

ПОИСК БИОМАРКЕРОВ С ОБСЕРВАТОРИЕЙ СПЕКТР-УФ: МОЛЕКУЛА NO В АТМОСФЕРАХ ЭКЗОПЛАНЕТ У АКТИВНЫХ РОДИТЕЛЬСКИХ ЗВЕЗД

© 2025 г. Г. Н. Цуриков^{1,*}, Д. В. Бисикало^{2,1}, В. И. Шематович¹, А. Г. Жилкин¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Национальный центр физики и математики, Саров, Россия

*e-mail: grishatsurikov9826@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.08.2024 г.

После доработки 07.10.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

Обнаружение N_2-O_2 атмосферы на экзопланете земного типа может являться одним из определяющих свидетельств наличия на ней биологической и геологической активности. Молекула окиси азота, в свою очередь, является индикатором такой атмосферы, а ее спектральные полосы в ближнем УФ диапазоне (γ -полосы, 203–248 нм) могут быть потенциально обнаружены с помощью спектрографа с длинной щелью (СДЩ) (разрешающая способность $R = 1000$) планируемого к запуску космического телескопа (КТ) Спектр-УФ. Интенсивные высыпания электронов в атмосферы экзопланет, которые находятся в зоне потенциальной обитаемости у активных звезд, могут приводить к увеличению концентрации NO и, соответственно, к повышению шансов для обнаружения этого биомаркера. По результатам расчетов с использованием моделей высыпания электронов в верхнюю атмосферу планеты, химии нечетного азота, переноса излучения, а также калькулятора экспозиций Спектр-УФ — мы определили необходимые наблюдательные условия для обнаружения биомаркера NO. Так, за разумное наблюдательное время (≤ 200 часов) при отношении сигнал к шуму, равном 3, с помощью КТ Спектр-УФ можно зарегистрировать γ -полосы NO в атмосферах типичных супер-земель и суб-нептунов, подверженных интенсивным высыпаниям электронов, — на расстояниях до 8 и 30 парсек, соответственно. При этом наилучшими наблюдательными целями для регистрации NO являются экзопланеты в зоне потенциальной обитаемости у родительских звезд спектральных классов G-K.

Ключевые слова: экзопланеты земного типа, атмосферы экзопланет, биомаркеры, окись азота, Спектр-УФ, высыпания электронов

DOI: 10.31857/S0004629925020056, EDN: GHBEOD

1. ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение молекул, возможных биомаркеров, в атмосферах экзопланет земного типа является важной задачей при исследовании потенциально обитаемых миров. Для того чтобы сделать вывод о потенциальной обитаемости на конкретной экзопланете, требуется определить множество физических параметров, часть из которых недоступна для определения с помощью наземных и космических телескопов и может быть найдена только путем теоретического моделирования (см., например, рис. 1 в [1]). Несмотря на это, вместе с выполнением необходимых условий потенциальной обитаемости¹ [2] для экзопланеты, обнаружение в ее атмосфере определенных молекул может свидетель-

ствовать о наличии на ней биологической и геологической активности. Поэтому теме атмосферных биомаркеров уделяется пристальное внимание, начиная с работ [3, 4].

Из общих соображений можно предположить, что наличие N_2-O_2 атмосферы, аналогичной Земле, на экзопланете, которая находится в ЗПО, может являться весомым признаком ее обитаемости. Подтверждение этому можно найти в работах [5, 6], в которых производилось моделирование азотного цикла на Земле в аэробных и анаэробных условиях, а также были рассмотрены модели эволюции атмосфер на планетах земного типа с/без геологической и биологической активностью. По результатам моделирования было установлено [5, 6], что концентрация N_2 в атмосфере Земли в основном поддерживается бактериями (на протяжении последних

¹ Под необходимыми условиями потенциальной обитаемости подразумеваются следующие [2]: 1. На планете существует вода в жидкой форме. 2. В ее атмосфере отсутствует сильный парниковый эффект. В этом случае считается, что

экзопланета находится в зоне потенциальной обитаемости (ЗПО) у своей родительской звезды.

2.5 млрд. лет), которые поставляют молекулярный азот в атмосферу. А одновременное присутствие молекул N_2 и O_2 в атмосфере может служить биогео-маркером для экзопланеты земного типа.

Обнаружение N_2 и O_2 в атмосфере может оказаться ложным индикатором биологической активности на планете² [7, 8]. Как правило, рассматривают другие молекулы, содержащие азот и кислород, например, NO_2 , N_2O , NO , N_2-O_2 димеры [5]. Спектральные признаки молекул NO_2 и N_2O в ближнем УФ и видимом диапазоне длин волн в атмосфере Земли перекрываются молекулярными полосами поглощения O_2 и O_3 (см., например, [5, 9]). В работах [10, 11] было отмечено, что полосы N_2O в ИК диапазоне слабы для их обнаружения. Однако Schwieterman и др. в [12] показали, что при довольно высоком темпе поступления этой молекулы в атмосферу в процессе жизненного цикла бактерий, регистрация спектральных признаков N_2O на экзопланете TRAPPIST-1e возможна с помощью КТ Джеймс Уэбб. Обнаружение столкновительного комплекса N_2-O_2 также потенциально возможно с помощью инструментов этого телескопа [13]. Молекула NO также является индикатором N_2-O_2 доминантной атмосферы. Возможность регистрации излучения данной молекулы в ИК диапазоне длин волн (спектральная полоса на длине волны 5.3 микрона) была продемонстрирована ранее в работах [14] и [15].

Данная работа является продолжением нашего цикла работ [16–19], посвященного молекуле NO , как перспективному биомаркеру в атмосферах экзопланет земного типа. Ранее в [16] и [17] были даны оценки возможности обнаружения спектральных признаков окиси азота (γ -полос, 203–248 нм) в атмосферах типичных супер-земель и суб-нептунов с помощью спектрографов планируемого к запуску КТ Спектр-УФ [20–22]. Для этого рассматривались два метода возможного обнаружения сигнала:

1. Трансмиссионная спектроскопия — регистрация пропускания света родительской звезды, проходящего через атмосферу экзопланеты.

2. Эмиссионная спектроскопия — регистрация резонансного переизлучения света родительской звезды в спектральных линиях молекулы NO .

Оба этих метода основаны на измерении разности потоков от родительской звезды во время первичного транзита (в первом случае) / вторичного затмения (во втором случае) и вне его. Со-

² 1. Из исследований N_2 -доминантной атмосферы Титана известно [7], что данная молекула может эффективно образовываться в химических реакциях, возбуждаемых фотодиссоциацией NH_3 , которая может испаряться с приповерхностного H_2O-NH_3 океана. 2. Молекула O_2 , в свою очередь, может также образоваться в химических реакциях, возбуждаемых фотодиссоциацией H_2O при образовании первичной атмосферы планеты [8].

гласно полученным оценкам, регистрация трансмиссионного сигнала в γ -полосах NO с помощью Спектр-УФ возможна в атмосферах супер-земель и суб-нептунов, находящихся в ЗПО у звезд G и ранних K спектральных классов, жесткий УФ (XUV, extreme ultraviolet, 1–91.2 нм) поток которых превышает солнечный в 5 и более раз. Высокий XUV поток приводит к дополнительному нагреву атмосферы и ее последующему расширению, что является следствием увеличения глубины транзита, $R_{pl}^2/R_{st}^2 = f(\lambda)$, где R_{pl} — радиус планеты с учетом ее атмосферы, R_{st} — радиус звезды. Регистрация эмиссионного сигнала в спектральных линиях NO возможна у этих же экзопланет только с использованием коронографа с контрастом, равным 10^{-8} – 10^{-9} [17].

Стоит отметить, что XUV поток, приходящий на планету от родительской звезды, также является важным параметром при определении потенциальной обитаемости. Этот поток излучения влияет на ионизацию, нагрев, улетание атмосферы и, как следствие, на ее устойчивость и эволюцию (например, переход от первичной атмосферы к вторичной или полная потеря атмосферы). На настоящий момент существует несколько моделей, с помощью которых можно исследовать устойчивость N_2-O_2 атмосфер у экзопланет земного типа (см., например, [23, 24]). Так, согласно расчетам по модели [23], в работе [25] было показано, что при XUV потоке от родительской звезды в 60 раз больше солнечного возможен гидродинамический отток N_2-O_2 атмосферы, приводящий к ее потере за время $< 10^5$ лет. Однако модель [24] показывает устойчивость N_2-O_2 атмосферы к таким и более высоким XUV потокам (вплоть до 1000 XUV) за счет эффективного выхолаживания атмосферы при излучении в спектральных линиях атомов. В работе [17], в свою очередь, мы использовали результаты расчетов [24]: значения температур при величине XUV потока, не превышающей 30 XUV солнечного.

Очевидно, что помимо расширения атмосферы планеты вследствие ее нагрева, значимым фактором для регистрации NO в УФ диапазоне длин волн также является высокое содержание этой молекулы в верхней атмосфере. Вообще, из наблюдений верхних слоев атмосферы Земли [25–27] известно, что основными процессами, способствующими пополнению окиси азота являются: 1. В экваториальных областях — образование высокоэнергичных фотоэлектронов при поглощении атмосферным газом мягкого рентгеновского излучения родительской звезды [28]; 2. В полярных областях — высыпание высокоэнергичных электронов магнитосферного происхождения [29]. При сильных высыпаниях окись азота может также переноситься в средние широты предположительно за счет меридионального ветра [27]. Упомянутые процессы приводят к диссоциации молекулярного азота N_2

электронным ударом, продукты которой — атомы азота в основном и метастабильном ($\Delta E = 2.38$ эВ) состоянии $N(^4S, ^2D)$ взаимодействуют с молекулярным кислородом O_2 с образованием молекулы NO : $N(^4S, ^2D) + O_2 \rightarrow NO + O$. Этот процесс и является основным тепловым каналом производства NO в верхней атмосфере.

Существует также и эффективный нетепловой канал образования данной молекулы [30–34]. При диссоциации N_2 электронным ударом могут образовываться надтепловые атомы азота $N(^4S)_{hot}$, функция распределения энергии которых имеет неравновесный характер (см., например, рис. 2 в [18], рис. 5 в [19]). Взаимодействие этих атомов с O_2 также приводит к образованию NO . А концентрация окиси азота за счет этого нетеплового процесса может достигать значений, на 2 порядка величины больших, чем это возможно в тепловом канале [18, 19].

Оба упомянутых канала чувствительны к изменению активности родительской звезды. Рост этой активности может сопровождаться увеличением потока звездного ветра и корональными выбросами массы, что может приводить и к увеличению потока высыпавшихся электронов магнитосферного происхождения в верхнюю N_2-O_2 атмосферу планеты. Это, в свою очередь, влияет на рост производства NO в атмосфере [18, 19, 29, 35].

Основная цель данной работы заключается в том, чтобы оценить возможность обнаружения молекулы NO в атмосферах экзопланет земного типа, которые подвержены сильным возмущениям со стороны звездного ветра и, следовательно, большим потокам высыпавшихся электронов. Для того, чтобы провести такие расчеты, ранее нами были разработаны и апробированы на атмосфере Земли три вычислительных модели: 1. Кинетическая модель Монте–Карло (модель КММК) высыпания электронов в N_2-O_2 атмосферу [36]; 2. Модель кинетики и переноса надтепловых атомов азота в атмосфере, образующихся во время этих высыпаний [18]; 3. Модель химии нечетного азота с молекулярной и турбулентной диффузией [19]. В данной работе мы используем результаты расчетов по этим моделям (см., например, раздел 3.5 в [19]).

Работа организована следующим образом.

1. В разделе 2 приведено краткое описание представленных выше моделей. Также представлено описание разработанной ранее модели пропускания света родительской звезды через атмосферу планеты в ближнем УФ диапазоне [17]. Описана методика расчета времени экспозиции для регистрации спектральных γ -полос NO со Спектр-УФ. Данная методика была модифицирована по сравнению с [17].

2. В разделе 3 представлены результаты расчетов по упомянутым выше моделям. А именно, рассчитано наблюдательное время, необходимое для

обнаружения NO в атмосферах экзопланет с заданным отношением сигнал к шуму, S/N . Представлены пределы для обнаружения NO в атмосферах экзопланет, подверженных высоким XUV потокам и сильным возмущениям со стороны звездного ветра.

3. Основные выводы работы представлены в разделе 4.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для того чтобы определить вклад высыпания электронов в образование молекулы NO в верхних N_2-O_2 атмосферах экзопланет и возможность наблюдения данной молекулы, ранее мы разработали серию моделей, которые подробно описаны в [16–19, 36]. В данной работе ограничимся кратким описанием этих моделей:

1. Для расчетов процессов взаимодействия³ высыпавшихся магнитосферных электронов с верхней N_2-O_2 атмосферой планеты земного типа ранее была разработана кинетическая модель Монте–Карло [36]. Эта модель позволяет численно решить кинетическое уравнение Больцмана для электронов в стохастическом приближении. Детальное описание реализации модели КММК для атмосфер планет представлено в работах [36–41]. Основными результатами расчетов по данной модели являются энергетические спектры и потоки энергии (восходящие и нисходящие) электронов. Используя эти данные, впоследствии можно рассчитать скорости процессов диссоциации, ионизации и диссоциативной ионизации молекулярного азота N_2 . Данные процессы являются основными драйверами химии нечетного азота. Взаимодействие продуктов диссоциации N_2 , атомов азота $N(^2D, ^4S)$, с O_2 , является основным источником теплового образования молекулы NO .

2. Еще одним продуктом диссоциации N_2 электронным ударом являются надтепловые атомы азота, $N(^4S)_{hot}$ [42, 43]. Взаимодействие $N(^4S)_{hot}$ с молекулами O_2 является основным источником нетеплового производства NO :



Эта реакция может дать существенный вклад в формирование NO в верхней атмосфере [18, 19, 30–34]. Для описания кинетики и переноса надтепловых атомов азота в верхней атмосфере используется модифицированная в [18] модель КММК. Численная реализация данной модели полностью совпадает с реализацией модели КММК для высыпавшихся электронов и также описана в [18]. Основным результатом этой модели являются функции распределения энергии надтепловых атомов

³ Под взаимодействием здесь подразумеваются упругие, неупругие и ионизационные столкновения электронов с окружающим атмосферным газом. Полный перечень процессов указан в [36] (Приложение А).

азота в каждом атмосферном слое. Используя эти функции, можно впоследствии рассчитать частоту нетеплового образования молекулы NO.

3. Для расчета концентрации NO в N₂–O₂ атмосфере Земли и экзопланет земного типа в [19] была разработана модель химии нечетного азота. Эта модель позволяет решить систему уравнений химической кинетики: 19 реакций с компонентами NO, O₂, O, N(⁴S, ²D), NO⁺, N₂⁺, O₂⁺, O⁺, N⁺ и e⁻ (см. табл. 1 в [19]). В качестве входных данных используются скорости диссоциации, ионизации, диссоциативной ионизации N₂, полученные на предыдущем шаге. Рассматриваемая система является жесткой, поскольку константы скоростей реакций могут значительно отличаться друг от друга, и описывает тепловой канал образования NO. Включение в эту систему реакции (1), которая характеризует нетепловой канал образования NO, может существенно повлиять на решение системы. Для включения (1) в модель используются частоты нетеплового образования NO, полученные на предыдущем шаге.

В модели также учитывается вертикальный перенос NO и N(⁴S, ²D) за счет молекулярной и турбулентной диффузии. Концентрации основных нейтральных атмосферных компонентов N₂, O₂, O и ионов NO⁺, O₂⁺, O⁺, N⁺ задаются согласно моделям MSISE90 [44] и IRI2016 [45], соответственно. Аналогично [46], на каждом расчетном шаге разработанной модели обновляются концентрации второстепенных компонентов NO, N(⁴S, ²D), N₂⁺, а концентрации основных компонентов соответствуют начальным из моделей MSISE90 [44] и IRI2016 [45]. Расчет производится до установившегося режима. Численная реализация модели подробно описана в [19].

4. В качестве основного метода обнаружения молекул в атмосферах экзопланет в данной работе рассматривается метод трансмиссионной спектроскопии⁴. Вклад атмосферы в глубину транзита, $f_A = \frac{F_{out} - F_{in}}{F_{out}}$, определяется следующим выражением [11, 47]:

$$f_{A_{atm}} = \frac{(R_{pl} + h_{eff}(\lambda))^2}{R_{st}^2} - \frac{R_{pl}^2}{R_{st}^2}, \quad (2)$$

где R_{pl} и R_{st} — радиусы экзопланеты и родительской звезды; $h_{eff}(\lambda) = \int_{z_1}^{z_2} (1 - e^{-\tau(\lambda)}) dz$ — эффективная высота атмосферы, которая характеризует пропускание света родительской звезды в атмосфере планеты; $\tau(\lambda)$ — оптическая толщина. Для расчета указанных величин в работе используется представленная ранее [17] модифицированная line-by-

line модель переноса излучения Py4CAtS (Python for Computational Atmospheric Spectroscopy) [48–50]. Эта модель позволяет с высокой точностью рассчитать коэффициенты поглощения исследуемых атомов и молекул в каждом атмосферном слое, который характеризуется⁵ давлением (задается согласно модели U.S. Standard Atmosphere [51]) и температурой (15–80 км — согласно модели [51], > 80 км — см. далее). Впоследствии рассчитывается оптическая толщина, эффективная высота и глубина транзита. Помимо спектральных признаков молекулы NO, γ -полос (203–248 нм), в модели также учитывается поглощение света в полосах молекул O₂, O₃, N₂O, NO₂, SO₂, а также рэлеевское рассеяние на молекулах N₂, O₂, CO₂, Ar в ближнем УФ диапазоне (180–250 нм). Особенности реализации модели подробно описаны в [17].

5. Наконец, для того чтобы рассчитать отношение сигнала к шуму, S/N, необходимое для регистрации спектральных полос NO в атмосферах экзопланет с помощью Спектр-УФ, мы использовали специально разработанную для Спектр-УФ модель калькулятора экспозиций⁶ [52]. Методика расчета S/N в данной модели более детальна, чем в [11] и нашей предыдущей работе [17]. Эта методика позволяет учесть шумовые характеристики измерительного канала самого прибора, в данном случае спектрографа СДЩ (R = 1000) КТ Спектр-УФ. Кроме того, в расчетах учитывается зодиакальный свет и свечение атмосферы Земли. Выражение для вычисления S/N выглядит следующим образом:

$$S/N_{pl} = f_{A_{atm}} \frac{C_{out} \cdot t_{exp}}{\sqrt{2\sigma_{total}}} = \frac{f_{A_{atm}} S/N_{st}}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где $f_{A_{atm}}$ определяется согласно выражению (2), $\sigma_{total} = C_{out} \cdot t_{exp} + (\sigma_{det} + \sigma_{sky}) N_{pix} t_{exp} + N_{read} R^2$ — полное значение шумового сигнала; σ_{det} — темновой ток детектора (для ПЗС матрицы спектрографа СДЩ, $\sigma_{det,ISS} = 3.3 \times 10^{-3} e^-/c/пиксель$ [53]); σ_{sky} — фон неба, рассчитывается согласно выражению (8) в [52]. Для этого используются: 1. Спектральное распределение зодиакального света, соответствующее среднему уровню видимой поверхностной яркости 22.7 зв. вел./угл. сек², согласно [54]; 2. Спектральное распределение свечения атмосферы Земли, взятое в первом приближении согласно наблюдениям КТ им. Хаббла [55]; N_{pix} — количество пикселей, в которых содержится сигнал от объекта; N_{read} — количество считываний детектора (полагается равным 1); R — шум считывания (для спектрографа СДЩ, R = 3 e⁻ [53]); t_{exp} — время экспозиции, с; C_{out} — полезный сигнал от звезды вне транзита, который рассчитывается согласно выражению (7) в [52].

⁴ Данный метод основан на регистрации разности потоков от родительской звезды во время первичного транзита, F_{in}, и вне его, F_{out} (см., например, [11, 17, 47]).

⁵ В качестве профиля коэффициента поглощения используется профиль Фойгта.

⁶ <http://etc.wso-uv.org/>

Приведем также несколько основных предположений, которые, за исключением последнего, подробно обсуждаются в наших предыдущих работах [17, 19]:

1. У рассматриваемой экзопланеты земного типа сформировалась устойчивая вторичная N_2-O_2 доминантная атмосфера;

2. Физические условия и состав этой атмосферы аналогичны атмосфере Земли.

3. Экзопланета подвержена более частым и сильным возмущением со стороны звездного ветра родительской звезды, чем Земля. Как следствие, в атмосфере происходят интенсивные высыпания электронов, которые имеют постоянный характер, а не спорадический, как на Земле. Как и в [19], мы предполагаем, что рассматриваемые экзопланеты подвержены постоянным на длительном временном отрезке потокам Q_0 , изменяющимся в пределах от 1 до 100 эрг $см^{-2} с^{-1}$. Такие случаи могут быть реализованы, если экзопланета находится в пределах ЗПО у более активной звезды, чем Солнце. А также если экзопланета находится вблизи нижней границы зоны потенциальной обитаемости.

4. Структура нейтральной верхней атмосферы не изменяется под действием высоких потоков высыпавшихся электронов, $Q_0 \in [1; 100]$ эрг $см^{-2} с^{-1}$. Это предположение приемлемо и ранее использовалось разными авторами (см., например, [19, 29, 35, 46]) при моделировании высыпания электронов в верхнюю атмосферу Земли. В следующем разделе для обоснования представленного предположения мы проанализируем влияние дополнительных источников нагрева/охлаждения, возникающих во время электронных высыпаний, на изменение температуры нейтральной атмосферы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Содержание NO в атмосферах планет земного типа

Для того чтобы определить возможность обнаружения NO в атмосферах экзопланет, в первую очередь необходимо рассчитать высотные распределения данной молекулы в атмосфере. Используя рассмотренные ранее модели и предположения, мы провели расчеты высотных профилей NO для N_2-O_2 атмосферы планеты земного типа, подверженной более частым и сильным (чем атмосфера Земли) высыпаниям электронов магнитосферного происхождения. Для этого, на верхней границе расчетной области (для Земли это 700 км) в модели высыпания электронов задавались различные потоки энергии данных частиц, Q_0 . Кроме того, в модели химии нечетного азота рассматривались два канала образования NO: тепловой (без реакции 1) и нетепловой (с реакцией 1) каналы.

Всего было выделено 4 варианта расчета: 1. $Q_0 = 1$ эрг $см^{-2} с^{-1}$, рассматривается тепловой канал образования NO. Такие условия зачастую реализуются в атмосфере Земли (см., например, [27, 35, 46]); 2. $Q_0 = 1$ эрг $см^{-2} с^{-1}$, рассматривается нетепловой канал образования NO; 3. $10 Q_0$, тепловой канал; 4. $80 Q_0$, нетепловой канал. Электронные высыпания, заданные в вариантах 2–4 могут возникать в атмосфере Земли только как спорадические явления [47]. Поэтому, как было обозначено ранее, мы предполагаем, что N_2-O_2 атмосфера планеты земного типа подвержена более сильным и постоянным высыпаниям электронов магнитосферного происхождения.

Распределение высыпавшихся электронов по энергии было задано максвелловской функцией с характеристической энергией $E_0 = 4$ кэВ. Это значение соответствует половине средней кинетической энергии электронов, $E_m = 2E_0 = 8$ кэВ. Из наблюдений полярных областей атмосферы Земли известно, что NO эффективно образуется при высыпании электронов со средними кинетическими энергиями 1–10 кэВ [27, 29]. Таким образом, значение $E_0 = 4$ кэВ практически соответствует верхнему пределу из представленного диапазона энергий. Рассчитанные высотные распределения NO для более низких и высоких характеристических энергий высыпавшихся электронов можно найти в работах [19, 46].

Для расчетов кинетики и переноса высокоэнергичных электронов и надтепловых атомов $N(^4S)_{hot}$, а также химии нечетного азота с использованием рассмотренных ранее моделей (раздел 2.1) необходимо задать концентрации основных атмосферных нейтралов N_2 , O_2 , O , N , ионов NO^+ , O_2^+ , O^+ , N^+ , электронов и их температуры. Как отмечалось ранее, для этого мы использовали референтные модели атмосферы для Земли: MSISE90 [44] (для нейтралов) и IRI2016 [45] (для ионов и электронов). Начальные данные для расчетов с помощью этих моделей были взяты аналогично предыдущей работе ([19], рис. 1), где проводилось сравнение наших моделей с моделями [46]: 1. Рассматривалась полярная область атмосферы на широте $65^\circ N$ и долготе 0° на дату 21 сентября 1999 г.; 2. Значения солнечной и геомагнитной активности были заданы равными $F_{10.7} = 160$ и $A_p = 6$ (аналогично [46]).

На верхней панели рис. 1 представлены результаты проведенных расчетов: высотные профили NO для четырех вариантов высыпания электронов в N_2-O_2 атмосферу планеты земного типа. В первую очередь, из сравнения профилей, построенных при $Q_0 = 1$ эрг $см^{-2} с^{-1}$ (штриховые кривые) для теплового (синяя кривая) и нетеплового (красная кривая) каналов образования NO, видно, что во втором случае концентрация этой молекулы существенно увеличивается в диапазоне высот 90–200 км. Особенно это заметно в районе мак-

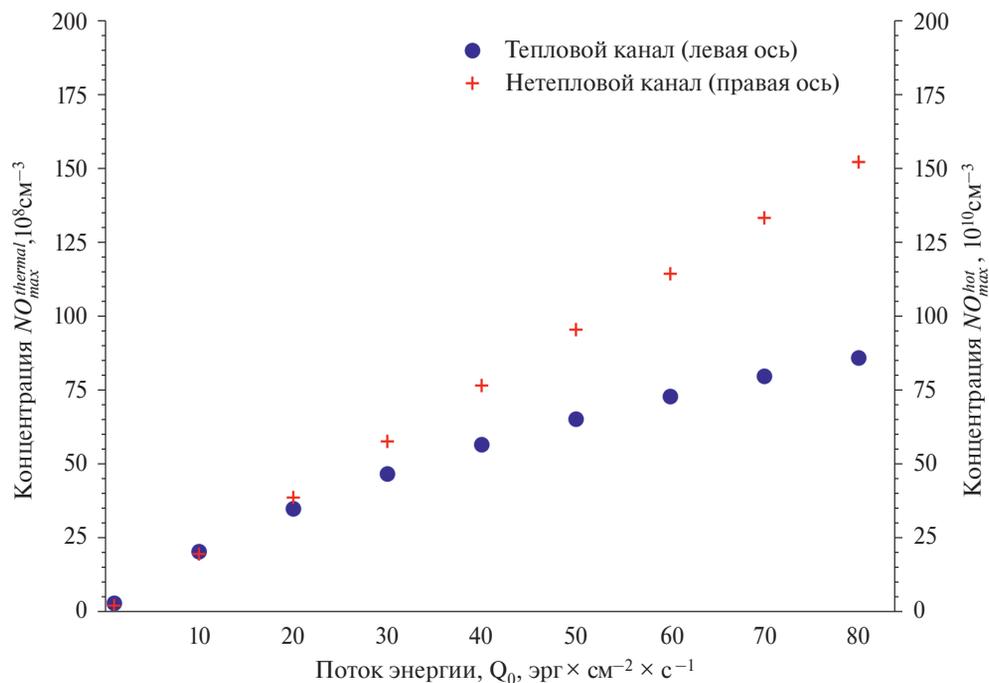
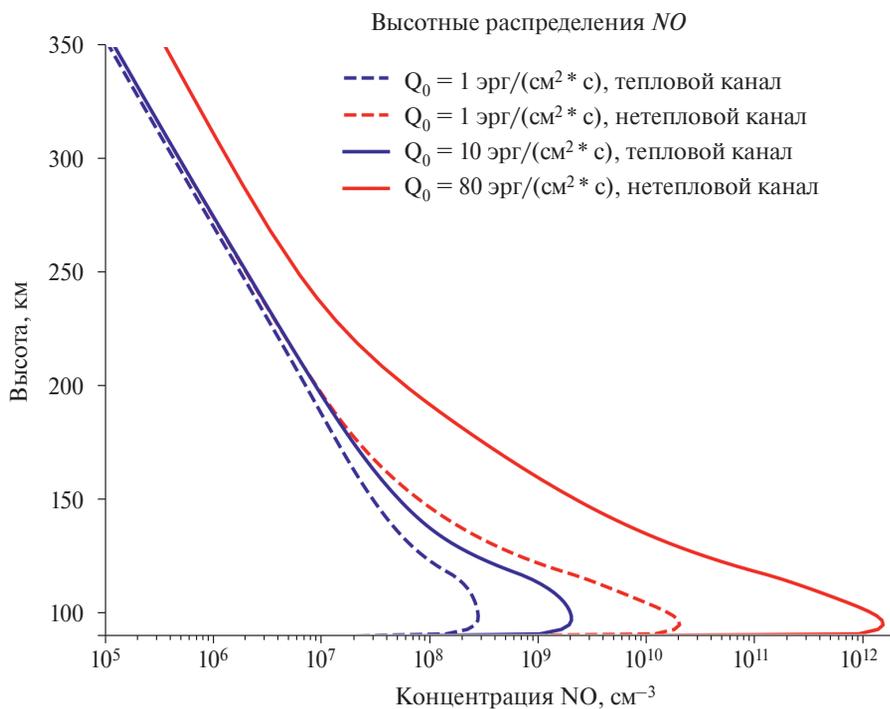


Рис. 1. Верхняя панель: Высотные распределения концентрации NO в N₂–O₂ атмосфере экзопланеты земного типа, которая подвержена различным по силе выпадениям электронов магнитосферного происхождения: Q₀ = 1 эрг см⁻² с⁻¹ (синие и красные штриховые кривые); 10 Q₀ (синие сплошные кривые); 80 Q₀ (красные сплошные кривые). Во всех случаях характеристическая энергия выпадающих электронов, E₀ = 4 кэВ. Синий цвет кривых соответствует тепловому каналу образования NO, красный цвет — нетепловому каналу образования данной молекулы. Нижняя панель: Зависимость максимального значения концентрации NO на высотах 95–105 км при различных потоках энергии выпадающих электронов 1–80 эрг см⁻² с⁻¹. Значения по левой оси ординат соответствуют тепловому каналу образования NO (синие кружки). Правая ось ординат — нетепловому каналу образования этой молекулы (красные крестики)

симула концентрации NO (95–105 км), где различие составляет практически два порядка величины. Такой рост концентрации NO при рассмотрении нетеплового канала обусловлен тем, что дополнительная реакция (1) вносит существенный вклад в решение жесткой системы уравнений химической кинетики, описывающей химию нечетного азота [18, 19].

С увеличением потока энергии Q_0 в 80 раз (красная сплошная кривая) максимум концентрации NO в нетепловом канале достиг значений, еще на 2 порядка больших, чем при $Q_0 = 1$ эрг см⁻² с⁻¹. При этом в 3 варианте расчета (10 Q_0 , тепловой канал) содержание NO все же меньше, чем в нетепловом случае⁷ при $Q_0 = 1$ эрг см⁻² с⁻¹.

На нижней панели рис. 1 показана зависимость максимума концентрации NO в диапазоне высот 95–105 км от потока энергии высыпавшихся электронов. Левая ось ординат соответствует тепловому каналу образования NO, правая ось ординат — нетепловому. При этом значения концентрации по данным осям отличаются на два порядка величины. Как можно заметить, с ростом Q_0 увеличение максимума NO происходит нелинейным образом в тепловом случае. Это связано с эффективной потерей данной молекулы в реакциях с атомарным азотом [19, 29]. Напротив, за счет дополнительного нетеплового источника образования (1) максимум NO демонстрирует линейный рост.

3.2. Тепловой баланс атмосферы при сильных электронных высыпаниях

Одним из важных предположений данной работы (см. раздел 2.1) является то, что структура верхней N₂–O₂ атмосферы не изменяется под действием высоких потоков высыпавшихся электронов. Вплоть до случая высыпаний, который соответствует 4-му варианту расчета (80 Q_0 , нетепловой канал). Чтобы показать допустимость этого предположения, мы оценили профили температуры в атмосфере для различных случаев высыпания, рассматриваемых в работе. При этом мы приняли, что структура атмосферы не изменяется, если температура увеличивается не более, чем в два раза.

Из моделей и наблюдений верхней N₂–O₂ атмосферы Земли известно, что в уравнение теплового баланса для этой области может входить довольно большое количество источников нагрева и охлаждения (см., например, [23, 24, 56, 57]). Для оценок температуры мы использовали уже посчитанные источники нагрева/охлаждения из работы [24] (рис. 2, верхняя панель) для случая, когда планета земного типа подвержена XUV потоку (1–91.2 нм) от звезды, в 5 раз превышающем XUV

поток от Солнца, $F_{XUV} = 5F_{XUV\odot}$. Такое значение XUV потока использовалось нами ранее в [17] для расчета наблюдательных проявлений NO. Таким образом, чтобы оценить температуру в атмосфере, решалось стационарное уравнение теплопроводности с известными источниками нагрева, Q , и охлаждения, L [58]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{mol}}(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q - L, \quad (4)$$

где λ_{mol} — полный коэффициент теплопроводности, который был рассчитан согласно работе [23] (выражения 45–47). Значения коэффициентов A_k и s_k , которые используются в расчете коэффициента теплопроводности для каждого атмосферного компонента, $\lambda_k = A_k T_n^{s_k}$ [59], (k соответствует компонентам N₂, O₂, CO₂, CO, O, He, H и Ar) были взяты из работ [60] и [61].

Помимо основных источников Q и L из [24], в расчетах были также рассмотрены дополнительные источники нагрева и охлаждения в N₂–O₂ атмосфере, которые могут возникнуть в результате высыпания электронов:

1. Нагрев атмосферы может возникнуть в результате [62]: 1. Диссоциации молекул электронным ударом. Избыточная кинетическая энергия атомов — продуктов этой диссоциации преобразуется в теплоту; 2. Экзотермических реакций с выделением теплоты (реакций нейтралов с нейтралами, ионов с нейтралами, ионов с электронами); 3. Столкновений тепловых вторичных электронов с нейтральными компонентами атмосферы.

2. Важным дополнительным источником нагрева может также являться Джоулев нагрев [63]. Скорость Джоулева нагрева пропорциональна концентрации электронов, n_e , и квадрату напряженности электрического поля, E . Увеличение потока энергии Q_0 приводит к росту величин n_e и E . Это может вызвать довольно сильный нагрев атмосферы и дать больший вклад в нагрев по сравнению с описанными выше процессами, возникающими во время электронных высыпаний [63].

Для оценочных расчетов по формуле (4) мы использовали уже посчитанные ранее высотные профили скоростей нагрева в представленных выше процессах (пункты 1 и 2) для N₂–O₂ атмосферы Земли (рис. 15 и 16 в [63]). Упомянутые рисунки из работы [63] построены для двух случаев: $Q_0 = 5$ эрг см⁻² с⁻¹, $E = 25$ мВ м⁻¹ и $Q_0 = 50$ эрг см⁻² с⁻¹, $E = 50$ мВ м⁻¹. Анализ этих рисунков показал, что скорость нагрева за счет высыпаний электронов (пункт 1) практически прямо пропорциональна потоку энергии электронов, Q_0 . Из этого анализа также следует практически аналогичная прямо пропорциональная зависимость скорости Джоулева нагрева от Q_0 (с учетом того, что эта скорость пропорциональна E^2).

⁷ В качестве сокращения, здесь и далее в некоторых местах используется фраза “(не)тепловой случай” вместо “рассмотрение (не)теплового канала образования NO”.

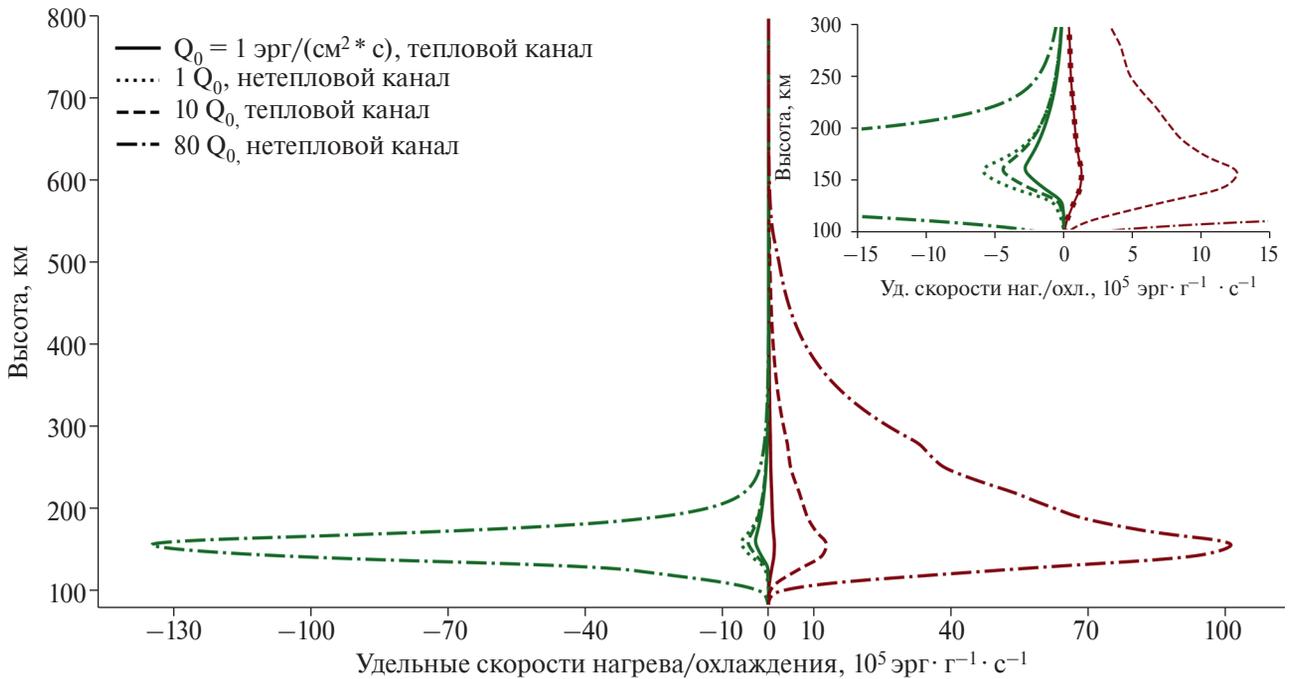


Рис. 2. Значения удельных скоростей нагрева/охлаждения N_2-O_2 атмосферы экзопланеты земного типа в различных случаях электронных высыпаний: *сплошные* кривые соответствуют высыпаниям с $Q_0 = 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и тепловому каналу образования NO; *пунктирные* — $1 Q_0$, нетепловой канал; *штриховые* — $10 Q_0$, тепловой канал; *штрих-пунктирные* — $80 Q_0$, нетепловой канал. *Зеленым цветом* обозначены удельные скорости охлаждения атмосферы за счет ИК излучения молекулы NO на длине волны 5.3 микрон. *Коричневым цветом* обозначены суммарные удельные скорости нагрева атмосферы за счет высыпания в нее электронов магнитосферного происхождения и возникающего Джоулева нагрева

3. Как известно (см., например, [56]), молекула NO, наряду с CO_2 и O_3 , играет важную роль в энергетике атмосферы, так как является ее эффективным охладителем за счет ИК излучения в колебательно-вращательных полосах (в основном, на длине волны 5.3 микрон). Возбуждение колебательных уровней молекулы связано со столкновениями NO с атомами кислорода:



а также с поглощением свечения Земли [64]. В расчете скорости охлаждения за счет ИК излучения NO как раз-таки учитываются указанные процессы возбуждения [64]:

$$L_{NO} = hv_{5.3\mu m} A_{10} [NO^*],$$

$$[NO^*] = \frac{S_E + k_{NO-O} e^{-2700/T} [O]}{A_{10} + k_{NO-O} [O]} [NO], \quad (6)$$

где $A_{10} = 12.54 \text{ с}^{-1}$ [64] — эйнштейновский коэффициент спонтанного перехода; $[NO^*]$ — заселенность возбужденного колебательного состояния NO; $k_{NO-O} = 2.8 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ [64, 65] — скорость столкновительного возбуждения и де-возбуждения в реакции (5); $S_E = 1.06 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ — частота возбуждения NO за счет поглощения свечения Земли [64, 66]; $hv_{5.3\mu m} = 3.75 \times 10^{-13} \text{ эрг}$; $[NO]$ и $[O]$ — концентрации NO и O в основном состоянии, см^{-3} .

Как было показано ранее (рис. 1), с увеличением потока энергии высыпавшихся электронов, Q_0 , концентрация NO может существенно увеличиться. Скорость охлаждения за счет ИК излучения данной молекулы пропорциональна концентрации $[NO]$ и может быть особенно высока при рассмотрении нетеплового канала образования NO.

На рис. 2 представлены высотные профили удельных скоростей нагрева/охлаждения за счет дополнительных источников (пункты 1–3), рассчитанные для 4-х вариантов высыпания электронов. Стоит отметить, что на рисунке отражены суммарные скорости нагрева за счет высыпания электронов и Джоулева нагрева (кривые обозначены коричневым цветом).

Из анализа данного рисунка следует, что при относительно небольших потоках энергии высыпавшихся электронов, $Q_0 = 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (аналогично атмосфере Земли), среди рассмотренных источников нагрева/охлаждения доминирует охлаждение атмосферы за счет излучения NO в ИК диапазоне длин волн. Это справедливо как для теплового (сплошные кривые), так и для нетеплового (пунктирные кривые) каналов образования данной молекулы. В нетепловом случае максимум скорости охлаждения примерно в 2.5 раза больше, чем в тепловом случае. С ростом Q_0 и при рассмотрении теплового канала образования NO (штриховые кривые) нагрев атмосферы за счет высыпания электро-

нов и Джоулев нагрев начинают преобладать над охлаждением NO. Это связано с тем, что при увеличении Q_0 рост концентрации этой молекулы имеет нелинейный характер (см. рис. 1), аналогичный характер имеет и скорость охлаждения. Тем временем скорость нагрева увеличивается линейным образом с ростом Q_0 .

Напротив, в нетепловом случае и при более высоких потоках энергии, $Q_0 = 80 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (штрихпунктирные кривые), концентрация NO и, следовательно, скорость охлаждения существенно возрастают. Это приводит к тому, что дополнительный источник охлаждения практически уравнивает источники нагрева.

Стоит также отметить, что полученные удельные скорости нагрева/охлаждения для расчетного варианта 3 ($10 Q_0$, тепловой канал) совпадают по порядку величины с суммарными скоростями нагрева/охлаждения из работы [24]. А скорости нагрева/охлаждения из варианта 4 ($80 Q_0$, нетепловой канал) значительно выше, чем суммарные скорости в [24]. Таким образом, можно заключить, что при исследовании устойчивости атмосфер экзопланет земного типа, важно также учитывать представленные дополнительные источники нагрева/охлаждения, которые отражают результат взаимодействия звездного ветра с атмосферой экзопланеты. Этот вопрос, однако, не является предметом данной работы и будет рассмотрен нами впоследствии.

Представленные выше выводы справедливы и при анализе высотных профилей температуры в атмосфере, которые показаны на рис. 3. Как от-

мечалось ранее, эти оценочные профили были получены из решения стационарного уравнения теплопроводности с заданными источниками нагрева/охлаждения при $F_{\text{XUV}} = 5F_{\text{XUV}\odot}$ из [24] и дополнительными источниками, связанными с высыпанием электронов в атмосферу. На нижней границе расчетной области 80 км задавалось значение температуры, взятое из ([24], рис. 3) на той же высоте. На верхней границе, $\sim 1400 \text{ км}$ (аналогично [24]), вертикальный поток теплоты был задан равным 0 (см., например, [56]). Численное решение уравнения производилось методом трехточечной прогонки. Так как полный коэффициент теплопроводности λ_{mol} зависит от температуры, решение также уточнялось методом простой итерации.

Распределение температуры в атмосфере, в свою очередь, было также получено для 4-х расчетных вариантов высыпания электронов. Цвета для каждого из вариантов соответствуют рис. 1, верхняя панель.

Сплошной черной кривой на рис. 3 показан профиль температуры, полученный с использованием источников/нагрева охлаждения, взятых только из работы [24]. Сравнение же с высотным профилем температуры из этой работы показало относительную ошибку в 10%. Основное отличие решений наблюдается на высотах $< 140 \text{ км}$. В районе термопаузы, $> 200 \text{ км}$, температура практически полностью соответствует данным из [24]. Напомним, что в работе [24] для определения температуры самосогласованно решается нестационарное уравнение энергии. В данной же работе, толь-

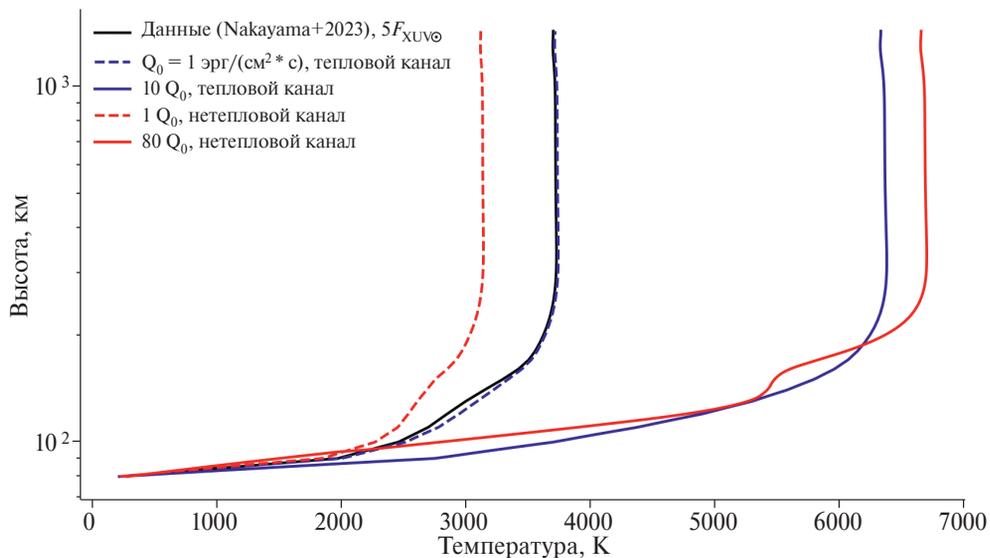


Рис. 3. Высотные профили температуры в $\text{N}_2\text{—O}_2$ атмосфере экзопланеты земного типа, находящейся под воздействием XUV потока излучения родительской звезды, равного $5F_{\text{XUV}}$, и различных потоков высыпающих электронов магнитосферного происхождения: $Q_0 = 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (синие и красные штриховые кривые); $10 Q_0$ (синие сплошные кривые); $80 Q_0$ (красные сплошные кривые). Во всех случаях характеристическая энергия высыпающих электронов, $E_0 = 4 \text{ кэВ}$. Синий цвет кривых соответствует тепловому каналу образования NO, красный цвет — нетепловому каналу образования данной молекулы. Цвет и стиль кривых соответствует рис. 1. Для построения рисунка использовались профили нагрева/охлаждения из [15] при $F_{\text{XUV}} = 5F_{\text{XUV}\odot}$ — черная кривая. А также дополнительные источники нагрева/охлаждения, возникающие при сильных высыпаниях электронов в атмосферу (рис. 2)

ко для оценки вклада дополнительных источников, связанных с высыпанием электронов, мы рассмотрели стационарное уравнение теплопроводности (4) с известными источниками нагрева/охлаждения [58].

Из рис. 2 и 3 следует, что при рассмотрении нетеплового канала образования NO, излучение этой молекулы в ИК диапазоне может вносить большой вклад в энергетику атмосферы. Это может привести к заметному охлаждению атмосферы при невысоких потоках $Q_0 = 1$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (красная штриховая кривая на рис. 3) по сравнению с тепловым случаем (синяя штриховая кривая).

При сильных высыпаниях электронов с $Q_0 = 80$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ нетепловое образование NO способствует установлению относительного “равновесия” в атмосфере между нагревом и охлаждением. В этом случае наблюдается увеличение температуры в ~ 1.8 раза. Аналогичное увеличение температуры возможно и в тепловом случае, но при $Q_0 = 10$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Во всех рассмотренных вариантах 1–4 температура в атмосфере не превышает начальную (при $F_{\text{XUV}} = 5F_{\text{XUV}\odot}$) в более, чем 2 раза. Таким образом, мы приняли, что предположение о неизменности структуры атмосферы допустимо для данных расчетных вариантов.

3.3. Границы для обнаружения NO в атмосферах экзопланет

3.3.1. Экзопланеты и звезды. Как и в предыдущих работах [16, 17] расчеты наблюдательных проявлений молекулы NO были произведены для разных модельных и реальных экзопланет. В качестве модельных экзопланет⁸ мы рассмотрели супер-земли ($2R_E$, $4M_E$), суб-нептуны-1 ($3R_E$, $8M_E$), суб-нептуны-2 ($4R_E$, $15M_E$). Ранее было показано [17], что достичь отношения $S/N = 3$ для наблюдения NO в атмосферах экзо-земель ($1R_E$, $1M_E$) с помощью Спектр-УФ возможно, только значительно превысив разумное наблюдательное время ($\gg 200$ часов). Ввиду этого, в данной работе мы убрали экзопланеты данного типа из рассмотрения.

Чтобы произвести дальнейшие расчеты глубины транзита и наблюдательных проявлений для атмосфер рассмотренных экзопланет, было выполнено масштабирование содержаний атмосферных компонентов в соответствии с полученными ранее результатами (см. табл. 2, [16]). Напомним, что в работе [16] из соображений гидростатического равновесия в атмосфере были определены массы атмосфер представленных экзопланет. Отношение этих масс к массе атмосферы Земли, $M_{\text{Atm}_{\text{pl}}}/M_{\text{Atm}_E}$, состави-

ли: 4 для супер-земель; 10.5 для суб-нептунов-1; 17.5 для суб-нептунов-2. При масштабировании концентрации всех рассматриваемых в модели молекул (см. раздел 2.2) изменялись пропорционально представленным отношениям $M_{\text{Atm}_{\text{pl}}}/M_{\text{Atm}_E}$.

Помимо этого в расчетах наблюдательного времени, необходимого для регистрации NO, рассматривались экзопланеты, которые подвержены XUV потоку излучения от родительской звезды, $F_{\text{XUV}} = 5F_{\text{XUV}\odot}$. При таких и больших XUV потоках от родительских звезд могут достигаться благоприятные условия для регистрации NO в атмосферах экзопланет [17]. В результате нагрева атмосферы, который обусловлен высоким XUV потоком звезды, шкала высот в атмосфере может увеличиться, а сама атмосфера расширится. Результаты проведенных расчетов (рис. 3) показали, что сильные высыпания электронов магнитосферного происхождения в атмосферу могут также приводить к ее дополнительному нагреву. Это может также способствовать расширению атмосферы. Для того, чтобы учесть влияние нагрева на глубину транзита, f_{ATM} , в первом приближении мы использовали введенное ранее предположение [17], что на высотах > 200 км атмосфера является изотермической. Полученные профили температуры (рис. 3) показывают, что это предположение вполне допустимо. Таким образом, для учета нагрева мы производили дополнительное масштабирование концентраций исследуемых атмосферных компонентов на указанных высотах в соответствии с законом Дальтона.

Стоит также отметить, что для молекул O_3 , N_2O , NO_2 , SO_2 , которые не являются составляющими химии нечетного азота, но используются при расчете глубины транзита, высотные профили задавались в соответствии с [67] для высот < 120 км. Выше 120 км концентрация этих молекул мала и не влияет на глубину транзита.

В качестве реальных экзопланет в данной работе рассматривались планеты τ Cet e (супер-земля, радиус $\approx 1.8 R_E$, расстояние $d = 3.603$ пк, большая полуось орбиты $a = 0.538$ а. е., продолжительность транзита $T_d = 14$ ч, родительская звезда — G8V спектрального класса) и HD 192310 c (верхняя граница суб-нептунов, $\approx 5.3 R_E$, $d = 8.797$ пк, $a = 1.18$ а. е., $T_d = 13.2$ ч, родительская звезда K2V). Согласно проведенным ранее расчетам [17], именно эти экзопланеты являются потенциальными кандидатами для обнаружения в их атмосферах молекулы NO с помощью КТ Спектр-УФ. Супер-земля τ Cet e находится в оптимистичной ЗПО (нижняя граница этой области — недавняя Венера, см., например, в [68]) согласно расчетам с использованием кода VPlanet [17, 69]. Расчет производился без учета эллиптичности орбиты. Экзопланета HD 192310 c частично входит и в оптимистичную, и в консервативную зону потенциальной обитаемости по данным каталога [68] для эк-

⁸ Стоит отметить, что у всех представленных экзопланет ускорение силы тяжести на поверхности практически такое же, как у Земли (в пределах 12%).

зопланет в ЗПО. Для всех представленных реальных экзопланет масштабирование содержаний атмосферных составляющих производилось аналогично описанной выше процедуре.

Для расчета отношения S/N (3) в спектральных полосах NO необходимо знать информацию о потоке родительской звезды в ближнем УФ диапазоне (NUV, 170–300 нм). Ранее было показано [17], что для достижения заданного $S/N = 3$ предпочтительнее рассматривать планетные системы с родительскими звездами спектрального класса G и раннего K. NUV поток от “холодных” звезд более позднего спектрального класса K и M меньше. Как следствие, наблюдательное время для обнаружения NO в атмосферах экзопланет у этих звезд превышает разумное (200 часов).

В данной работе для параметрических расчетов времени экспозиции мы использовали NUV потоки следующих родительских звезд, взятых в рассмотрение из предыдущей работы [16]: HD 10180 (G1V спектральный класс); HD 31527 (G2V); Солнце (G2V); τ Cet (G8V); HD 192310 (K2V). Напомним, что для звезд HD 10180, HD 31527 и HD 192310 ввиду отсутствия спектральных наблюдений использовались средние потоки на эффективной длине волны $\lambda_{\text{eff}} = 231.5$ нм, полученные из анализа фотометрических наблюдений GALEX в NUV полосе (170–300 нм) [70]. Спектр Солнца был взят с веб-сайта VPL⁹, аналогично работам [1, 71, 72]). Спектральное распределение для звезды G8V спектрального класса было взято из атласа спектров звезд Pickles [73]. Этот спектр в рассматриваемом диапазоне длин волн, 180–250 нм, построен согласно работе [74] на основе комбинации спектров звезд: τ Cet [75], 61 Uma, HD 122742, HD 144287, HD 144579, HD 154345, HD 210612.

3.3.2. Глубина транзита. Используя полученные высотные профили концентрации NO и других атмосферных компонентов, а также их сечения поглощения и рассеяния (см. раздел 2.2), мы последовательно рассчитали коэффициенты поглощения, оптическую толщину и эффективную высоту атмосферы. После чего определили вклад атмосферы в наблюдаемую глубину транзита, согласно (2). Эти расчеты были произведены для разных модельных экзопланет и родительских звезд. В качестве характерного примера на рис. 4 представлены значения глубины транзита в диапазоне 180–250 нм для типичной супер-земли, которая находится в транзите у звезды солнечного типа (спектральный класс G2V). Эти значения были также получены для четырех вариантов высыпания электронов в верхнюю атмосферу планеты. Полученный результат представляет собой свертку с разрешением спектрографа СДШ Спектр-УФ ($R = 1000$).

На рис. 4 также представлена идентификация спектральных признаков молекул, рассматриваемых в модели. Наибольший вклад в поглощение света в диапазоне < 200 нм вносят спектральные полосы O_2 (система полос Шумана–Рунге). В меньшей мере на формирование глубины транзита в этом спектральном диапазоне влияют полосы N_2O , NO_2 , SO_2 и рэлеевское рассеяние [75]. Начиная с 210–220 нм и в более длинноволновой области основным поглощающим элементом становится озон (спектральные полосы Хартли) [67]. Таким образом, вклад в глубину транзита от представленных спектральных признаков в диапазоне образования γ -полос NO (205–230 нм) незначителен. Это в свою очередь является причиной проявления этих полос в спектре атмосферы планеты даже при “спокойных” условиях (вариант 1, $Q_0 = 1$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, тепловый случай, синяя пунктирная кривая на рис. 4).

С ростом потока энергии высыпавшихся электронов глубина транзита увеличивается. Так, при наиболее возмущенных условиях в атмосфере (вариант 4, $80 Q_0$, нетепловой случай, красная сплошная кривая на рис. 4) глубина транзита возрастает практически на 1 порядок величины по сравнению со спокойными условиями (вариант 1). В терминах эффективной высоты, максимум глубины транзита в наиболее интенсивной (1,0) γ -полосе NO, $\lambda_c = 214.8$ нм, соответствует ~ 370 км при возмущенных условиях в атмосфере. Это примерно в 6 раз больше эффективной высоты в этой спектральной линии при спокойных условиях в атмосфере.

Несмотря на то что содержание NO в верхней атмосфере существенно увеличивается (вплоть до 3–4 порядков величины) с ростом Q_0 и при рассмотрении нетеплового канала образования данной молекулы (рис. 1), эффективная высота и глубина транзита изменяются в меньших пределах (рис. 4). Дело в том, что наибольший эффект от высыпания электронов в производство NO достигается лишь в малом диапазоне высот, в области, где происходит наибольшая потеря энергии электронов в результате упругих, неупругих и ионизационных столкновений с окружающим атмосферным газом [18, 19, 36]). В этой области также наблюдаются максимальные скорости реакций диссоциации, ионизации, диссоциативной ионизации N_2 электронным ударом [18, 19]. Кроме того, здесь достигаются и наибольшие частоты нетеплового образования NO (1). Высыпания электронов, таким образом, вносят локальный эффект в увеличение содержания NO. Вкупе с дополнительным нагревом атмосферы (напомним, что экзопланета подвержена XUV излучению с $F_{\text{XUV}} = 5F_{\text{XUV}\odot}$), все это приводит к небольшому расширению атмосферы и увеличению содержания NO на луче зрения. Эти эффекты и отображаются на глубине тран-

⁹ <https://vpl.astro.washington.edu/spectra/stellar/>

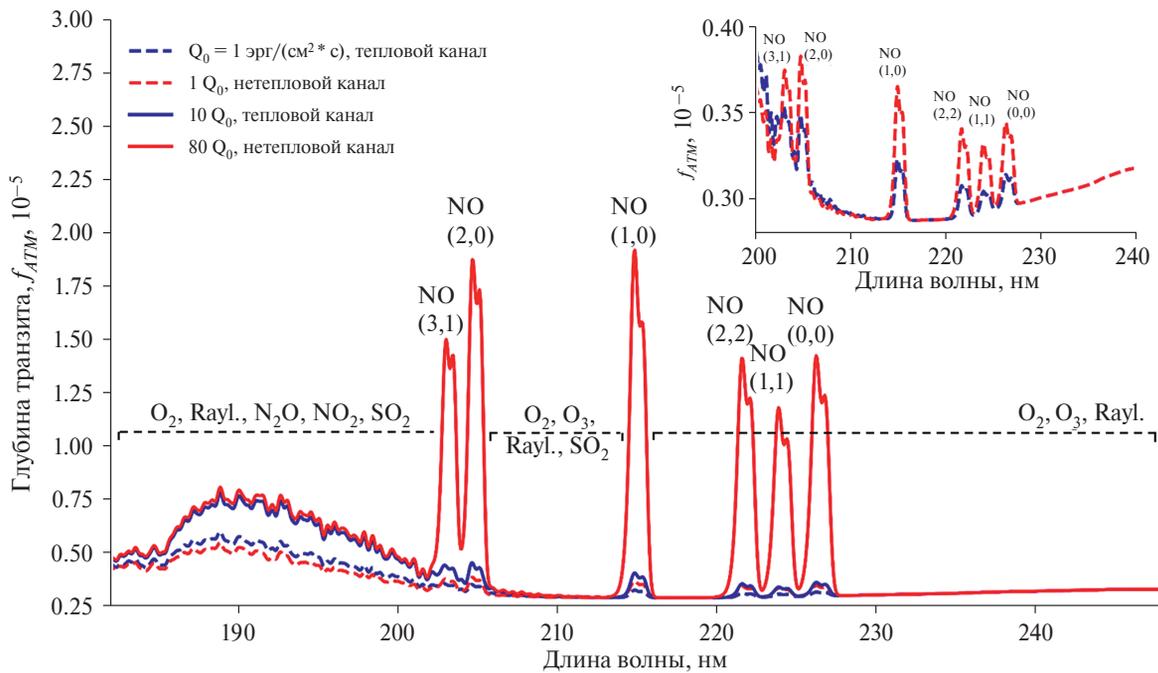


Рис. 4. Значения глубины транзита, $f_{\text{АТМ}}$, для планетной системы: “супер-земля — звезда типа Солнце (G2V спектральный класс)” при $F_{\text{XUV}} = 5F_{\text{XUV}\odot}$ и различных потоках высыпающихся электронов магнитосферного происхождения: $Q_0 = 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (синие и красные штриховые кривые); $10 Q_0$ (синие сплошные кривые); $80 Q_0$ (красные сплошные кривые). Во всех случаях характеристическая энергия высыпающихся электронов, $E_0 = 4 \text{ кэВ}$. Синий цвет кривых соответствует тепловому каналу образования NO, красный цвет — нетепловому каналу образования данной молекулы

зита, создаваемой атмосферой. Полученный в результате расчетов невысокий рост данной величины (в пределах одного порядка), тем не менее, может оказаться существенным для обнаружения молекулы NO.

3.3.3. Предельные расстояния для регистрации NO со Спектр-УФ. Для определения возможности обнаружения NO согласно выражению (3), мы использовали рассчитанные ранее значения глубины транзита для атмосфер различных экзопланет. Также с помощью калькулятора экспозиций Спектр-УФ [52] было определено отношение $S/N_{\text{ст}}$ для спектрального распределения рассматриваемых в работе родительских звезд. Как отмечалось ранее, в расчетах использовались параметры спектрографа низкого разрешения СДШ ($R = 1000$). Для надежной регистрации молекулы мы предположили, что минимальное отношение $S/N_{\text{пл}}$ должно быть равно 3. Кроме того, из практических соображений мы ограничили суммарное¹⁰ наблюдательное время 200 часами.

Удобно рассматривать задачу по поиску и обнаружению NO в атмосферах экзопланет со Спектр-УФ через анализ предельных для наблюдения расстояний [17]. Это расстояния, при которых с помощью Спектр-УФ еще возможно зарегистрировать сигнал пропускания

в γ -полосах NO с отношением $S/N_{\text{пл}} = 3$ за разумное наблюдательное время, $t_{\text{obs}} = 200 \text{ ч}$. Мы, в свою очередь, рассчитали предельные расстояния для различных условий (варианты 1–4) в атмосферах различных экзопланет, которые находятся в зоне потенциальной обитаемости у различных звезд. Результаты этих расчетов представлены на рис. 5 и 6. Сами расстояния до экзопланет отложены на этих рисунках по осям абсцисс и ординат. В начале отсчета отмечен КТ Спектр-УФ. Рисунки, таким образом, отображают сферы возможных наблюдений Спектр-УФ для рассматриваемой задачи.

На рис. 5 предельные расстояния определены для типичных супер-земель ($2R_E, 4M_E$) и суб-нептунов ($4R_E, 15M_E$), которые находятся в зоне потенциальной обитаемости у звезды типа Солнце. При этом для расчетов используется поток от звезды HD 31527 в ближнем УФ диапазоне. Расчеты проведены для различных случаев высыпания электронов в верхние атмосферы экзопланет. Стиль и цвет кривых совпадает с определенным ранее на рис. 1 и 4 для расчетных вариантов 1–4. Анализ рисунка показывает, что при относительно спокойных геомагнитных условиях (вариант 1, $Q_0 = 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, тепловой случай, синяя штриховая кривая) пределы для обнаружения NO составляют: 1.5 пк для супер-земель и 3.5 пк для суб-нептунов-2, находящихся в ЗПО у звезд типа Солнца. Подобных планетных систем среди уже открытых в пределах указанных расстояний, согласно ката-

¹⁰ Под суммарным подразумевается общее время наблюдений, которое может быть достигнуто при наблюдении нескольких транзитов.

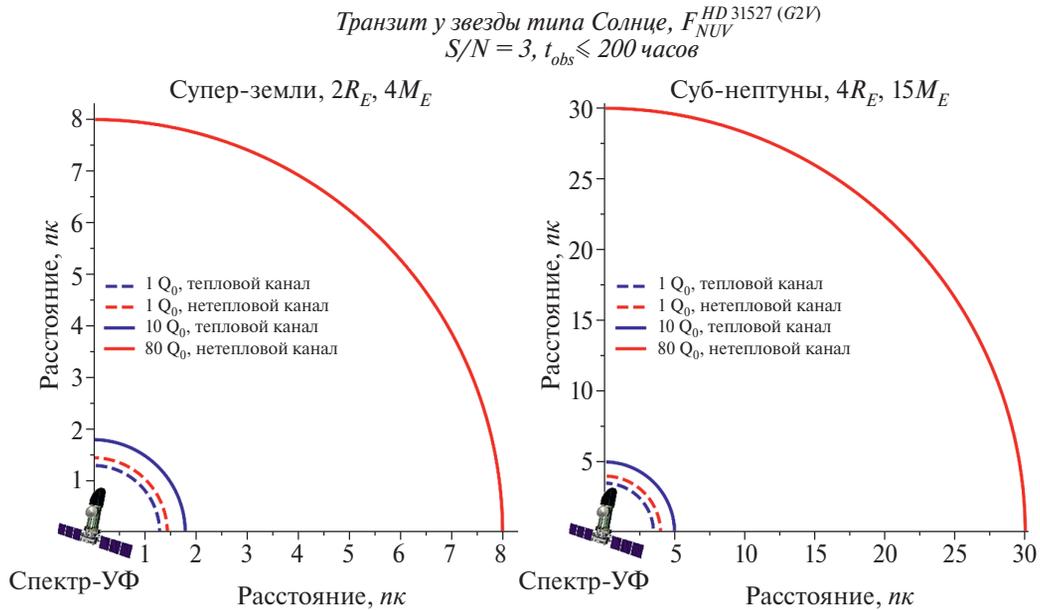


Рис. 5. Предельные расстояния для регистрации γ -полос NO в предполагаемых N_2 – O_2 атмосферах типичных модельных супер-земель (левая панель) и суб-нептунов-2 (правая панель), находящихся в ЗПО у звезды солнечного типа – с помощью спектрографа СДШ ($R = 1000$) КТ Спектр-УФ с параметрами экспозиции: $S/N = 3$, наблюдательное время – в пределах 200 часов. Предельные расстояния рассчитаны при $F_{XUV} = 5F_{XUV\odot}$ и различных потоках высыпавшихся электронов магнитосферного происхождения: $Q_0 = 1$ эрг $cm^{-2} s^{-1}$ (синие и красные штриховые кривые); $10 Q_0$ (синие сплошные кривые); $80 Q_0$ (красные сплошные кривые). Для расчетов использовался средний поток звезды HD 31527 (G2V спектральный класс) в ближнем УФ диапазоне спектра. В начале координат изображен КТ Спектр-УФ

логу NASA Exoplanets Archive¹¹, ранее обнаружено не было.

Из рис. 5 следует, что с увеличением Q_0 в 10 раз предельные расстояния увеличиваются в ~ 1.5 раза (в тепловом случае, синие сплошные кривые). А при наиболее возмущенных условиях в атмосфере экзопланеты (вариант 4, $80 Q_0$, нетепловой канал) границы для потенциального обнаружения NO существенно расширяются и могут достигать 8 пк для супер-земель и 30 пк для суб-нептунов, находящихся в ЗПО у звезд типа Солнце. Это, в свою очередь, подтверждает высказанное ранее предположение о том, что увеличение глубины транзита в пределах порядка величины вследствие нагрева и расширения атмосферы, а также увеличения содержания NO на луче зрения может заметно улучшить возможность обнаружения данной молекулы.

Полученные результаты тем не менее зависят от спектрального класса родительской звезды и ее потока в ближнем УФ диапазоне. Это наглядно видно на рис. 6, где для тех же модельных экзопланет предельные расстояния рассчитаны для случая, когда эти экзопланеты находятся в ЗПО у разных родительских звезд. При этом предполагается, что

экзопланеты подвержены наиболее сильному возмущению со стороны звездного ветра (вариант 4, $80 Q_0$, нетепловой канал, красные сплошные кривые). Рассчитанные значения предельных расстояний на этом рисунке полностью отражают градацию по спектральным потокам у рассматриваемых звезд (см. рис. 3 в [17]). Отсюда следует, что представленные на рис. 5 предельные расстояния в 8 пк (для супер-земель) и 30 пк (для суб-нептунов) являются своеобразными верхними пределами для обнаружения NO. Действительно, поток в ближнем УФ диапазоне у звезды HD 31527 (спектральный класс G2V) выше, чем у Солнца (G2V) примерно в 20 раз. Это, в свою очередь, отражается на изменении предельных расстояний, рассчитанных для планетных систем с этими родительскими звездами, в $\sim \sqrt{20}$ раз.

Помимо модельных экзопланет расчеты наблюдательных проявлений NO были проведены и для атмосфер реальных планет τ Cet e и HD 192310 c, которые ранее были определены как потенциальные кандидаты для обнаружения NO [17]. Эти экзопланеты отмечены на рис. 6. Результаты проведенных расчетов показали, что регистрация сигнала пропускания в γ -полосах NO потенциально возможна в предполагаемой N_2 – O_2 атмосфере супер-земли τ Cet e за 14 транзитов или 196 часов наблюдений, суммарно. Для достижения указанных наблюдательных условий ($S/N = 3, t_{obs} = 200$ ч), однако, предполагалось, что атмосфера планеты находится под действием более сильных высыпа-

¹¹ 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.

Транзит у звезд разных спектральных классов
 $80 Q_0$, нетепловой канал $S/N = 3$, $t_{obs} \leq 200$ часов

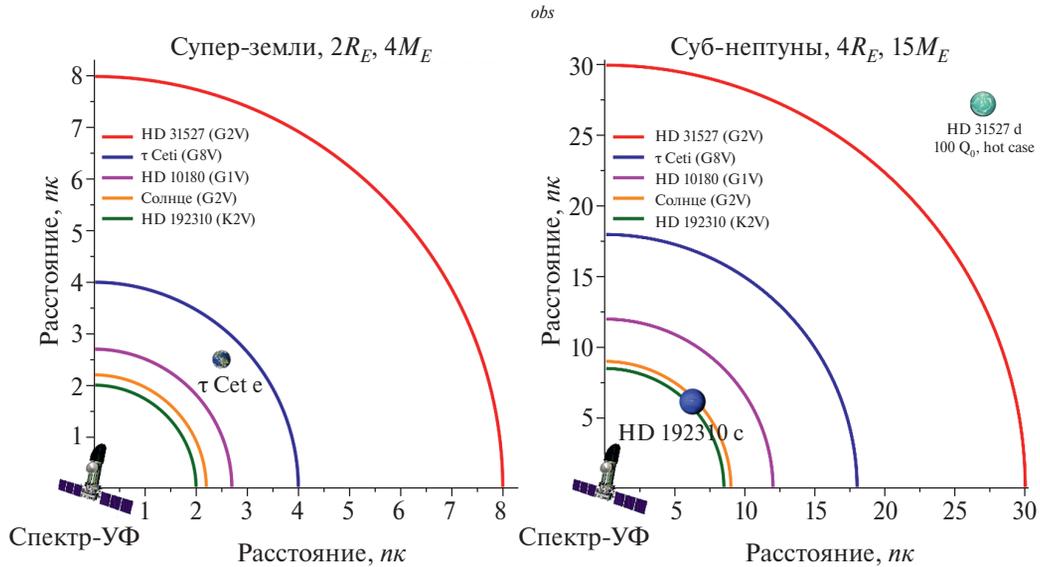


Рис. 6. Предельные расстояния для регистрации γ -полос NO в предполагаемых N_2-O_2 атмосферах типичных модельных супер-земель (левая панель) и суб-нептунов-2 (правая панель), находящихся в ЗПО у звезд разных спектральных классов – с помощью спектрографа СДЩ ($R = 1000$) КТ Спектр-УФ с параметрами экспозиции: $S/N = 3$, наблюдательное время – в пределах 200 часов. Для построения рисунка использованы NUV потоки звезд: HD 31527 (G2V спектральный класс) (красные кривые); τ Ceti (G8V) (синие кривые); HD 10180 (G1V) (пурпурные кривые); Солнце (G2V) (оранжевые кривые); HD 192310 (K2V) (зеленые кривые). Предполагается, что N_2-O_2 атмосфера представленных планет подвержена XUV потоку $F_{XUV} = 5F_{XUV\odot}$ и выпадениям электронов магнитосферного происхождения с $Q_0 = 80$ эрг $см^{-2} с^{-1}$. Рассматривается нетепловой канал образования NO. На рисунках отмечены планеты: τ Ceti e (1.85 RE) (время экспозиции составляет 200 часов при $Q_0 = 100$ эрг $см^{-2} с^{-1}$); HD 192310 c (5.3 RE) (время экспозиции составляет 50 часов при $Q_0 = 80$ эрг $см^{-2} с^{-1}$); HD 31527 d (3.5 RE) (время экспозиции составляет 220 часов при $Q_0 = 100$ эрг $см^{-2} с^{-1}$). В начале координат отображена КТ Спектр-УФ

ний электронов, $Q_0 = 100$ эрг $см^{-2} с^{-1}$, и также рассматривался нетепловой канал образования окиси азота. Стоит отметить, что температура в атмосфере при таких возмущенных условиях, согласно проведенным расчетам теплового баланса, может измениться в 2.2 раза. Тем не менее, как и ранее, мы предположили, что структура атмосферы в этом предельном случае также остается неизменной.

Расчеты для суб-нептуна HD 192310 c показали, что обнаружение NO в предполагаемой N_2-O_2 атмосфере этой экзопланеты потенциально возможно за 4 транзита или примерно 52 часа наблюдений (суммарно). Результат был получен при рассмотрении наиболее возмущенных условий в атмосфере планеты (вариант 4, $Q_0 = 80$ эрг $см^{-2} с^{-1}$, нетепловой случай). Регистрация сигнала пропускания в γ -полосах NO в атмосфере этой экзопланеты возможна и при рассмотрении более спокойных геомагнитных условий. Так, за 15 транзитов (195 часов наблюдений) зарегистрировать сигнал в атмосфере этой экзопланеты еще возможно, если она подвержена электронным выпадениям с $Q_0 = 65$ эрг $см^{-2} с^{-1}$, и при рассмотрении нетеплового канала образования NO.

Мы также определили, что еще одна экзопланета может быть потенциальным кандидатом для

обнаружения NO – это суб-нептун HD 31527 d (11.8 M_E , 3.5 R_E , $d = 38.447$ пк, $a = 0.81$ а. е., $T_d = 12.8$ ч, родительская звезда G2V). Согласно [68], HD 31527 d находится в оптимистичной ЗПО. Регистрация трансмиссионного сигнала в γ -полосах NO в атмосфере этой экзопланеты возможна в случае более сильных, чем в расчетном варианте 4, выпадений электронов, $Q_0 = 100$ эрг $см^{-2} с^{-1}$. Суммарное наблюдательное время для обнаружения биомаркера NO в этом случае может составить 220 часов, что соответствует 17 транзитам этой экзопланеты.

Тем не менее реальные наблюдения атмосфер экзопланет могут сопровождаться дополнительными осложняющими факторами, которые влияют на качество получаемого сигнала. Одним из наиболее важных факторов является активность родительской звезды и проявление этой активности в ближнем УФ диапазоне. Как следует из полученных результатов, исследование атмосфер экзопланет земного типа, находящихся в ЗПО, – сугубо многотранзитная задача. Во время транзита и между ними на родительской звезде могут возникать и эволюционировать пятна – области с пониженной температурой и меньшим потоком непрерывного излучения. Наличие пятен может исказить спектр звезды и, как следствие приводить к ис-

кажениям в наблюдаемой глубине транзита [76]. Эти факторы, в свою очередь, необходимо учитывать при планировании наблюдений и последующем анализе экспериментальных данных.

Стоит также отметить, что ранее транзиты экзопланет τ Set e и HD 31527 d не были достоверно зарегистрированы по результатам наблюдений на обсерватории TESS [77].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью данной работы было оценить возможность обнаружения молекулы NO в предполагаемых N_2-O_2 атмосферах экзопланет земного типа, которые подвержены более сильным и частым, чем атмосфера Земли, возмущениям со стороны звездного ветра и, следовательно, более интенсивным высыпаниям электронов магнитосферного происхождения. При моделировании образования NO мы рассмотрели два канала производства данной молекулы: тепловой и нетепловой. Помимо этого, также предполагалось (аналогично [17]), что рассматриваемые экзопланеты подвержены и более сильным XUV потокам от родительской звезды, вплоть до $5 F_{XUV\odot}$. N_2-O_2 атмосферы планет могут быть потенциально устойчивы к таким и большим XUV потокам [24].

В работе исследовалась возможность регистрации трансмиссионного сигнала в γ -полосах NO в атмосферах супер-земель и суб-нептунов с помощью спектрографа СДШ ($R = 1000$) планируемого к запуску КТ Спектр-УФ. В качестве разумных предельных для наблюдения параметров были рассмотрены: $S/N = 3$ и $t_{obs} \leq 200$ часов.

По результатам проведенных расчетов было показано, что с помощью спектрографа СДШ Спектр-УФ обнаружение биомаркера NO потенциально возможно в предполагаемых N_2-O_2 атмосферах типичных супер-земель ($2R_E, 4M_E$), и суб-нептунов ($4R_E, 15M_E$). Предельные расстояния до экзопланет, на которых регистрация сигнала становится возможной, во многом зависят от интенсивности высыпания электронов в их атмосферу. Высыпания электронов, в свою очередь, напрямую влияют на увеличение содержания окиси азота в верхних слоях атмосферы¹².

В первую очередь, существенное увеличение концентрации NO возможно в случае нетеплового образования данной молекулы, когда надтепловые атомы азота $N_h(^4S)$, образованные при диссоциации N_2 электронным ударом, взаимодействуют с O_2 , формируя NO (1). Эффективное протекание

данной реакции возможно на экзопланетах, подверженных практически постоянным возмущениям со стороны звездного ветра и, соответственно, постоянным высыпаниям электронов (в отличие от Земли, где эти процессы имеют спорадический характер). Прирост концентрации NO в этом случае может составлять 2 порядка величины по сравнению с тепловым каналом (см. рис. 1, верхняя панель).

Кроме того, рост содержания NO происходит и вследствие увеличения потока энергии высыпавшихся электронов (рис. 1, нижняя панель). В случае теплового образования NO, этот рост имеет нелинейный характер за счет действия “обратной связи”: NO эффективно теряется в результате взаимодействия с тепловыми атомами азота $N(^4S, ^2D)$. При включении дополнительного нетеплового источника производства NO его вклад в химию нечетного азота становится существенным, а зависимость концентрации окиси азота от Q_0 линейной.

Таким образом, если верхняя атмосфера экзопланеты подвержена интенсивным высыпаниям магнитосферных электронов ($Q_0 = 80 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и важную роль в образовании NO играет взаимодействие надтепловых атомы азота с O_2 , то концентрация NO может значительно увеличиться. Это увеличение может составить практически 4 порядка величины, по сравнению со “спокойными” условиями в атмосфере ($Q_0 = 1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, тепловой случай). Оно, однако, носит локальный характер и проявляется только на высотах вблизи максимума концентрации окиси азота (рис. 1).

Как же изменения в содержании NO могут сказаться на обнаружении данного биомаркера с КТ Спектр-УФ? Так как рост концентрации окиси азота даже при сильной геомагнитной активности имеет локальный характер, глубина транзита, характеризующая пропускание в атмосфере планеты, в этом случае увеличивается лишь в пределах одного порядка величины (рис. 4). Это тем не менее может привести к заметному улучшению наблюдательных условий для обнаружения исследуемого биомаркера. Так, предельные расстояния для регистрации сигнала в γ -полосах NO могут потенциально расширяться:

- С 1.5 пк (при спокойных условиях в атмосфере) до 8 пк (в случае интенсивных высыпаний) для типичных супер-земель в ЗПО у звезд солнечного типа;
- С 3.5 пк до 30 пк для типичных суб-нептунов в ЗПО у родительских звезд солнечного типа.

Верхние пределы, однако, зависят от спектрального класса родительской звезды и ее потока в ближнем УФ диапазоне длин волн. Для наблюдений при этом предпочтительны экзопланеты у звезд G и ранних K спектральных классов. За разумное наблюдательное время в этом случае воз-

¹² Высыпания электронов приводят к диссоциации молекулярного азота N_2 электронным ударом (этот процесс и “возбуждает” химию нечетного азота) и последующему образованию атомов азота в основном и метастабильном состояниях. Взаимодействие этих атомов с O_2 является основным источником NO в верхней атмосфере.

можно достичь достаточного значения S/N для надежной регистрации сигнала [17].

Как минимум три экзопланеты, находящиеся в зоне потенциальной обитаемости у своих родительских звезд, подходят под указанные наблюдательные критерии: супер-земля τ Ceti e¹³, суб-нептуны HD 192310 c¹⁴ и HD 31527 d¹⁵ (рис. 6). Результаты расчетов наблюдательного времени для предполагаемых N₂–O₂ атмосфер этих экзопланет показали, что они могут являться потенциальными кандидатами для обнаружения NO с помощью Спектр-УФ¹⁶. Так, регистрация γ -полос NO на экзопланете τ Ceti e потенциально возможна за 14 транзитов (суммарно 198 часов наблюдений), если ее атмосфера подвержена интенсивным высыпаниям электронов с $Q_0 = 100$ эрг см⁻² с⁻¹. Обнаружение этой молекулы на HD 192310 с возможно за 4 транзита (52 часа наблюдений) в случае реализации рассмотренных ранее условий геомагнитной активности в ее атмосфере ($Q_0 = 80$ эрг см⁻² с⁻¹, нетепловой канал образования NO). Регистрация трансмиссионного сигнала в γ -полосах NO также потенциально возможна в атмосфере HD 31527 d за 17 транзитов (220 часов наблюдений) в случае интенсивных высыпаний электронов с $Q_0 = 100$ эрг см⁻² с⁻¹.

Полученные в работе результаты показывают возможность обнаружения биомаркеров на экзопланетах с использованием планируемого к запуску КТ “Спектр-УФ” и могут использоваться при формировании его наблюдательной программы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-12-00364).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V.S. Meadows and R.K. Barnes* Handbook of Exoplanets (H.J. Deeg and J.A. Belmonte, Eds., 57, 2018).
2. *J.F. Kasting, D.P. Whitmire, and R.T. Reynolds*, Icarus 101, 1, 108–128 (1993).
3. *I.S. Shklovskii* Vselennaia, zhizn', razum. (1962).
4. *I.S. Shklovskii and C. Sagan* Intelligent life in the universe (1966).
5. *L. Sproß, M. Scherf, V.I. Shematovich, D.V. Bisikalo, and H. Lammer*, Astronomy Reports 65, 4, 275–296 (2021).
6. *H. Lammer, L. Sproß, J.L. Grenfell, M. Scherf, et al.*, Astrobiology 19, 7, 927–950 (2019).
7. *A. Coustenis and F.W. Taylor* Titan: Exploring an Earthlike World (Second Edition, vol. 4, 2008).
8. *S.D. Domagal-Goldman, A. Segura, M.W. Claire, T.D. Robinson, and V.S. Meadows*, Astrophys. J. 792, 2, 90 (2014).
9. *Y. Bétrémieux and L. Kaltenegger*, Astrophys. J. Lett. 772, 2, L31 (2013).
10. *J.L. Grenfell, J.-M. Grießmeier, P. von Paris, A.B.C. Patzer, et al.*, Astrobiology 12, 12, 1109–1122 (2012).
11. *H. Rauer, S. Gebauer, P.V. Paris, J. Cabrera, et al.*, Astron. and Astrophys. 529, A8 (2011).
12. *E.W. Schwieterman, S.L. Olson, D. Pidhorodetska, C.T. Reinhard, et al.*, Astrophys. J. 937, 2, 109 (2022).
13. *A. Misra, V. Meadows, M. Claire, and D. Crisp*, Astrobiology 14, 2, 67–86 (2014).
14. *V.S. Airapetian, C.H. Jackman, M. Mlynczak, W. Danchi, and L. Hunt*, Scientific Reports 7, 14141 (2017).
15. *P. Barth, E.E. Stüeken, C. Helling, E.W. Schwieterman, and J. Telling*, Astron. and Astrophys. 686, A58 (2024).
16. *G.N. Tsurikov and D.V. Bisikalo*, Astronomy Reports 67, 2, 125–143 (2023).
17. *G.N. Tsurikov and D.V. Bisikalo*, Astronomy Reports 67, 11, 1123–1138 (2023).
18. *V. Shematovich, D. Bisikalo, and G. Tsurikov*, Atmosphere 14, 7, 1092 (2023).
19. *V. Shematovich, D. Bisikalo, G. Tsurikov, and A. Zhilkin*, Astronomy Reports 68, 8, 843–864 (2024).
20. *A.A. Boyarchuk, B.M. Shustov, I.S. Savanov, M.E. Sachkov, et al.*, Astronomy Reports 60, 1, 1–42 (2016).
21. *B.M. Shustov, M.E. Sachkov, S.G. Sichevsky, R.N. Arkhangelsky, et al.*, Solar System Research 55, 7, 677–687 (2021).
22. *M. Sachkov, A.I. Gómez de Castro, B. Shustov, S. Sichevsky, and A. Shugarov*, SPIE 12181, 121812S (2022).
23. *C.P. Johnstone, M. Güdel, H. Lammer, and K.G. Kislyakova*, Astron. and Astrophys. 617, A107 (2018).
24. *A. Nakayama, M. Ikoma, and N. Terada*, Astrophys. J. 937, 2, 72 (2022).
25. *C.P. Johnstone, M.L. Khodachenko, T. Lüftinger, K.G. Kislyakova, et al.*, Astron. and Astrophys. 624, L10 (2019).
26. *C.A. Barth, D.N. Baker, K.D. Mankoff, and S.M. Bailey*, Geophysical Research Letters 28, 8, 1463–1466 (2001).

¹³ Находится в оптимистичной ЗПО у звезды G8V спектрального класса.

¹⁴ Частично находится в консервативной ЗПО у звезды K2V спектрального класса.

¹⁵ Находится в оптимистичной ЗПО у звезды G2V спектрального класса.

¹⁶ Это, в свою очередь, подтвердило результаты, полученные в [17].

27. C.A. Barth, K.D. Mankoff, S.M. Bailey, and S.C. Solomon, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 108, A1, 1027 (2003).
28. C.A. Barth, S.M. Bailey, and S.C. Solomon, *Geophysical Research Letters* 26, 9, 1251–1254 (1999).
29. J.C. Gerard and C.A. Barth, *Journal of Geophysical Research* 82, 4, 674 (1977).
30. V.I. Shematovich, D.V. Bisikalo, and J.C. Gerard, *Annales Geophysicae* 10, 10, 792–801 (1992).
31. V.I. Shematovich, D.V. Bisikalo, and J.C. Gerard, *Geophysical Research Letters* 18, 9, 1691–1694 (1991).
32. J.C. Gérard, V.I. Shematovich, and D.V. Bisikalo, *Geophysical Research Letters* 18, 9, 1695–1698 (1991).
33. J.C. Gérard, V.I. Shematovich, and D.V. Bisikalo, *Geophysical Monograph Series* 87, 235–241 (1995).
34. J.C. Gérard, D.V. Bisikalo, V.I. Shematovich, and J.W. Duff, *Journal of Geophysical Research* 102, A1, 285–294 (1997).
35. C.A. Barth, *Planetary and Space Science* 40, 2–3, 315–336 (1992).
36. D. Bisikalo, V. Shematovich, and B. Hubert, *Universe* 8, 8, 437 (2022).
37. M.Y. Marov, V.I. Shematovich, and D.V. Bisikalo, *Space Science Reviews* 76, 1–2, 1–204 (1996).
38. S.C. Solomon, *Journal of Geophysical Research* 106, A1, 107–116 (2001).
39. S.C. Solomon, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 122, 7, 7834–7848 (2017).
40. V.I. Shematovich, D.V. Bisikalo, J.C. Gérard, C. Cox, et al., *Journal of Geophysical Research (Planets)* 113, E2, E02011 (2008).
41. V.I. Shematovich, *Russian Chemical Reviews* 88, 10, 1013–1045 (2019).
42. P.C. Cosby, *Journal of Chemical Physics* 98, 12, 9544–9553 (1993).
43. C.W. Walter, P.C. Cosby, and H. Helm, *Journal of Chemical Physics* 99, 5, 3553–3561 (1993).
44. A.E. Hedin, *Journal of Geophysical Research* 96, A2, 1159–1172 (1991).
45. D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, et al., *Space Weather* 15, 2, 418–429 (2017).
46. S.M. Bailey, C.A. Barth, and S.C. Solomon, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 107, A8, 1205 (2002).
47. F. Wunderlich, M. Godolt, J.L. Grenfell, S. Städt, et al., *Astron. and Astrophys.* 624, A49 (2019).
48. F. Schreier, S. Gimeno Garcá, P. Hochstaffl, and S. Städt, *Atmosphere* 10, 5, 262 (2019).
49. F. Schreier, S. Gimeno Garcá, P. Hedelt, M. Hess, et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 137, 29–50 (2014).
50. F. Schreier, S. Städt, P. Hedelt, and M. Godolt, *Molecular Astrophysics* 11, 1–22, (2018).
51. U.S. standard atmosphere (1976).
52. G.N. Tsurikov, S.G. Sichevsky, V.E. Shmagin, I.N. Nikonorov, and B.M. Shustov, *Nauchnye trudy Instituta astronomii RAN* 9, 1, 12–31 (2024).
53. A. Shugarov and M. Sachkov, *Photonics* 10, 9, 1032 (2023).
54. R. Diaz, *Space Telescope Science Institute, Tech. Rep. CDBS-CRDS 2015-001*, April (2015).
55. S. Medallon, E. Rickman, and J. Brown, *STIS Instrument Handbook for Cycle 32 v. 23 (vol. 23, 23, 2023)*.
56. B.F. Gordietz, Y.N. Kulikov, M.N. Marov, and M.Ya. Marov, *Trudi FIAN* 130, 1, 3–28 (1982).
57. R.G. Roble, *Geophysical Monograph Series* 87, 1–21 (1995).
58. M.N. Izakov, *Space Science Reviews* 7, 5–6, 579–641 (1967).
59. P.M. Banks and G. Kockarts, *Aeronomy* (1973).
60. S.J. Bauer and H. Lammer, *Planetary aeronomy: atmosphere environments in planetary systems* (2004).
61. R. Schunk and A. Nagy, *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* (2009).
62. V. Singh and J.C. Gerard, *Planetary and Space Science* 30, 11, 1083–1089 (1982).
63. D.E. Siskind, C.A. Barth, D.S. Evans, and R.G. Roble, *Journal of Geophysical Research* 94, A12, 16899–16911 (1989).
64. J. Oberheide, M.G. Mlynczak, C.N. Mosso, B.M. Schroeder, et al., *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 118, 11, 7283–7293 (2013).
65. J.A. Dodd, R.B. Lockwood, E.S. Hwang, et al., *Journal of Chemical Physics* 111, 8, 3498–3507 (1999).
66. G.E. Caledonia and J.P. Kennealy, *Planetary and Space Science* 30, 10, 1043–1056 (1982).
67. G.P. Anderson, *AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km)* (1986).
68. M.L. Hill, K. Bott, P.A. Dalba, T. Fetherolf, et al., *Astron. J.* 165, 2, 34 (2023).
69. R. Barnes, R. Luger, R. Deitrick, P. Driscoll, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 132, 1008, 024502 (2020).
70. R.O.P. Loyd, E.L. Shkolnik, A.C. Schneider, T. Richey-Yowell, et al., *Astrophys. J.* 890, 1, 23 (2020).
71. A. Segura, K. Krelove, J.F. Kasting, D. Sommerlatt, et al., *Astrobiology* 3, 4, 689–708 (2003).
72. A. Segura, J.F. Kasting, V. Meadows, M. Cohen, et al., *Astrobiology* 5, 6, 706–725 (2005).
73. A.J. Pickles, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 110, 749, 863–878 (1998).
74. Z. Sviderskiene, *Vilnius Astronomijos Observatorijos Biuletenis* 80, 3 (1988).
75. C.C. Wu, T.B. Ake, A. Boggess, R.C. Bohlin, et al., *NASA IUE Newsl* 22 (1983).
76. H. Chakraborty, M. Lendl, B. Akinsanmi, et al., *Astron. and Astrophys.* 685, A173 (2024).
77. F.V. Lovos, R.F. Dáz, and L.A. Nieto, *Astron. and Astrophys.* 665, A157 (2022).

SEARCHING FOR BIOMARKERS WITH SPEKTR-UF OBSERVATORY: NITRIC OXIDE MOLECULE IN ATMOSPHERES OF EXOPLANETS NEAR THE ACTIVE HOST STARS

© 2025 G. N. Tsurikov^{a,*}, D. V. Bisikalo^{b,a}, V. I. Shematovich^a, A. G. Zhilkin^a

^a*Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia*

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

**e-mail: grishatsurikov9826@yandex.ru*

Detection of an N₂–O₂ atmosphere on an Earth-like exoplanet may be one of the defining pieces of evidence for the presence of biological and geological activity on it. The nitric oxide molecule, in turn, is an indicator of such an atmosphere, and its spectral bands in the near UV range (γ -bands, 203–248 nm) can be potentially detected using the long-slit spectrograph (LSS) (resolution $R = 1000$) of the planned launch of the Spektr-UF space telescope. Strong electron precipitations into the atmospheres of exoplanets that are in the potentially habitable zone near the active host stars can lead to an increase in the concentration of NO and, accordingly, increase the chances of detecting this biomarker. Based on the calculations using models of electron precipitation into the upper atmosphere of the planet, odd nitrogen chemistry, radiative transfer, and the Spektr-UF exposure time calculator, we determined the necessary observational conditions for detecting the NO biomarker. Thus, in a reasonable observational time (≤ 200 hours) with a signal-to-noise ratio of 3, using the Spektr-UF, it is possible to detect γ -bands of NO in the atmospheres of typical super-Earths and sub-Neptunes that are subjects of string electron precipitation — at distances of up to 8 and 30 parsecs, respectively. The best observational targets for NO detection are exoplanets in the potential habitable zone near host stars with G-K spectral types.

Keywords: terrestrial exoplanets, atmospheres of exoplanets, biomarkers, nitric oxide, Spektr-UF, electron precipitation