

NO БИОМАРКЕР: ТРАНСМИССИОННЫЙ И ЭМИССИОННЫЙ МЕТОДЫ ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ В АТМОСФЕРАХ ЭКЗОПЛАНЕТ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТР-УФ

© 2023 г. Г. Н. Цуриков^{1,*}, Д. В. Бисикало^{2,1,**}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Национальный Центр Физики и Математики, Саров, Россия

*E-mail: tsurikov@inasan.ru

**E-mail: bisikalo@inasan.ru

Поступила в редакцию 16.06.2023 г.

После доработки 23.08.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

Среди всех факторов обитаемости экзопланет земного типа одним из определяющих является наличие у экзопланеты вторичной N_2-O_2 доминантной атмосферы. Именно данный фактор может потенциально свидетельствовать об уже существующих геологических и биологических процессах на экзопланете. Между тем прямая характеристика N_2-O_2 атмосфер у экзопланет земного типа является сложной наблюдательной задачей. Существует всего несколько индикаторов (молекул) такой атмосферы, среди которых можно выделить потенциальный биомаркер – молекулу окиси азота NO. Наиболее сильными спектральными признаками данной молекулы в ультрафиолетовом диапазоне являются γ -полосы (203–248 нм). Важную роль в поиске потенциальных биомаркеров на экзопланетах, в том числе в регистрации γ -полос NO, может сыграть планируемая к запуску космическая обсерватория Спектр-УФ. В работе приведены оценки возможности детектирования трансмиссии света в γ -полосах в атмосферах экзопланет с помощью данной обсерватории. Проведено сравнение методов эмиссионной и трансмиссионной спектроскопии применительно к регистрации NO. По результатам работы показано, что потенциальная возможность обнаружения сигнала трансмиссии в γ -полосах NO в атмосферах близких экзопланет (<10 пк) с помощью спектрографа LSS обсерватории Спектр-УФ существует. Представлены накладываемые ограничения для регистрации данного сигнала на более далеких экзопланетах.

Ключевые слова: экзопланеты земной группы, атмосферы экзопланет, биомаркеры, Спектр-УФ

DOI: 10.31857/S0004629923110105, EDN: HISEXS

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск потенциально обитаемых экзопланет представляет собой сложную задачу, решение которой зависит от многих факторов. Обязательными (но не достаточными) условиями обитаемости считаются следующие: планета должна быть земного типа (экзо-земля, супер-земля, суб-нептун), на ее поверхности возможно существование жидкой воды, в ее атмосфере отсутствует сильный парниковый эффект [1].

Формирование данных условий зависит от физических свойств родительской звезды и орбитальных параметров планетной системы. В связи с этим в качестве родительских звезд обычно рассматривают звезды солнечного типа и маломассивные звезды, которые не демонстрируют сильной активности в жестком ультрафиолетовом (XUV) и мягком рентгеновском спектральных диапазонах. Это необходимо для формирования и

удержания вторичной атмосферы планеты. Данный критерий, однако, не является обязательным для N_2-O_2 атмосфер экзопланет земного типа, т.к. они могут быть устойчивы к большим XUV потокам родительской звезды [2].

К настоящему моменту известно большое количество работ, в которых предполагаются дополнительные условия для формирования биологической активности на экзопланетах, исследуются индикаторы такой активности и определяется возможность детектирования данных индикаторов с помощью существующих наземных и космических обсерваторий. Результаты недавних исследований [3, 4] позволяют предположить, что одним из основных признаков биологической и геологической активности на экзопланете является наличие у данной планеты N_2-O_2 доминантной атмосферы с примесью CO_2 . Прямыми инди-

каторами такой атмосферы могут служить молекулы N_2O , NO_2 , NO и N_2-O_2 димеры [4–6].

Большую роль в структуре атмосферы экзопланеты земного типа может играть молекула окиси азота, NO . Данная молекула является промежуточным продуктом процесса денитрификации [7]. Кроме того, NO в достаточно большом количестве образуется в верхней атмосфере (в реакциях $N(^2D, ^4S)$ с O_2): в результате электронных высыпаний в полярных областях атмосферы планеты и при воздействии излучения звезды в мягком рентгеновском диапазоне [8–16]. Также окись азота, наряду с CO_2 и O_3 , играет важную роль в энергетике атмосферы, т.к. является эффективным охладителем атмосферы вследствие колебательно-поступательного энергообмена [17].

Ранее, в работе [18], нами были получены оценки возможности детектирования эмиссии NO в наиболее интенсивных γ -полосах (203–248 нм) в атмосферах экзопланет земного типа с помощью спектрографов космической обсерватории Спектр-УФ [19–21]. В частности, было показано, что регистрация эмиссии NO в случае оптически тонкой среды в атмосферах супер-земель и суб-нептунов возможна с помощью спектрографа LSS ($R = 1000$) обсерватории Спектр-УФ за 120 ч наблюдений.

Данная работа является продолжением наших исследований детектируемости NO с помощью научной аппаратуры готовящейся к запуску обсерватории Спектр-УФ. Основная цель работы заключается в оценке возможности регистрации сигнала трансмиссии света родительской звезды в γ -полосах NO в атмосферах экзопланет земного типа. А также в сравнении потенциальных возможностей детектирования NO методами трансмиссионной и эмиссионной спектроскопии. Более конкретно, в работе вычисляется время накопления сигнала, необходимое для детектирования окиси азота в предполагаемых N_2-O_2 доминантных атмосферах экзопланет с заданным соотношением сигнал к шуму, SNR . Как и в предыдущей работе, в качестве планет рассматриваются экзо-земли, супер-земли, суб-нептуны с различными концентрациями NO в атмосфере; в качестве спектров родительских звезд используются спектры звезд G, K, M спектральных классов.

Работа организована следующим образом: в разделе 2 приводится описание модели пропускания атмосферы планеты в ближнем ультрафиолетовом диапазоне. Также представлена используемая методика расчета соотношения сигнал к шуму. В разделе 3 показаны результаты работы модели трансмиссии для атмосфер экзопланет, а также результаты параметрических расчетов времени экспозиции и граничных расстояний до планетных систем, необходимых для регистрации

сигнала пропускания в γ -полосах NO . В данном разделе также представлены обсуждение полученных результатов, пути возможного увеличения SNR . Основные выводы работы представлены в разделе 4.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

2.1. Модель пропускания

Для того, чтобы решить поставленную задачу, первоначально требуется построить модель пропускания света родительской звезды через атмосферу планеты. Результатом расчетов по данной модели является зависимость эффективной высоты атмосферы от длины волны, которая определяет разницу между геометрической глубиной транзита (без учета атмосферы) и реальной глубиной транзита (с учетом атмосферы):

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

где $\tau(\lambda) = \int \alpha(\lambda) dz$ – оптическая толщина; $\alpha(\lambda) = \sum_m \sigma_m(\lambda) * N_m$ – коэффициент поглощения, см^{-1} ; $\sigma(\lambda) = S(T)g(\lambda, p, T)$ – сечение поглощения, см^2 ; N_m – концентрация молекулы m в атмосфере, см^{-3} ; $g(\lambda, p, T)$ – профиль спектральной линии; $S(T)$ – сила линии.

Для проведения расчетов была модифицирована line-by-line модель переноса излучения $Py4CA\text{tS}$ [22], которая является преобразованием написанного на Fortran кода GARLIC [23, 24] и обычно применяется для инфракрасной области спектра. Данная модификация заключалась в обновлении базы данных сечений поглощения для интересующего нас спектрального диапазона (180–250 нм). Так, аналогично работе [5] были добавлены сечения поглощения следующих молекул: O_2 , O_3 , N_2O , NO_2 , SO_2 . Информация по сечениям N_2O , NO_2 , SO_2 была взята из базы данных MPI-Mainz UV/VIS Spectral Atlas¹ [25] – источники [26–28] соответственно. Данные для расчета сечений поглощения O_2 в системе полос Шумана-Рунге и системе полос Герцберга I были взяты из базы данных HITRAN2020² [29]. Сечения поглощения O_2 в континууме фотодиссоциации и O_3 в системе полос Хартли заимствованы из работы [30].

В модель также были добавлены сечения рэлеевского рассеяния для воздуха, основными составляющими которого для атмосферы Земли являются молекулы N_2 , O_2 , CO_2 , Ar (процентное со-

¹ <https://www.uv-vis-spectral-atlas-mainz.org/uvvis/>

² <https://hitran.org/>

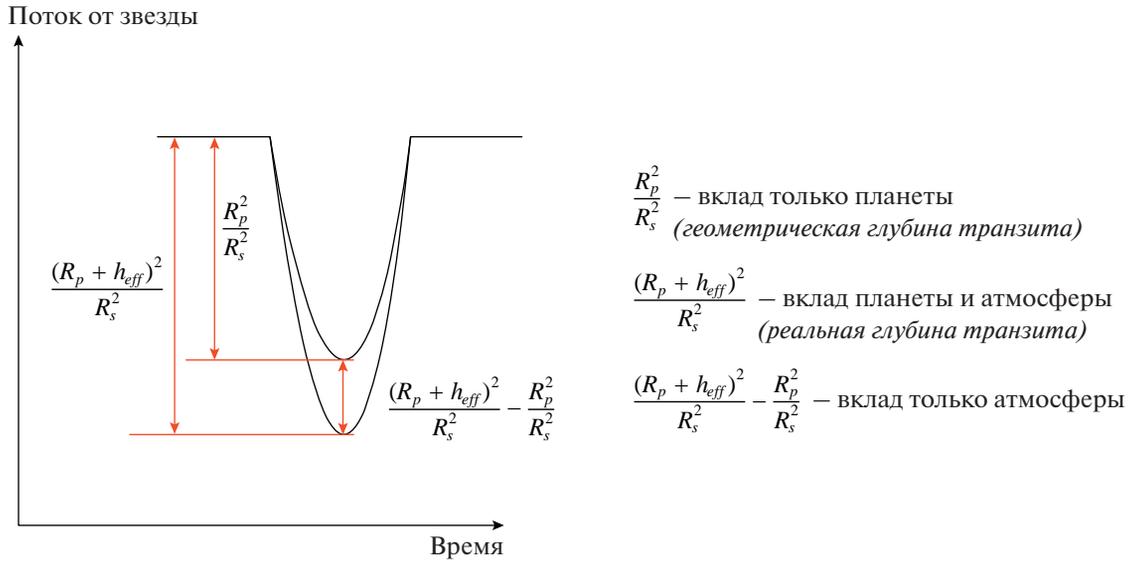


Рис. 1. Пояснительный рисунок к выражению (3) – глубина первичного транзита.

держание $\approx 99.999\%$ [5]). Рэлеевское рассеяние представляет собой упругое рассеяние на частицах, когда длина волны рассеянного света много больше размера частицы ($\frac{2\pi a}{\lambda} \ll 1$, a – радиус сферической частицы). Сечение рэлеевского рассеяния обратно пропорционально длине волны в четвертой степени: $\sigma_R = \frac{32\pi^3}{3N^2\lambda^4} F_k (n-1)^2$ [31], где N – постоянная Лоренца; λ – длина волны; F_k – корректировочный коэффициент Кинга; $(n-1)$ – коэффициент рефракции. Поэтому важно учитывать данный процесс при расчетах для ультрафиолетовой области спектра. Сечения рэлеевского рассеяния для воздуха в диапазоне длин волн 200–250 нм были взяты из работы [31]. Для спектрального диапазона 180–200 нм данные сечения были экстраполированы с учетом зависимости от длины волны ($\sigma_R \sim \lambda^{-4}$). Стоит отметить, в работе [5] было показано, что в указанном диапазоне длин волн основной вклад в формирование эффективной высоты земной атмосферы все же вносит поглощение света в системе полос Шумана–Рунге O_2 (см. рис. 1 в [5]). При этом вклад рэлеевского рассеяния сравним с поглощением света в полосах озона O_3 .

Основным отличием данной работы от [5] является то, что расчеты проводились также для γ -полос NO. Аналогично работе [18] данные вычисления были сделаны для (0,0), (1,0), (1,1), (2,0), (2,2), (3,1) колебательных γ -полос. Сечения поглощения в данных полосах для каждого атмосферного слоя были вычислены аналогично [32]. Факторы Хенля–Лондона для каждого враща-

тельного перехода были взяты из базы данных LIFBASE [33]; силы осцилляторов – из [34] и [35] G.V. Marr, 1964. Для расчета популяций уровней было использовано выражение из [36] и [37] с учетом поправки на случай Λ -дублета из [38]. Значения для молекулярных констант были взяты из [38] и [39].

Как уже отмечалось ранее, первоначально модель была построена для атмосферы землеподобной планеты. В данной модели использовались усредненные распределения объемной концентрации представленных выше молекул. Диапазон рассматриваемых высот составлял 15–500 км, с шагом 5 км. Нижний предел $z_1 = 15$ км обусловлен тем, что лучи, проходящие через более глубокие слои атмосферы, ввиду роста концентрации молекул и увеличения коэффициента преломления, будут недоступны для наблюдателя, если родительской звездой планеты является звезда солнечного типа (см. [40, 5]). Высотные профили температуры и давления были взяты из модели [41]. Для молекул O_3 , N_2O , NO_2 , SO_2 (<120 км) использовались распределения по высоте из [42]. Выше 120 км концентрация данных молекул мала и не влияет на результаты расчета. Для O_2 , N_2 высотные профили были взяты из модели NRLMSIS 2.0 [43]. Для молекулы NO данные для высот <95 км взяты также из [42]. При этом для высот ≥ 95 км, как и в [18], использовались значения объемной концентрации NO из наблюдений спутника SNOE [16] при высокой геомагнитной активности.

Для описания профилей спектральных линий молекул NO (γ -полосы) и O_2 (полосы Шумана–Рунге и Герцберга I) использовалась функция

Фойгта. Таким образом, учитывалось уширение рассматриваемых спектральных линий за счет эффектов давления (столкновение поглощающих молекул с молекулами окружающего атмосферного газа при давлении смеси p) и температуры (доплеровское уширение спектральных линий за счет теплового движения молекул) в разных слоях атмосферы планеты. Так как давление в атмосфере планеты экспоненциально уменьшается с увеличением высоты, основной вклад в уширение спектральных линий в диапазоне рассматриваемых высот ($z \geq 15$ км) вносит доплеровское уширение за счет теплового движения молекул (полуширина линии на полувысоте, НВНМ [22],

$$\gamma_D = \lambda \sqrt{\frac{2 \ln 2 k T}{m c^2}}.$$

Для того, чтобы учесть уширение рассматриваемых спектральных линий давлением, важно знать коэффициент уширения данной линии в случае столкновения молекулы с окружающими частицами, γ_L^{air} . Данный коэффициент определяет НВНМ линии при построении профиля Ло-

ренца, $\gamma_L = \gamma_L^{\text{air}} \frac{p}{p_0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^n$ [22], где n – показатель степени, характеризует температурную зависимость полуширины линии; p_0 и T_0 – давление и температура, при которых были определены коэффициенты γ_L^{air} . Значения коэффициента уширения γ_L^{air} и показателя степени n для молекулы O_2 были взяты из базы данных HITRAN2020 [29]. Для колебательной (0,0) γ -полосы NO данные параметры, соответствующие столкновениям данной молекулы с N_2 и O_2 , были взяты из работы [32], которые, в свою очередь, были заимствованы из работ [44] и [45] соответственно. Как и в [32], мы предположили аналогичные параметры уширения давлением и для других колебательных γ -полос NO, рассматриваемых в работе. Важно отметить, что эффект уширения за счет столкновения поглощающих молекул между собой не учитывается в модели Py4CatS [22]. Рассмотрение данного эффекта является предметом дальнейшей работы.

Стоит также отметить, как и в работах [5, 30], для молекул O_3 , N_2O , NO_2 , SO_2 использовались уже измеренные сечения поглощения для конкретного значения температуры: 298 К – для O_3 и NO_2 ; 302 К – для N_2O ; 295 К – для SO_2 .

В данной работе, чтобы сопоставить результаты расчетов времени экспозиции, необходимого для регистрации γ -полос NO с помощью эмиссионной и трансмиссионной спектроскопии, – рассматриваются те же реальные и модельные экзопланеты, что и в [18]. Напомним, что в качестве модельных экзопланет мы рассмотрели: экзо-

земли ($1 R_E, 1 M_E$), супер-земли ($2 R_E, 4 M_E$), суб-нептуны-1 ($3 R_E, 8 M_E$), суб-нептуны-2 ($4 R_E, 15 M_E$). Чтобы применить построенную модель к атмосферам данных экзопланет, было произведено масштабирование содержания атмосферных компонентов в соответствии с полученными ранее результатами (см. табл. 2, [18]). Для этого были сделаны следующие допущения: 1) на данных экзопланетах (в том числе на суб-нептунах) образовалась устойчивая вторичная атмосфера; 2) химический состав данной атмосферы эквивалентен химическому составу атмосферы Земли; 3) для родительских звезд различных спектральных классов химический состав атмосферы остается неизменным. Стоит отметить, что при масштабировании концентрации всех рассмотренных ранее молекул изменялись пропорционально массе атмосферы планеты. Кроме того, концентрация NO на высотах >100 км корректировалась с учетом влияния геомагнитной активности (см. [46]).

2.2. Расчет времени экспозиции

При расчете соотношения сигнал к шуму и времени, необходимого для регистрации сигнала трансмиссии, были сделаны следующие предположения: 1) составляющая шума определяется только статистическим шумом (темновой ток, шум считывания, зодиакальный свет, собственное свечение Земли – не учитываются); 2) активность звезды не меняется во время транзита и между транзитами; 3) эффект потемнения к краю не влияет на трансмиссионный спектр. Безусловно, учет данных и сделанных ранее допущений может уменьшить соотношение сигнал к шуму. Однако в данной работе, как и в работе [18], представлены верхние пределы возможности регистрации NO, и данные предположения, поэтому, являются приемлемыми для оценочных расчетов.

Для того, чтобы рассчитать соотношение сигнал к шуму, SNR_{planet} , была использована методика из работы [47]. Согласно данной методике, определить вклад планеты в потерю приходящего излучения от звезды можно на основе разности потоков вне первичного транзита, F_{out} , и во время его, F_{in} . Сигнал к шуму, SNR_{planet} , в данном случае, можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned} SNR_{\text{planet}} &= \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{stellar}}^2}} = \\ &= \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{F_{\text{out}}} \frac{F_{\text{out}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{stellar}}^2}} = f_A \frac{SNR_{\text{stellar}}}{\sqrt{2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

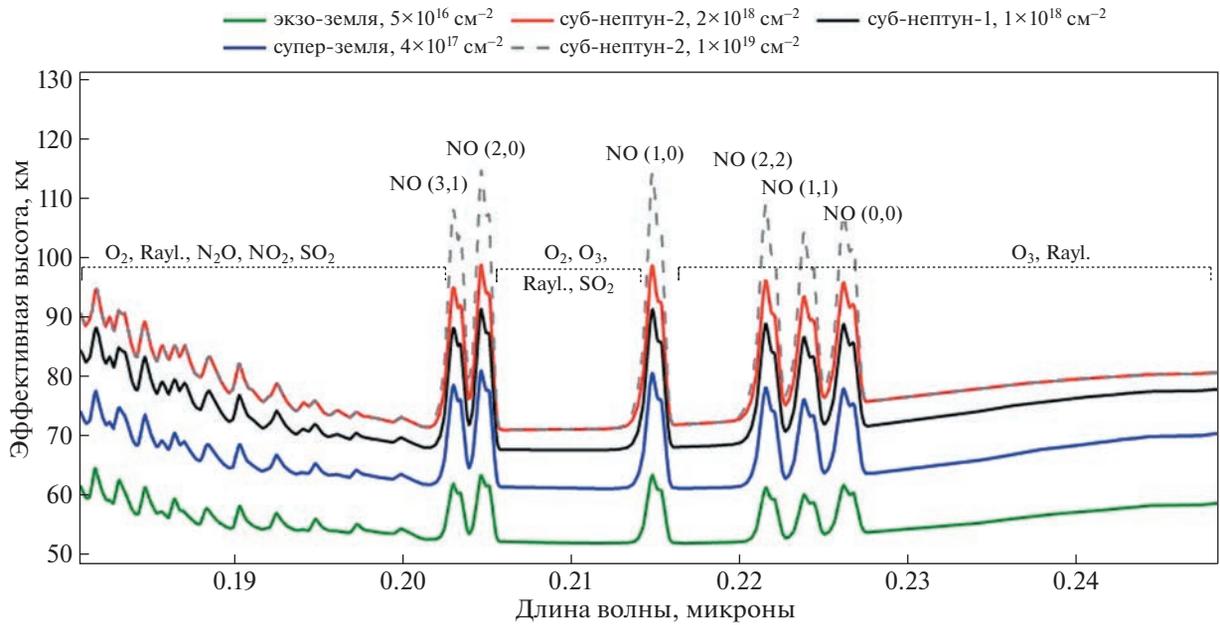


Рис. 2. Эффективная высота для модельных экзопланет: экзo-земель (зеленые линии), супер-земель (синие линии), суб-нептунов-1 (черные линии), суб-нептунов-2 (красные линии), суб-нептунов-2 с лучевой концентрацией NO $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ (штриховые серые линии). На рисунке уточнены спектральные признаки, которые оказывают влияние на эффективную высоту в конкретных диапазонах спектра. Рэлеевское рассеяние обозначается “Rayl.”.

где $SNR_{\text{stellar}} = \sqrt{\frac{\lambda R_s^2 I_s A_{\text{eff}} t \lambda_c}{hc d^2 R}}$ – сигнал к шуму

для родительской звезды; $\frac{\lambda R_s^2 I_s A_{\text{eff}} t \lambda_c}{hc d^2 R}$ – сигнал,

приходящий от звезды на детектор; I_s – интенсивность излучения на центральной длине волны

λ_c , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ микроны}}$ (является сверткой с разрешением

спектрографа); λ_c для (0,0), (1,0), (1,1), (2,0), (2,2), (3,1) колебательных γ -полос NO соответствует 0.2265, 0.2150, 0.2240, 0.2049, 0.2218, 0.2032 микронам [33]; d – расстояние до планетной системы, м ($1 \text{ м} \approx 3.24\text{E-}17$ парсек); R_s – радиус звезды, м; $A_{\text{eff}} = A * q = f(\lambda)$ – эффективная площадь приемника в м^2 ; q – пропускная способность всего измерительного канала, зависящая от длины волны; t – время накопления сигнала, с; $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$;

h – постоянная планка, Дж · с; c – скорость света, м/с; коэффициент $\sqrt{2}$ указывает на то, что сигнал от планеты определяется на основе разности измеряемого потока от родительской звезды во время транзита и вне его [47].

В выражение (2), помимо соотношения сигнал к шуму от звезды, также входит и глубина транзи-

та, $f_A = \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{F_{\text{out}}} = f(\lambda)$, которая формируется за счет атмосферы планеты [47]:

$$f_A(\lambda) = \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{F_{\text{out}}} = \frac{R_p^2}{R_s^2} \left(\frac{(R_p + h_{\text{eff}}(\lambda))^2}{R_p^2} - 1 \right), \quad (3)$$

где $\frac{R_p^2}{R_s^2} = C_T$ – геометрическая глубина транзита;

R_p – радиус планеты, м; $h_{\text{eff}}(\lambda)$ – эффективная высота атмосферы планеты (1), м, (является сверткой с разрешением спектрографа). Для пояснения представленного выражения на рис. 1 наглядно показаны вклад геометрического размера планеты и вклад атмосферы в формирование глубины транзита.

В данной работе, для сравнения с результатами работы [18], использовались параметры спектрографа LSS ($R = 1000$) космической обсерватории Спектр-УФ. Значения эффективной площади ($A_{\text{eff}\lambda=215 \text{ нм}} = 2000 \text{ см}^2$), пропускной способности (26% – для спектрографа) были взяты из работ [48–50].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Эффективная высота

Используя построенную модель трансмиссии и параметры спектрографа LSS, была определена

эффективная высота атмосфер рассматриваемых модельных экзопланет. Данные вычисления были произведены для определенного ранее диапазона лучевых концентраций NO [18] с учетом масштабирования, описанного выше. На рис. 2 представлены результаты данных вычислений для граничных лучевых концентраций NO в верхней атмосфере: $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ — для экзо-земель; $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ — для супер-земель; $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ — для суб-нептунов-1; $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ — для суб-нептунов-2. Для сравнения, на рисунок добавлены результаты для суб-нептунов-2 с лучевой концентрацией NO в верхней атмосфере $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Увеличение лучевой концентрации NO до данного значения было сделано из предположения о влиянии дополнительных источников пополнения данной молекулы в верхней атмосфере (за счет увеличения потока высыпавшихся электронов [15], нетеплового образования NO [9, 10], Джоулева нагрева в верхней атмосфере [51, 52], биологической и геологической активности на экзопланете). Более подробное описание данных источников приведено в разделе *b2*. Детальное исследование влияния данных источников на изменение концентрации NO в верхней атмосфере частично представлено в [10, 11] (нетепловое образование NO), а также будет проведено в последующих работах.

На рисунке также обозначены спектральные признаки, влияющие на пропускание света в атмосфере в конкретных спектральных диапазонах. До 200 нм доминирующую роль в поглощении света занимает молекулярный кислород (система полос Шумана-Рунге). Также незначительное влияние на формирование эффективной высоты в данном спектральном диапазоне (<200 нм) оказывает поглощение молекул N_2O , NO_2 , SO_2 и рэлеевское рассеяние [5]. С другой стороны, минимум поглощения света озоном O_3 в полосах Хартлеи достигается на 210 нм [30]. Таким образом, в диапазоне образования γ -полос NO находится своеобразное окно, где данные полосы практически не блиндируются. Из рис. 2 также следует, что изменение эффективной высоты с ростом лучевой концентрации NO в верхней атмосфере соответствует закону Бэра-Ламберта (см. выражение (1)).

3.2. Возможность детектирования трансмиссии NO в γ -полосах

Для сравнения возможностей обнаружения NO методами эмиссионной и трансмиссионной спектроскопии были произведены аналогичные работе [18] параметрические расчеты наблюдательного времени, необходимого для регистрации сигнала с $\text{SNR} = 3$. Используя выражения (2)

и (3), данные расчеты были сделаны для: различных модельных и реальных экзопланет; различных типов родительских звезд; разных расстояний до планетных систем.

3.2.1 Экзопланеты и звезды. В качестве реальных экзопланет рассматривались те, для которых ранее были получены наименьшие значения времени экспозиции для регистрации эмиссии NO в γ -полосах (случай оптически тонкой среды). Часть из этих планет (GJ 514 b, GJ 832 c, HD 31527 d, HD 10180 g), согласно каталогу [53], находятся в консервативной или оптимистичной зоне потенциальной обитаемости (ЗПО) (определения см. в [53]). Нахождение в ЗПО остальных экзопланет было определено нами из простых предположений с помощью методики [54]. Параметры экзопланет были взяты из NASA Exoplanets Archive³ (NEA). Для всех реальных экзопланет предполагается наличие $\text{N}_2\text{—O}_2$ доминантной атмосферы и производится масштабирование в соответствии с рассмотренными ранее предположениями.

В расчетах были использованы реальные спектры следующих родительских звезд: Солнце (G2V), HD 22049 (K2V), GJ 644 (M3V), AD Leo (M4.5V), Proxima Cen (M5.5V), взятые с веб-сайта VPL⁴ [55–57], а также спектр GJ 832 (M1.5V) из базы данных MUSCLES⁵.

Для звезд HD 192310 (K2V), HD 10180 (G1V), HD 31527 (G2V), которые являются родительскими звездами рассматриваемых реальных экзопланет, на момент проведения исследований отсутствовали измеренные спектры. В связи с этим мы воспользовались каталогом [58] с фотометрическими данными космической миссии GALEX [59] для родительских звезд в ближнем и дальнем ультрафиолетовом диапазонах⁶. С помощью программы `galex_motion`⁷ [58] были определены потоки (отсчеты/с) от рассматриваемых звезд в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (полоса 170–300 нм), откорректированные за собственное движение звезд и нелинейные эффекты приемника. Используя затем преобразования (отсче-

³ В этом исследовании использовался NASA Exoplanet Archive, который находится в ведении Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства в рамках Программы исследования экзопланет.

⁴ <https://vpl.astro.washington.edu/spectra/stellar/>

⁵ Была использована версия 2.2 адаптированного панхроматического спектра звезды с разрешением в 1 Å из базы данных MUSCLES

⁶ <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/890/23>

⁷ https://github.com/parkus/galex_motion

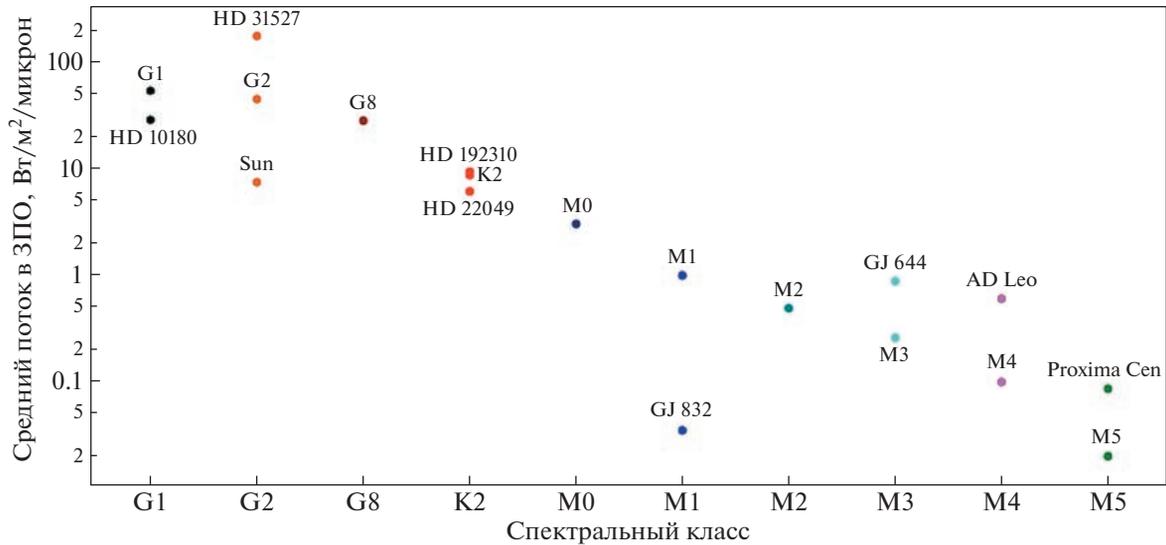


Рис. 3. Средние потоки от родительских звезд в ЗПО в диапазоне длин волн 0.18–0.25 микрон. Различные цвета точек соответствуют различным спектральным классам звезд.

ты/с) в $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ А}}$ ⁸, были определены средние спектральные потоки от данных родительских звезд на эффективной длине волны $\lambda_{\text{eff}} = 231.5 \text{ нм}$, которые применялись в расчетах.

Также в данной работе, в предположении: 1) об отсутствии сильной активности звезд в ближнем ультрафиолетовом диапазоне и 2) об отсутствии влияния хромосферной эмиссии в спектральном диапазоне $\lambda > 170 \text{ нм}$ [60] были добавлены спектры звезд M5–M0, K2, G8, G1 спектральных классов, аппроксимированные функцией Планка. Похожие предположения были сделаны в работах [47, 54]. Безусловно данные предположения являются грубыми, особенно для ультрафиолетового диапазона. Однако они приемлемы для параметрических расчетов, проводимых в данном исследовании.

Для полноты картины и удобства анализа полученных результатов (см., например, пункт *b3*), на рис. 3 представлены средние потоки в центре ЗПО от рассмотренных звезд в спектральном диапазоне 180–250 нм. При анализе данного рисунка, однако, стоит учитывать, что расстояния до центров ЗПО разные для звезд разных спектральных классов (см., например, табл. 4 [18]). Из данного рисунка видны существенные различия между реальными и чернотельными спектрами звезд (в особенности для маломассивных звезд). Также различия наблюдаются среди спектров солнцеподобных звезд, что косвенно подтверждает выводы в работе [61].

⁸ https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/galex/FAQ/counts_background.html

3.2.2. Расчет глубины транзита и наблюдательного времени. В данном разделе представлены результаты вычислений глубины транзита для разных планетных систем, а также значения наблюдательного времени, необходимого для регистрации сигнала трансмиссии NO в γ -полосах с $SNR = 3$ с помощью спектрографа LSS ($R = 1000$) обсерватории Спектр-УФ.

На рис. 4 представлены значения глубины транзита $f_A = \frac{F_{\text{out}} - F_{\text{in}}}{F_{\text{out}}}$, учитывающие только атмосферу планеты (см. выражение (3)). В качестве экзопланеты рассмотрена модельная супер-земля ($2R_E$) с лучевой концентрацией NO, равной $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в верхней атмосфере. Используются параметры следующих звезд: Солнце (G2V), HD192310 (K2V), AD Leo (M4.5V), Proxima Cen (M5.5V).

Из представленного рисунка видно, что наибольшие значения глубины транзита в рассматриваемом спектральном диапазоне достигаются для супер-земли, родительской звездой которой является маломассивная звезда Proxima Cen (M5.5V). При этом наименьшие значения при той же атмосфере экзопланеты получены для планетной системы с солнцеподобной звездой.

Важно отметить, что для системы γ -полос NO необходимо рассматривать не только поглощение фотонов родительской звезды (переход из $X^2\Pi$ основного состояния в $A^2\Sigma^+$ возбужденное состояние), но и резонансное переизлучение (флуоресценцию) ($A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ переход) на тех же длинах волн. При этом время жизни NO в возбужденном $A^2\Sigma^+$ состоянии составляет $\sim 200 \text{ нс}$ [62], и боль-

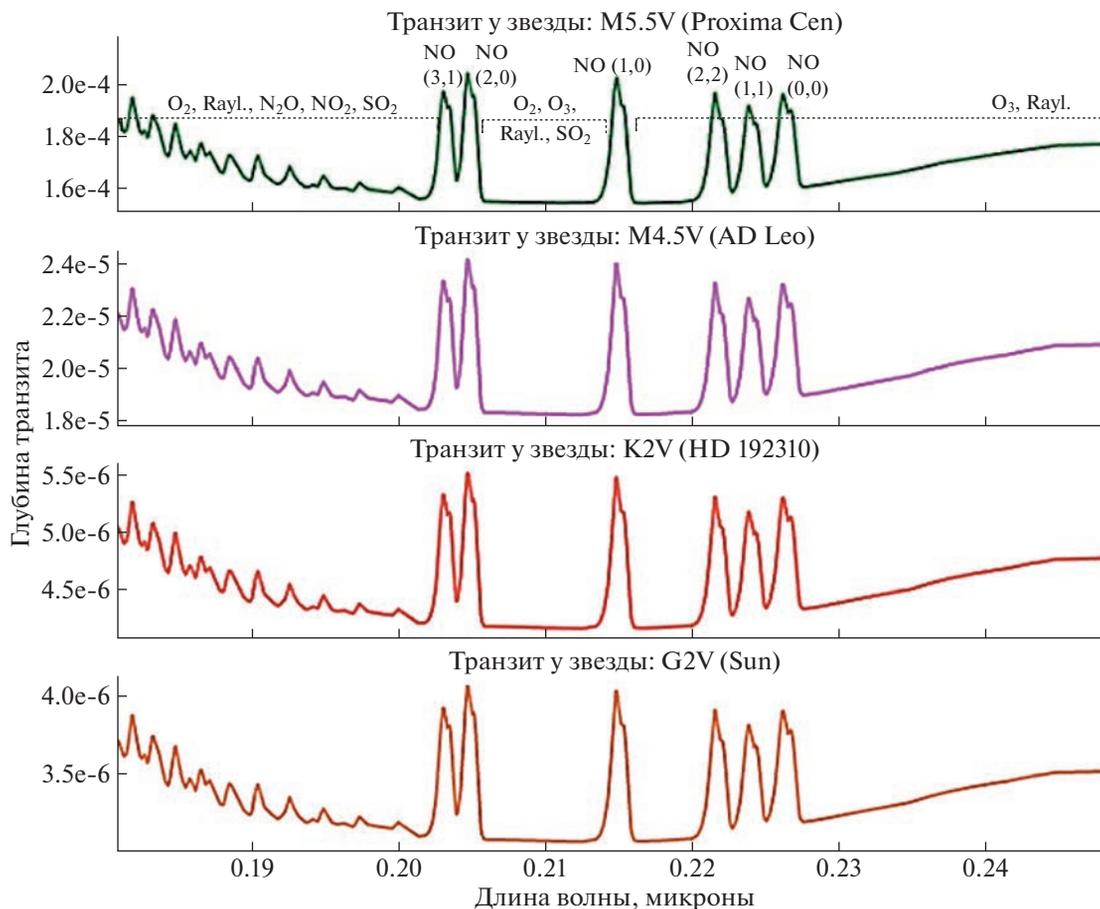


Рис. 4. Значения глубины транзита для модельных планетных систем супер-земля ($2R_E$, $N_{NO} = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$) – Солнце (G2V), HD192310 (K2V), AD Leo (M4.5V), Proxima Cen (M5.5V). Палитра цветов соответствует рис. 3.

шинство молекул NO, соответственно, находятся в основном $X^2\Pi$ состоянии. В данном случае глубина транзита будет определяться не только пропусканием через атмосферу планеты, но и собственным излучением планеты, т.е.

$$f_A = \frac{F_{out} - (TF_{out} - F_{self})}{F_{out}} \quad (\text{здесь } T - \text{пропускание;}$$

F_{self} – собственное излучение). В связи с этим нами были произведены расчеты эмиссии NO в γ -полосах аналогично предыдущей работе [18]. Вычисления показали, что ввиду сильного влияния эффекта резонансного самопоглощения в индивидуальных γ -полосах, вклад флуоресценции NO в глубину транзита составляет менее 1% для рассматриваемых атмосфер экзo-земель, супер-земель, суб-нептунов.

На основе полученных результатов для эффективной высоты атмосферы (рис. 2) и глубины транзита (рис. 4), были даны оценки детектируемости сигнала трансмиссии в γ -полосах NO для исследуемых модельных планетных систем. Удобно провести анализ данных результатов, ис-

пользуя значения граничных расстояний до планетных систем, при которых регистрация рассматриваемого сигнала возможна за разумное наблюдательное время (≤ 120 ч) при $SNR = 3$. Данные расстояния представлены в табл. 1. Результаты были получены для следующих значений лучевых концентраций NO в атмосферах модельных экзoпланет: для супер-земли – $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$; для суб-нептунов – $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Как было указано ранее, данные значения на 1 порядок величины выше предельных лучевых концентраций NO [18] и получены из предположения о влиянии дополнительных источников образования данной молекулы (подробнее см. в пункте b2). При использовании полученных ранее пределов для лучевых концентраций NO – граничные расстояния до рассматриваемых планетных систем не превысили 1 пк.

Из представленных результатов видно, что при рассматриваемых условиях в предполагаемых N_2 – O_2 атмосферах экзoпланет предельное расстояние для регистрации NO составляет 2 пк.

Таблица 1. Граничные расстояния до разных модельных планетных систем для наблюдения трансмиссии NO в системе γ -полос. Параметры: $SNR = 3$; $R = 1000$ (LSS); время экспозиции = 120 ч; $SNR = 3$

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	$\ll 1^j$	$1^a (< 1^j)$	$2^a (1^j)$
G8	$\ll 1^a$	1^a	1^a
K2	$\ll 1^{a,c,d}$		$1^{a,d} (< 1^c)$

^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 “ $\ll 1$ пк” соответствует расстояниям, меньшим 0.1 пк.

При анализе данной таблицы стоит также учитывать, что в пределах 2 пк не было обнаружено планетных систем с супер-землями и суб-нептунами, находящимися в пределах ЗПО (см., например, [53]).

В целях сравнения полученных результатов с оценками детектируемости сигнала эмиссии в γ -полосах мы воспроизвели расчеты, сделанные в

работе [18], для тех же модельных планетных систем. При этом учитывались неравномерность излучения по диску планеты и резонансное самопоглощение в γ -полосах. Стоит отметить, что при значениях $N_{NO} > 10^{17} \text{ см}^{-2}$ вклад резонансного самопоглощения в γ -полосах NO становится существенным, и наблюдается значительное отклонение от результатов, получаемых для случая оптически тонкой среды (см. рис. 1, [18]; рис. 7, [36]). В верхней атмосфере Земли, согласно наблюдениям [16] и моделям [46], лучевая концентрация NO не превышает $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при высокой геомагнитной активности, и приближение оптически тонкой среды при анализе излучения данной молекулы в γ -полосах еще может быть применимым.

Расчеты, таким образом, показали, что для всех представленных в табл. 2 планетных систем, граничные расстояния для регистрации эмиссии NO в γ -полосах – не превышают 1 пк (при $SNR = 3$; $R = 1000$ (LSS); время экспозиции = 120 ч; $N_{NO} = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ – при данной лучевой концентрации достигается минимум наблюдательного времени в случае оптически толстой среды [18]).

Кроме того, вычисления наблюдательного времени были сделаны и для реальных экзопланет. Наилучшие результаты были получены для планеты HD 192310 с (расстояние $d = 8.797$ пк; радиус $5.3 R_E$; большая полуось орбиты, $a = 1.18$ а.е.; родительская звезда: K2V спектрального класса;

Таблица 2. Граничные расстояния до разных модельных планетных систем для наблюдения трансмиссии NO в системе γ -полос. Параметры: $T|_{h > 200 \text{ км}} = 3000 \text{ К}, 5000 \text{ К}$; $SNR = 3$; $R = 1000$ (LSS); время экспозиции = 120 ч; $SNR = 3$

Родительская звезда	Граничные расстояния, пк;					
	$T _{h > 200 \text{ км}} = 3000 \text{ К}$			$T _{h > 200 \text{ км}} = 5000 \text{ К}$		
	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, $N_{NO} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$	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	$1^{a,b}$	$4^a (2^b)$	$6^a (3^b)$	$3^a (2^b)$	$8^a (5^b)$	$12^a (7^b)$
Солнце	$1^a (< 1^j) 3^k$	$4^a (2^j) 6^k$	$6^a (3^j) 10^k$	$3^a (1^j) (5^k)$	$9^a (4^j) 14^k$	$12^a (6^j) 20^k$
G8	1^a	3^a	5^a	3^a	7^a	10^a
K2	$< 1^{a,c,d}$	$2^a (< 1^c) (1^d)$	$3^a (< 1^c) (2^d)$	$2^a (< 1^c) (1^d)$	$4^a (1^c) (4^d)$	$6^a (1^c) (5^d)$
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).

продолжительность транзита: $T_d = 1.16$ сут (определена из предположения о круговых орбитах [47]). Время экспозиции для регистрации сигнала трансмиссии NO составило ($SNR = 3$): 450 сут (при использовании чернотельного спектра); 510 сут (для среднего потока GALEX для HD 192310); 8000 сут (для спектра HD 22049 (K2V)). Оценки наблюдаемости сигнала эмиссии в γ -полосах при этом показали, что время экспозиции превышает 1E7 сут для всех рассмотренных случаев.

a. Сравнение результатов для сигналов эмиссии и трансмиссии NO

Прежде всего из представленных оценок следует, что использование методов трансмиссионной спектроскопии для детектирования γ -полос NO (с помощью спектрографа LSS обсерватории Спектр-УФ) является более эффективным подходом, чем поиск сигнала эмиссии в данной системе полос. Пояснить данный вывод можно из сравнения оценочных выражений для определения соотношения сигнал к шуму планеты: для трансмиссии – формулы (2–3) и эмиссии [47]:

$$SNR_{\text{planet}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{R_p^2 I_p}{R_s^2 I_s} \sqrt{SNR_{\text{stellar}}}, \quad (4)$$

где $\frac{R_p^2 I_p}{R_s^2 I_s} = C_E$ – отношение потоков излучения от планеты и родительской звезды; I_p – интенсивность излучения в атмосфере планеты (резонансное переизлучение света родительской звезды в γ -полосах NO); I_s – интенсивность излучения родительской звезды. Понятно, что при рассмотрении излучения NO в случае оптически тонкой среды рост интенсивности I_p будет происходить пропорционально лучевой концентрации данной молекулы. Однако учет резонансного самопоглощения в γ -полосах (использование интеграла Хольштейна [63] для каждой вращательной линии) приведет к тому, что соотношение C_E будет существенно меньше соотношения $C_T = \frac{R_p^2}{R_s^2}$ (которое характеризует геометрическую глубину транзита, см. выражение (3) и рис. 1).

b. Варианты увеличения соотношения SNR при наблюдении сигнала трансмиссии NO

Результаты вычислений времени экспозиции для наблюдения сигнала трансмиссии NO в γ -полосах также свидетельствуют о наличии ограничений в регистрации данного сигнала при рассмотрении как модельных планетных систем (табл. 1), так и реальных. В первом случае детектирование NO возможно только в предполагае-

мых N_2 – O_2 доминантных атмосферах супер-земель ($2 R_E$) и суб-нептунов (3, 4 R_E), которые находятся в ЗПО у звезд солнечного типа, если расстояние до данных планетных систем ≤ 2 пк. При рассмотрении реальных экзопланет – значения времени экспозиции превышают разумное наблюдательное время (120 ч).

Варианты, при которых регистрация рассматриваемого сигнала станет возможной для более далеких планетных систем, можно получить из простого анализа выражений (1–3) для оценки соотношения SNR .

b1. Увеличение температуры в верхней атмосфере экзопланеты

Во-первых, увеличение сигнал к шуму возможно при повышении эффективной высоты атмосферы экзопланеты, $h_{\text{eff}}(\lambda)$, т.е. при наличии у данной экзопланеты расширенной и плотной атмосферы. В рамках рассматриваемой задачи, уровень атмосферы, где $\tau \approx 1$ составляет: 115 км – для супер-земель ($N_{\text{NO}} = 4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$); 145 км – для суб-нептунов-1 ($N_{\text{NO}} = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$); 155 и 185 км – для суб-нептунов-2 ($N_{\text{NO}} = 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$) и $N_{\text{NO}} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$). Из первичных соображений: увеличение эффективной высоты возможно за счет повышения уровня экзобазы, которая определяется из равенства $H(h) = l(h)$ [64], где $H(h) = \frac{kT}{\mu g}$ – шкала высот, $l(h) = (\sqrt{2}\sigma n)^{-1}$ – средняя длина свободного пробега упругих сферических молекул в простом равновесном газе [65]. Повышение данного уровня возможно за счет увеличения температуры и, как следствие, расширения атмосферы планеты. Температура в верхней атмосфере планеты, в свою очередь, зависит от потока излучения родительской звезды в жестком ультрафиолетовом диапазоне (XUV) (см., например, рис. 1, 3 в [2]; рис. 2 в [4]). Соответственно, на данный параметр могут влиять орбитальное расстояние экзопланеты (в пределах ЗПО), активность родительской звезды, ее спектральный класс, возраст, вращение. Таким образом, для более активных звезд температура в верхней атмосфере будет более высокой, что будет способствовать образованию более плотной и расширенной атмосферы.

Стоит, однако, отметить, что так как NO является довольно тяжелой молекулой (30 г/моль) и к тому же вносит значимый вклад в охлаждение атмосферы (за счет ИК излучения в линии 5.3 микрон вследствие колебательно-поступательного энергообмена [17]), совсем необязательно, что объемная концентрация данной молекулы будет

равномерно распределена в расширенной атмосфере.

Для проверки рассмотренной гипотезы были выполнены аналогичные предыдущим расчеты наблюдательного времени в предположении о более высоких температурах ($T = 3000, 5000$ К) в верхних атмосферах исследуемых экзопланет. Согласно модели [2], такие температуры могут быть достигнуты в атмосфере Земли при потоках XUV, приходящих от родительской звезды, в 5 и более раз превышающих современный поток XUV от Солнца. Для сравнения, температура в верхней атмосфере Земли составляет ≈ 1000 К (см., например, модели [41], NRLMSIS 2.0 [43]). Данные расчеты выполнялись в рамках предположения, что атмосфера на высотах >200 км является изотермической. Масштабирование концентраций исследуемых атмосферных компонентов на указанных высотах, таким образом, выполнялось в соответствии с законом Дальтона. Верхней границей атмосферы в расчете считалась та, на которой объемная концентрация NO составляла 10^4 см $^{-3}$ (т.к. вклад поглощения в γ -полосах NO в эффективную высоту при такой концентрации незначителен). Результаты вычислений граничных для регистрации трансмиссии NO состояний до планетных систем (по аналогии с табл. 1) представлены в табл. 2.

Из представленных результатов видно, что с повышением температуры в верхних атмосферах рассматриваемых модельных экзопланет пределы детектируемости NO увеличиваются. Так, для супер-земель граничные расстояния достигают 3 пк (при $T = 3000$ К) и 5 пк (при $T = 5000$ К); для суб-нептун-1 – 6 пк ($T = 3000$ К) и 14 пк ($T = 5000$ К); для суб-нептун-2 – 10 и 20 пк соответственно. Стоит также заметить, что полученные результаты довольно сильно зависят от энергетического спектра родительской звезды (более подробное обсуждение данного вопроса представлено в пункте *b3*).

Увеличение температуры в верхних атмосферах также сказывается и на оценках наблюдаемости NO для реальных экзопланет. Проведенные расчеты показали, что регистрация сигнала трансмиссии становится потенциально возможной для суб-нептуна HD 192310 с ($5.3 R_E, d = 8.797$ пк) и составляет 115 ч наблюдений (около 12 транзитов) при $T|_{h > 200 \text{ км}} = 5000$ К ($SNR = 3$, рассматривается средний поток GALEX для HD 192310). Также при $T = 5000$ К и лучевой концентрации NO, равной $2E18$ см $^{-2}$, детектирование NO возможно в атмосфере супер-земли Tau Ceti e ($\approx 1.8 R_E, d = 3.603$ пк, $a = 0.538$ а.е., $T_d = 14$ ч, родительская звезда – G8V спектрального класса). Рассчитанное время экспозиции при этом составляет 96 ч (около 7 транзитов, $SNR = 3$, используется комбинированный спектр звезды

спектрального класса G8V из атласа Pickles [66]^{9,10}). Стоит отметить, что данная экзопланета не входит в упомянутый ранее каталог планет, находящихся в ЗПО [53]. При этом с помощью кода VPLanet¹¹ [69] мы воспроизвели результаты работы [70] (рис. 7b) и определили, что без учета эллиптичности орбиты Tau Ceti e входит в оптимистичную зону потенциальной обитаемости (нижняя граница данной зоны (недавняя Венера) для родительской звезды Tau Ceti составляет 0.44 а.е.).

b2. Пополнение окиси азота в верхней атмосфере

Как было отмечено в предыдущем пункте, наряду с увеличением шкалы высот (за счет роста температуры в атмосфере), для увеличения эффективной высоты необходимо также наличие высокого содержания NO в верхней атмосфере экзопланеты. В таком случае необходимо рассматривать источники пополнения окиси азота в верхней атмосфере.

С одной стороны (сверху), из спутниковых наблюдений атмосферы Земли [16] следует, что NO эффективно образуется при высыпании электронов (с энергиями 1–10 кэВ) в авроральных областях, а также на более низких широтах – за счет воздействия мягкого рентгеновского излучения родительской звезды. Кроме того, увеличение объемной концентрации NO на низких широтах наблюдалось также и в случае высокой геомагнитной активности (Ap индекс >12) – это связано с горизонтальным переносом NO из авроральных областей [16].

Важными дополнительными источниками производства NO являются надтепловые атомы азота $N(4S)_{\text{hot}}$ [8, 9, 12–14], которые образуются в результате диссоциации N_2 электронным ударом [11]. Механизм нетеплового образования NO ($N(4S)_{\text{hot}} + O_2 \rightarrow NO + O$) в верхней атмосфере может оказаться существенным источником увеличения объемной концентрации окиси азота при гораздо более сильных высыпаниях электронов, чем на Земле [10].

Еще одним дополнительным источником NO в верхней атмосфере может являться Джоулев нагрев во время геомагнитных штормов [51, 52]. Джоулев нагрев пропорционален квадрату напряженности электрического поля, а также проводимости среды, которая увеличивается во время вы-

⁹ <https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/reference-data-for-calibration-and-tools/astronomical-catalogs/pickles-atlas>

¹⁰ Для звезды спектрального класса G8V в рассматриваемом спектральном диапазоне 180–250 нм в атласе Pickles используются данные из работы [67], в которой, в свою очередь, спектр данной звезды строится на основе комбинации спектров звезд: Tau Ceti [68], 61 Uma, HD 122742, HD 144287, HD 144579, HD 154345, HD 210612.

¹¹ <https://github.com/VirtualPlanetaryLaboratory/vplanet>

Таблица 3. Значения времени экспозиции (в сутках) для наблюдения трансмиссии NO в γ -полосах в атмосфере супер-земли ($N_{\text{NO}} = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$, $T|_{h > 200 \text{ км}} = 1000 \text{ K}$) при увеличении интенсивности излучения родительской звезды в 10 и 100 раз. Параметры: $SNR = 3$; $R = 1000$ (LSS)

Расстояние, пк	Время экспозиции, сут		
	$1 \times I_s$	$10 \times I_s$	$100 \times I_s$
Используется спектр Солнца (G2V)			
1	50	5	0.5
5	>100		12.5
10			50
Используется средний поток GALEX для HD 192310 (K2V)			
1	66	6.7	0.7
5	>100		16.7
10			67
Используется спектр Proxima Cen (M5.5V)			
1	>100		19.9
5			
10			

сыпания электронов (т.к. увеличивается плотность электронов). Данный процесс влияет на образование NO через реакцию $\text{N}(^4\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}$, которая, в свою очередь, чувствительна к температуре. Кроме того, Джоулев нагрев влияет на образование вертикального ветра, который переносит NO на высоты $>120 \text{ км}$ в верхней термосфере Земли [52]. По результатам обработки наблюдений спутника Solar Mesosphere Explorer (SME), в работе [52] показано, что в авроральных областях атмосферы Земли, во время увеличения геомагнитной активности, образование NO происходит как за счет высыпания электронов, так и под воздействием Джоулева нагрева. При этом первый процесс является основным источником NO на высотах $<120 \text{ км}$, источником NO на высотах $>120 \text{ км}$ является Джоулев нагрев (за счет вертикального переноса).

Безусловно, представленные процессы, влияющие на увеличение концентрации окиси азота в верхней атмосфере планеты, являются спорадическими. Поэтому их вклад в дополнительное образование NO может быть значимым только при более сильном и продолжительном росте уровня геомагнитной активности на планете, чем на Земле. Это может возникнуть в следующих случаях: 1) при высокой активности родительской звезды; 2) при нахождении экзопланеты на малых орбитальных расстояниях (в пределах ЗПО). В представленных двух случаях, однако, возможно и сильное увеличение потока родительской звезды

в жестком ультрафиолетовом диапазоне, что может способствовать убеганию атмосферы экзопланеты. При этом, как было отмечено ранее, $\text{N}_2\text{-O}_2$ доминантная атмосфера планеты может быть устойчива к сильным XUV потокам [2]; 3) при отсутствии у экзопланеты собственного магнитного поля и наличии только наведенного (как, например, у Венеры и Марса). В этом случае с дневной стороны экзопланеты образуется стоячая головная ударная волна, которая будет отклонять набегающий поток плазмы ветра родительской звезды. При этом некоторая часть плазмы все же может проникать в верхнюю атмосферу экзопланеты, что, в свою очередь, может сопровождаться высыпанием энергетических электронов по всей площади данной планеты (см., например, диффузные полярные сияния на Марсе [71]).

Стоит также отметить, что NO обладает достаточно большими временами жизни в верхней атмосфере Земли (от десятков минут до нескольких дней [36]), в связи с чем содержание данной молекулы может оставаться на высоком уровне даже после спада геомагнитной активности [52].

С другой стороны (снизу), более крупномасштабными по времени источниками формирования не столько NO, сколько $\text{N}_2\text{-O}_2$ доминантной атмосферы, являются: вулканизм и биологическая активность (бактерии). Данные факторы играют определяющую роль в азотном цикле, как до великой кислородной катастрофы, так и после нее [3]. Так, например, в [6] определили поступление молекулы N_2O в атмосферу землеподобных планет в результате неполного процесса денитрификации (процесс восстановления NO_3^- в N_2) и рассчитали возможность ее детектирования в ИК диапазоне с помощью космического телескопа JWST.

Безусловно, представленные выше источники пополнения NO требуют детального изучения. Частично данные источники рассмотрены в работах [11, 10] и также будут исследованы в последующих работах.

б3. Увеличение потока родительской звезды

Кроме того, увеличение соотношения SNR для планеты будет происходить при увеличении данного соотношения для родительской звезды (см. выражение (2)), т.е. при больших значениях спектрального потока звезды в рассматриваемом диапазоне длин волн. Это наглядно видно из анализа табл. 1, 2 и рис. 3. Так, наибольшие значения граничных для детектирования трансмиссии NO расстояний достигаются для планетных систем, родительскими звездами в которых являются звезды солнечного типа. В частности, наилучшая детектируемость рассматриваемого сигнала до-

стигается при использовании потока звезды HD 31527 (G2V), который является наибольшим в ближнем ультрафиолетовом диапазоне среди исследуемой выборки звезд (см. рис. 3, с учетом расстояния до центра ЗПО). Время экспозиции увеличивается при рассмотрении планетных систем с маломассивными родительскими звездами. При этом регистрация сигнала за разумное наблюдательное время (< 120 ч) еще возможна при использовании спектров звезд спектрального класса K2 и определенных условиях в атмосфере экзопланеты (что следует из табл. 2 и результатов для реальных экзопланет в пункте b2). Однако при рассмотрении родительских звезд спектрального класса M время экспозиции превышает 120 ч наблюдений, если расстояние до планетных систем > 1 пк.

Для того, чтобы обозначить нижние пределы интенсивности излучения родительских звезд, необходимые для регистрации трансмиссии в γ -полосах NO, в табл. 3 добавлены результаты вычислений времени экспозиции для наблюдения данного спектрального признака в атмосферах супер-земель ($N_{NO} = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$, $T_{|h > 200 \text{ км}} = 1000 \text{ K}$) при значениях интенсивностей в NUV, равных $1 \times I_s$, $10 \times I_s$, $100 \times I_s$. Данные результаты показывают, что для детектирования NO в атмосферах супер-земель (при $T_{|h > 200 \text{ км}} = 1000 \text{ K}$), которые находятся на расстояниях > 5 пк, интенсивность излучения рассматриваемых родительских звезд должна быть более чем в 100 раз больше известной.

С одной стороны, сильное увеличение потока родительской звезды в ультрафиолетовом диапазоне длин волн может привести к неустойчивости N_2 – O_2 доминантной атмосферы (см., например, [72–75]). Однако, как отмечалось ранее, в работе [2] показано, что ввиду охлаждения верхней атмосферы за счет излучения в атомарных линиях, гидродинамический режим убегания N_2 – O_2 доминантной атмосферы не наступает, вплоть до $1000 F_{XUV}$ родительской звезды, что говорит об устойчивости такой атмосферы.

С другой стороны, анализ имеющихся на настоящий момент спектров звезд в NUV, а также фотометрических измерений GALEX (см. раздел 3.2.1) показал, что в пределах 55 парсек от Земли только у двух звезд (HD 10180 и HD 31527), у которых открыты экзопланеты в ЗПО, поток в NUV больше, чем поток от Солнца, но не более, чем в 15 раз. Расчеты при этом показали, что необходимое время наблюдений для обнаружения сигнала трансмиссии NO для данных планетных систем (HD 10180 и HD 31527) все же сильно превышает 120 ч.

Безусловно, соотношение SNR для планеты также зависит и от соотношения $C_T = \frac{R_p^2}{R_s^2}$. В этом

случае теоретически наиболее подходящими для наблюдения целями являются планетные системы с маломассивными родительскими звездами, обладающими большими потоками в NUV. Так, например, трансмиссию NO можно зарегистрировать за разумное наблюдательное время на реальной экзо-земле Proxima Cen b ($d = 1.3$ пк, $N_{NO} = 1E17 \text{ см}^{-2}$, $T_{|h > 200 \text{ км}} = 1000 \text{ K}$), если поток родительской звезды Proxima Cen ($0.141 R_{SUN}$) в ближнем ультрафиолетовом диапазоне был бы равен солнечному потоку.

Подводя заключительную черту, стоит отметить, что для надежного детектирования сигнала трансмиссии NO в γ -полосах необходимо рассматривать все варианты увеличения SNR (пункты b1–b3) в совокупности.

с. Варианты увеличения соотношения SNR для регистрации эмиссии NO

Как было показано ранее (пункт a), накладываемые ограничения при оценке детектируемости излучения в γ -полосах NO с учетом резонансного самопоглощения являются достаточно большими, что делает рассматриваемый метод малоэффективным в сравнении с методами трансмиссионной спектроскопии. Из проведенных расчетов следует, что время экспозиции для регистрации данного сигнала превышает 120 ч, как для модельных (при $d > 1$ пк), так и для реальных планетных систем. При этом также существуют условия и подходы, при которых можно увеличить получаемое соотношение сигнал к шуму и, соответственно, уменьшить наблюдательное время до разумных пределов.

с1. Увеличение температуры в верхней атмосфере экзопланеты и уменьшение орбитального расстояния

Из анализа выражения (4) для оценки соотношения SNR при наблюдении эмиссии в γ -полосах NO следует, что основными факторами, влияющими на данное соотношение, являются:

1. Падающий на экзопланету поток от родительской звезды, так как интенсивность излучения в атмосфере планеты (резонансное переизлучение света в γ -полосах NO) является функцией данного потока, $I_p = f(F_s)$. Следовательно, SNR зависит и от орбитального расстояния экзопланеты.

2. Условия в атмосфере. Строго говоря, переизлученный поток от экзопланеты распространяется не только с поверхности, характеризуемой

радиусом данной планеты, но и с лимба. Поэтому влияние на поток излучения планеты также оказывает шкала высот и, соответственно, температура в верхней атмосфере экзопланеты. Как отмечалось ранее, данный факт учитывался нами при построении модели излучения в γ -полосах. При этом (что было также указано ранее) рост содержания NO в атмосфере экзопланеты может привести к снижению интенсивности излучения, так как при больших лучевых концентрациях данной молекулы существенным становится вклад резонансного самопоглощения в γ -полосах (см. также рис. 1, [18]; рис. 7, [36]).

3. Спектральный класс родительской звезды.

Таким образом, в целях исследования границ наблюдаемости эмиссии в γ -полосах NO, аналогично разделу *b*, были произведены расчеты *SNR* для различных: температур в верхних атмосферах модельных экзопланет ($T_{\text{atm}} = 3000$ К, 5000 К); больших полуосей данных экзопланет; родительских звезд. При этом для больших полуосей использовались значения, соответствующие: центру ЗПО, $a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$ (вычислен с помощью методики [54]); нижней границе консервативной, a^{CHZ} , и оптимистичной, a^{OHZ} , ЗПО (рассчитаны с помощью кода VPLanet [69]); $0.2 \times a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$ и $0.1 \times a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$.

Результаты данных параметрических расчетов, однако, показали, что за разумное наблюдательное время (<120 ч) регистрация сигнала эмиссии в γ -полосах возможна только для близких экзопланет, $a \leq 0.2 \times a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$, в следующих планетных системах:

- экзопланета: суб-нептун-2; расстояние до планетной системы, $d \leq 1$ пк; $T_{\text{atm}} = 3000, 5000$ К; родительские звезды: G1V, G2V, G8, K2 спектральных классов (используются спектры звезд, описанные в разделе 3.2.1);
- экзопланета: супер-земля; $d \leq 2$ пк; $T_{\text{atm}} = 3000, 5000$ К; родительская звезда: M5 спектрального класса (используется спектр Proxima Cen);
- экзопланета: суб-нептун-2; $d \leq 5$ пк; $T_{\text{atm}} = 3000, 5000$ К; родительская звезда: M5 спектрального класса (используется спектр Proxima Cen).

Анализ каталога NEA показал, что подобных реальных планетных систем (с такими малыми орбитальными расстояниями) в пределах 5 пк на настоящий момент открыто не было. Кроме того, следует отметить, что при значениях больших полуосей $a \leq a^{\text{OHZ}}$ необходимые условия обитаемости экзопланеты (наличие жидкой воды на ее поверхности, отсутствие сильного парникового эффекта в атмосфере [1]) не выполняются.

с2. Использование коронографа

Указанную проблему увеличения *SNR* можно рассмотреть с технической стороны. Из расчетов с использованием построенной модели излучения следует, что контраст (отношение потока от экзопланеты к потоку от родительской звезды, см. выражение (4)) для γ -полос составляет порядка: 10^{-8} для супер-земли и 10^{-7} для суб-нептуна-2 ($T = 3000$ К) в центре ЗПО у звезды солнечного типа; 10^{-6} и 10^{-5} для супер-земли и суб-нептуна в центре ЗПО у маломассивной звезды позднего спектрального класса (например, Proxima Cen (M5.5V)). Инструментом, способным решить проблему контраста при достаточном угловом разрешении родительской звезды и ее компаньона, является коронограф. К настоящему моменту существует довольно много конфигураций коронографов для решения задачи по обнаружению экзопланет (см., например, [76]). Более того, в рамках проекта Спектр-УФ также разрабатывался ахроматический интерференционный коронограф общего пути с переменным вращательным сдвигом для работы в видимом диапазоне длин волн [77–79].

Чтобы определить потенциальную значимость коронографа в исследовании детектируемости рассматриваемого сигнала эмиссии NO, в данной работе мы решили не ограничиваться определенной конфигурацией данного инструмента, а получить теоретическую оценку увеличения соотношения *SNR* в сравнении с рассмотренными ранее подходами. Более подробное изучение эффективности коронографа для решения поставленной задачи будет представлено в дальнейших исследованиях.

Для оценки соотношения сигнал к шуму была использована методика, подробно описанная в работе [80] (см. приложение). Данная методика основана на том, что экзопланета рассматривается как точечный источник собственного излучения (такое предположение обсуждалось ранее в [18]). При этом в качестве составляющих шума рассматриваются: статистический шум, зодиакальный и экзо-зодиакальный свет, остаточная засветка звезды, темновой ток и шум считывания. Как и в работе [80], мы предположили: значение внутреннего рабочего угла (IWA) равным $2\lambda/d$; поверхностную яркость для зодиакального света $M_z = 23 \text{ mag/arcsec}^2$ и для экзо-зодиакального света $M_{ez} = 22 \text{ mag/arcsec}^2$. Значение контраста коронографа, *C*, варьировалось от 10^{-7} до 10^{-10} , максимальная пропускная способность коронографа была установлена равной 0.6. Мы также предположили, что в канале коронографа находится спектрограф с характеристиками, аналогичными LSS ($R = 1000$, эффективная площадь, $A_{\text{eff}|\lambda=215\text{nm}} = 2000 \text{ cm}^2$ [48]). Границы на шум считывания

($<3 e^-$) и темновой ток ($12 e^-/c/\text{пиксел}$) были заданы согласно работе [50]. Расчеты наблюдательного времени с использованием указанной методики и параметров коронографа были также произведены для разных планетных систем (с учетом разрешающей способности) и разных условий в атмосферах экзопланет (см. пункт *c1*).

Из сравнения полученных верхних пределов детектируемости (без учета темнового тока и шума считывания), которые соответствуют двум разным методам обнаружения сигнала, следует, что использование коронографа существенно увеличивает возможность регистрации эмиссии в γ -полосах NO. Так, например, в модельном случае, при рассмотрении планетной системы супер-земля, суб-нептун-2 ($T_{\text{atm}} = 5000 \text{ K}$, $a = a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$), родительская звезда солнечного типа (используется спектр Солнца) – время экспозиции, необходимое для регистрации сигнала ($SNR = 3$), составляет: 4 ч для суб-нептуна-2 (контраст коронографа $C = 10^{-7}$) и 41 ч для супер-земли ($C = 10^{-7}$). Аналогичные результаты для затменного метода (имеется в виду: регистрация излучения во вторичном затмении) показывают: $\sim 10^4$ и $\sim 10^5$ дней для суб-нептуна-2 и супер-земли соответственно. Граничные для детектирования расстояния для тех же планетных систем с использованием коронографа составляют: ≤ 9 пк для суб-нептунов-2 ($C = 10^{-8}$, $T_{\text{atm}} = 5000 \text{ K}$, $a = a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$) и ≤ 5 пк для супер-земель ($C = 10^{-9}$, $T_{\text{atm}} = 5000 \text{ K}$, $a = a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$). Кроме того, результаты вычислений наблюдательного времени показали, что регистрация эмиссии NO становится потенциально возможной и для реальных экзопланет: для HD 192310 c ($d = 8.797$ пк; $5.3 R_E$; $a = 1.18$ а.е.; родительская звезда: K2V спектрального класса) время экспозиции составляет 120 ч (при $C = 10^{-8}$, $T_{\text{atm}} = 5000 \text{ K}$); для Tau Cet e ($\approx 1.8 R_E$, $d = 3.603$ пк, $a = 0.538$ а.е.) – 40.5 ч наблюдений.

Важно отметить, что темновой ток и шум считывания могут достаточно сильно (на более, чем 2 порядка величины) ограничить полученные оценки. Так, например, использование указанных выше значений для данных шумовых характеристик [50] снижает граничные для детектирования расстояния до 1 пк для суб-нептунов-2, находящихся в центре ЗПО у родительской звезды солнечного типа.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью проведенного исследования было оценить возможность регистрации трансмиссии NO в γ -полосах в атмосферах экзопланет земного типа (экзо-земель, супер-земель, суб-нептунов) за разумное наблюдательное время (<120 ч) с по-

мощью инструментов планируемой к запуску космической обсерватории Спектр-УФ. А также провести сравнение эффективности методов трансмиссионной и эмиссионной спектроскопии при решении задачи по обнаружению молекулы окиси азота. В рамках данной работы были получены следующие результаты:

1. С помощью спектрографа LSS ($R = 1000$) обсерватории Спектр-УФ детектирование сигнала пропускания NO в γ -полосах в предполагаемых N_2-O_2 доминантных атмосферах супер-земель и суб-нептунов потенциально возможно за 120 ч наблюдений. При условиях в атмосферах данных экзопланет, приближенных к условиям в атмосфере Земли (температура в верхней атмосфере, интенсивность электронных высыпаний), – регистрация данного сигнала возможна в модельном случае, когда родительской звездой данных экзопланет является звезда солнечного типа, и расстояние до планетной системы не превышает 2 пк.

При этом увеличение граничных для детектирования NO расстояний возможно:

1.1. Для планетных систем с активными родительскими звездами, XUV поток от которых способствует росту температуры и расширению верхних атмосфер экзопланет. Границы наблюдаемости в этом случае расширяются: до 3 и 5 пк для супер-земель с температурами 3000 и 5000 К в верхних атмосферах; до 10 и 20 пк для суб-нептунов при тех же температурах соответственно. Спектральные классы родительских звезд при этом должны соответствовать K2, G8–G1 классам.

При температуре 5000 К в предполагаемых N_2-O_2 атмосферах регистрация трансмиссии NO в γ -полосах становится потенциально возможной на: суб-нептуне HD 192310 c (время экспозиции составляет 115 ч или 12 транзитов) и супер-земле Tau Cet e (96 ч или 7 транзитов).

1.2. При рассмотрении дополнительных источников формирования NO в верхней атмосфере: надтепловых атомов азота, образующихся при более интенсивных (чем в атмосфере Земли) электронных высыпаниях в атмосферах экзопланет [10]. Причинами сильных высыпаний электронов могут служить: высокая активность родительской звезды; нахождение экзопланеты на малых орбитальных расстояниях от родительской звезды; наличие только наведенного магнитного поля у экзопланеты (высыпания в этом случае возможны по всей поверхности планеты). В качестве дополнительных источников пополнения окиси азота следует также рассматривать: Джоулев нагрев в атмосфере во время геомагнитных штормов; а также высокую геологическую и биологическую активности на экзопланете. Данные источники будут подробно рассмотрены в последующих работах.

1.3. При высоких значениях спектральных потоков родительской звезды. В данном случае детектирование окиси азота возможно на экзо-землях (в том числе у Proxima Cen b) и супер-землях, если они находятся в ЗПО у маломассивных звезд более позднего спектрального класса с потоками в ближнем ультрафиолетовом диапазоне, равными или большими, чем солнечный. Так, для супер-земель граничные расстояния составляют 5–25 пк, если их родительской звездой является звезда M5 спектрального класса с потоками 1–100 F_{SUN} в рассматриваемом диапазоне длин волн. Однако, среди существующих на настоящий момент наблюдательных данных, таких потоков у звезд с экзопланетами данного спектрального класса не было обнаружено. Важным здесь также является условие сохранения устойчивости $\text{N}_2\text{--O}_2$ доминантных атмосфер при высоких потоках от родительской звезды в жестком ультрафиолетовом диапазоне [2].

2. Сравнение результатов данной работы с оценками наблюдаемости эмиссии в системе γ -полос NO, полученными ранее [18], показывает, что с помощью спектрографа LSS космического телескопа Спектр-УФ наиболее эффективным будет детектирование пропускания света в γ -полосах в атмосфере экзопланеты, чем поиск переизлученного света в данных полосах.

При этом результаты расчетов наблюдательного времени для регистрации флуоресценции NO во время вторичного затмения показывают, что ввиду сильного влияния резонансного самопоглощения в γ -полосах при высоких лучевых концентрациях NO в атмосфере экзопланеты ($>10^{17} \text{ см}^{-2}$) – наблюдательное время для ближайших планетных систем превышает 120 ч. Данный вывод, однако, также получен для условий в атмосферах экзопланет, соответствующих условиям в атмосфере Земли.

Улучшение условий регистрации рассматриваемого сигнала возможно в следующих случаях:

2.1. При нахождении экзопланеты на малых орбитальных расстояниях – до $\leq 0.2 \times a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$ (где $a_{\text{center}}^{\text{HZ}}$ – большая полуось орбиты экзопланеты в центре ЗПО) и при более высоких температурах в верхней атмосфере ($T_{\text{atm}} > 3000 \text{ K}$). Предельные расстояния для детектирования сигнала при данных условиях составляют 5 пк, если рассматривать модельные планетные системы: суб-нептун – родительская звезда M5 спектрального класса. Представленные условия, при которых потенциально возможно достижение желаемого соотношения $\text{SNR} = 3$, однако, противоречат необходимым условиям обитаемости на экзопланете [1].

2.2. При использовании коронографа. Расчеты показали, что использование коронографа с контрастом, равным 10^{-8} – 10^{-9} , позволяет уменьшить

наблюдательное время на 4 порядка величины по сравнению с затменным методом (когда полезный сигнал определяется на основе разности потоков во вторичном затмении и вне его). Граничные для регистрации сигнала расстояния при этом достигают 9 пк для суб-нептунов и 5 пк для супер-земель, родительскими звездами которых являются звезды солнечного типа. Время экспозиции для наблюдения эмиссии NO в γ -полосах в атмосферах реальных экзопланет может составить: 120 ч (12 транзитов) для суб-нептуна HD 192310 с и 40.5 ч (3 транзита) для супер-земли Tau Cet e. Однако такие шумовые характеристики приемника, как темновой ток и шум считывания могут уменьшить полученные наблюдательные диапазоны.

Безусловно, полученные результаты подтверждают значимость проекта космической обсерватории Спектр-УФ для поиска биомаркеров в атмосферах экзопланет земного типа. Потенциальная возможность детектирования окиси азота с помощью научной аппаратуры данной обсерватории является прямым подтверждением этого тезиса. При этом требуется более детальное рассмотрение процессов, формирующих и происходящих в $\text{N}_2\text{--O}_2$ доминантных атмосферах данных экзопланет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была поддержана Российским научным фондом (Проект № 22-12-00364).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарят Валерия Ивановича Шематовича, Андрея Георгиевича Жилкина и Юрия Васильевича Пахомова за полезные обсуждения. Авторы статьи также благодарят рецензента за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. Kasting, D. Whitmire, and R. Reynolds*, Icarus **101**, 1, 108–128 (1993).
2. *A. Nakayama, M. Ikoma, and N. Terada*, Astrophys. J. **937**, 72 (2022).
3. *H. Lammer, L. Sproß, J. L. Grenfell, M. Scherf, et al.*, Astrobiology **19**, 7 (2019).
4. *L. Sproß, M. Scherf, V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and H. Lammer*, Astronomy Reports **65**, No. 4 (2021).
5. *Y. Betremieux and L. Kaltenecker*, Astrophys. J. Lett. **772**, L31, 6 (2013).
6. *E. W. Schwieterman, S. L. Olson, D. Pidhorodetska, C. T. Reinhard, et al.*, Astrophys. J. **937**, 109, 22 (2022).
7. *S. Seager, M. Schrenk, and W. Bain*, Astrobiology **12**, 1, 61–82 (2012).
8. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J. C. Gérard*, Geophysical Research Letters **18**, 1691–1693 (1991).

9. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J. C. Gérard*, *Annales Geophysicae* **10**, 792–801 (1992).
10. *V. Shematovich, D. Bisikalo, and G. Tsurikov*, *Atmosphere* **14**, 1092, 15 (2023).
11. *D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, and B. Hubert*, *Universe* **8**, 437–451, (2022).
12. *J. C. Gérard, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo*, *Geophysical Research Letters* **18**, 1695–1697 (1991).
13. *J.-C. Gérard, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo*, *Geophysical Monograph Series. The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory*, Vol. 87 (1995).
14. *J.-C. Gérard, D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, and J. W. Duff*, *Journal of Geophysical Research* **102**, A1 (1997).
15. *C. A. Barth*, *Piana Space Sci.* **40**, No. 24 (1992).
16. *C. A. Barth, K. D. Mankoff, S. M. Bailey, S. C. Solomon*, *Journal of Geophysical Research* **108**, No. A1 (2003).
17. *Б. Ф. Гордиец, Ю. Н. Куликов, М. Н. Марков, М. Я. Маров*, *Труды ФИАН: Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе*, 130 (1982).
18. *Г. Н. Пуриков, Д. В. Бисикало*, *Астрон. журн.* **100**, № 2, 144–165 (2023).
19. *A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, D. V. Bisikalo, et al.*, *Astronomy Reports* **60** (2016).
20. *B. M. Shustov, M. E. Sachkov, S. G. Sichevsky, R. N. Arkhangelsky, et al.*, *Solar System Research* **55**, No. 7 (2021).
21. *M. Sachkov, Ana Inés Gómez de Castro, B. Shustov, et al.*, *Proc. SPIE.*, 12181 (2022).
22. *F. Schreier, S. Gimeno García, P. Hochstaffl, and S. Städt*, *Atmosphere* **10**, 5, 262 (2019).
23. *F. Schreier, S. G. Garcia, P. Hedelt, et al.*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **137**, 29 (2014).
24. *F. Schreier, S. Städt, P. Hedelt, and M. Godolt*, *Molecular Astrophysics* **11**, 1 (2018).
25. *H. Keller-Rudek, G. K. Moortgat, R. Sander, and R. Sörensen*, *The MPI-Mainz UV/VIS spectral atlas of gaseous molecules of atmospheric interest*, *Earth System Science Data*, **5**, 365–373 (2013).
26. *W. Schneider, G. K. Moortgat, J. P. Burrows, and G. S. Tyndall*, *Journal of Photochemistry and Photobiology. A: Chemistry* **40**, 195–217 (1987).
27. *G. Selwyn, J. Podolske, and H. S. Johnston*, *Geophysical Research Letters* **4**, 427–430 (1977).
28. *C. Y. R. Wu, B. W. Yang, F. Z. Chen, D. L. Judge, J. Caldwell, and L. M. Trafton*, *Icarus* **145**, 289–296 (2000).
29. *I. E. Gordon, L. S. Rothman, R. J. Hargreaves, et al.*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **277**, 107949 (2022).
30. *M. W. P. Cann, R. W. Nicholls, W. F. J. Evans, J. L. Kohl, et al.*, *Applied Optics* **18**, 7, 964 (1979).
31. *D. R. Bates*, *Planet. Space Sa.* **32**, 6, 7855790 (1984).
32. *H. Trad, P. Higelin, N. Djebaili-Chaumeix, and C. Mounaim-Rousselle*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **90**, 275–289 (2005).
33. *J. Luque and D. R. Crosley*, *LIFBASE: database and spectral simulation Program (Version 1.5)*, *SRI International Report MP 99-009* (1999).
34. *A. J. D. Farmer, V. Hasson, and R. W. Nicholls*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **9** (1972).
35. *G. V. Marr*, *Proceedings of the Physical Society* **83**, 2 (1964).
36. *F. G. Eparvier and C. A. Barth*, *Journal of Geophysical Research* **97**, A9 (1992).
37. *J. B. Tatum*, *Astrophysical Journal Supplement* **14**, 21 (1967).
38. *J. R. Reisel, C. D. Carter, and N. M. Laurendeau*, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **47**, 1 (1992).
39. *R. Engleman and Jr. P. E. Rouse*, *Journal of Molecular Spectroscopy* **37** (1971).
40. *A. Garcia Munoz, M. R. Zapatero Osorio, R. Barrena, et al.*, *Astrophys. J.* **755**, 103 (2012).
41. *U. S. Standard Atmosphere, 1976* (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1976).
42. *G. P. Anderson, S. A. Clough, F. X. Kneizys, J. H. Chetwynd, and E. P. Shettle*, *Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km) (AFGL)*, TR-86-0110 (1986).
43. *J. T. Emmert, D. P. Drob, J. M. Picone, D. E. Siskind, M. Jones, M. G. Mlynczak, et al.* *Earth and Space Science* **8** (2021).
44. *A. Y. Chang, M. D. Di Rosa, and R. K. Hanson*, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **47**, №5, 375–390, (1992).
45. *M. D. Di Rosa and R. K. Hanson*, *Journal of Molecular Spectroscopy* **164**, № 1, 97–117 (1994).
46. *J. C. Gérard, C. A. Barth*, *Journal of Geophysical Research* **82**, 4 (1977).
47. *H. Rauer, S. Gebauer, P. v. Paris, J. Cabrera, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **529**, A8 (2011).
48. *L. Fossati, D. V. Bisikalo, H. Lammer, B. M. Shustov, M. E. Sachkov, et al.*, *Astrophysics and Space Science* **354**, 1 (2014).
49. *M. Sachkov, B. Shustov, and Ana Inés Gómez de Castro*, *Proc. SPIE.* 9144, 914402 (2014).
50. *A. Shugarov, I. Savanov, M. Sachkov, P. Jerram, et al.*, *Astrophys. and Space Sci.* **2014**, 354, 1 (2014).
51. *D. E. Siskind, C. A. Barth, and R. G. Roble*, *Journal of Geophysical Research* **94**, A12 (1989a).
52. *D. E. Siskind, C. A. Barth, D. S. Evans, and R. G. Roble*, *Journal of Geophysical Research* **94**, A12 (1989b).
53. *M. L. Hill, K. Bott, P. A. Dalba, T. Fetherolf, et al.*, *Astron. J.* **165**, 2 (2023).
54. *L. Kaltenegger and W. A. Traub*, *Astrophys. J.* **698** (2009).
55. *A. Segura, K. Krelove, J. F. Kasting, D. Sommerlatt, et al.*, *Astrobiology* **3**, 4 (2003).
56. *A. Segura, J. F. Kasting, V. Meadows, M. Cohen, et al.*, *Astrobiology* **5**, 6 (2005).
57. *V. S. Meadows, G. N. Arney, E. W. Schwieterman, J. Lustig-Yaeger, et al.*, *Astrobiology* **18**, 2 (2018).
58. *R. O. P. Loyd, E. L. Shkolnik, A. C. Schneider, T. Ritchey-Yowell, et al.*, *Astrophys. J.*, **890**, 23, 21 (2020).

59. *P. Morrissey, T. Conrow, T. A. Barlow, T. Small, et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **173**, 2 (2007).
60. *J. L. Linsky and M. Güdel*, *Exoplanet Host Star Radiation and Plasma Environment* (In: *Lammer H., Khodachenko M.* (eds) *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments. Astrophysics and Space Science Library*, Springer, Cham., 411, 2015).
61. *И. С. Саванов*, *Астрофизический бюллетень* **76**, No. 2 (2021).
62. *S. R. Langhoff, C. W. Bauschlicher, and H. Partridge*, *Theoretical study of the NO γ system. The Journal of Chemical Physics* **89**, 8 (1988).
63. *T. Holstein*, *Physical Review* **72**, 12 (1947).
64. *V. I. Shematovich and M. Ya. Marov*, *Physics Uspekhi* **61**, 217–246 (2018).
65. *Г. Берд*, *Молекулярная газовая динамика* (М.: Мир, 319, 1981).
66. *A. J. Pickles*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **110**, 749 (1998).
67. *Z. Sviderskiene*, *Vilnius Astronomijos Observatorijos Biuletenis* **80**, 3 (1988).
68. *C. C. Wu, T. B. Ake, A. Bogges, et al.*, *NASA Newsletter* № 22 (1983).
69. *R. Barnes, R. Luger, R. Deitrick, P. Driscoll, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **132**, 1008, 61 (2020).
70. *R. K. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting, V. Eymet, et al.*, *Astrophys. J.* **765**, 2, 16 (2013).
71. *J.-C. Gérard, L. Soret, V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and S. W. Bougher*, *Icarus* **288**, 284–294 (2017).
72. *C. P. Johnstone, M. L. Khodachenko, T. Lüftinger, K. G. Kislyakova, H. Lammer, and M. Güdel*, *Astron. and Astrophys.* **624**, L10 (2019).
73. *C. P. Johnstone, H. Lammer, K. G. Kislyakova, M. Scherf, and M. Güdel*, *Earth and Planetary Science Letters* **576** (2021).
74. *R. Luger and R. Barnes*, *Astrobiology* **15**, 2 (2015).
75. *V. S. Airapetian, A. Glozer, G. V. Khazanov, R. O. P. Loyd, K. France, et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **836**, L3 (2017).
76. *O. Guyon, E. A. Pluzhnik, M. J. Kuchner, B. Collins, and S. T. Ridgway*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **167**, 81Y99 (2006).
77. *A. Tavrov, S. Kameda, A. Yudaev, I. Dzyuban, et al.*, *Journal of Astronomical Telescopes Instruments and Systems* **4**, 04, 1 (2018).
78. *A. Tavrov, O. Korablev, L. Ksanfomaliti, A. Rodin, P. Frolov, et al.*, *Optics Letters* **36**, 11 (2011).
79. *P. Frolov, I. Shashkova, Y. Bezymyannikova, A. Kiselev, and A. Tavrov*, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments and Systems* **2**, 1 (2015).
80. *T. D. Robinson, K. R. Stapelfeldt, and M. S. Marley*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **128**, 22 (2016).

NO BIOMARKER: TRANSMISSION AND EMISSION METHODS FOR ITS POTENTIAL DETECTION IN EXOPLANET ATMOSPHERES WITH SPEKTR-UF (WSO-UV)

G. N. Tsurikov^a and D. V. Bisikalo^{b,a}

^a*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*National Centre for Physics and Mathematics, Sarov, Russia*

Among all habitability factors for terrestrial exoplanets, one of the most important is the presence of a secondary N₂–O₂ dominant atmosphere in an exoplanet. This factor can potentially indicate the already existing geological and biological processes on the exoplanet. Meanwhile, direct characterization of the N₂–O₂ atmospheres of terrestrial exoplanets is a difficult observational task. There are only a few indicators (molecules) of such an atmosphere, among which one can single out a potential biomarker – a molecule of nitric oxide NO. The strongest spectral features of this molecule in the ultraviolet range are γ -bands (203–248 nm). An important role in the search for potential biomarkers on exoplanets, including the registration of NO γ -bands, can be played by planned for the launch WSO-UV space observatory. In the paper estimates of the possibility of detecting the transmission of light in γ -bands in the atmospheres of exoplanets with this observatory are presented. The methods of emission and transmission spectroscopy are compared as applied to the detection of NO. Based on the results of this work, it is shown that there is a potential possibility of detecting a transmission signal in the NO γ -bands in the atmospheres of nearby exoplanets (<10 pc) using the LSS spectrograph of the WSO-UV observatory. At the same time, the imposed restrictions for the registration of this signal on more distant exoplanets are presented.

Keywords: terrestrial exoplanets, exoplanet atmospheres, biomarkers, WSO-UV