, $5 - 10 \frac{erg}{s cm^2}$, (Sun-like - 1 Gyr), (M-dwarfs – few Gyr)

- (Jhonstone et. al., 2019): земле-подобная планета, в ЗПО у активной звезды, потеря атмосферы $< 0.1 Myr$

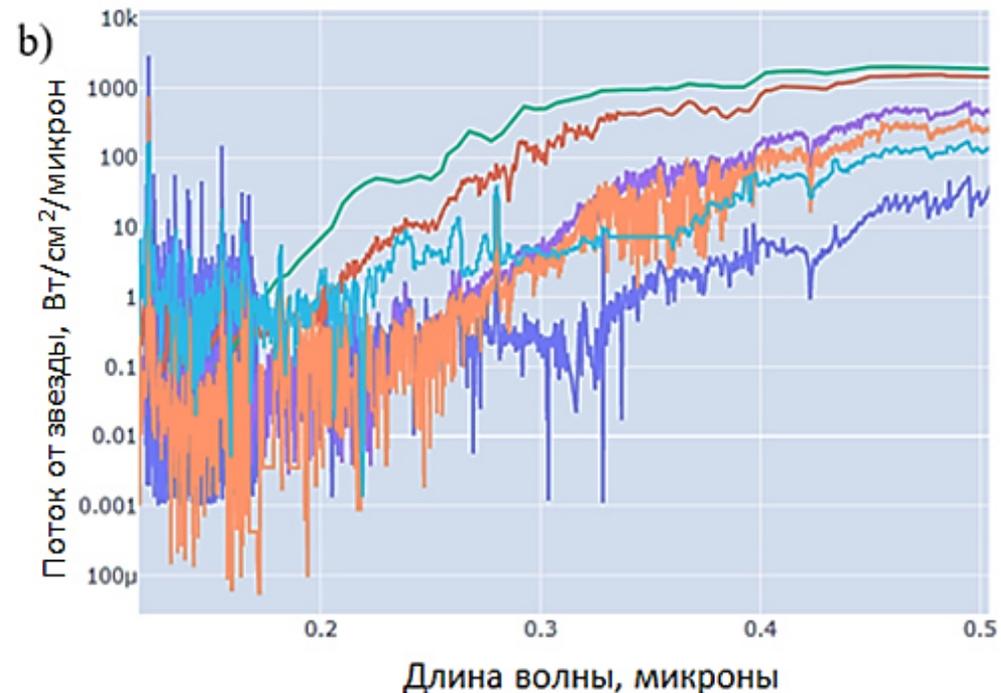
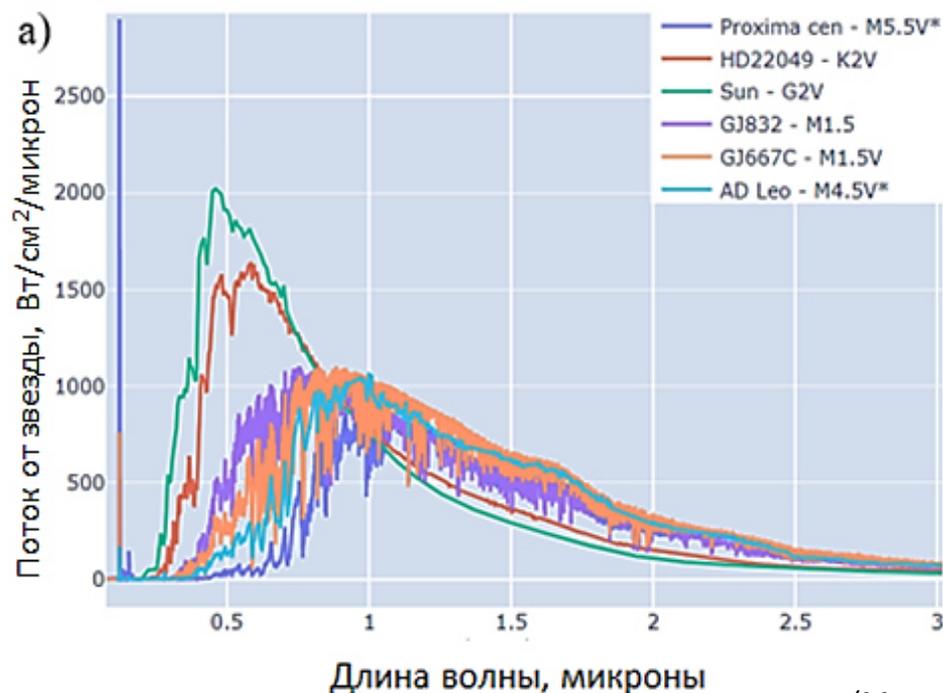
- (Airapetian et al., 2017): время убегания атмосферы планеты (1 бар), в ЗПО у Proxima Cen b $\sim 10 Myr$

- (Lammer. H et. al. 2019), (Luger, R., et. al., 2015): формирование N_2-O_2 доминантной атмосферы в ЗПО у M и K – карликов скорее невозможно.

- (Wunderlich F., et. al., 2019), (Segura, A. et. al., 2003, 2005), (Rauer H., et. al., 2011), (Kaltenegger, L., et. al., 2009) – делают параметрические расчеты для M и K карликов

1. Мы ссылаемся на исследования, согласно которым формирование N_2-O_2 атмосфер у планет в ЗПО у M и K карликов – невозможно.
2. Все же делаем параметрические расчеты для данных планет, ссылаясь на работы справа.

Транзитные наблюдения. Влияние спектров родительских звезд



(Масштабирование потока,
→ 288.15 K на поверхности)

Спектры:

- GJ 832 и GJ 667 C – MUSCLES database (France et. al., 2016)
 - AD Leo, Proxima Centauri (M-type), HD22049 (K-type), Sun – VPL website (Segura et. al., 2003, 2005), (Meadows et al., 2018)
- + Тихие M0 – M7 карлики – аппроксимация спектром АЧТ

Транзитные наблюдения. Влияние спектров родительских звезд

Параметры ЗПО

$$\frac{L_{star}}{L_{sun}} = \left(\frac{R_{star}}{R_{Sun}}\right)^2 \left(\frac{T_{star}}{T_{Sun}}\right)^4$$

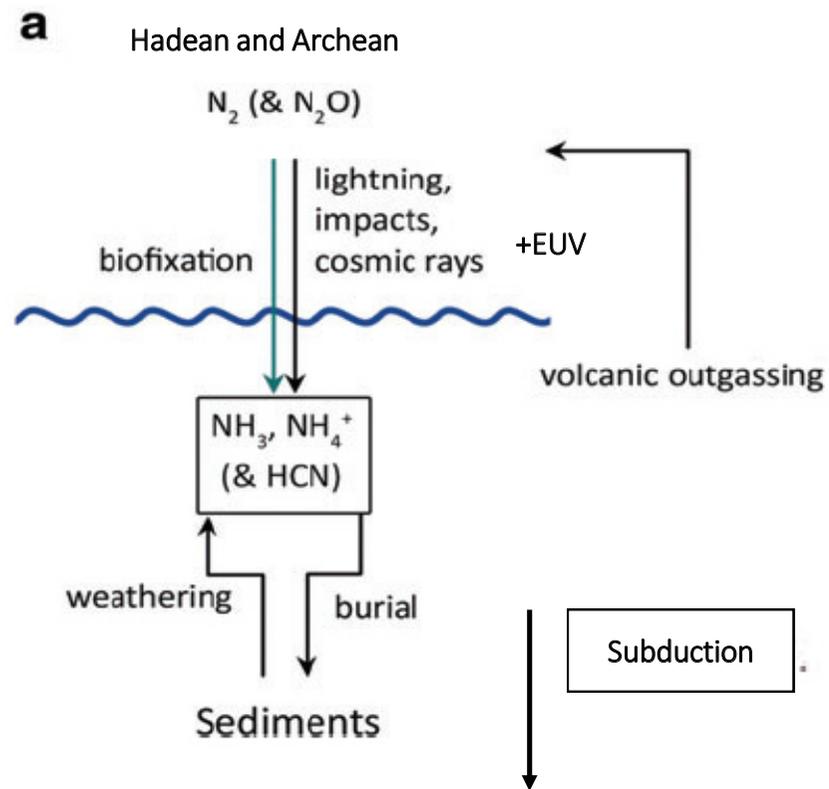
(Kaltenegger, L., et. al., 2009)

$$a_{HZ} = 1\text{AU} \times \left(\frac{L_{star}}{L_{sun}}\right)^{1/2} = \left(\frac{T_{star}}{T_{Sun}}\right)^2 \left(\frac{R_{star}}{R_{Sun}}\right)$$

$$P_{HZ} = 365.25 \times 24 \times (a_{HZ})^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_{star}}{M_{Sun}}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

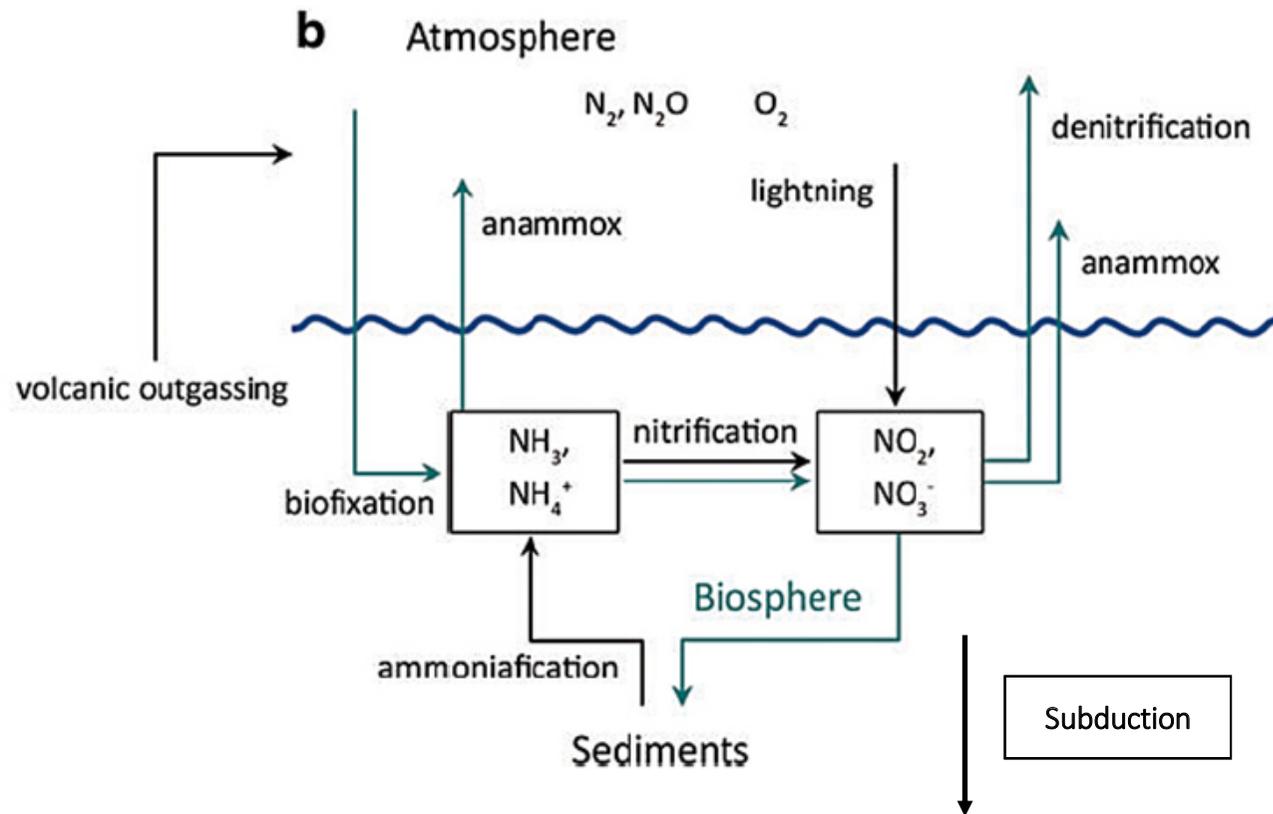
$$T_d = \frac{P}{2\pi} 2 \arcsin\left(\frac{R_s}{a}\right) \quad (R_p \ll R_s, i = 90^\circ) \quad (\text{Rauer, H., et. al. 2011})$$

Азотный цикл до GOE



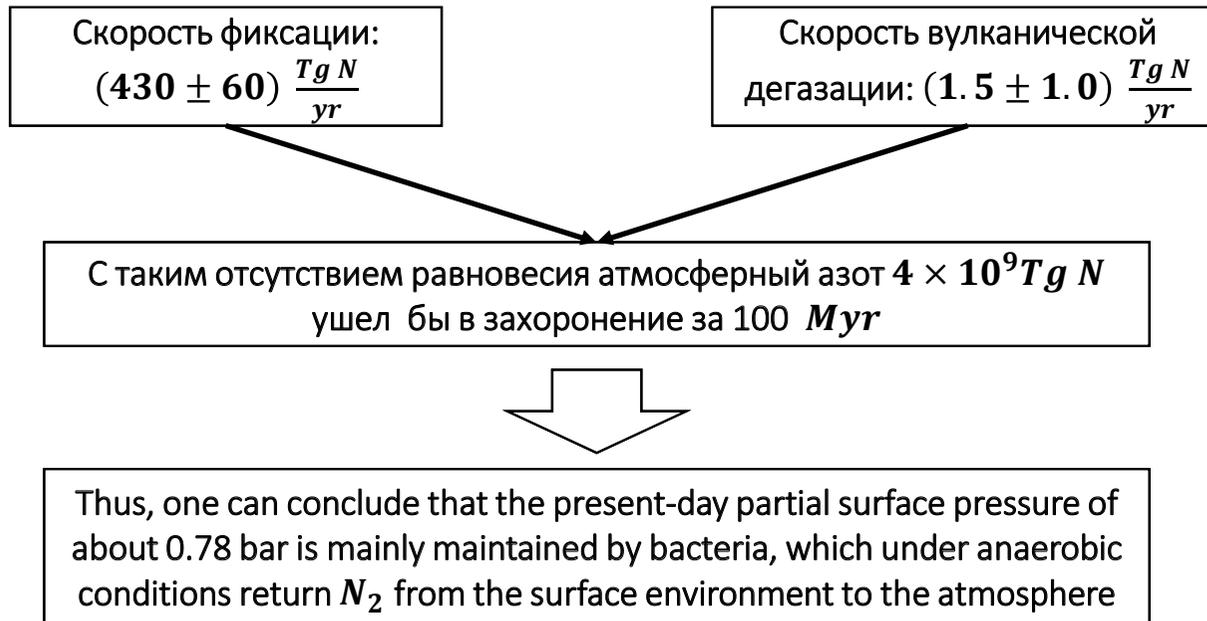
(Lammer, H et. al. 2019)

Азотный цикл после GOE



(Lammer, H et. al. 2019)

Азотный цикл сейчас



(Lammer. H et. al. 2019)

Nitrogen building blocks

The isotopic ratio of $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ in the atmospheres of Earth, Titan, but also Triton, and Pluto, can tell us something about their building blocks, since different reservoirs in the Solar System can be divided by their various fractionations.

No	Nitrogen reservoirs	$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$
1	Solar wind	(440.5 ± 5.8)
1.1	Jupiter's atmosphere	(435 ± 65)
2	NH_3 ices in comets	(127 ± 32) (135.7 ± 5.9)
3	Refractory organics: Interplanetary dust particles and carbonaceous chondrites from the outer Solar System	≈ 231
	Chondrites from the additional reservoir being mixture of 2 and 3 reservoirs.	(259 ± 15)

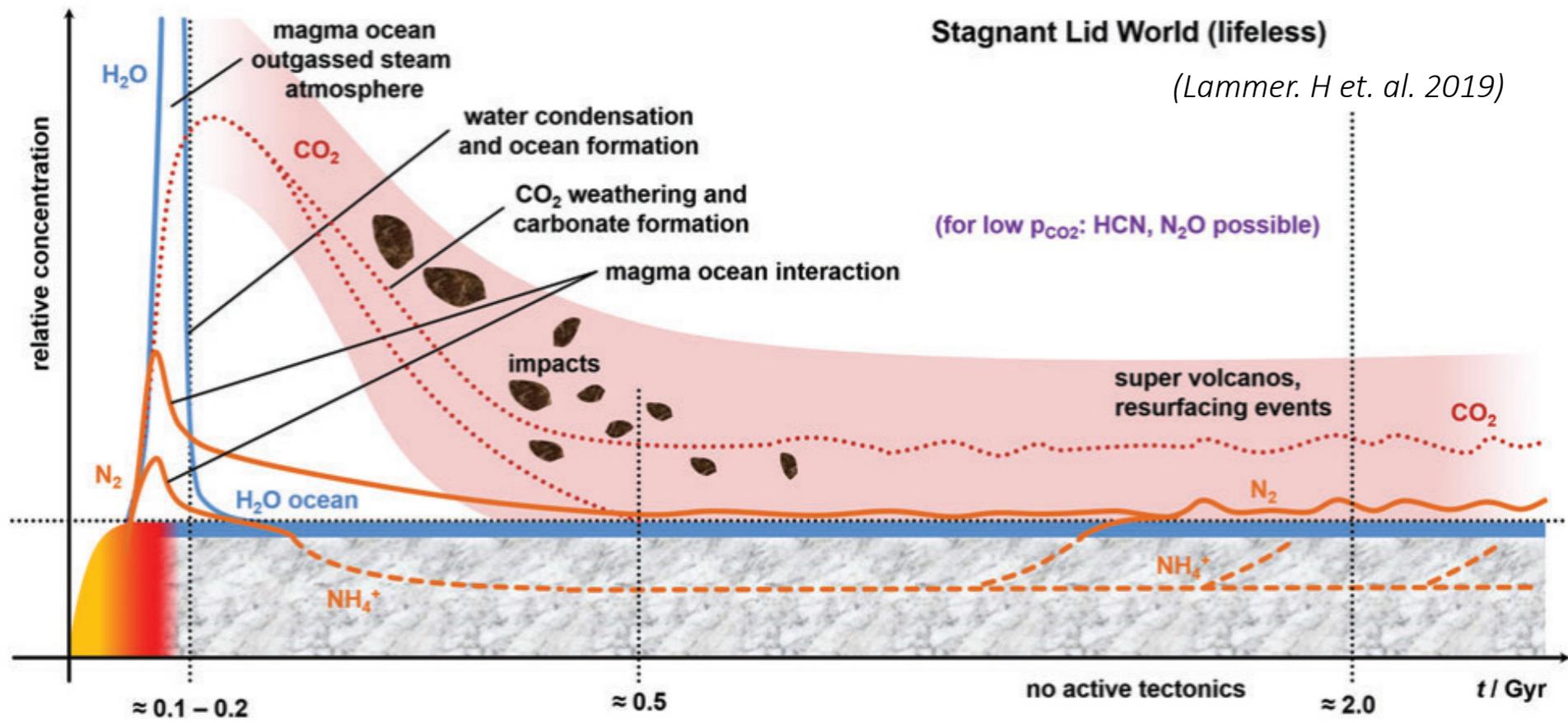
Titan's atmosphere

Earth's atmosphere (≈ 272).
Martian interior and Venus's atmosphere show comparable values

(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)

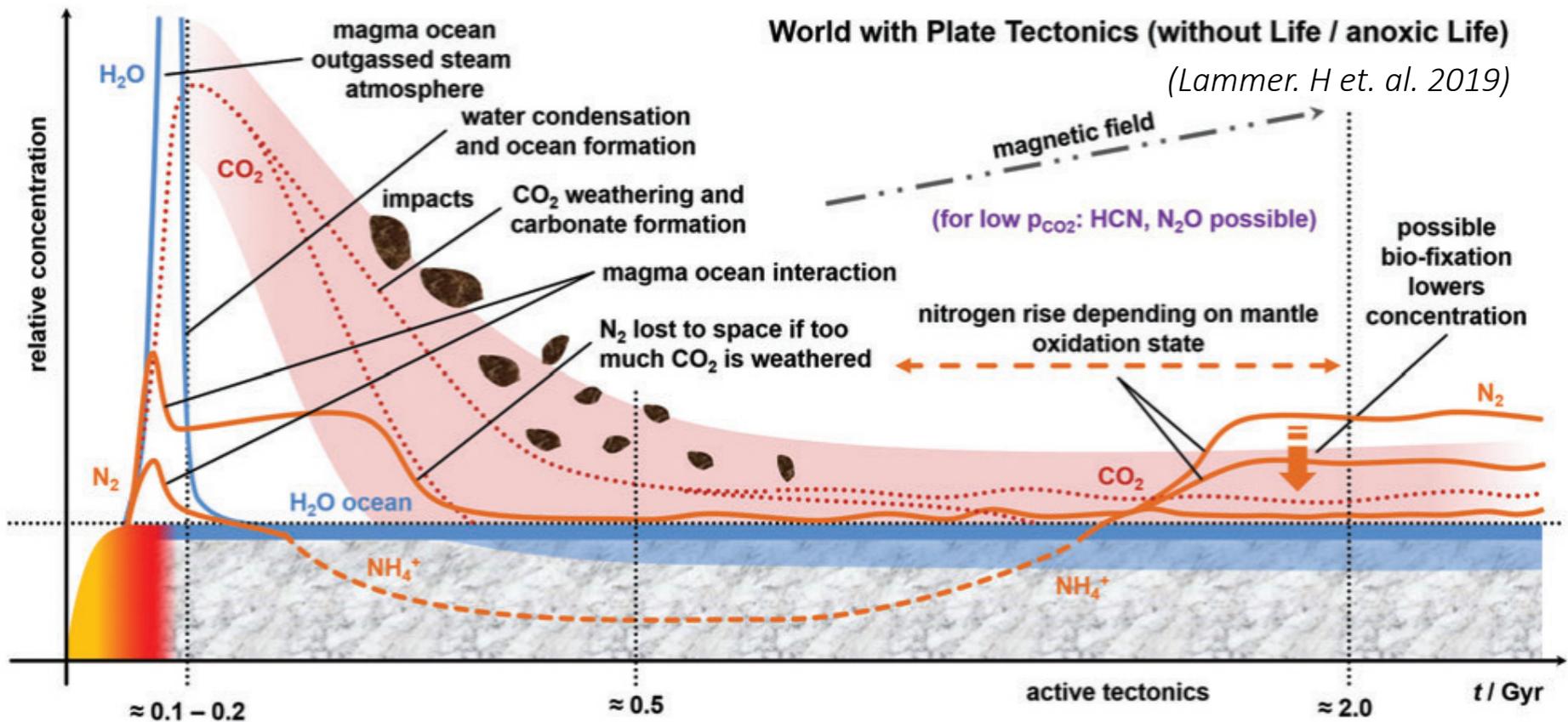
Сценарии эволюции атмосфер планет Земного типа

Режим 1: Stagnant-lid regime world – тектоника плит отсутствует. Планета обладает жидким водным океаном. Жизнь – отсутствует.



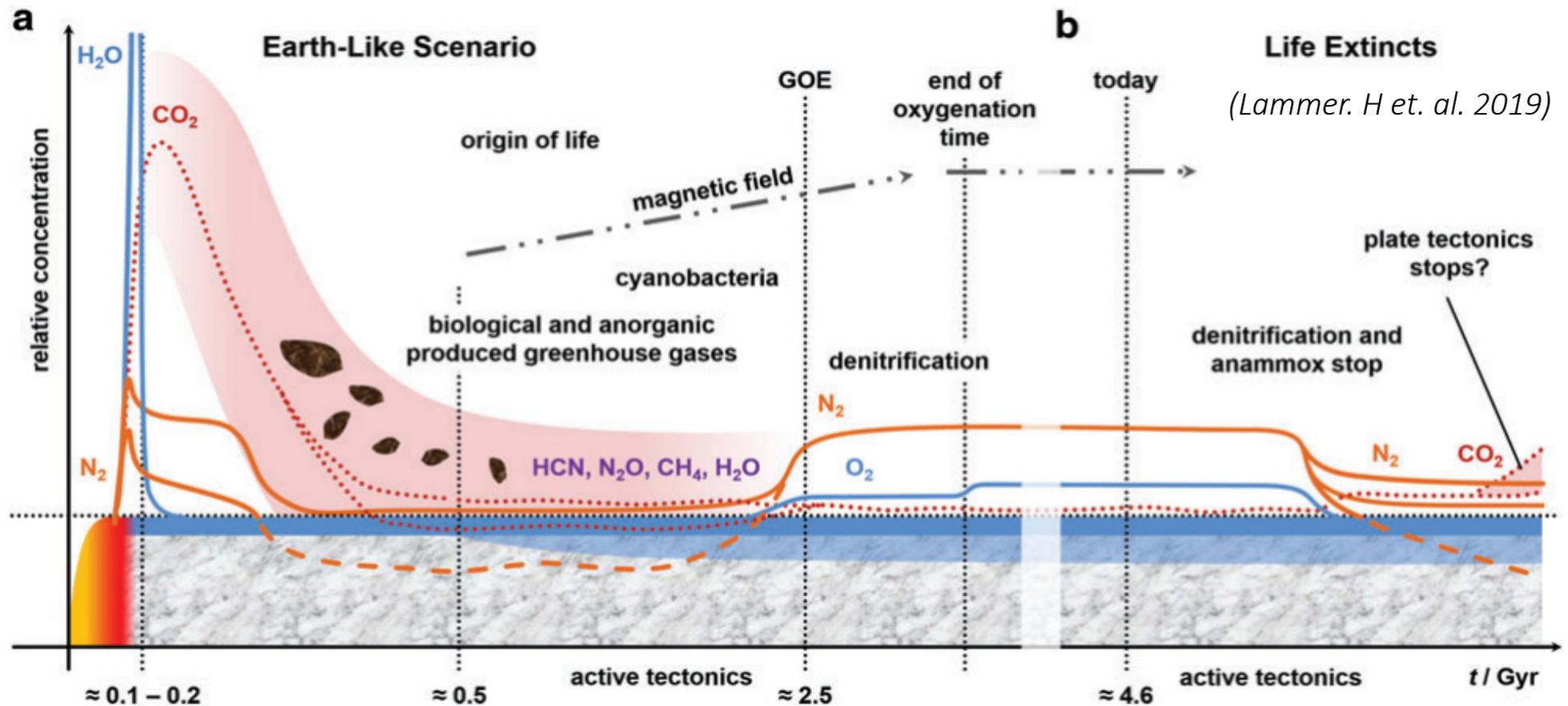
Сценарии эволюции атмосфер планет Земного типа

Режим 2: Anoxic tectonic world – тектоника плит развита. Планета обладает жидким водным океаном. Жизнь – отсутствует, или присутствует только бескислородная жизнь.



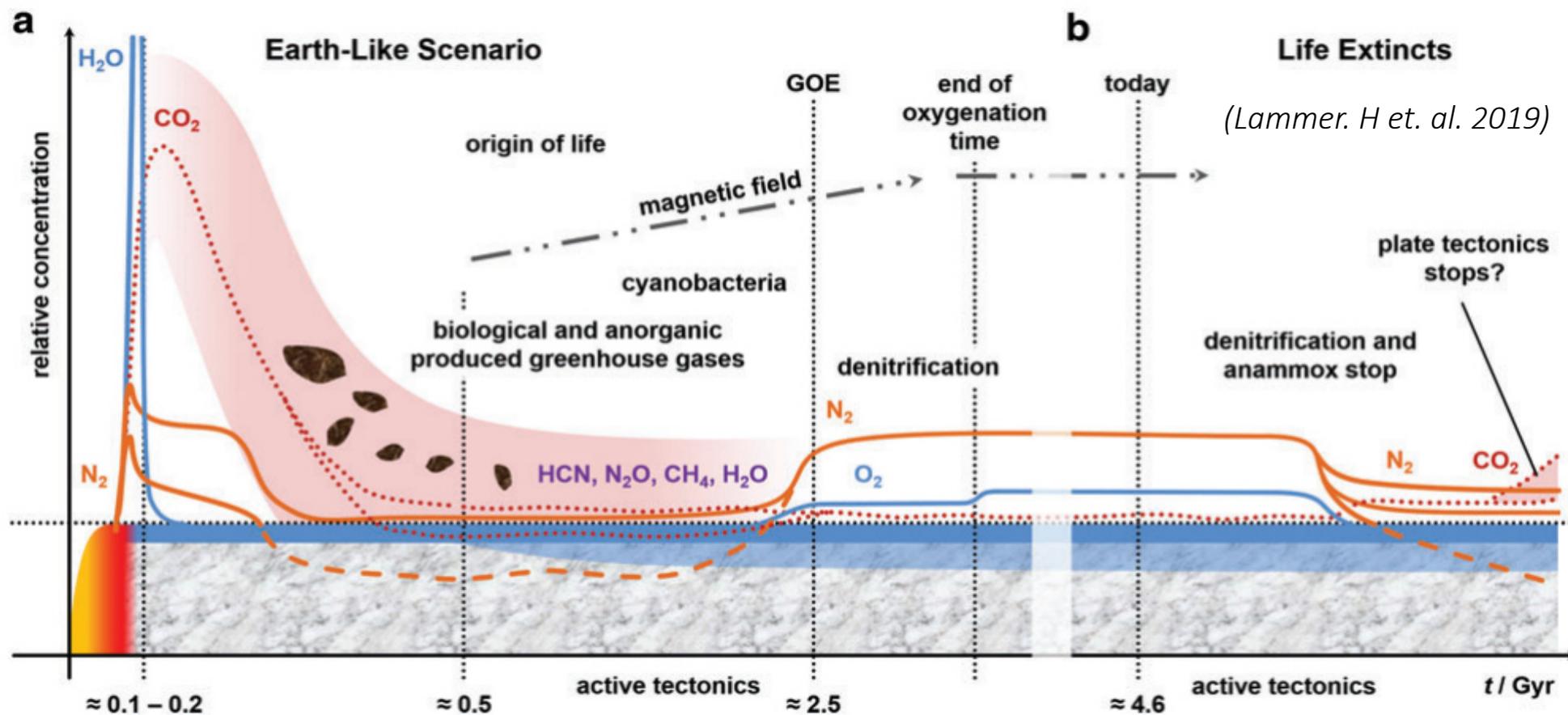
Сценарии эволюции атмосфер планет Земного типа

Режим 3: Oxic tectonic world (Земле-подобный мир) – тектоника плит и жизнь такие же, как на Земле.



Сценарии эволюции атмосфер планет Земного типа

Режим 4: Entirely extinct world – все условия такие же, как на Земле, но все формы жизни внезапно вымерли.



Nitrogen building blocks

The reverse of this $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ value also serves as the nitrogen isotope standard $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}_{\text{standard}} = 3.676 \times 10^{-3}$

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\frac{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{sample}}}{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000,$$

No	Nitrogen reservoirs	$\delta^{15}\text{N}$, %
1	Atmosphere	0%
1	Upper atmosphere	< - 5%
2	Terrestrial crust	+ 6%
3	Deep matle	< -40% (≈ 4.56 Gyr ago)

In Archean and Hadean

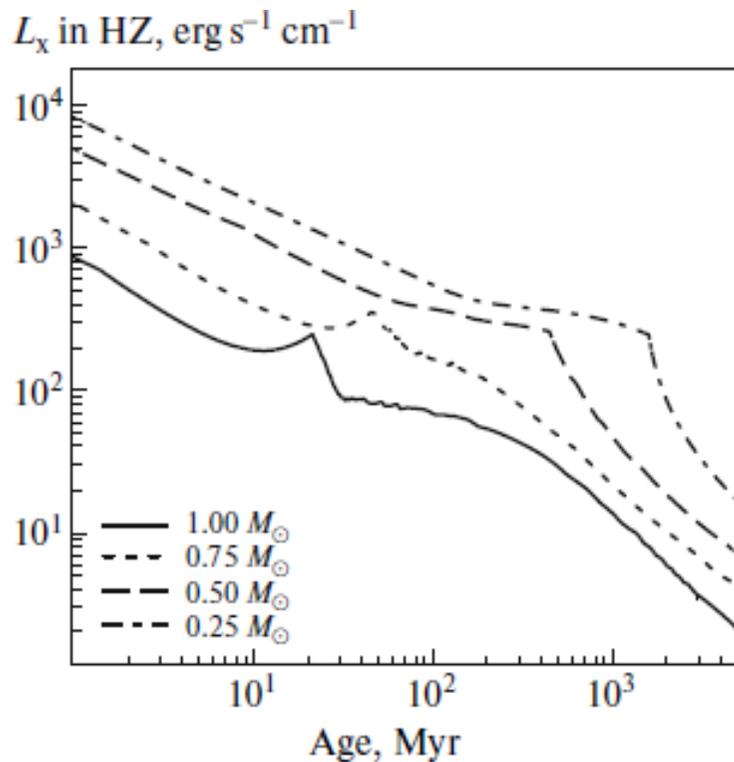
Small Disequilibrium due to ^{15}N enriching through: Atmospheric escape (thermal, non-thermal). I.e. lighter isotope is removed and $\delta^{15}\text{N} \uparrow$

To confirm this – modelling is required.
But modelling is needed in $p\text{N}_2$ value.
But $p\text{N}_2$ is not known!

(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)

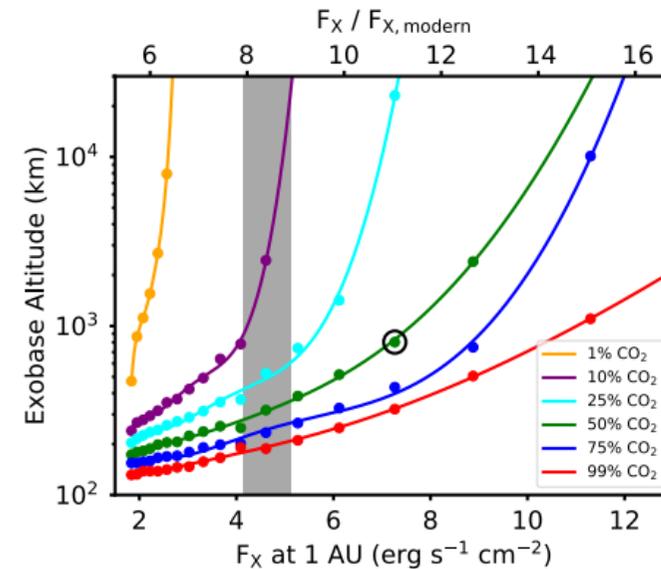
Атмосферы в ЗПО М- и К- звезд. Недостатки.

1. Атмосферы таких планет находятся под сильным влиянием X-rays и EUV излучения на протяжении намного большего времени, по сравнению с планетами в ЗПО звезд G-класса;



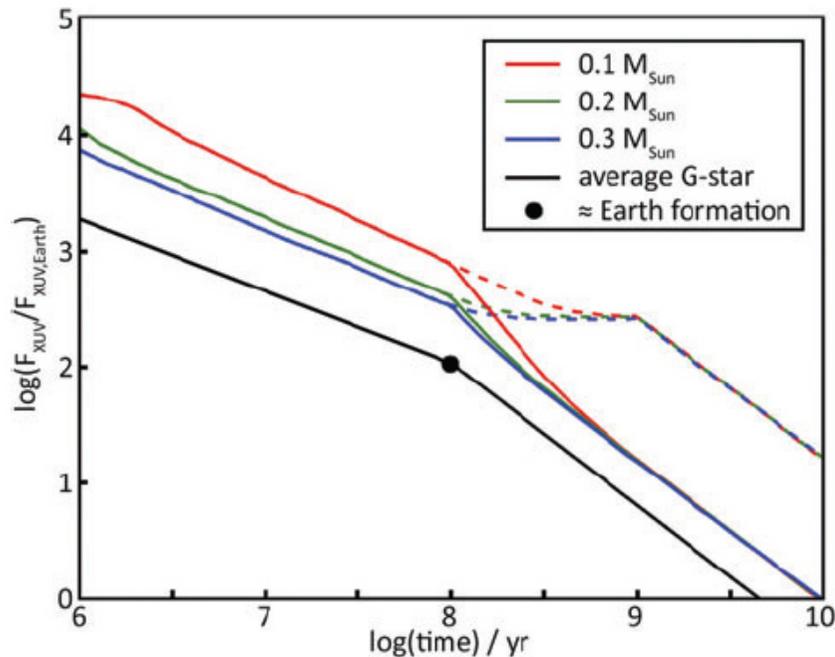
(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)

- Johnstone et al., 2020 found that even a nitrogen-dominated atmosphere with 10% CO_2 becomes unstable for $L_x \approx 5 - 10 \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2}$



Атмосферы в ЗПО М- и К- звезд. Недостатки.

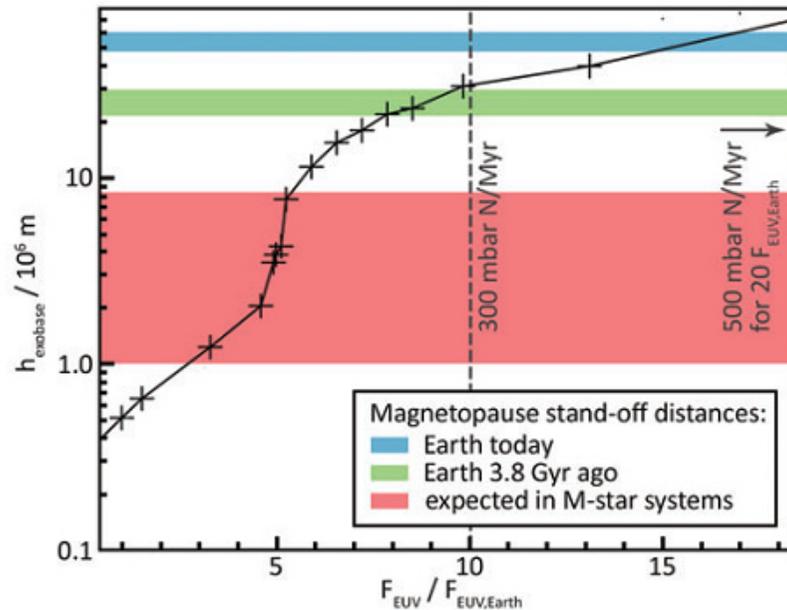
1. Атмосферы таких планет находятся под сильным влиянием X-rays и EUV излучения на протяжении намного большего времени, по сравнению с планетами в ЗПО звезд G-класса;



- Johnstone et al., 2019, found extreme hydrodynamic losses of nitrogen-dominated atmosphere of a planet in the habitable zones of very active stars (60 XUV), resulting in the complete evaporation of a modern Earth evaporation < **0.1 Myr**
- Airapetian et al. ,2017, found that the escape time of a 1 bar atmosphere on a terrestrial-type planet in the habitable zone of Proxima Cen b is expected to be about **10 Myr**.

Атмосферы в ЗПО М- и К- звезд. Недостатки.

- 2. На планетах в ЗПО таких звезд наиболее вероятно нельзя поддерживать плотные атмосферы на длительном промежутке времени, ввиду: тепловых и нетепловых процессов убегания атмосферы, геофизических сложностей, связанных с тектоникой плит, поверхностного выветривания CO_2 ;

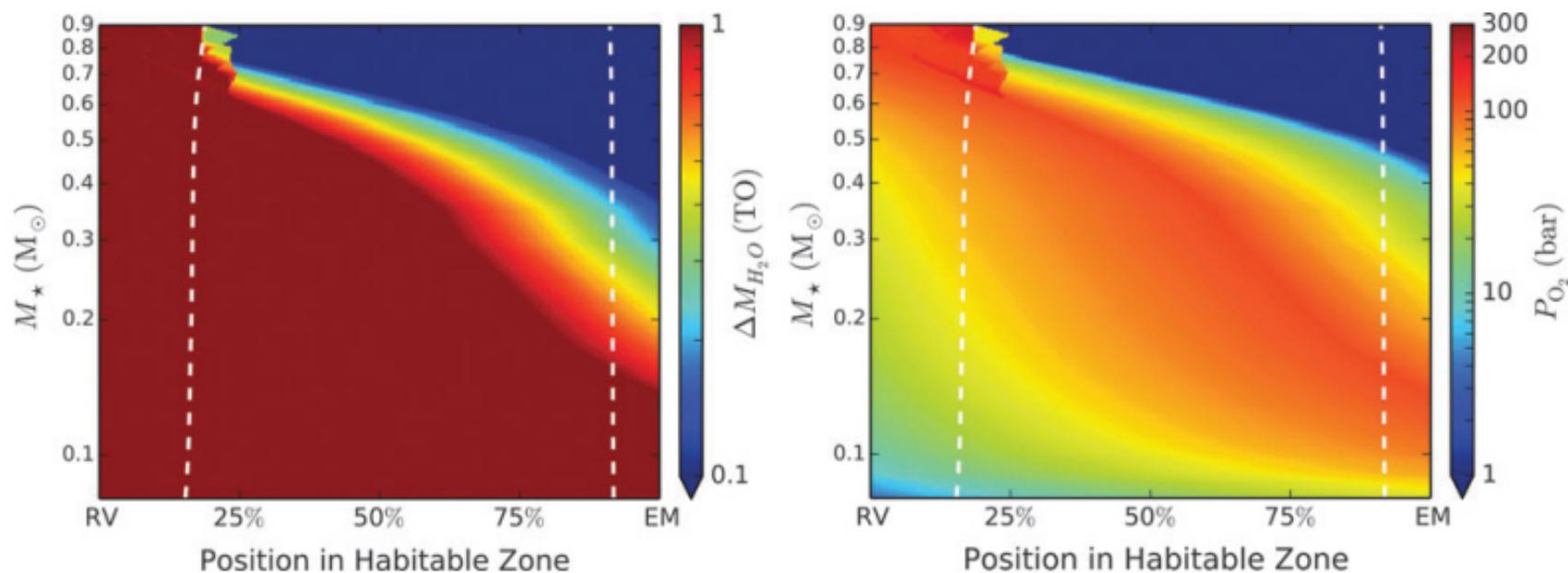


(Lammer, H et. al. 2019)

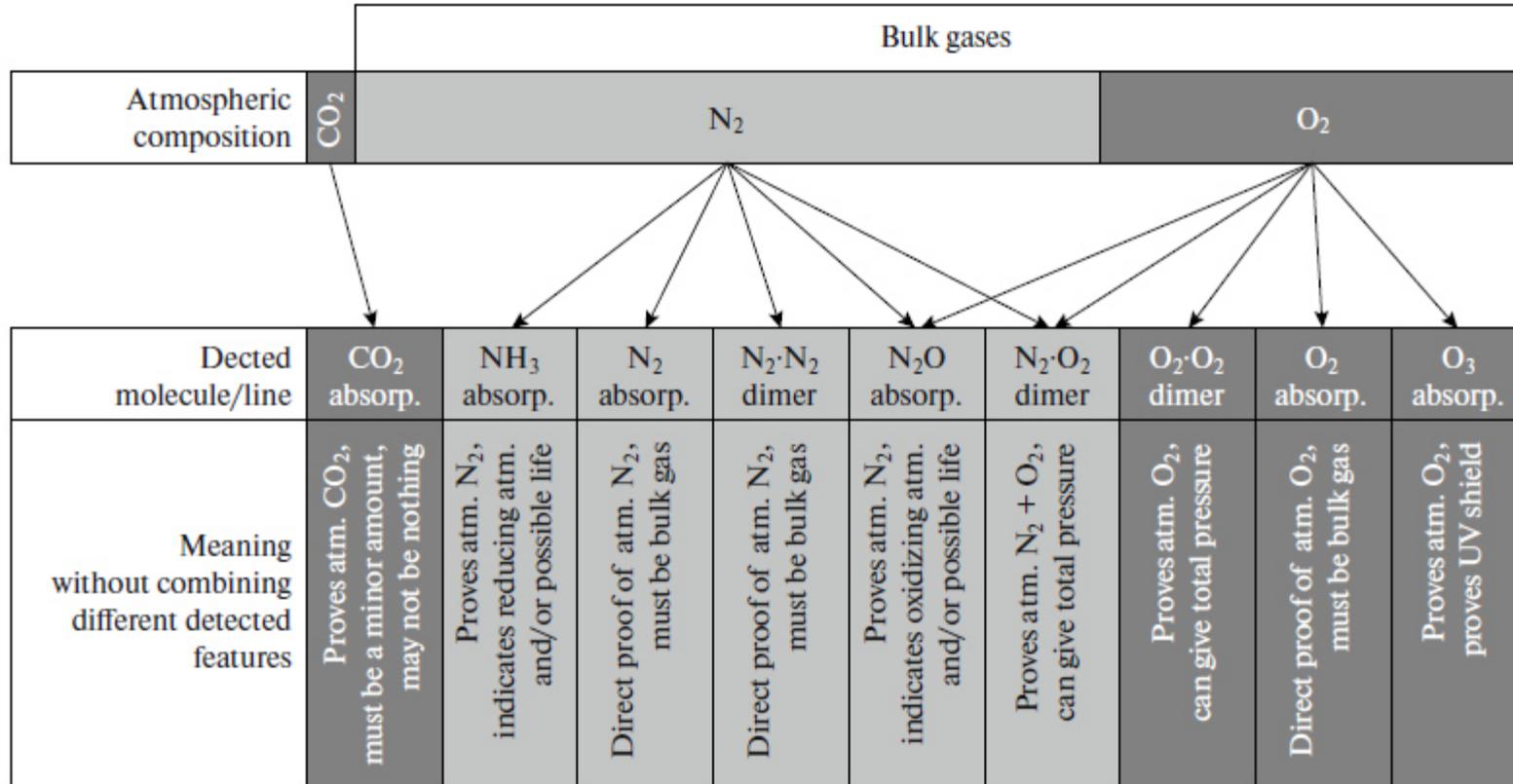
- Для молодых планет, которые находятся под сильным EUV потоком, верхние атмосферы расширяются до уровней магнитопаузы.
- Для $10F_{EUV,Earth}$ скорость убегания азота из атмосферы составит **300 mbar/Myr**, для $20F_{EUV,Earth}$ скорость убегания азота из атмосферы составит **500 mbar/Myr**

Атмосферы в ЗПО М- и К- звезд. Недостатки.

- 3. Однако, исследование Luger R., et. al., 2015, показывает, что для некоторых звезд М-типа: вода будет сохраняться в океане планеты в ЗПО, также, как и молекулярный кислород буде сохраняться в атмосфере данной планеты.



Наблюдения в $N_2 - O_2$ доминантных атмосферах



(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)

Наблюдения в $N_2 - O_2$ доминантных атмосферах

N_2

- No transitional dipole moment – no absorption features in NIR or VIS
- $N_2 - N_2$ Collisionally induced absorption in FIR ($> 40 \mu m$) can be masked by water vapor absorption
- $N_2 - N_2$ Collisions create short-lived $N_2 - N_2$ pairs – absorption feature near $4.3 \mu m$. It is overlapped by CO_2 absorption line. But if $pN_2 > 0.5$ bar, then $N_2 \cdot N_2$ can significantly widen the CO_2 line width in thick N_2 atmospheres.

N_2O and NO_2

- Are overlapped in VIS and NUV by strong O_2 and O_3
- In humid atmospheres N_2O bands are overlapped by water vapor, CO_2 and even CH_4
- BUT: N_2O absorption feature at $4 \mu m$ can be strong in transmission spectrum of Earth-like planet orbiting inactive star.

Other dimers

- $N_2 \cdot O_2$ absorption feature can be detected at $1.26 \mu m$
- Comparing the Strength of $O_2 \cdot O_2$ absorption line at $1.29 \mu m$ with the strength of O_2 vibrational-rotational bands provide information about the atmospheric pressure

(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)

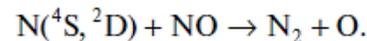
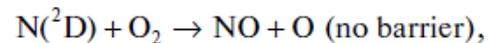
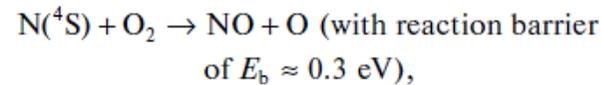
Наблюдения в $N_2 - O_2$ доминантных атмосферах

O_2

- O_2 has long been recognized as a key biosignature, detectable by subsequently produced O_3 , BUT O_2 can be also built up abiotically in an exoplanet's atmosphere due to H_2O dissociation followed by hydrogen escape!
- Such O_2 -rich atmospheres will also produce O_3 layers that, accompanied by the detection of H_2O and relatively low CO_2 values, could result in potential false positives for life.

NO - secondary biosignature

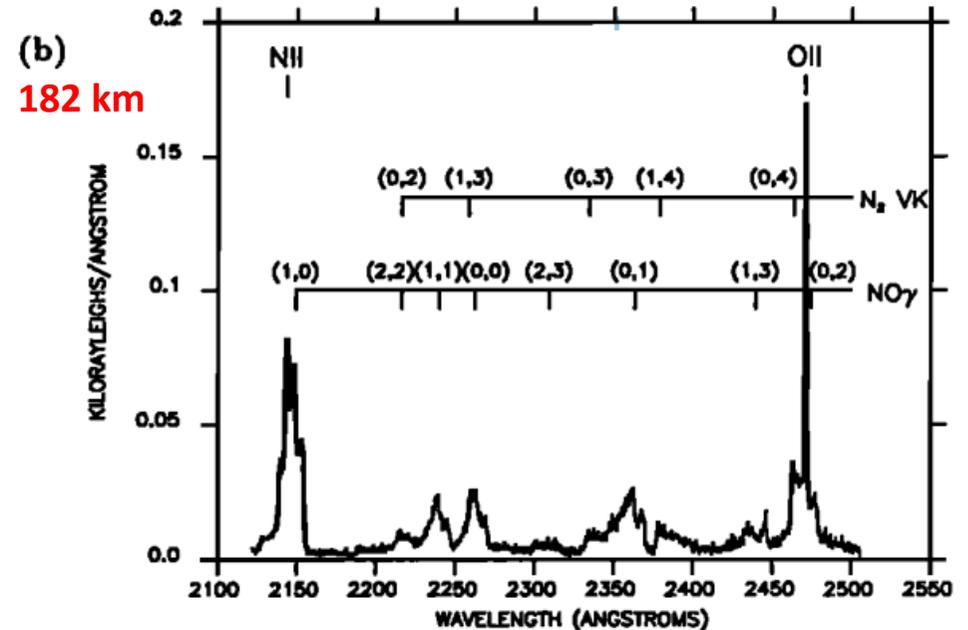
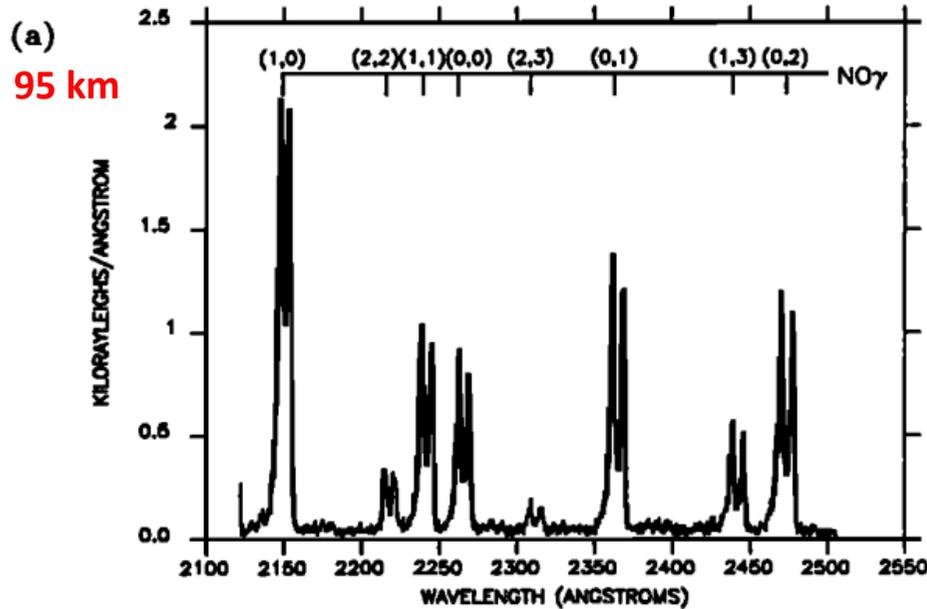
- It is important to point out that radical NO is a direct indicator of an $N_2 - O_2$ -dominated atmosphere because its formation is a consequence of the presence of molecular nitrogen and oxygen as the main atmospheric constituents in the planetary atmosphere:



- Infrared emission vibrational-rotation feature at $5.3 \mu m$.
- UV emission electronic feature at $205.3 - 247.9 nm$.

(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)

NO (1,0) gamma band



[Clearly, David (1986)]: The (1, 0) band of the nitric oxide gamma band system ($A^2\Sigma - X^2\Pi$) is the brightest NO emission in the earth's atmosphere. Its brightness combined with a known fluorescence efficiency of unity [Callear and Smith, 1963] makes this band attractive for remote sensing of NO. Indeed, the (1, 0) gamma band has been used extensively to determine thermospheric NO densities [e.g., Barth, 1964; Pearce, 1969; Meira, 1971; Rusch, 1973; Tohmatsu and Iwagami, 1976; Thomas, 1978, McCoy, 1983a, b]. Because this band connects to the ground vibrational level, however, for some viewing conditions self-absorption can complicate the analysis [Rusch, 1973; Cravens, 1977].

Источники

- Eparvier, F. G.; Barth, C. A. (1992). doi:10.1029/92JA00993
- Cleary, David D. (1986). doi:10.1029/ja091ia10p11337
- T.E. Cravens (1977). doi:10.1016/0032-0633(77)90052-6
- J.B. Pearce (1969). doi:10.1016/0022-4073(69)90097-1
- John R. Reisel; Campbell D. Carter; Normand M. Laurendeau (1992). doi:10.1016/0022-4073(92)90078-i
- H. Trad; P. Higelin; N. Djebaili-Chaumeix; C. Mounaim-Rousselle (2005). doi:10.1016/j.jqsrt.2004.03.017
- Rusch, David W. (1973). doi:10.1029/ja078i025p05676
- Conway, Robert R. (1982). doi:10.1029/ja087ia02p00859
- A.J.D. Farmer; V. Hasson; R.W. Nicholls (1972). doi:10.1016/0022-4073(72)90172-0
- LIFBASE
- Tatum, J. B. (1967) doi:10.1086/190149

Расчет

1. The intensity of emission resulting from the resonant reradiation of sun-light in the gamma band system, $\frac{\text{photons}}{s \times \text{cm}^2}$:

$$4\pi I = g_{\nu\nu''} N$$

- $g_{\nu\nu''}$ – g -factor (emission coefficient, $\frac{\text{photons}}{s}$)
- N – column density cm^{-2}

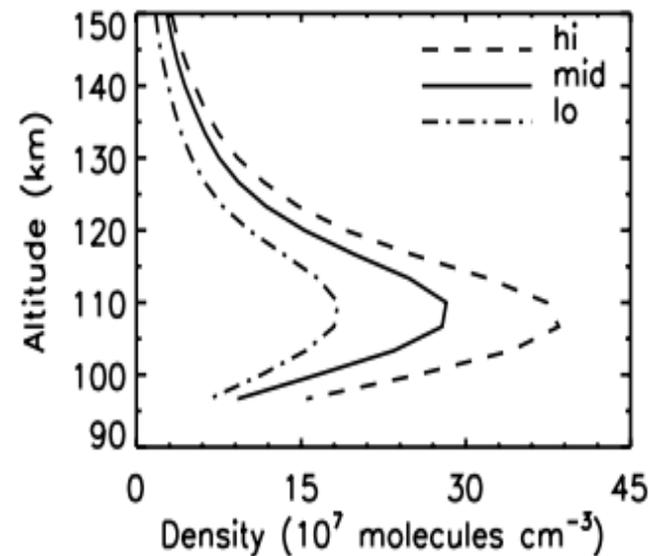


Figure 7. Altitude profiles of the mean nitric oxide density in the auroral region for periods of low, mid, and high geomagnetic activity.

Расчет (оптически тонкий случай)

1.2 $g_{v'v''}$ can be expressed as the summation of the individual emission rate factors, $g_{J'J''}$, for all the rotational lines in the band:

$$g_{J'J''} = \omega_{v'v''}(v', v'', J'', B'') \sum_v \sum_J \sum_B \left\{ \frac{\pi e^2}{mc^2} \cdot \lambda^2(v', v, J, B) \cdot \pi F(\lambda(v', v, J, B)) \cdot f(v', v) \cdot \frac{S(J, B)}{2J'(B) + 1} \cdot \frac{N_J}{N_0} \right\}$$

TABLE 1. BRANCHING RATIOS USED IN EMISSION RATE FACTOR CALCULATION

Gamma Band	Branching ratio	
	Albritton <i>et al.</i> (1976)	Poland and Broida (1971)
(0, 0)	0.2151	0.1611
(0, 1)	0.2979	0.3175
(1, 0)	0.4517	0.4228
(1, 1)	0.1232	0.1490
(2, 0)	0.4471	0.3753
(2, 2)	0.1880	0.1884
(3, 1)	0.2972	0.2984

T.E. Cravens (1977).

Table 1. Rotational transitions and energies for NO. The subscripted numbers for the energy expressions F'' and F' refer to the two spin-split states, while the subscripted letters (c and d) refer to the two Λ -doubled states.

Transition	Ground Rotational State	Excited Rotational State
	${}^2\Pi$	${}^2\Sigma^+$
$P_{11}(J'')$	$F_{1c}''(J'')$	$F_1'(J'' - 1)$
${}^oP_{21}(J'')$	$F_{1d}''(J'')$	$F_2'(J'' - 1)$
$Q_{11}(J'')$	$F_{1d}''(J'')$	$F_1'(J'')$
${}^aQ_{21}(J'')$	$F_{1c}''(J'')$	$F_2'(J'')$
$R_{11}(J'')$	$F_{1c}''(J'')$	$F_1'(J'' + 1)$
${}^sR_{21}(J'')$	$F_{1d}''(J'')$	$F_2'(J'' + 1)$
${}^oP_{12}(J'')$	$F_{2d}''(J'')$	$F_1'(J'' - 1)$
$P_{22}(J'')$	$F_{2c}''(J'')$	$F_2'(J'' - 1)$
${}^pQ_{12}(J'')$	$F_{2c}''(J'')$	$F_1'(J'')$
$Q_{22}(J'')$	$F_{2d}''(J'')$	$F_2'(J'')$
${}^oR_{12}(J'')$	$F_{2d}''(J'')$	$F_1'(J'' + 1)$
$R_{22}(J'')$	$F_{2c}''(J'')$	$F_2'(J'' + 1)$

John R. Reisel (1992). Итого: 12 branches x 80 rotational levels (LIFBASE)

TABLE 1. BAND ABSORPTION OSCILLATOR STRENGTHS EINSTEIN A COEFFICIENTS ($A_{v'v''}$) FOR BANDS OF 1

Band	Wavelength (Å)	$f_{v'v''}^{abs}$	$S_{v'v''}$ (a_0e) ²
(0, 0)	2262	4.01 (-4)	1.19 (-
(1, 0)	2148	8.09 (-4)	2.29 (-
(2, 0)	2047	7.00 (-4)	1.89 (-
(3, 0)	1956	2.4 (-4)	6.2 (-

A.J.D. Farmer (1972).

Расчет (оптически тонкий случай)

1.2 $g_{\nu',\nu''}$ can be expressed as the summation of the individual emission rate factors, $g_{J',J''}$ for all the rotational lines in the band:

$$g_{J',J''} = \omega_{\nu',\nu''} \sum_{J=|\Lambda+\Sigma|}^{\infty} \frac{\pi e^2}{mc^2} \lambda^2_{J',J} \pi F_{J',J} f_{\nu',0} \frac{S(J',J)}{2J+1} \frac{N_J}{N_0}$$

• **Eparvier, F. G.; Barth, C. A. (1992) + Tatum, J. B. (1967) :**

$$\frac{N_J}{N_0} = \frac{\phi(2J+1) \exp\left[-\frac{hc}{kT} [F(J) + A\Lambda\Sigma]\right]}{\sum_{\Sigma=-S}^S \exp\left(-\frac{hc}{kT} A\Lambda\Sigma\right) \sum_{J=|\Lambda+\Sigma|}^{\infty} \left((2J+1) \exp\left(-\frac{hc}{kT} F(J)\right) \right)}$$

• **H. Trad (2005):**

$$N(J'') = n_0 \frac{(2J''+1)}{Q_r} \exp\left[\frac{-hcF(J'')}{kT}\right]$$

$$Q_r = \sum_{J''} (2J''+1) \left[\exp\left(\frac{-hcF(J'', X^2\Pi_{1/2}, c)}{kT}\right) + \exp\left(\frac{-hcF(J'', X^2\Pi_{1/2}, d)}{kT}\right) + \exp\left(\frac{-hcF(J'', X^2\Pi_{3/2}, c)}{kT}\right) + \exp\left(\frac{-hcF(J'', X^2\Pi_{1/2}, d)}{kT}\right) \right]$$

Расчет эмиссии в γ -полосах NO (оптически толстый случай)

1. Учет самопоглощения во вращательной линии:

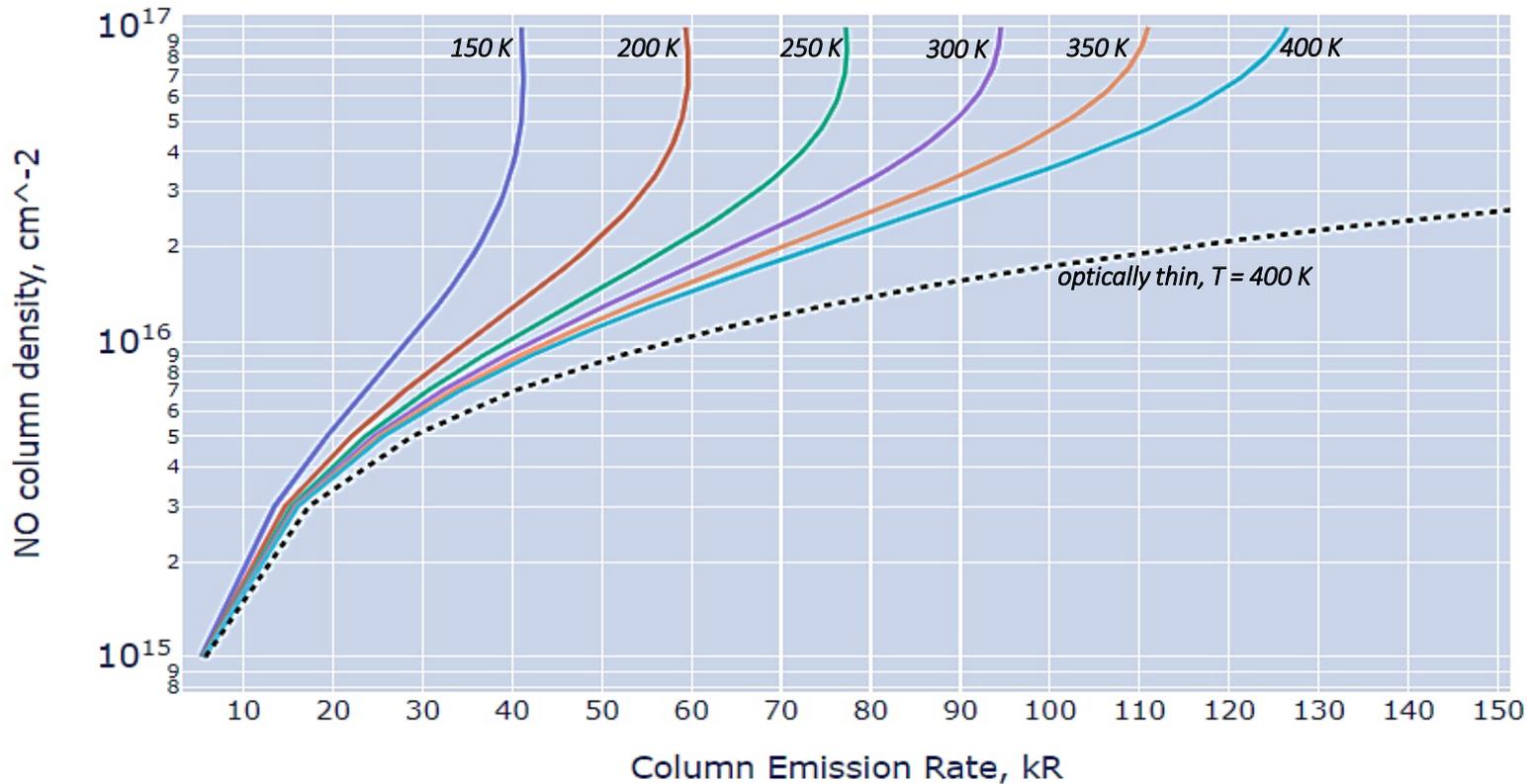
$$g^{sa}_{J'J''} = g^0_{J'J''} T(\tau_{J'J''})$$

$$\tau_{J'J''} = \sigma_{J'J''} N_J \quad \sigma_{J'J''} = \frac{\pi e^2}{mc^2} f_{v'v''} \frac{S(J'J'')}{2J' + 1} \frac{\lambda^2_{J'J}}{\Delta\lambda_D \sqrt{\pi}}$$

2. $T(\tau_{J'J''})$ - функция трансмиссии Хольштейна

$$T(\tau_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-y^2 - \tau_0 \exp(-y^2)] dy$$

$$\sigma_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad y = \frac{v - v_0}{\sigma_D \sqrt{2}}$$



Источники

- **Eparvier, F. G.; Barth, C. A. (1992).** doi:10.1029/92JA00993
- **Cleary, David D. (1986).** doi:10.1029/ja091ia10p11337
- **T.E. Cravens (1977).** doi:10.1016/0032-0633(77)90052-6
- **J.B. Pearce (1969).** doi:10.1016/0022-4073(69)90097-1
- **John R. Reisel; Campbell D. Carter; Normand M. Laurendeau (1992).** doi:10.1016/0022-4073(92)90078-i
- **H. Trad; P. Higelin; N. Djebaili-Chaumeix; C. Mounaim-Rousselle (2005).** doi:10.1016/j.jqsrt.2004.03.017
- **Rusch, David W. (1973).** doi:10.1029/ja078i025p05676
- **Conway, Robert R. (1982).** doi:10.1029/ja087ia02p00859
- **A.J.D. Farmer; V. Hasson; R.W. Nicholls (1972).** doi:10.1016/0022-4073(72)90172-0
- **LIFBASE**
- **Tatum, J. B. (1967)** doi:10.1086/190149

Расчет (оптически толстый случай)

$$T(\tau_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-y^2 - \tau_0 \exp(-y^2)] dy$$

$$\tau_{J'J''} = \sigma_{J'J''} N_J$$

$$\sigma_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

$$y = \frac{v-v_0}{\sigma_D \sqrt{2}}$$

$$\Delta\lambda_D = \frac{2\lambda_{J'J}}{c} \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{m}}$$

$$\sigma_{J'J''} = \frac{\pi e^2}{mc^2} f_{v'0} \frac{S(J'J'')}{2J'+1} \frac{\lambda^2_{J'J}}{\Delta\lambda_D \sqrt{\pi}}$$

Образование γ -полос NO

Dayglow

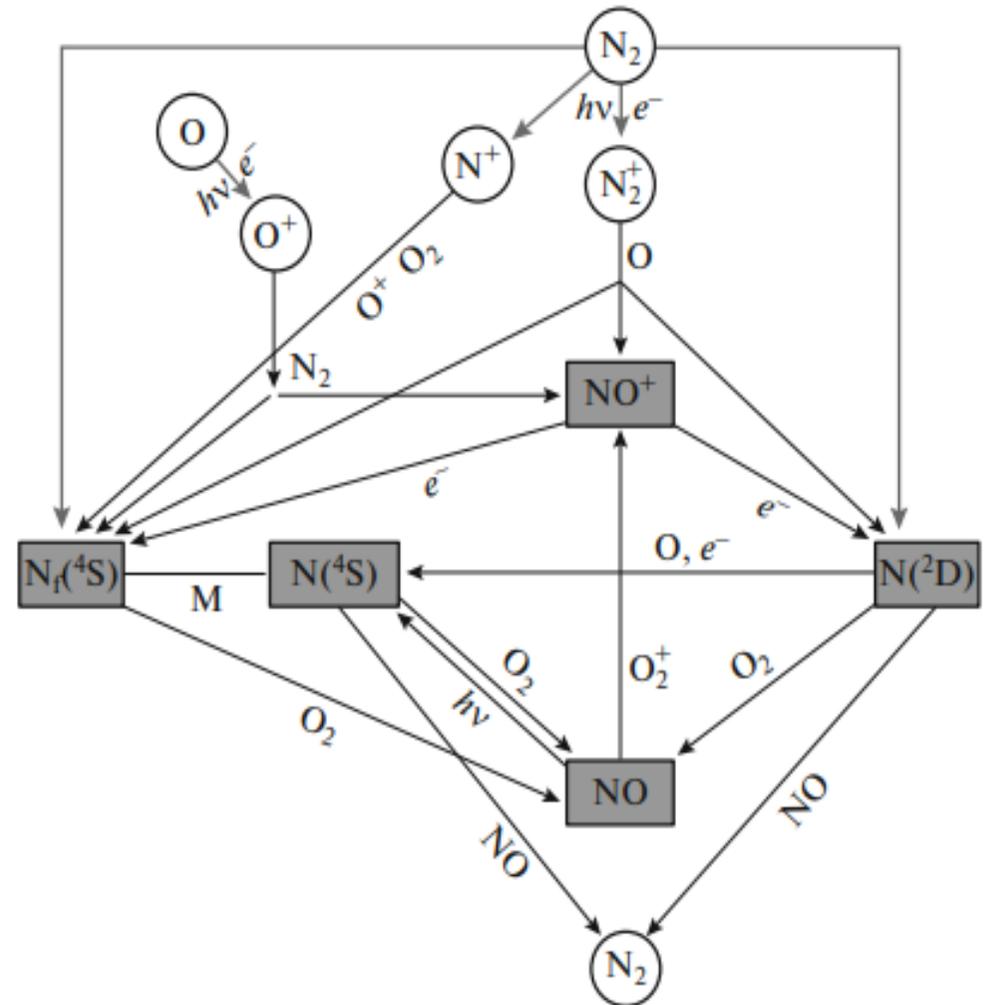
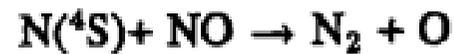
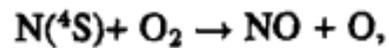
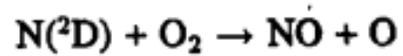
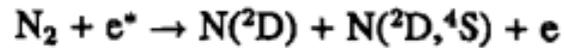
- резонансная флуоресценция солнечного света

Nightlow

- $N + O$ ассоциация и каскадный переход из электронного состояния $C^2\Pi$ в электронное состояние $A^2\Sigma^+$:
$$N(^4S) + O(^3P) \rightarrow NO(C^2\Pi) (v' = 0)$$
$$NO(C^2\Pi) \rightarrow NO(A^2\Sigma^+)(v' = 0) + 1.22\mu m$$
$$NO(A^2\Sigma^+) \rightarrow NO(X^2\Pi) + \gamma_{bands}$$

Образование NO

формируется в верхней атмосфере в результате реакций продуктов диссоциации молекул N_2 и O_2 и теряется в ходе столкновений с атомарным азотом $N(^4S, ^2D)$, образуя молекулы N_2



(Sproß L., Lammer H., et. al., 2021)