

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ОКИСИ АЗОТА НА ЭКЗОПЛАНЕТАХ ЗЕМНОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ ОБСЕРВАТОРИИ WSO-UV (СПЕКТР-УФ)

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

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²НЦФМ, Саров, Россия

*E-mail: grishatsurikov9826@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 01.12.2022 г.

Принята к публикации 08.12.2022 г.

Принято считать, что наличие N_2-O_2 доминантной атмосферы является признаком биологической и геологической активности на экзопланетах земного типа, которые находятся в зоне потенциальной обитаемости. Одним из индикаторов такой атмосферы является молекула окиси азота NO. Из спутниковых наблюдений атмосферы Земли известно, что наиболее яркой полосой окиси азота в ультрафиолетовом диапазоне является γ -полоса (203–248 нм). Космические телескопы, такие как действующий HST и планируемый к запуску WSO-UV (Спектр-УФ), позволяют наблюдать в данном спектральном диапазоне. В работе приведены оценки светимости различных экзопланет в γ -полосе NO. Установлено, что обнаружение эмиссии NO в γ -полосе в атмосферах типичных экзопланет земного типа возможно с помощью спектрографов обсерватории WSO-UV (Спектр-УФ) за разумное наблюдательное время (5 орбит Спектр-УФ или 120 ч наблюдений).

Ключевые слова: экзопланеты земного типа, атмосферы экзопланет, биомаркеры, Спектр-УФ

DOI: 10.31857/S0004629923020081, **EDN:** SKTDBW

1. ВВЕДЕНИЕ

При поиске потенциально обитаемых экзопланет обычно принимают во внимание планеты земного типа (экзо-Земли, супер-Земли, суб-Нептун), на поверхности которых возможно существование жидкой воды и в атмосферах которых отсутствует сильный парниковый эффект. То есть, рассматривают планеты, находящиеся в зоне потенциальной обитаемости (ЗПО) у своих родительских звезд. В качестве родительских звезд при этом обычно предполагают звезды солнечного типа, а также маломассивные звезды, которые не демонстрируют сильной активности в жестком ультрафиолетовом (ЖУФ) и мягком рентгеновском диапазоне. Выполнение последнего условия необходимо для формирования и удержания вторичной атмосферы планеты.

По мнению ряда авторов, одним из возможных условий обитаемости считается наличие у экзопланеты N_2-O_2 доминантной атмосферы. Так, Lammer и др. [1] и Stüeken и др. [2], исследуя свойства, состав и эволюцию земной атмосферы, показали, что индикатором биологической и геологической активности на планетах земного типа

может служить только одновременное существование в атмосфере N_2 и O_2 совместно с примесью CO_2 , SrO_2 и др. [3], в свою очередь, рассмотрели такие молекулы, как N_2O , NO, N_2-O_2 – димеры, которые могут указывать на азотно-кислородный состав атмосферы. Кроме того, они указали спектральные линии данных молекул, которые могут детектироваться с помощью космических УФ и ИК миссий. Особое внимание в их исследовании уделено молекуле окиси азота, которая указывает на существование N_2-O_2 доминантной атмосферы и играет значительную роль в структуре и энергетике термосферы.

Данная работа является первой частью наших исследований возможности наблюдения индикаторов геологической и биологической активности с помощью космической обсерватории WSO-UV [4, 5]. Основной целью данной работы является оценка возможности детектирования излучения NO в γ -полосе в диапазоне длин волн 203–248 нм на экзо-Землях, супер-Землях, суб-Нептунах, которые находятся в зоне потенциальной обитаемости звезд спектрального класса G, K и M. Чтобы быть более точными, в данной работе

мы вычисляем время, необходимое для регистрации сигнала эмиссии окиси азота (в оптически тонком и толстом случаях) в N_2-O_2 доминантных атмосферах экзопланет земного типа с помощью инструментов HST и WSO-UV (Спектр-УФ) при различных заданных соотношениях сигнал к шуму (SNR). Рассматриваются планеты разных размеров и масс, с различными концентрациями окиси азота в верхней атмосфере, находящиеся на различных расстояниях от наблюдателя. Также учитывается влияние спектров звезд спектральных классов G, K, M на значения времени экспозиции.

В работе проводится анализ двух различных случаев возможного получения сигнала эмиссии окиси азота в γ -полосе: в первом модельном случае планета рассматривается как источник собственных фотонов. Вычисления в данном модельном случае позволяют провести аккуратное сравнение характеристик инструментов HST и WSO-UV (Спектр-УФ). Во втором случае мы рассчитываем время экспозиции при наблюдении эмиссии NO на основе регистрации потоков от родительской звезды во время вторичного затмения планеты и вне его.

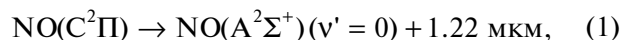
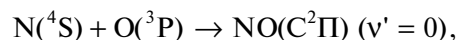
Данная статья организована следующим образом: в разделе 2 представлено описание механизма излучения NO в γ -полосе и дается краткий обзор существующих наблюдений данной полосы в земной атмосфере. Также приведены результаты вычислений лучевой интенсивности излучения для наиболее ярких γ -полос окиси азота. Данные вычисления сделаны как для оптически тонкого, так и для оптически толстого излучения. В разделе 3 проводится сравнение возможностей инструментов телескопа WSO-UV (Спектр-УФ) и телескопа HST для наблюдения NO в ближнем УФ диапазоне в атмосферах экзопланет, при этом экзопланеты рассматриваются в качестве источников только собственного излучения. В разделе 4 представлены результаты вычислений времени экспозиции для транзитных наблюдений экзопланет. Наконец, в разделе 5 представлены основные выводы работы.

2. ИЗЛУЧЕНИЕ В γ -ПОЛОСЕ ОКИСИ АЗОТА

2.1. Образование NO и его наблюдения

Гетероядерная молекула NO формируется в верхней атмосфере в результате реакций продуктов диссоциации молекул N_2 и O_2 и теряется в ходе столкновений с атомарным азотом $N(^4S, ^2D)$, образуя молекулы N_2 [3]. Вообще, химия нечетного азота и окиси азота в термосфере Земли описывается целым набором химических реакций (см., например, [6–10]). В дневном свечении атмосферы γ -система полос NO образуется в ре-

зультате резонансной флуоресценции солнечного света, в ночном свечении – в результате ассоциации $N + O$ (которая следует за радиативной релаксацией) после каскадного перехода из электронного состояния $C^2\Pi$ в электронное состояние $A^2\Sigma^+$ [11]:



Наблюдения окиси азота в ультрафиолетовом диапазоне в термосфере Земли обычно проводились в наиболее интенсивной полосе излучения данной молекулы – (1,0) γ -полосе на длине волны 2150 Å. К числу наиболее эффективных инструментов можно отнести геофизическую обсерваториюOGO [12]; спутники исследования атмосферы AE-C и AE-D [13]; Solar Mesosphere Explorer [10] и Student Nitric Oxide Explorer [14, 15]. В результате этих наблюдений были выявлены и подтверждены следующие источники, влияющие на формирование окиси азота в верхней атмосфере:

- 1) излучение Солнца в мягком рентгене (в диапазоне длин волн 20–70 Å), что является причиной максимума концентрации NO в экваториальной области;
- 2) высыпание электронов с энергиями 1–10 кэВ, благодаря чему достигается максимальная концентрация окиси азота на высоте 106–110 км в авроральной области [14]. Кроме того, было подтверждено дополнительное влияние надтепловых атомов азота $N_{\text{hot}}(^4S)$ на концентрацию NO на данной высоте [9];
- 3) было также обнаружено увеличение концентрации окиси азота на высотах более 120 км во время геомагнитных штормов в результате джоулева нагрева [16, 17].

2.2. Расчет излучения NO в наиболее ярких γ -полосах

Для проведения вычислений времени накопления сигнала, необходимого для детектирования излучения в γ -полосе окиси азота, сначала нужно рассчитать эмиссию данной молекулы в атмосфере планеты. Такие расчеты ранее были произведены для земной атмосферы в работах [18–21]. В данном разделе приведены результаты расчетов, полученных на основе алгоритмов, которые были представлены в этих работах. В последующих разделах полученные значения эмиссии NO масштабируются на другие рассматриваемые планеты.

Как уже было упомянуто, система γ -полос NO является результатом электронного перехода

Таблица 1. Сравнение g -факторов при температуре 200 К (единицы: $\frac{\text{фотон}}{\text{с молекула}}$)

| NO полоса | $\lambda_c, \text{\AA}$ | Данная работа | [18, 20, 29] | [19] | [21] | Доля интенсивности эмиссии, % |
|-----------|-------------------------|---------------|--------------|--------|-------|-------------------------------|
| (0,0) | 2262 | 2.524 | 2.58 | 1.744 | 2.724 | 15.61 |
| (0,1) | 2363 | 3.251 | 3.59 | 3.173 | 3.773 | 20.11 |
| (1,0) | 2150 | 5.779 | 6.36 | 3.931 | 7.678 | 35.74 |
| (1,1) | 2239 | 2.398 | 2.08 | 1.305 | 2.094 | 14.83 |
| (2,0) | 2047 | 0.861 | 2.02 | 0.962 | 2.043 | 4.70 |
| (2,2) | 2216 | 1.179 | — | — | 0.859 | 7.29 |
| (3,1) | 2030 | 0.279 | 0.293 | 0.0539 | 0.299 | 1.73 |

между возбужденным $A^2\Sigma^+$ и основным $X^2\Pi$ состояниями. Индивидуальные γ -полосы определяются колебательными переходами, при этом каждая колебательная полоса состоит из 12 отдельных ветвей, каждая из которых, в свою очередь, состоит из 80 вращательных линий (база данных LIFBASE [22]). Кроме того, основное состояние $X^2\Pi$, ввиду наличия спин-орбитального взаимодействия состоит из двух суб-состояний $X^2\Pi_{1/2}$ и $X^2\Pi_{3/2}$. Также ввиду существования двух возможных ориентаций электронного углового момента вращения (Λ -дублет) каждое из этих суб-состояний расщепляется еще на два.

Если рассматривать оптически тонкий случай изотропного излучения, то наблюдаемая интенсивность излучения молекулы (которое следует за переизлучением солнечных лучей в ультрафиолетовом диапазоне) в полосе вдоль луча зрения, проинтегрированная по длине волны [23] и детектируемая с помощью измерительного прибора, может быть определена, как [18]

$$4\pi I = g_{v'v''} N, \quad (2)$$

где N — лучевая концентрация излучающей молекулы в см^{-2} , $g_{v'v''}$ — g -фактор для колебательной полосы, который означает количество фотонов, рассеянных в секунду на молекулу, и определяется как произведение альбедо для однократного рассеяния на сумму g -факторов, $g_{J'J''}$, по всем вращательным линиям и ветвям в полосе [19].

В данной работе использовался профиль объемной концентрации окиси азота в земной термосфере, который был построен по результатам измерений спутника SNOE [14]. Лучевая концентрация NO была вычислена с использованием метода “многослойной луковицы” [24]. Значения g -факторов были вычислены для наиболее ярких индивидуальных γ -полос окиси азота в атмосфере Земли, которыми, согласно [11], являются (0,0),

(0,1), (1,0), (1,1), (2,0), (2,2), (3,1) γ -полосы. При расчете использовались значения факторов Хенля-Лондона для вращательного перехода из базы данных LIFBASE [22]; силы осцилляторов, взятые из [25] и [26]; поток солнечного УФ излучения из базы данных MODTRAN [27]. Значения альбедо для однократного рассеяния были взяты из работ [21, 28]. Для вычисления отношения популяций уровней в молекуле окиси азота использовалось выражение из [20] и [30]. При этом в выражения для вращательных термов была добавлена поправка на случай Λ -дублета, рассмотренная в [31]. Молекулярные константы были взяты из работ [31] и [32].

Результаты вычислений g -факторов для наиболее ярких индивидуальных γ -полос окиси азота при температуре 200 К представлены в табл. 1. В данной таблице приведены результаты и других авторов. Также показана доля интенсивности эмиссии каждой индивидуальной полосы относительно интенсивности эмиссии всей системы γ -полос окиси азота.

Как можно заметить, резонансная (1,0) γ -полоса окиси азота является наиболее яркой в системе γ -полос. Однако в данной полосе, согласно [20] и [21], следует рассматривать оптически толстый случай излучения, так как имеет место эффект самопоглощения. То есть, длины волн испускаемых фотонов совпадают с длинами волн фотонов, необходимых для начального возбуждения молекулы. Учет данного эффекта важен для достоверной интерпретации наблюдений [20]. В связи с этим, чтобы учесть самопоглощение в резонансной (1,0) γ -полосе окиси азота (далее учет данного эффекта будем называть вычислениями для оптически толстого случая излучения), индивидуальные g -факторы, $g_{J'J''}$, для всех вращательных линий и ветвей в колебательном переходе были умножены на интеграл Хольштейна [33]:

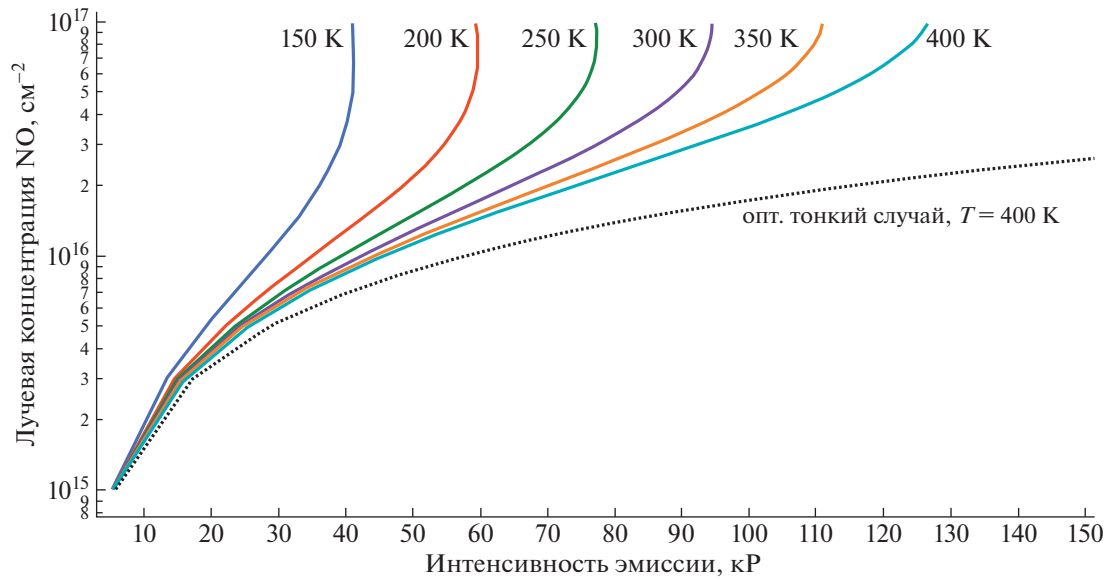


Рис. 1. Зависимость интенсивности эмиссии в резонансной (1,0) γ -полосе от лучевой концентрации NO при диапазоне температур 150–400 К. Сплошными линиями показаны результаты вычислений для оптически толстого случая. Пунктирной линией обозначена модель оптически тонкого случая.

$$g_{J'J''}^{\text{thick}} = g_{J'J''}^{\text{thin}} T(\tau_{J'J''}), \quad (3)$$

где $g_{J'J''}^{\text{thin}}$ – индивидуальный g -фактор, который расположен в правой части выражения (2), $T(\tau_{J'J''})$ – интеграл Хольштейна [33], записанный для профиля линии, обладающего доплеровским уширением и центрированного на частоте $\nu_{J'J''}$ с оптической толщиной $\tau_{J'J''} = \sigma_{J'J''} N_J$.

Результаты вычислений интенсивности излучения окиси азота в резонансной (1,0) γ -полосе для оптически толстого случая при различных температурах (150–400 К) и лучевых концентрациях NO (10^{15} – 10^{17} см $^{-2}$) в верхней атмосфере представлены на рис. 1.

Данный рисунок показывает влияние самопоглощения на видимую интенсивность излучения вдоль луча зрения в килорэлеях (кР) в сравнении с излучением в оптически тонком случае (пунктирная кривая). Как можно заметить, значительное отличие между оптически толстым и тонким случаями излучения начинается при лучевой концентрации окиси азота, большей 10^{16} см $^{-2}$. Полученные результаты для оптически толстого случая излучения согласуются с [20].

2.3. Зависимость концентрации окиси азота в верхней атмосфере от массы и радиуса планеты

Как было указано ранее, цель настоящего исследования – определить время экспозиции при наблюдении эмиссии окиси азота в γ -полосе

се в атмосферах различных экзопланет с разной лучевой концентрацией NO. При вычислениях, наряду с реальными планетами, в данной работе рассматриваются также четыре модельных экзопланеты: экзо-Земля ($1R_E, 1M_E$), супер-Земля ($2R_E, 4M_E$), суб-Нептун-1 ($3R_E, 8M_E$) и суб-Нептун-2 ($4R_E, 15M_E$). Таким образом, для дальнейших расчетов необходимо определить лучевые концентрации окиси азота на данных планетах. Для этого изначально задается диапазон возможных лучевых концентраций окиси азота в атмосфере Земли. Затем делаются два важных предположения:

- 1) на рассматриваемых планетах образовалась устойчивая вторичная атмосфера;
- 2) химический состав этой атмосферы эквивалентен химическому составу земной атмосферы.

Затем полученный для Земли диапазон лучевых концентраций NO масштабируется на рассматриваемые экзопланеты.

Стоит отметить, что в качестве модельных планет суб-Нептун-1 и суб-Нептун-2 предполагаются суб-Нептуну, находящиеся в ЗПО, которые также потеряли свою первичную атмосферу и обладают устойчивой вторичной атмосферой, сформированной в результате наличия тектоники плит и кислородной жизни. Однако в ряде работ (например, [34], а также [35] и [36]) показано, что для более крупных планет земного типа ($>2R_E$), находящихся в ЗПО, полная потеря первичной водородно-доминантной атмосферы под действием ЖУФ излучения родительской звезды ма-

ловероятна. С другой стороны, предположение, что суб-Нептуну (которые находятся рядом со своей родительской звездой) могут потерять свою первичную водородно-доминантную атмосферу в результате процесса фотоиспарения при нагреве от родительской звезды и перейти в класс супер-Земель, можно найти, например, в работе [37]. Вообще, эволюция атмосфер рассматриваемых экзопланет является сложным процессом, зависящим от многих факторов (в том числе от продолжительности ранней стадии насыщения звезды в ЖУФ диапазоне), и выходит за рамки данной работы. Принятое предположение является приемлемым для проведения параметрических расчетов.

Рассмотрим диапазон лучевых концентраций NO в верхней атмосфере Земли. Из наблюдений окиси азота в земной атмосфере [14] следует, что наибольшие объемные концентрации NO достигаются на высоких широтах (в авроральных областях) и равны $28 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ при средней геомагнитной активности (Ar индекс между 6-ю и 12-ю) и $39 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ при высокой геомагнитной активности (Ar индекс выше 12-ти) на высоте 110 км. При этом увеличение концентрации окиси азота вследствие высокой геомагнитной активности происходит также на низких и средних широтах ($<55^\circ$, вплоть до экватора) [14]. Влияние излучения Солнца в мягком рентгене на концентрацию NO наблюдается на всей освещенной полусфере Земли, при этом наибольший эффект достигается в экваториальной области: объемная концентрация в этой области составляет $13 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$ при высокой солнечной активности. Однако при высокой геомагнитной активности концентрация NO в данной области может достигать больших значений (за счет переноса окиси азота из авроральных областей меридиональной составляющей ветра, см. [14]). Таким образом, используя технику “многослойной луковицы” и профили объемной концентрации NO из работы [14], мы определили лучевые концентрации окиси азота в атмосфере Земли: $0.791 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $1.046 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при средней и высокой геомагнитных активностях соответственно.

J.-C. Gérard и C.A. Barth в своей работе [38] построили модель, отражающую влияние интенсивности выпадения электронов на объемную концентрацию окиси азота. Они заключили, что при любой авроре объемная концентрация NO не может превысить 10^{10} см^{-3} , что соответствует лучевой концентрации меньше $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Также стоит отметить, что в их вычислениях для интенсивности выпадения электронов, равной

$100 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ с}}$ (IBC III аврора), объемная концентра-

ция NO достигала $\approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ на высоте 110 км. Таким образом, из вышесказанного можно установить диапазон лучевых концентраций окиси азота, связанный с различной геомагнитной активностью в авроральных областях атмосферы Земли, равный $1 \times 10^{15} - 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Используя барометрический закон распределения плотности по высоте в предположении гидростатического равновесия [23], определим диапазон масс атмосферы Земли, который мог бы существовать при различных начальных значениях плотности атмосферы. В качестве нижнего предела используем значение начальной плотности на уровне моря, в качестве верхнего предела — значение начальной плотности на глубине порядка 3 км самой глубокой шахты “Mponeng Gold Mine”, где были обнаружены бактерии [39]. Такой выбор верхнего предела начальной плотности связан с условиями, при которых возможно существование бактерий. Как известно, бактерии играют определяющую роль в поддержании и регулировании парциального давления молекулярного азота в атмосфере Земли, как до кислородной катастрофы, так и после нее (см. [1]). Таким образом, полученный диапазон масс атмосферы составляет $1 - 1.75 M_{\text{атм.З}}$. Пользуясь предположением о том, что концентрация окиси азота пропорциональна массе атмосферы, определим, что диапазон лучевых концентраций NO на планете, подобной Земле, в свою очередь, составляет $1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Также, из соображений гидростатического равновесия определим отношение масс атмосфер рассматриваемых экзопланет к массе атмосферы

Земли $\frac{M_{\text{атм.пл.}}}{M_{\text{атм.З}}}$, используя определенные выше

верхний и нижний пределы начальной плотности. В предположении, что химический состав рассматриваемых экзопланет равен земному, проведем масштабирование значений лучевых концентраций окиси азота на атмосферы исследуемых экзопланет. Полученные диапазоны лучевых концентраций окиси азота представлены в табл. 2.

3. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ NO В БЛИЖНЕМ УФ ДИАПАЗОНЕ

Окись азота в γ -полосе излучает в интервале длин волн 203–248 нм. Наземные наблюдения данного излучения в атмосферах экзопланет невозможны ввиду непрозрачности земной атмосферы вплоть до 310 нм [11]. Внеатмосферные

Таблица 2. Диапазоны отношений масс атмосфер модельных экзопланет к массе земной атмосферы и диапазоны лучевых концентраций NO

| Наименование планеты | Диапазон отношений $\frac{M_{atm_{pl}}}{M_{atm_E}}$ | Диапазон значений масс атмосфер $M_{atm_{pl}}$, кг | Диапазон лучевых концентраций NO, см ⁻² |
|------------------------------|---|---|--|
| экзо-Земля: $1R_E, 1M_E$, | 1–1.75 | $5.14 \times 10^{18} - 9.04 \times 10^{18}$ | $1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16}$ |
| супер-Земля-1: $2R_E, 4M_E$ | 4–7 | $2.06 \times 10^{19} - 3.61 \times 10^{19}$ | $4 \times 10^{15} - 4 \times 10^{17}$ |
| супер-Земля-2: $3R_E, 8M_E$ | 10.4–18 | $5.35 \times 10^{19} - 9.27 \times 10^{19}$ | $1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{18}$ |
| супер-Земля-3: $4R_E, 15M_E$ | 17.4–30.3 | $8.96 \times 10^{19} - 1.56 \times 10^{20}$ | $2 \times 10^{16} - 2 \times 10^{18}$ |

наблюдения излучения NO в рассматриваемом диапазоне из всех существующих космических телескопов могут быть проведены только на работающем сейчас аппарате HST и планируемой к пуску в 2028 г. обсерватории WSO-UV (Спектр-УФ). Еще одна ультрафиолетовая обсерватория – CSST (Chinese Space Station Telescope) – планируется к пуску в 2023 г., однако нижний предел детектируемого диапазона у спектрографа данного телескопа составляет 250 нм [40].

Для цели сравнения спектрографов обсерваторий HST и WSO-UV (Спектр-УФ), способных регистрировать γ -полосу NO, вычислим требуемое время экспозиции при фиксированном соотношении SNR. Для простоты сравнения будем предполагать, что исследуемая экзопланета является источником собственных фотонов. Также предположим, что инструментальный шум приборов определяется только статистическим шумом. Неучет темнового тока, шума считывания, зодиакального света и собственного свечения Земли не позволит точно рассчитать требуемое время экспозиции, однако позволит определить верхний предел [41] возможности наблюдений излучения NO спектрографами обсерваторий HST и WSO-UV (Спектр-УФ).

Если рассматривать планету, как источник излучения собственных фотонов, соотношение сигнала к шуму может быть вычислено с использованием следующего выражения для точечного источника [42]:

$$SNR = \frac{F_{\lambda}^l S_{\lambda}^{point} T_A \epsilon_f N_{\lambda,pix} t G}{\sqrt{(F_{\lambda}^l + F_{\lambda}^c) S_{\lambda}^{point} T_A \epsilon_f N_{\lambda,pix} t G}}, \quad (4)$$

где $S_{count}^l = F_{\lambda}^l S_{\lambda}^{point} T_A \epsilon_f N_{\lambda,pix}$ – сигнал от планеты; F_{λ}^l и F_{λ}^c – потоки излучения в линии и континууме в $\frac{эрг}{с см^2 \text{ \AA}}$ соответственно; S_{λ}^{point} – инструментальная чувствительность для точечного источника, $S_{\lambda}^{point} = \frac{A_{eff} \lambda d}{hc}$, выраженная в $\frac{e^-}{с пикс}$ или $\frac{count}{с пикс}$,

в зависимости от используемого типа детектора (ПЗС или МКП соответственно); T_A – пропускная способность апертуры, ϵ_f – доля энергии точечного источника, содержащаяся в количестве пикселей N_{spix} в пространственном направлении; $N_{\lambda,pix}$ – количество спектральных пикселей; $N_{pix} = N_{\lambda,pix} \cdot N_{spix}$ – общая площадь, в которой накапливается сигнал, выраженная в пикселях; G – коэффициент усиления; A_{eff} – эффективная площадь телескопа в см²; d – дисперсия в $\frac{\text{ \AA}}{пикс}$; h – постоянная Планка и c – скорость света.

Выражение для вычисления времени экспозиции, необходимого для достижения заданного сигнала к шуму, в рассматриваемом случае может быть записано следующим образом:

$$t = \frac{SNR^2 (S_{count}^l + S_{count}^c) G}{(S_{count}^l G)^2}. \quad (5)$$

Чтобы учесть количество фотоэлектронов, образующихся после попадания фотонов на матрицу, в выражение (5) было также добавлено значение квантовой эффективности прибора.

В качестве измерительных приборов были рассмотрены спектрографы STIS и COS телескопа Хаббл с эшелле решеткой E230H и решеткой G230L, соответственно, параметры которых были взяты из STIS Instrument Handbook [42] и COS Instrument Handbook [43]; и спектрографы UVES и LSS обсерватории WSO-UV (Спектр-УФ) с параметрами из WSO-UV User’s handbook¹ и работы [44]. Инструменты UVES и STIS с решеткой E230H являются спектрографами высокого разрешения, $R = 50000$ и $R = 114000$ соответственно. Эффективная площадь данных спектрографов на длине волны, равной 215 нм, составляет 1000 и 254 см² соответственно [44]. LSS и COS с G230L решеткой, в свою очередь, являются спектрографами низкого разрешения, $R = 1000$ и $R \approx 2700$ (на длине волны 215 нм [43]). Эффективные площади

¹ https://wso-jcuva.ucm.es/WSO.UsersBook_rev_es.pdf

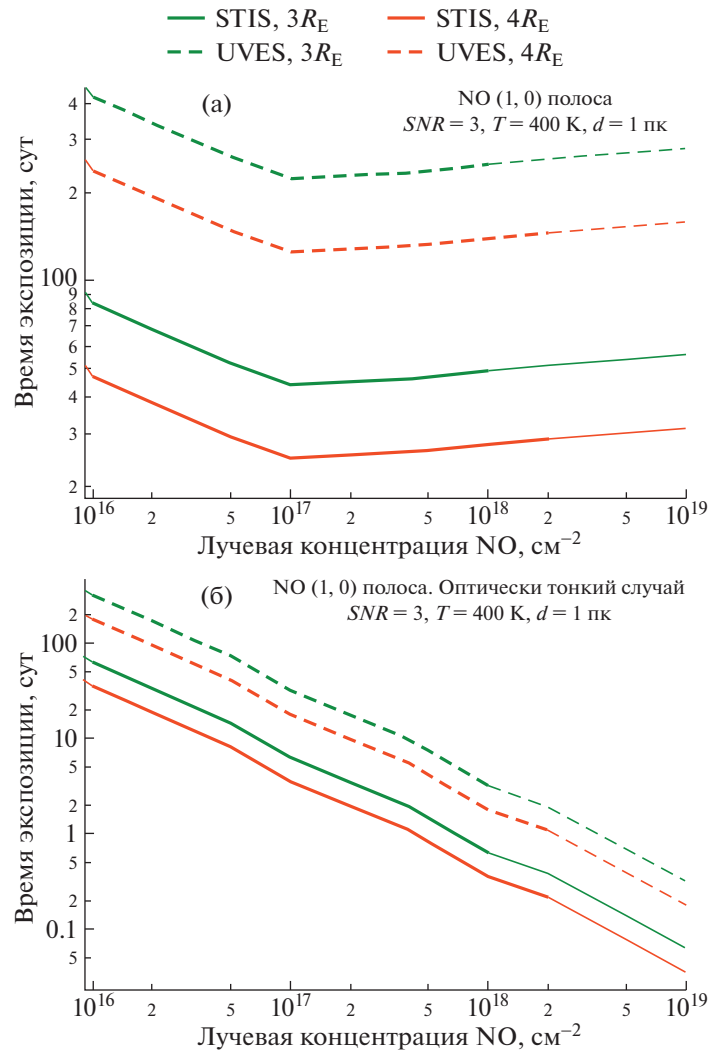


Рис. 2. Значения времени экспозиции для наблюдения эмиссии в NO (1,0) γ -полосе на разных модельных планетах, находящихся на расстоянии 1 пк в следующих случаях: а) оптически толстый случай, $SNR = 3$, б) оптически тонкий случай, $SNR = 3$. Зеленые линии соответствуют суб-Нептунам с $3R_E$ и красные линии – суб-Нептунам с $4R_E$. Пунктирные линии соответствуют вычислениям с параметрами STIS E230H и сплошные линии – вычислениям с параметрами UVES.

на той же длине волны равны, соответственно, 2000 и 720 см².

Таким образом, используя выражение (5), можно рассчитать время экспозиции, необходимое, чтобы пронаблюдать излучение окиси азота (в оптически тонком и толстом случаях) как в наиболее яркой резонансной (1,0) γ -полосе, так и в системе γ -полос, с заданным соотношением SNR . Вычисления были произведены для $SNR = 3$ и для разных типов планет, параметры которых приводятся в табл. 2.

Результаты вычислений времени экспозиции представлены на рис. 2 и 3. Рисунки 2 и 3 показывают зависимость времени экспозиции в днях от лучевой концентрации NO, см⁻², в оптически

толстом (а) и тонком (б) случаях излучения в (1,0) γ -полосе (рис. 2) и в системе γ -полос (рис. 3) окиси азота соответственно. Результаты, представленные на рис. 2, получены с использованием параметров спектрографов STIS (с E230H решеткой) (штриховые линии) и UVES (сплошные линии), на рис. 3 – с использованием параметров спектрографов COS (с G230L решеткой) (штриховые линии) и LSS (сплошные линии). Значение расстояния до рассматриваемых экзопланет берется равным 1 пк.

Стоит отметить, что для наглядности были также произведены вычисления времени экспозиции для лучевых концентраций, не входящих в принятый ранее диапазон для рассматриваемых экзопланет (табл. 2). Результаты данных вычисле-

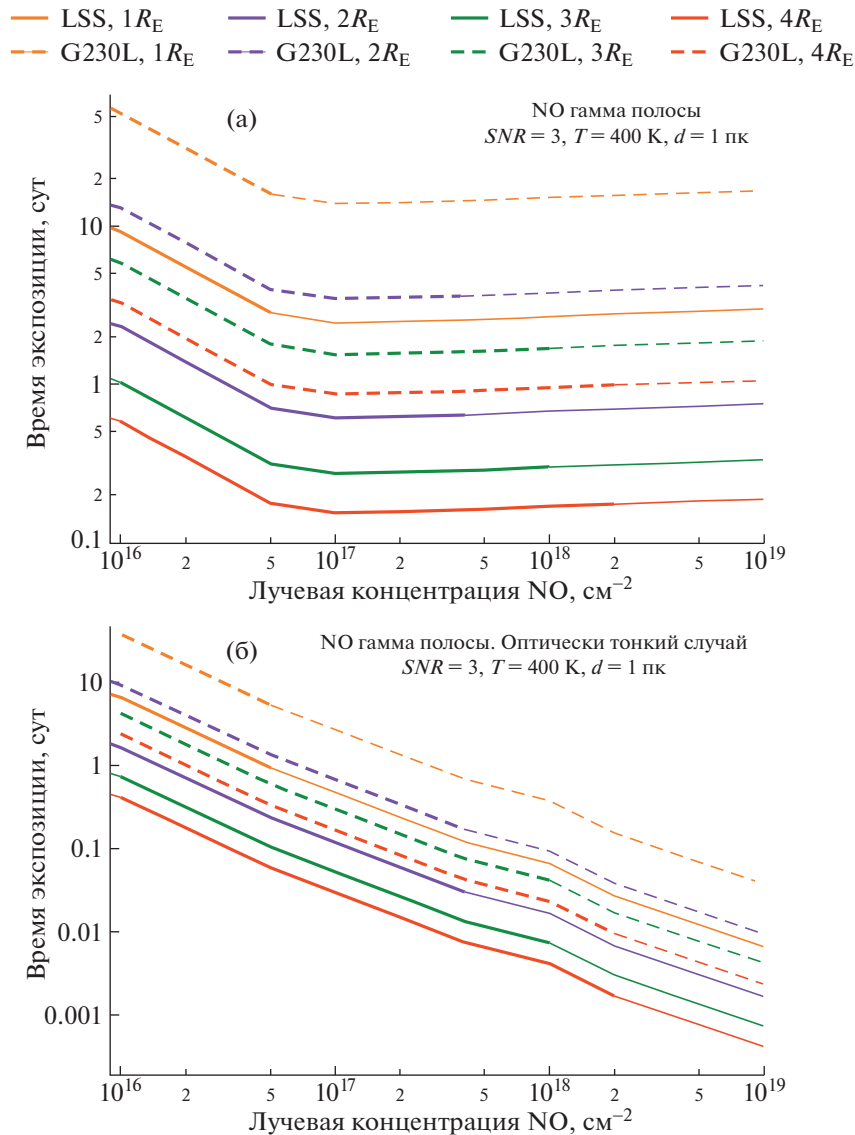


Рис. 3. Значения времени экспозиции для наблюдения эмиссии в системе γ -полосы NO на разных модельных планетах, находящихся на расстоянии 1 пк в следующих случаях: а) оптически толстый случай, $SNR = 3$, б) оптически тонкий случай, $SNR = 3$. Оранжевые линии соответствуют экзo-Землям с $1R_E$, фиолетовые линии – супер-Землям с $2R_E$, зеленые линии – суб-Нептунам с $3R_E$ и красные линии – суб-Нептунам с $4R_E$. Пунктирные линии соответствуют вычислениям с параметрами COS G230L и сплошные линии – вычислениям с параметрами LSS.

ний показаны тонкими линиями на рис. 2 и 3 и охватывают диапазон лучевых концентраций NO $10^{15} \text{ см}^{-2} - 10^{19} \text{ см}^{-2}$ для всех модельных планет.

Как следует из представленных результатов, наименьшие значения времени экспозиции достигаются при рассмотрении спектрографов UVES и LSS в качестве измерительных приборов. При этом можно ожидать, что с помощью спектрографов UVES и LSS значения времени экспозиции будут в 5 и 5.5 раза меньше, чем с помощью STIS и COS, соответственно, при заданном соотношении SNR . Иными словами, спектрографы UVES и LSS космической обсерватории WSO-UV

(Спектр-УФ) могут позволить достигнуть соотношения сигнал к шуму, в 2.2 и 2.3 раза большего, чем это возможно с помощью спектрографов STIS с E230H решеткой и COS с G230L решеткой телескопа HST, соответственно, при одинаковом времени накопления сигнала. Такое улучшение в результатах при рассмотрении UVES и LSS связано с большими ожидаемыми значениями квантовой эффективности, инструментальной чувствительности (что является следствием большего значения эффективной площади, $S_\lambda = \frac{A_{\text{eff}} \lambda d}{hc}$, и также достигается за счет специального антиот-

ражательного покрытия ПЗС [45]), пропускной способности.

Как и следовало ожидать, проведенные расчеты подтверждают, что в оптически тонком случае минимальное время экспозиции достигается при максимальном значении лучевой концентрации NO в атмосфере. В оптически толстом случае и в (1,0) γ -полосе, и в системе γ -полос время экспозиции сначала снижается с увеличением лучевой концентрации NO. Однако при значениях лучевой концентрации больше 10^{17} см⁻², влияние эффекта самопоглощения в линии становится существенным, и время, необходимое для регистрации сигнала эмиссии, возрастает.

4. РАСЧЕТЫ ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ ДЛЯ ТРАНЗИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ γ -ПОЛОСЫ NO

Косвенно наблюдать эмиссию атмосферы планеты можно при регистрации потоков от родительской звезды во время вторичного затмения планеты и вне его, т.е. $F_{\text{planet}} = (F_{\text{stellar}} + F_{\text{planet}}) - F_{\text{stellar}}$. Если оценивать только верхний предел возможности детектирования данной эмиссии и, следовательно, учитывать только статистический шум, а также сделать естественное предположение, что $F_{\text{stellar}} \gg F_{\text{planet}}$, то для вычисления соотношения SNR для планеты можно записать [41]:

$$SNR_{\text{planet}} = \frac{F_{\text{planet}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{stellar}}^2 + \sigma_{\text{planet}}^2}} = \frac{F_{\text{planet}}}{F_{\text{stellar}}} \frac{F_{\text{stellar}}}{\sqrt{2\sigma_{\text{stellar}}^2}} = \frac{F_{\text{planet}}}{F_{\text{stellar}}} \frac{SNR_{\text{stellar}}}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

Это выражение может быть преобразовано к виду [41]:

$$SNR_{\text{planet}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{R_p^2 I_p}{R_s^2 I_s} \sqrt{\frac{R_s^2}{d^2} I_s A t \frac{\lambda_c}{R} q}, \quad (7)$$

где $\frac{F_{\text{planet}}}{F_{\text{stellar}}} = \frac{R_p^2 I_p}{R_s^2 I_s}$ показывает, во сколько раз интенсивность излучения в данной полосе и размер звезды больше, чем у планеты; $SNR_{\text{stellar}} = \sqrt{\frac{R_s^2}{d^2} I_s A t \frac{\lambda_c}{R} q}$ — соотношение SNR для звезды; I_s — интенсивность излучения на центральной длине волны λ_c в $\frac{\text{Фотон}}{\text{с см}^2 \text{Å}}$; A — площадь телескопа; d — расстояние от измерительного прибора до звезды; t — время накопления сигнала; q — пропускная способность всего измерительного канала, зависящая от длины волны; $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$; R_p и R_s — радиусы

планеты и звезды соответственно; I_p — интенсивность излучения в атмосфере планеты в $\frac{\text{Фотон}}{\text{с см}^2 \text{Å}}$.

Коэффициент $\sqrt{2}$ указывает на различие сигнала планеты, находящейся в первичном или вторичном транзите.

Полагая, что $R_p \ll R_s$ и наклонение $i = 90^\circ$, а также используя следующее выражение для вычисления продолжительности транзита, T_d [41]:

$$T_d = \frac{P}{2\pi} 2 \arcsin\left(\frac{R_s}{a}\right), \quad (8)$$

где P — орбитальный период и a — орбитальное расстояние планеты, получаем, что время накопления сигнала, необходимое для достижения требуемого соотношения сигнал к шуму SNR_{set} , может быть вычислено следующим образом:

$$t = T_d \left(\frac{SNR_{\text{set}}}{SNR_{\text{planet}}} \right)^2. \quad (9)$$

В данном разделе приводятся результаты расчетов значений времени экспозиции для наблюдения излучения окиси азота в атмосферах исследуемых экзопланет в случае, когда данные планеты находятся во вторичном затмении у своих родительских звезд. Исследуется влияние спектров родительских звезд, лучевой концентрации NO в атмосфере, расстояния до рассматриваемых планет на значения времени экспозиции и определяются граничные возможности детектирования эмиссии NO.

4.1. Параметры экзопланет

В данном разделе, как и ранее, производятся вычисления значений времени экспозиции для экзо-Земель, супер-Земель, суб-Нептунов разных радиусов и масс, которые обладают N₂–O₂ доминантными атмосферами с различными лучевыми концентрациями окиси азота, диапазоны которых представлены в табл. 2. Кроме того, расчеты были также сделаны для нескольких подтвержденных экзопланет из NASA Exoplanet Archive² [46], которые расположены в зоне потенциальной обитаемости у своих родительских звезд и отстоят от наблюдателя на расстояниях, меньших 10 пк. Стоит уточнить, что на момент проведения вычислений количество подтвержденных экзопланет составляло 5060 (8819 кандидатов в экзопланеты), 96 из них расположены на расстояниях

² 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.

Таблица 3. Параметры планет для вычисления времени экспозиции. (Температура в верхней атмосфере принята равной 400 К. Заданное значение *SNR* равно 3)

| Тип планеты | Радиус, R_E | Расстояние, пк | Тип звезды | a , а.е. |
|----------------------------|---------------|----------------|------------|------------|
| экзо-Земля | 1 | 1–10 | — | — |
| супер-Земля | 2 | | | |
| суб-Нептун | 3.4 | | | |
| GJ1061 d (супер-Земля) | 1.64 | 3.670 | M5.5 | 0.054 |
| Tau Cet f (супер-Земля) | 1.85 | 3.603 | G8 | 1.334 |
| Proxima Cen b (экзо-Земля) | 1.08 | 1.3 | M5.5V | 0.0485 |
| GJ682 c (суб-Нептун) | 2.89 | 5.007 | M3.5V | 0.176 |
| GJ687 b (суб-Нептун) | 4.32 | 4.549 | M3V | 0.163 |
| GJ273 b (экзо-Земля) | 1.51 | 5.922 | M3.5 | 0.091 |
| Wolf 1061 c (супер-Земля) | 1.66 | 4.306 | M3.5 | 0.089 |
| GJ357 d (суб-Нептун) | 2.34 | 9.440 | M2.5V | 0.204 |
| GJ667 C e (супер-Земля) | 1.45 | 7.243 | M1.5V | 0.213 |
| GJ 514 b (суб-Нептун) | 2.13 | 7.618 | M0.5-1V | 0.422 |
| HD 20794 e (супер-Земля) | 2.03 | 6.003 | G8 | 0.509 |
| Tau Cet e (супер-Земля) | 1.81 | 3.603 | G8 | 0.538 |
| HD 192310 b (суб-Нептун) | 4.27 | 8.797 | K2V | 0.326 |
| GJ 229 A c (суб-Нептун) | 2.6 | 5.756 | M1V | 0.339 |
| GJ 667 C c (супер-Земля) | 1.77 | 7.244 | M1.5V | 0.125 |
| GJ 433 d (суб-Нептун) | 2.14 | 9.064 | M2V | 0.178 |
| GJ 832 c (суб-Нептун) | 2.18 | 4.964 | M1.5 | 0.163 |

менее 10 пк, и только несколько из этих 96 находятся в ЗПО. Полный перечень используемых в расчетах экзопланет и их параметры представлены в табл. 3.

Важно отметить, что многие из представленных в табл. 3 экзопланет классифицируются как суб-Нептуны. В данной работе, как уже было упомянуто, предполагается, что эти планеты могут потерять свою первичную атмосферу и приобрести устойчивую вторичную N_2-O_2 доминантную атмосферу, перейдя тем самым в класс супер-Земель.

4.2. Параметры родительской звезды

Одной из целей настоящего исследования является определение возможности наблюдения эмиссии потенциального биомаркера NO в γ -полосе в атмосферах экзопланет, которые находятся в ЗПО у звезд спектральных классов G-, K- и M. Однако существуют разные мнения касательно возможности существования биологической активности на планетах земного типа у маломассивных звезд.

Первоначально стоит отметить, что атмосферы планет, находящихся в ЗПО у звезд спектрального класса M и K, в отличие от звезд класса G,

подвержены сильному влиянию рентгеновского и жесткого ультрафиолетового потоков излучения на протяжении значительно большего времени [1, 47]. Так, например, Johnstone и др. [48] показали, что N_2-O_2 доминантная атмосфера с долей примеси CO_2 , равной 10%, будет нестабильна для потоков рентгеновского излучения, равных $5-10 \frac{\text{эрг}}{\text{с см}^2}$, которые для звезды солнечного типа были бы достигнуты примерно за 1 миллиард лет, и только за несколько миллиардов лет для M-карликов [3]. Также Johnstone и др. [49] определили, что планета земного типа, находящаяся в ЗПО у активной звезды, может полностью потерять атмосферу за время, меньше 0.1 Муг. Кроме того, в работе [50] было определено, что время убегающей атмосферы планеты в 1 бар, которая находится в ЗПО у Proxima Centauri b, составляет порядка 10 Муг. В своей работе Lammer и др. [1] заключают, что формирование плотной N_2-O_2 доминантной атмосферы на планете в ЗПО у M- и K-карликов скорее всего невозможно. Luger и др. [47], основываясь на собственных вычислениях, ставят под вопрос существование обитаемых планет вокруг M-карликов. Тем не менее в работах [41, 51–54] все же дается оценка для наблюдения молекулярных линий биомаркеров на планетах, роди-

Таблица 4. Параметры рассматриваемых звезд и характеристики орбит в центре зоны потенциальной обитаемости

| Тип звезды | T_{eff} , К | R_s | M_s | a , а.е. | P , сут | T_d , ч |
|---------------------|----------------------|-------|-------|------------|-----------|-----------|
| G2V (Солнце) | 5770 | 1 | 1 | 1 | 365 | 13.05 |
| K2V (HD 22049) | 4780 | 0.77 | 0.785 | 0.5284 | 158.25 | 8.25 |
| M1.5 (GJ 832) | 3657 | 0.48 | 0.45 | 0.1928 | 46.07 | 4.10 |
| M1.5V (GJ 667 C) | 3350 | 0.46 | 0.33 | 0.1551 | 38.80 | 4.12 |
| M4.5V (AD Leo) | 3400 | 0.41 | 0.45 | 0.153 | 32.56 | 3.12 |
| M5.5V (Proxima Cen) | 3054 | 0.141 | 0.118 | 0.0395 | 8.34 | 1.06 |
| G8 | 5440 | 0.85 | 0.68 | 0.7556 | 290.69 | 11.70 |
| K2 | 4960 | 0.77 | 0.785 | 0.5689 | 176.81 | 8.56 |
| M0 | 3800 | 0.62 | 0.6 | 0.2689 | 65.71 | 5.42 |
| M1 | 3600 | 0.49 | 0.49 | 0.1907 | 43.44 | 3.99 |
| M2 | 3400 | 0.44 | 0.44 | 0.1528 | 32.86 | 3.38 |
| M3 | 3250 | 0.39 | 0.36 | 0.1237 | 26.48 | 2.98 |
| M4 | 3100 | 0.26 | 0.2 | 0.0750 | 16.78 | 2.08 |
| M5 | 2800 | 0.2 | 0.14 | 0.0471 | 9.97 | 1.51 |

тельскими звездами которых являются М- и К-карлики.

Стоит также заметить, что анализ наблюдений показывает, что не все звезды солнечного типа демонстрируют ту же активность, что и Солнце [55].

В данной работе для сохранения полноты картины мы определяем возможность детектирования NO в атмосферах планет земного типа, находящихся в ЗПО как у маломассивных звезд (М- и К-класса), так и у звезд G-класса. Для этого используются реальные спектры: М-карликов GJ 832 и GJ 667 C из базы данных MUSCLES database³ [56–58]; активных М-карликов AD Leo и Proxima Centauri, звезды К-класса HD22049 и Солнца – с веб-сайта VPL [51, 52, 59]. Кроме того, предполагая гипотетическое существование спокойных (не активных) М-карликов и пренебрегая их сильной активностью в ЖУФ, в данной работе также используются звезды спектральных классов M0–M5, спектры которых аппроксимированы функцией Планка, как это было сделано в [41, 53]. Также предполагается, что за весь цикл наблюдений спектры рассматриваемых звезд остаются неизменными в исследуемом диапазоне длин волн (в реальности, спектр звезды может меняться ввиду вращения звезды и спорадической активности). Последние предположения являются достаточно грубыми, однако, остаются приемлемыми для проведения параметрических расчетов.

³ Для звезд GJ 832 и GJ 667 была использована версия 2.2 адаптированного панхроматического спектра звезд с разрешением в 1 Å из базы данных MUSCLES.

Таким образом, реальные спектры звезд, используемые в настоящем исследовании, соответствуют спектральным классам M1.5, M4.5V, M5.5V K2V и G2V, тогда как спектры, аппроксимированные функцией Планка, соответствуют спектральным классам M0–M5, G8 и K2. Параметры рассматриваемых звезд представлены в табл. 4. Спектры реальных звезд показаны на рис. 4. Рисунок 4а с демонстрирует спектральное распределение энергии в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне. На рис. 4б показан спектр в ультрафиолетовом диапазоне. Также на рис. 5 показаны средние потоки в центре ЗПО от всех рассматриваемых звезд в диапазоне длин волн 170–240 нм.

Поток от рассматриваемых звезд был масштабирован так, чтобы поверхностная температура модельной планеты, находящейся в ЗПО у данных звезд, была равна 288.15 К. Коэффициенты масштабирования были взяты из работы [54]. Стоит отметить, что при рассмотрении реальных планетных систем масштабирование потока от родительской звезды не производилось.

В предположении, что рассматриваемые планеты обладают таким альбедо же, как Земля, и имеют похожий парниковый эффект, было использовано следующее выражение для вычисления большой полуоси орбиты, расположенной в центре ЗПО [53]:

$$a_{\text{HZ}} = \left(\frac{T_s}{T_{\text{Sun}}} \right)^2 \left(\frac{R_s}{R_{\text{Sun}}} \right). \quad (10)$$

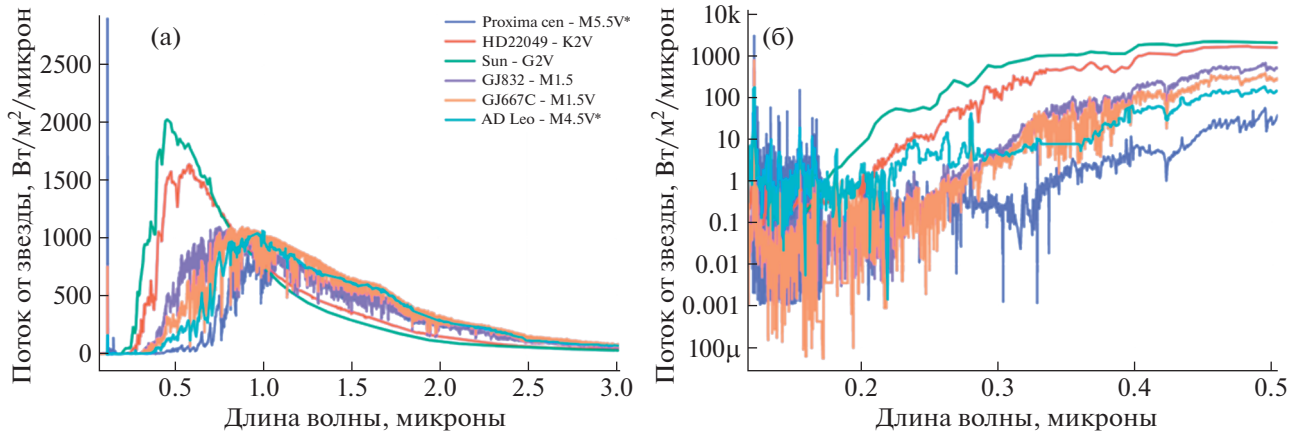


Рис. 4. Спектры реальных звезд, рассматриваемых в данном исследовании, масштабированные так, чтобы поверхностная температура планет достигала 288.15 К. В случае а) представлен УФ и ИК спектр с линейными осями и в случае б) представлен УФ спектр с логарифмическими осями.

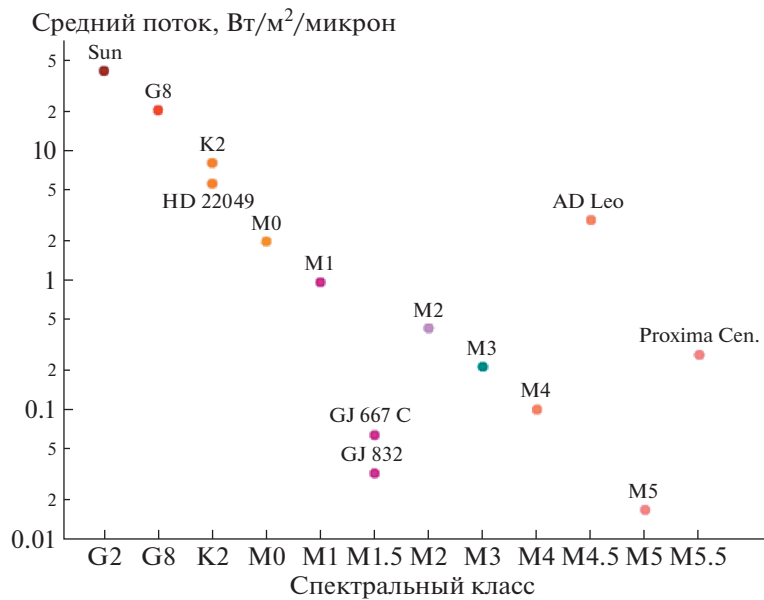


Рис. 5. Средние потоки в центре ЗПО от всех рассматриваемых звезд в диапазоне длин волн 170–240 нм.

Орбитальный период планеты в центре ЗПО был вычислен из тех же предположений, с помощью следующего выражения:

$$P_{HZ} = 365.25 \times 24 (a_{HZ})^{3/2} \left(\frac{M_s}{M_{Sun}} \right)^{-1/2} \quad (11)$$

Рассчитанные по формулам (10) и (11) параметры орбит, а также продолжительность транзитов (8) в часах были добавлены в табл. 4. Стоит отметить, что для всех планет рассмотрены только круговые орбиты. Все представленные предположения являются приемлемыми в наших параметрических вычислениях.

Также для полноты картины в табл. 5 представлены потоки рассматриваемых реальных звезд в линии Лайман-альфа ($Ly-\alpha$) и в мягком рентгеновском диапазоне ($<100 \text{ \AA}$), взятые из работы [60]. Как известно, поток в линии $Ly-\alpha$ сильно влияет на химию верхних атмосфер экзопланет, т.к. под действием данного потока изменяются сечения фотодиссоциации молекул H_2O , CO_2 и других [34]. Потоки рентгеновского излучения, в свою очередь, влияют на убегание атмосферы планеты. Стоит отметить, что в работе [60] потоки в линии $Ly-\alpha$ восстановлены с учетом межзвездного поглощения. Однако техника вос-

Таблица 5. Потоки реальных звезд в линии Лайман-альфа и в мягком рентгеновском диапазоне, $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ с}}$, в центре зоны потенциальной обитаемости. Данные взяты из [60]. Для рентгеновских потоков указаны ссылки на работы, из которых взяты данные в [60]

| Тип звезды | a , а.е. | Поток в линии Ly- α , $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ с}}$ | Рентгеновский поток, $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ с}}$ |
|---------------------|------------|---|---|
| G2V (Солнце) | 1 | 9.15 | 2.85 ¹ |
| K2V (HD 22049) | 0.5284 | 77.00 | 20.16 [62] |
| M1.5 (GJ 832) | 0.1928 | 139.08 | 5.76 [62] |
| M1.5V (GJ 667 C) | 0.1551 | 64.02 | 10.93 ² |
| M4.5V (AD Leo) | 0.153 | 398.56 | 815.93 [63] |
| M5.5V (Proxima Cen) | 0.0395 | 192.92 | 91.01 [64] |

¹Данные переданы Linsky и др. [60] от M. Snow в частном порядке (2012).

²Данные переданы Linsky и др. [60] от J. Schmitt в частном порядке (2012).

становления отличается от той, что была использована в работе [61], и основана на корреляции потока в линии Ly- α с потоками в других линиях (O I, C II и C IV), которые не испытывают межзвездного поглощения. При этом учитываются спектральный класс звезды и ее активность. В данной работе, к сожалению, не приведены ширины линии Ly- α для каждой звезды.

Звезды, спектры которых аппроксимированы функцией Планка, обозначены в дальнейшем тексте как “спокойные”. В заключение данного раздела отметим, что существует достаточно много неопределенностей, связанных с заданием параметров рассматриваемых звезд и экзопланет. Так, например, принято считать, что Proxima Centauri является активной звездой, однако Wunderlich и др. [54] классифицировали звезду Proxima Centauri как неактивную, а France и др. [56], ссылаясь на работу [65], определили данную звезду как слабоактивную. Очевидно, что единственный способ провести корректный анализ в данном случае — это рассмотрение всего возможного диапазона параметров, что мы и постарались учесть в расчетах.

4.3. Результаты расчетов

Используя выражения (7–9), мы вычислили значения времени экспозиции, необходимые для наблюдения излучения окиси азота (в оптически толстом и тонком случаях) в резонансной (1,0) γ -полосе и в системе γ -полос для случая, когда

планеты с N₂–O₂ доминантными атмосферами находятся во вторичном затмении у своих родительских звезд. В вычислениях использовались следующие параметры: соотношение SNR, равное 3; лучевые концентрации окиси азота в диапазоне из табл. 2. Расстояния между измерительным прибором и исследуемыми планетами варьировались в диапазоне от 1 до 10 пк. В расчетах использовались реальные и аппроксимированные функции Планка спектры родительских звезд спектральных классов M0–M7, K2, G8 и G2 (табл. 4 и рис. 6). В качестве параметров измерительного прибора использовались данные спектрографов WSO-UV (Спектр-УФ) UVES и LSS.

4.3.1. Влияние лучевой концентрации NO, спектров родительских звезд и разрешения на значения времени экспозиции. На рис. 6 и 7 показана зависимость значений времени экспозиции в сутках от лучевой концентрации окиси азота для оптически тонкого (рис. 5) и толстого (рис. 6) случаев излучения NO в системе γ -полос при соотношении SNR, равном 3, и расстоянии до модельных планет, принятым равным 1 пк. Результаты представлены для разрешения $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$, равного 1000, что соответствует спектрографу LSS космического телескопа WSO-UV (Спектр-УФ). В качестве спектров родительских звезд использовались: реальный спектр Солнца (G2V), спектры “спокойных” звезд G8 и M0 спектрального класса, а также реальный спектр AD Leo (M4.5V).

Стоит отметить, что аналогично результатам, которые были представлены ранее в разделе 3, минимальное значение времени экспозиции в транзитах достигается при лучевой концентрации NO, равной 10^{17} см^{-2} , в оптически толстом случае излучения NO; и при лучевой концентрации, равной верхнему пределу диапазона (табл. 2), в оптически тонком случае излучения.

Из представленных на рис. 6 и 7 результатов видно различие в значениях времени экспозиции при использовании спектров реальных звезд и спектров “спокойных” звезд. Так, минимальное время экспозиции при регистрации излучения NO в системе γ -полос в атмосфере суб-Нептуна-2 (оптически тонкий случай излучения), который находится во вторичном транзите у звезды типа AD Leo (M4.5V), должно составить порядка семи минут (менее одного транзита, см. табл. 4) (рис. 7с). В то же время экспозиция составляет 13 мин (рис. 7d), когда суб-Нептун-2 находится в затмении у “спокойной” звезды более раннего спектрального класса M0 (для анализа см. рис. 5). Если родительской звездой этой планеты является Солнце, то время экспозиции для того же случая излучения уменьшается до двух минут (рис. 7с).

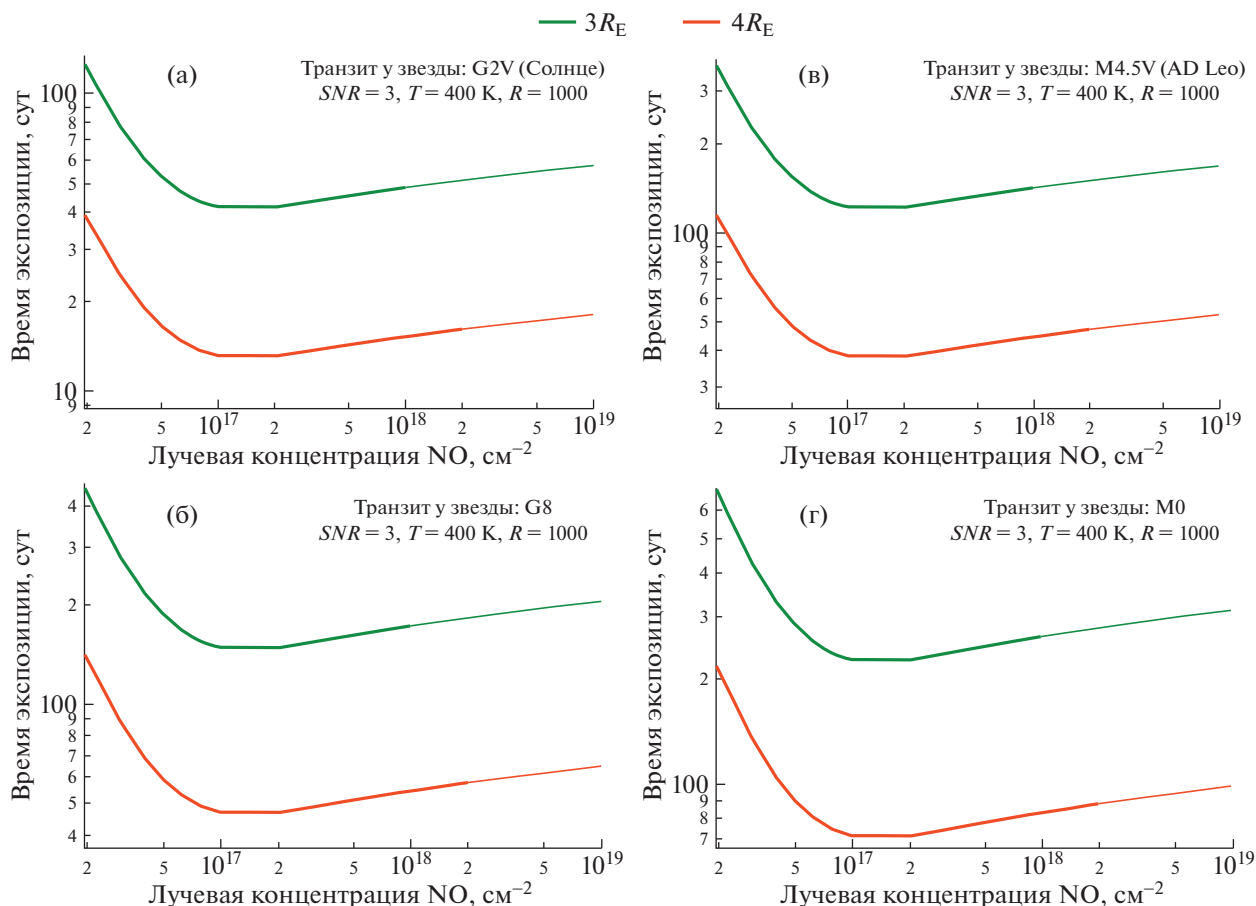


Рис. 6. Значения времени экспозиции в сутках для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос (оптически толстый случай излучения) на разных модельных планетах, родительская звезда которых: а) Солнце (G2V класса); б) G8 класса; в) AD Leo (M4.5V класса); г) M0 класса. Приняты следующие параметры: $SNR = 3$, $R = 1000$ (LSS), расстояние до планетных систем = 1 пк. Зеленые линии соответствуют суб-Нептунам с $3R_E$ и красные линии – суб-Нептунам с $4R_E$.

Важно отметить, что результаты, в которых значения времени экспозиции составляют меньше одного транзита (продолжительность транзита указана в табл. 4), стоит интерпретировать как увеличение соотношения сигнал к шуму больше заданного (т.е. $SNR > 3$) за время, равное одному транзиту (см. выражение (9)). Также стоит уточнить, что здесь и далее при указании значений времени экспозиции не учитывается время между транзитами.

В табл. 6 показаны значения времени экспозиции в сутках и часах для спектральных разрешений LSS ($R = 1000$) и UVES ($R = 50000$). Для сравнения добавлены расчеты для $R = 200$ (которого также достаточно, чтобы разрешить систему γ -полос окиси азота). При этом рассматривается оптически тонкий случай излучения окиси азота и используются спектры тех же звезд, что и на рис. 6 и 7. Расстояние до модельных планет принято равным 5 пк, лучевая концентрация NO соответствует верхнему пределу диапазона (табл. 2).

Из анализа полученных результатов следует, что использование спектрографа с меньшим разрешением позволяет снизить время накопления сигнала.

4.3.2. Влияние расстояния до планет, размеров планет, спектров родительских звезд и разрешения на значения времени экспозиции. На рис. 8–9 представлена зависимость значений времени экспозиции в сутках от расстояния до рассматриваемых планетных систем при рассмотрении оптически тонкого случая излучения окиси азота и лучевой концентрации NO, равной верхнему пределу диапазона лучевых концентраций. На рис. 8 показаны планетные системы, у которых в качестве спектра родительской звезды используется реальный спектр. Для построения рис. 9 использованы спектры “спокойных” звезд. Расчеты выполнены с использованием параметров спектрографа LSS ($R = 1000$).

Стоит заметить, что реальные экзопланеты (табл. 3) добавлялись на рис. 8, только если их ро-

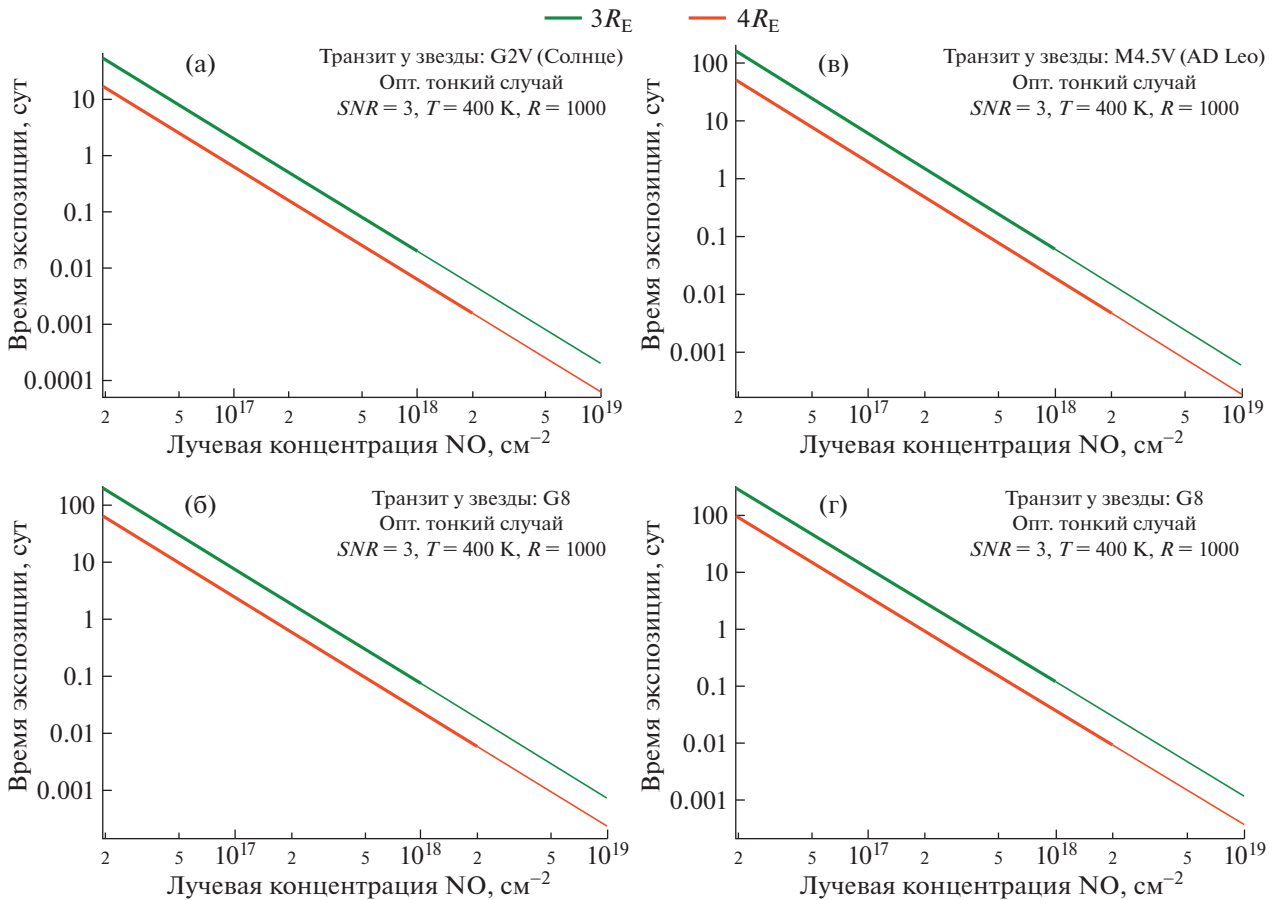


Рис. 7. Значения времени экспозиции в сутках для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос (оптически тонкий случай излучения) на разных модельных планетах, родительская звезда которых: а) Солнце (G2V класса); б) G8 класса; в) AD Leo (M4.5V класса); д) M0 класса. Приняты следующие параметры: $SNR = 3$, $R = 1000$ (LSS), расстояние до планетных систем = 1 пк. Зеленые линии соответствуют суб-Нептунам с $3R_E$ и красные линии – суб-Нептунам с $4R_E$.

дительская звезда совпадала со звездой, используемой в расчетах (табл. 4) (кроме планеты HD 192310, которая была добавлена, т.к. спектральный класс ее родительской звезды идентичен со спектральным классом звезды HD 22049). При этом на рис. 9 реальные экзопланеты были добавлены таким образом, чтобы спектральный класс их родительской звезды совпадал со спектральным классом звезды, рассматриваемой в данной работе.

Для сравнения возможностей различных спектрографов при наблюдении эмиссии окиси азота на рис. 10 показана та же зависимость, что и на рис. 9, при этом добавлены результаты расчетов с использованием разрешения $R = 50\,000$ (UVES), $R = 1000$ (LSS) и $R = 200$. В качестве планет рассматриваются суб-Нептуны-3 ($4R_E$).

Наилучшие результаты вычислений времени экспозиции для реальных экзопланет представлены в табл. 7. Некоторые планеты в данной таблице (HD 192310, GJ832c) были помечены как RS

(если спектр их родительской звезды соответствует спектру реальной звезды) и QS (если рассматривается спектр “спокойной” звезды, аппроксимированный функцией Планка).

Случай 1. Реальные звезды – реальные и модельные планеты

Как можно заметить, из всех рассмотренных реальных планетных систем эмиссию окиси азота в системе γ -полос можно задетектировать с помощью спектрографа LSS за разумное наблюдательное время (которое мы приняли равным 120 ч) на планете HD 192310 (рис. 8, табл. 7). Время экспозиции в оптически тонком случае излучения окиси азота составляет 26.9 ч.

При рассмотрении модельных планет с реальными звездами наблюдения также возможны с LSS только в оптически тонком случае излучения NO. Так, для суб-Нептунов-3 ($4R_E$), если они находятся в ЗПО у звезды типа Солнца, детектирование становится возможным, если расстояние до таких планетных систем < 55 пк; у звезд типа

Таблица 6. Значения времени экспозиции в сутках (и часах) для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос (в оптически тонком случае) на разных планетах с $SNR = 3$, разными разрешением: 200, 1000 (LSS), 50000 (UVES). Сделаны следующие предположения: лучевая концентрация NO равна верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2), температура в верхней атмосфере равна 400 К, планетная система находится на расстоянии 5 пк от Земли

| Тип Звезды | Радиус, R_E | $R = 200$ | $R = 1000$ | $R = 50000$ |
|-------------------|---------------|----------------------|------------|-------------|
| M4.5V (AD Leo) | 1 | >15 ¹ сут | >15 сут | >15 сут |
| | 2 | 9.7 сут | >15 сут | |
| | 3 | 7.4 ч | 1.5 сут | |
| | 4 | 0.5 ч | 2.9 ч | 6.1 сут |
| M0 | 1 | >15 сут | >15 сут | >15 сут |
| | 2 | | | |
| | 3 | 13.7 ч | 2.9 сут | |
| | 4 | 1.1 ч | 5.4 ч | 11.3 сут |
| G8 | 1 | >15 сут | >15 сут | >15 сут |
| | 2 | 11.9 сут | | |
| | 3 | 9.0 ч | 1.8 сут | |
| | 4 | 0.7 ч | 3.6 ч | 7.5 сут |
| G2V (Солнце) | 1 | >15 сут | >15 сут | >15 сут |
| | 2 | 3.1 сут | 15 сут | |
| | 3 | 2.4 ч | 12.6 ч | |
| | 4 | 0.2 ч | 1 сут | 1.9 сут |

¹В случаях, когда время экспозиции значительно превышает разумное наблюдательное время, в таблице указывается значение >15 сут. Это значение в три раза превышает установленное нами приемлемое наблюдательное время.

Proxima Cen (<50 пк); AD Leo (<35 пк); HD 22049 (<18 пк); GJ 667 C (<5 пк); GJ 832 (<4 пк) (рис. 8). Границы наблюдаемости для супер-Земель-1 ($2R_E$) в оптически тонком случае излучения рас-

ширяются только при использовании спектрографа меньшего разрешения $R = 200$ и увеличении лучевой концентрации NO вдвое выше заданного диапазона (табл. 2). Эмиссию NO в атмосферах данных планет в этом случае можно наблюдать, если они вращаются вокруг звезд типа Солнца и находятся на расстоянии <13 пк от телескопа; Proxima Cen (<11 пк); AD Leo (<8 пк); HD 22049 (<5 пк).

Случай 2. “Спокойные” звезды – реальные и модельные планеты

Ситуация улучшается при рассмотрении планетных систем со “спокойными” родительскими звездами. Так, в оптически тонком случае время экспозиции с LSS составляет 13.2 ч для GJ687 b и 15 ч для планеты HD 192310 (табл. 7, рис. 9). Однако, чтобы за разумное время задетектировать сигнал эмиссии на таких планетах, как GJ229 A c, GJ682 c и GJ 832 c, необходимо использовать спектрограф меньшего разрешения $R = 200$. Результаты в этом случае составляют 2.93, 2.64 и 4.41 сут соответственно (табл. 7).

Что касается модельных планет, находящихся в ЗПО у “спокойных” звезд спектральных классов K2, G8, M0–M5, то наблюдение излучения окиси азота в системе γ -полос (оптически тонкий случай) в атмосферах данных планет возможно за время, равное 100 ч наблюдений. Данное утверждение справедливо для суб-Нептунов-1 и -2, при этом доступный для детектирования диапазон расстояний до планетных систем составляет 2–30 пк (диапазон зависит от размеров планеты и спектрального класса звезды, см. Заключение, табл. 8). Однако, чтобы с помощью спектрографа LSS наблюдать эмиссию NO на супер-Землях-1, необходимо, чтобы лучевая концентрация окиси азота в атмосферах данных планет достигала $7 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, если данная планета находится в ЗПО у звезды G8 класса (при расстоянии до пла-

Таблица 7. Значения времени экспозиции, для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос для разных планет во время их вторичного затмения с $SNR = 3$, $R = 1000$ (LSS). Сделаны следующие предположения: рассматривается оптически тонкий случай излучения; Лучевая концентрация NO равна верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2); температура в верхней атмосфере равна 400 К. RS – соответствует спектру реальной звезды, QS – соответствует спектру “спокойной” звезды. Жирным шрифтом отмечены наилучшие результаты

| Наименование планеты | Тип планеты | Родительская звезда | d , pc | Радиус, R_E | Время экспозиции, сут | |
|----------------------|-------------|---------------------|----------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | | $R = 1000$ (LSS) | $R = 200$ |
| GJ229 A c | суб-Нептун | M1V | 5.756 | 2.6 | 14.65 | 2.93 |
| GJ514 b | суб-Нептун | M0.5-1V | 7.618 | 2.13 | 26.19 | 5.24 |
| HD 192310 b | суб-Нептун | K2V | 8.797 | 4.27 | 0.63 (QS) 1.12 (RS) | 0.12 (QS) 0.22 (RS) |
| GJ682 c | суб-Нептун | M3.5V | 5.007 | 2.89 | 13.21 | 2.64 |
| GJ687 b | суб-Нептун | M3V | 4.549 | 4.32 | 0.55 | 0.11 |
| GJ 832 c | суб-Нептун | M1.5V | 4.964 | 2.18 | 22.05 (QS) | 4.41 |

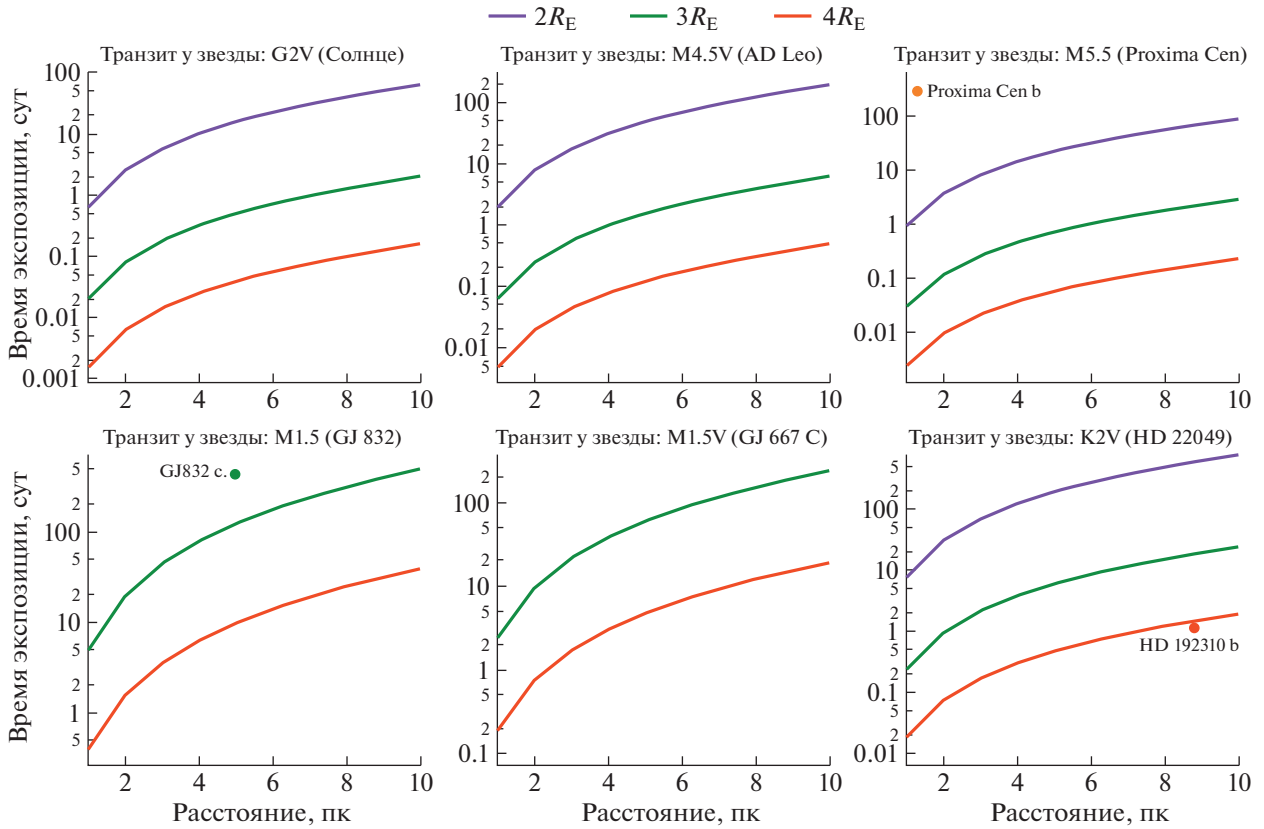


Рис. 8. Значения времени экспозиции, в сутках, для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос в оптически тонком случае с $SNR = 3$, $R = 1000$, лучевой концентрацией NO, равной верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2), для разных модельных и реальных планет, которые вращаются вокруг разных реальных звезд и расположены на разных расстояниях от Земли 1–10 пк. Фиолетовые линии соответствуют супер-Землям с $2R_E$, зеленые линии – суб-Нептунам с $3R_E$ и красные линии – суб-Нептунам с $4R_E$. Желтая точка соответствует экзo-Земле с $1R_E$.

нетной системы, равно 5 пк), и $7 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$, если планета вращается вокруг звезды класса M5 (при том же расстоянии до планетной системы).

Возможность детектирования также повышается при снижении разрешения спектрографа до $R = 200$: в этом случае окись азота в атмосферах су-

Таблица 8. Граничные расстояния до разных планетных систем с модельными планетами и “спокойными” звездами (и Солнцем) для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос в оптически тонком и толстом случаях с $SNR = 3$, $R = 1000$ (LSS), когда лучевая концентрация NO равна верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2) и равна 10^{17} см^{-2} соответственно. Пустые ячейки соответствуют невозможности детектирования эмиссии

| Родительская звезда | Граничные расстояния, пк | | |
|---------------------|---|--------------|--------------|
| | Оптически тонкий случай | | |
| | Лучевая концентрация NO = верхнему пределу из табл. 2 | | |
| | супер-Земля-1 | суб-Нептун-1 | суб-Нептун-2 |
| Солнце | 4 | 16 | 55 |
| G8 | 3 | 8 | 30 |
| K2 | 2 | 6 | 22 |
| M0 | 2 | 7 | 25 |
| M1 | 1 | 5 | 16 |
| M2 | — | 4 | 14 |
| M3 | — | 3 | 12 |
| M4 | — | 2.5 | 10 |
| M5 | — | 2 | 6 |

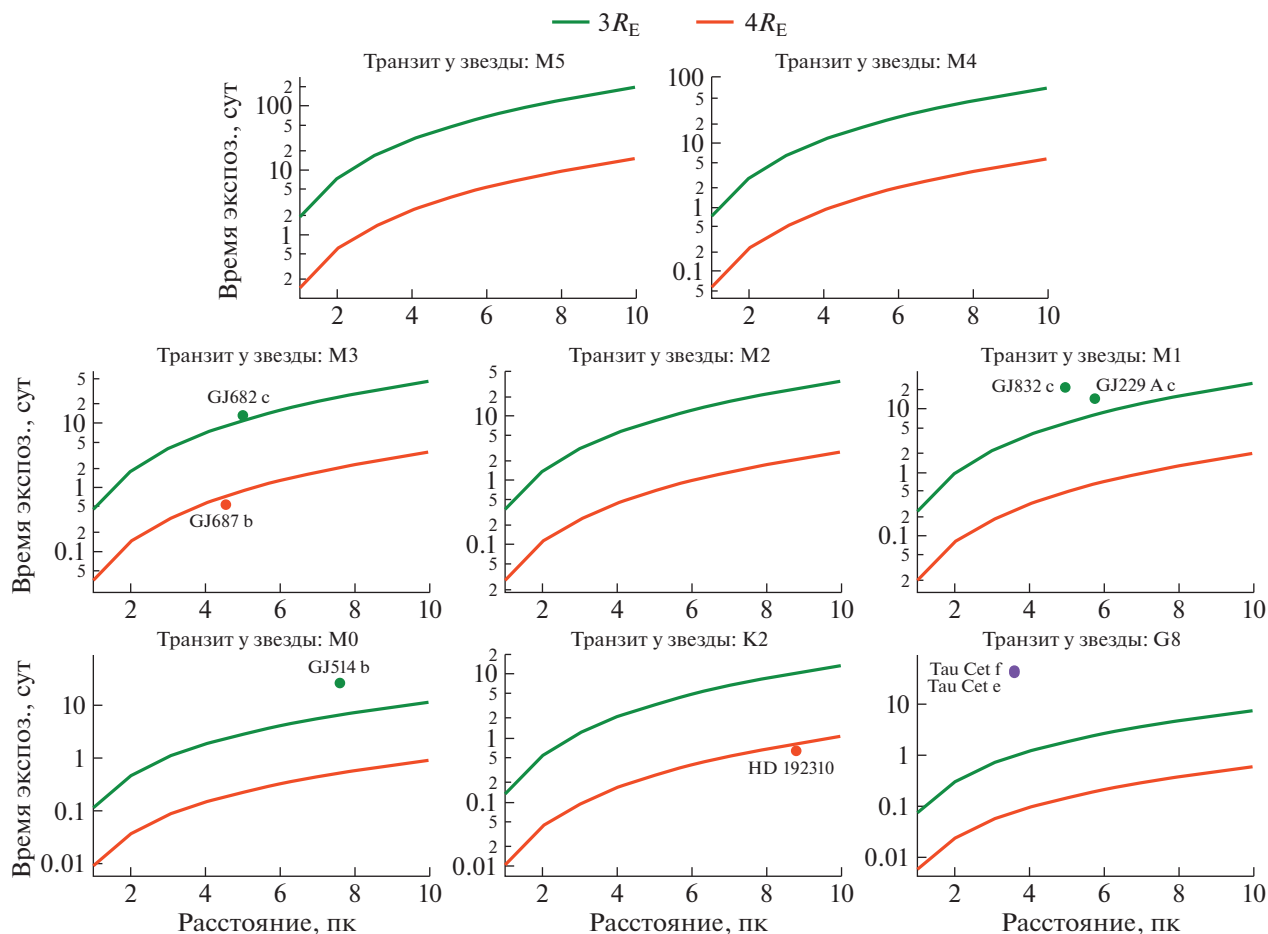


Рис. 9. Значения времени экспозиции, в транзитах, для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос в оптически тонком случае с $SNR = 3$, $R = 1000$, лучевой концентрацией NO, равной верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2), для разных модельных и реальных планет, которые вращаются вокруг разных “спокойных” звезд и расположены на разных расстояниях от Земли 1–10 пк. Зеленые линии соответствуют суб-Нептунам с $3R_E$ и красные линии – суб-Нептунам с $4R_E$. Фиолетовые точки соответствуют супер-Землям с $2R_E$.

пер-Земель-1 можно наблюдать, если данные планеты находятся в ЗПО у звезд спектральных классов K2, G8, M0–M4, расстояние до планетных систем составляет 1–5 пк, лучевая концентрация NO соответствует верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2).

К сожалению, анализ результатов показал, что при рассмотрении оптически толстого случая излучения окиси азота значения времени экспозиции, в большинстве случаев, превышают разумное время (120 ч) наблюдений, за которое можно задетектировать сигнал с помощью спектрографов Спектр-УФ. При использовании спектрографа с разрешением $R = 200$ возможность детектирования в рассматриваемом случае увеличивается, но все же остается ограниченной. Так, за 100 ч наблюдений можно наблюдать эмиссию NO (в оптически толстом случае) на модельном суб-Нептуне-2, который находится в ЗПО у звезды

солнечного типа, лишь на малых расстояниях (<2 пк) от Земли.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Ввиду предполагаемых лучших технических характеристик, потенциальные возможности для наблюдений в ближнем ультрафиолетовом диапазоне у спектрографов UVES и LSS комического телескопа WSO-UV (Спектр-УФ) выше, чем у спектрографов STIS и COS телескопа HST: UVES и LSS могут позволить достичь соотношения SNR , как минимум в 2.2 и 2.3 раза больше, чем это возможно с помощью STIS и COS, соответственно, при одинаковых значениях времени накопления сигнала.

2. С помощью спектрографа LSS космического телескопа WSO-UV (Спектр-УФ) можно получить следующие результаты при наблюдении по-

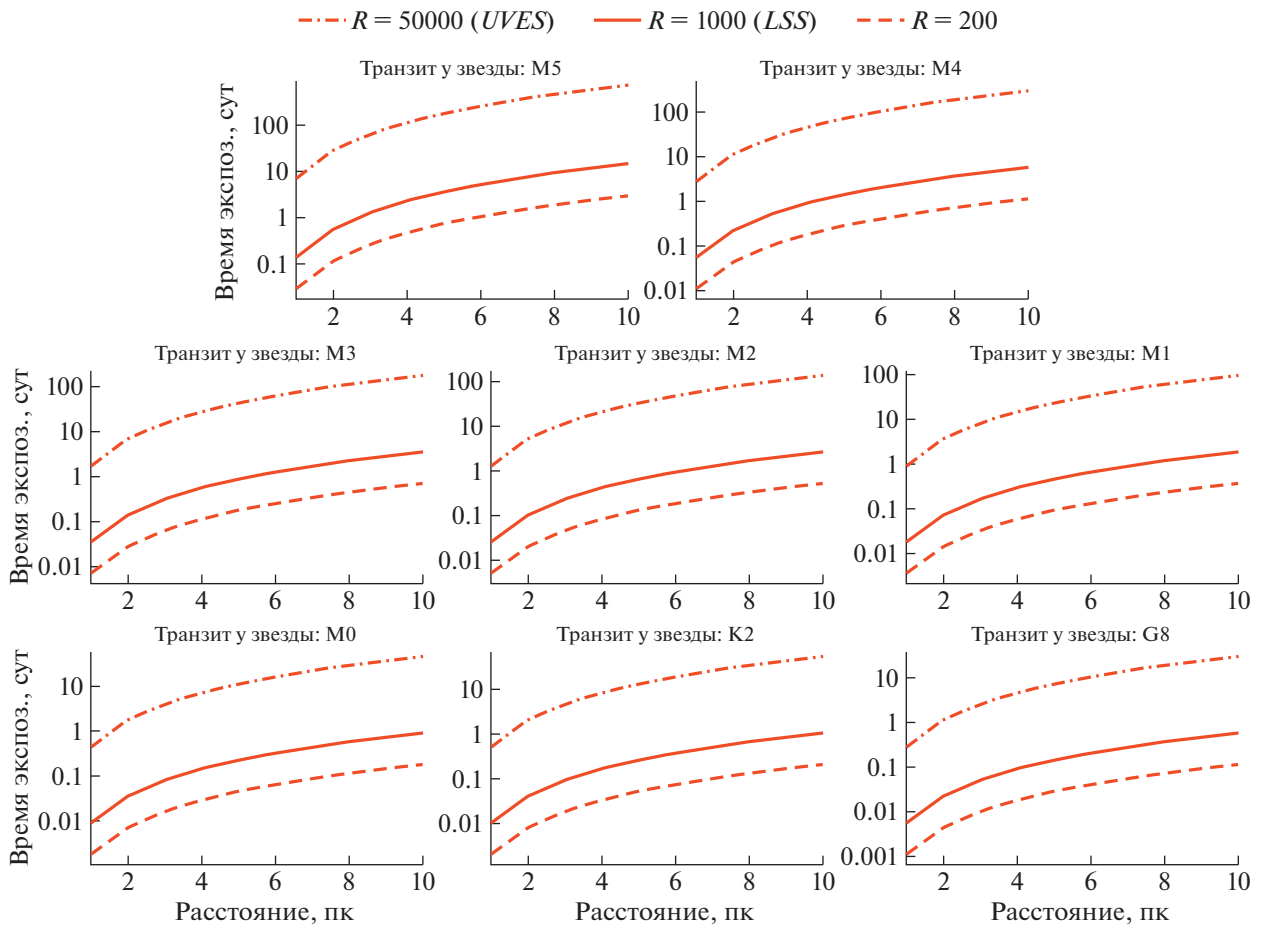


Рис. 10. Значения времени экспозиции, в транзитах, для наблюдения эмиссии NO в системе γ -полос в оптически тонком случае с $SNR = 3$, $R = 1000$ (LSS) – сплошные линии, $R = 50000$ (UVES) – пунктирные линии с точкой, $R = 200$ – пунктирные линии. Рассматривается модельная планета суб-Нептун-2 с лучевой концентрацией NO, равной верхнему пределу заданного диапазона (табл. 2), вращающаяся вокруг “спокойных” звезд. Расстояние до планетных систем варьируется от 1 до 10 пк.

тенциального биомаркера – γ -полосы NO в оптически тонких атмосферах экзопланет земного типа. (Предполагается, что как и для атмосферы Земли, излучение в γ -полосе в атмосферах экзопланет земного типа является оптически тонким, за исключением колебательной полосы (1,0).

2.1. Для экзo-Земель при принятых параметрах атмосферы детектирование эмиссии NO с помощью данного спектрографа невозможно за разумное наблюдательное время, принятое равным 120 ч. Условия, при которых возможность наблюдения окиси азота на данных экзопланетах появляется, указаны в табл. 9.

2.2. Использование данного спектрографа может позволить за разумное время задетектировать эмиссию NO в атмосферах супер-Земель, которые находятся в ЗПО у звезд солнечного типа и звезд спектрального класса G8, K2, M0, M1, при небольших расстояниях до данных планетных си-

стем (<4 пк). Область допустимых для детектирования расстояний расширяется при увеличении лучевых концентраций окиси азота в два и более раз (см. табл. 9).

2.3. Также наблюдения рассматриваемой эмиссии с помощью LSS возможны для следующих реальных экзопланет, на которых предполагается существование устойчивой вторичной N_2-O_2 доминантной атмосферы: HD 192310 b – время экспозиции составляет 26.9 ч; GJ687 b – время экспозиции составляет 13.2 ч (при условии, что родительской звездой данной планеты является спокойная звезда M3V спектрального класса).

3. Проведенные расчеты показали, что наблюдение эмиссии NO в γ -полосе с помощью спектрографа LSS в оптически тонких атмосферах суб-Нептунув ($3-4 R_E$) возможно, если данные планеты находятся в ЗПО у звезд, спектр которых соответствует Солнцу, Proxima Cen., AD Leo,

Таблица 9. Граничные лучевые концентрации NO в атмосферах модельных планет, которые находятся во вторичном затмении у “спокойных” звезд и Солнца, и расстояние до которых равно 5 пк — необходимые для того, чтобы наблюдать эмиссию NO в системе γ -полос за 5 орбит WSO-UV (Спектр-УФ). $SNR = 3$, $R = 1000$ (LSS), температура в верхней атмосфере равна 400 К. Стандартный диапазон — означает диапазон лучевых концентраций из табл. 2

| Родительская звезда | Граничные лучевые концентрации NO, см ⁻² . Оптически тонкий случай | | | |
|---------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | экзо-Земля | супер-Земля-1 | суб-Нептун-1 | суб-Нептун-2 |
| Солнце | 3×10^{18} | 7×10^{17} | Стандартный диапазон | Стандартный диапазон |
| G8 | 5×10^{18} | 1.5×10^{18} | | |
| K2 | 7×10^{18} | 2×10^{18} | | |
| M0 | | | | |
| M1 | 1×10^{19} | 3×10^{18} | | |
| M2 | $>1 \times 10^{19}$ | | 1.5×10^{18} | |
| M3 | | | | |
| M4 | | 4×10^{18} | 2×10^{18} | |
| M5 | | 7×10^{18} | 3×10^{18} | |

HD 22049, GJ 667 C, GJ 832. В этом случае граничные расстояния до планетных систем, при которых возможно детектирование рассматриваемой эмиссии за 120 ч наблюдений, варьируются от 4 до 55 пк. Данный диапазон зависит от спектрального класса звезды и размера планеты. Если спектр звезды соответствует спектру “спокойных” звезд спектральных классов G8, K2, M0–M5, диапазон граничных расстояний составляет 2–30 пк (см. табл. 8). Стоит отметить, что по современным оценкам число планетных систем, удовлетворяющих этим ограничениям, достигает 25 в пределах 10 пк (табл. 4, а также работа [66]).

4. Расчеты с использованием параметров LSS также показали, что время экспозиции при рассмотрении оптически толстого случая излучения окиси азота превышает время, соответствующее 120 ч наблюдений.

5. Возможность детектирования эмиссии NO в γ -полосе увеличивается при снижении разрешения спектрографа до $R = 200$. Так, например, наблюдения данной эмиссии в оптически тонком случае излучения возможны для планет GJ229 A c (время экспозиции 70 ч), GJ682 c (62 ч) и GJ832 c (100 ч), при условии что родительскими звездами этих экзопланет являются “спокойные” звезды спектральных классов M1V, M3.5V, M1.5V соответственно. Отметим также, что использование данного спектрографа увеличивает диапазон граничных расстояний для детектирования эмиссии NO на супер-Землях до 13 пк.

Проведенные вычисления показывают значимость проекта WSO-UV (Спектр-УФ) для наблюдений потенциальных биомаркеров в атмосферах

экзопланет. Выявленная возможность наблюдений с помощью спектрографа LSS γ -полосы NO на экзопланетах земного типа, обладающих N₂–O₂ доминантными атмосферами, открывает широкую возможность поиска индикаторов биологической и геологической активности на данных экзопланетах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарят Саванова Игоря Спартакевича, Шематовича Валерия Ивановича, Баркова Максима Владимировича и Машонкину Людмилу Ивановну за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Lammer, L. Sproß, J. L. Grenfell, M. Scher, et al., *Astrobiology* **19**, 7 (2019).
2. E. E. Stüeken, M. A. Kipp, M. C. Koehler, E. W. Schwieterman, et al., *Astrobiology* **16** (2016a).
3. L. Sproß, M. Scherf, V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and H. Lammer, *Astronomy Reports* **65**, No. 4 (2021).
4. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, D. V. Bisikalo, et al., *Astronomy Reports* **60** (2016).
5. B. M. Shustov, M. E. Sachkov, S. G. Sichevsky, R. N. Arkhangelsky, et al., *Sol. Syst. Res.* **55**, No. 7 (2021).
6. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J. C. Gérard, *Geophysical Research Letters* **18**(9) (1991).

7. J.-C. Gérard, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo, *Geophysical Research Letters* **18**(9) (1991).
8. 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* **87** (1995).
9. J.-C. Gérard, D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, and J. W. Duff, *Journal of Geophysical Research* **102**(A1) (1997).
10. C. A. Barth, *Piana Space Sci.* **40**, No. 24 (1992).
11. R. R. Meier, *Space Science Reviews* **58**, 1–185 (1991).
12. D. W. Rusch and C. A. Barth, *Journal of Geophysical Research* **80**(25) (1975).
13. C. A. Barth, D. W. Rusch, and A. I. Stewart, *Radio Science* **8**(4), 379–385 (1973).
14. C. A. Barth, K. D. Mankoff, S. M. Bailey, and S. C. Solomon, *Journal of Geophysical Research* **108**, No. A1 (2003).
15. A. W. Merkel, C. A. Barth, and S. M. Bailey, *Journal of Geophysical Research* **106**(A12) (2001).
16. D. E. Siskind, C. A. Barth, and R. G. Roble, *Journal of Geophysical Research* **94**(A12) (1989a).
17. D. E. Siskind, C. A. Barth, D. S. Evans, and R. G. Roble, *Journal of Geophysical Research* **94**(A12) (1989b).
18. C. A. Barth, *Ann. Geophys.* **22**, 198 (1966).
19. J. B. Pearce, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **9** (1969).
20. F. G. Eparvier and C. A. Barth, *Journal of Geophysical Research* **97**(A9) (1992).
21. T. E. Cravens, *Planet Space Sci.* **25** (1977).
22. J. Luque and D. R. Crosley, *LIFBASE: database and spectral simulation Program (Version 1.5)* (SRI International Report MP 99-009, 1999).
23. J. W. Chamberlain, *Physics of the Aurora and Airglow* (Academic Press, New York, ISBN: 9781483222530, 1961).
24. D. D. Cleary, *Journal of Geophysical Research* **91**(A10) (1986).
25. A. J. D. Farmer, V. Hasson, and R. W. Nicholls, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **9** (1972).
26. G. V. Marr, *Proceedings of the Physical Society* **83**(2) (1964).
27. A. Berk, P. Conforti, R. Kennett, T. Perkins, et al., *Proc. SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multi-spectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX*, 90880H (2014).
28. D. L. Albritton, A. L. Schmeltekopf, and R. N. Zare, *Diatomic Intensity Factors* (Harper and Row, New York, 1977).
29. C. A. Barth, *Journal of Geophysical Research* **69** (1964).
30. J. B. Tatum, *Astrophysical Journal Supplement* **14**, 21 (1967).
31. J. R. Reisel, C. D. Carter, and N. M. Laurendeau, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **47**, No. 1, (1992).
32. R. Engleman and Jr. P. E. Rouse, *Journal of Molecular Spectroscopy* **37** (1971).
33. T. Holstein, *Physical Review* **72**(4) (1947).
34. K. G. Kislyakova, M. Holmström, H. Lammer, and N. V. Erkaev, *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments* (Astrophysics and Space Science Library, Springer International Publishing Switzerland, ch. 7, vol. 411, 2015).
35. N. V. Erkaev, H. Lammer, P. Odert, and Y. N. Kulikov, et al., *Astrobiology* **11** (2013).
36. K. G. Kislyakova, H. Lammer, M. Holmström, M. Panchenko, et al., *Astrobiology* **11** (2013).
37. M. Zhang, H. A. Knutson, F. Dai, L. Wang, et al., Submitted to *Astronomical Journal*, arXiv:2207.13099 (July, 2022).
38. J. C. Gérard and C. A. Barth, *Journal of Geophysical Research* **82**, 4, (1977).
39. D. Chivian, E. L. Brodie, E. J. Alm, D. E. Culley, et al., *Science* **322** (2008).
40. H. Zhan, An Update on the Chinese Space Station Telescope Project. National Astronomical Observatories, URL: <http://ilariacaiazzo.com/wp-content/uploads/2021/09/HuZhanSlides.pdf> (2021).
41. H. Rauer, S. Gebauer, P. v. Paris, J. Cabrera, et al., *Astron. and Astrophys.* **529**, A8 (2011).
42. L. Prichard, D. Welty, A. Jones, et al. *STIS Instrument Handbook, Version 21.0* (Baltimore: STScI, 2022).
43. B. L. James, et al., *Cosmic Origins Spectrograph Instrument Handbook, Version 14.0* (Baltimore: STScI, 2022).
44. L. Fossati, D. V. Bisikalo, H. Lammer, B. M. Shustov, M. E. Sachkov, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **354**(1) (2014).
45. A. Shugarov, I. Savanov, M. Sachkov, P. Jerram, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **354**, No. 1 (2014).
46. R. L. Akeson, X. Chen, D. Ciardi, M. Crane, et al., The NASA Exoplanet Archive: Data and Tools for Exoplanet Research, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **125**(930), (2013).
47. R. Luger and R. Barnes, *Astrobiology* **15**(2) (2015).
48. C. P. Johnstone, H. Lammer, K. G. Kislyakova, M. Scherf, and M. Güdel, *Earth and Planetary Science Letters* **576** (2021).
49. C. P. Johnstone, M. L. Khodachenko, T. Lüftinger, K. G. Kislyakova, H. Lammer, and M. Güdel, *Astron. and Astrophys.* **624**, L10 (2019).
50. V. S. Airapetian, A. Gloer, G. V. Khazanov, R. O. P. Loyd, K. France, et al., *Astrophys. J. Lett.* 836, L3 (2017).
51. A. Segura, K. Krelove, J. F. Kasting, D. Sommerlatt, et al., *Astrobiology* **3**, No. 4 (2003).
52. A. Segura, J. F. Kasting, V. Meadows, M. Cohen, et al., *Astrobiology* **5**, No. 6 (2005).
53. L. Kaltenegger and W. A. Traub, *Astrophys. J.* **698** (2009).
54. F. Wunderlich, M. Godolt, J. L. Grenfell, S. Städt, et al., *Astron. and Astrophys.* **624**, A49 (2019).
55. И. С. Саванов, *Астрофизический Бюллетень* **76**, No. 2 (2021).
56. K. France, R. O. P. Loyd, A. Youngblood, Al. Brown, et al., *Astrophys. J.* **820**, 89 (2016).

57. *A. Youngblood, K. France, R. O. P. Loyd, J. L. Linsky, et al.*, *Astrophys. J.* **824**, 101 (2016).
58. *R. O. P. Loyd, K. France, A. Youngblood, C. Schneider, et al.*, *Astrophys. J.* **824**, 102 (2016).
59. *V. S. Meadows, G. N. Arney, E. W. Schwieterman, J. Lustig-Yaeger, et al.*, *Astrobiology* **18**, No. 2 (2018).
60. *J. L. Linsky, K. France, and T. R. Ayres*, *Astrophys. J.* **766**, 69 (2013).
61. *K. France, C. S. Froning, J. L. Linsky, A. Roberge, et al.*, *Astrophys. J.* **763**, 149 (2013).
62. *J. Sanz-Forcada, G. Micela, I. Ribas, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **532**, A6 (2011).
63. *J. Robrade and J. Schmitt*, *Astron. and Astrophys.* **435**, 1073 (2005).
64. *M. Gudel, M. Audard, F. Reale, S. L. Skinner, and J. L. Linsky*, *Astron. and Astrophys.* **416**, 713 (2004).
65. *L. M. Walkowicz and S. L. Hawley*, *Astron. J.* **137**, 3297 (2009).
66. *M. L. Hill, K. Bott, P. A. Dalba, T. Fetherolf, et al.*, accepted for publication in *Astron. J.*, arXiv:2210.02484 (October, 2022).