

На правах рукописи



Цуриков Григорий Николаевич

**Исследование молекулы NO как  
потенциального биомаркера в атмосферах  
экзопланет**

Специальность 1.3.1. – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

Научный руководитель:

**Бисикало Дмитрий Валерьевич**, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва, заместитель научного руководителя АНО «Национальный центр физики и математики», г. Саров

Официальные оппоненты:

**Антонюк Кирилл Анатольевич**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный

**Тавров Александр Викторович**, д.т.н., заведующий лабораторией ФГБУН Института космических исследований РАН, г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п. Нижний Архыз

Защита состоится 9 сентября 2025 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при ФГБУН Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>.

Автореферат разослан «17» июня 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.032.01, к.ф.-м.н.

*Чупина*

Н. В. Чупина

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Поиск потенциально обитаемых миров представляет собой сложную теоретическую и наблюдательную задачу, решение которой зависит от множества факторов [1]. Обязательным (но не достаточным) условием обитаемости считается [2] нахождение планеты в зоне потенциальной обитаемости (ЗПО), в пределах которой на поверхности планеты возможно существование жидкой воды, а в ее атмосфере отсутствует сильный парниковый эффект. Исследования [3], [4] показывают, что важным дополнительным условием потенциальной обитаемости является наличие у данной планеты  $N_2-O_2$  доминантной атмосферы. Такая атмосфера может образоваться на планете в результате геологических и биологических процессов [3]. Прямыми индикаторами такой атмосферы и, следовательно, биомаркерами могут служить молекулы  $N_2O$ ,  $NO_2$ ,  $NO$  и  $N_2-O_2$  димеры [4]. Их спектральные особенности можно потенциально зарегистрировать в атмосферах экзопланет с помощью современных космических телескопов (КТ) [4], [5], [6].

К настоящему моменту открыто уже более 5800 экзопланет, среди которых около 35-ти ближайших ( $< 100$  пк) экзопланет земного типа (экзо- и супер-земель,  $< 2R_E$ , суб-нептунов,  $< 4R_E$ ) находятся в ЗПО у своих звезд [7]. С помощью спектрографов наземных и космических телескопов открыто и проанализировано около 250 атмосфер экзопланет, в которых обнаружено суммарно около 60 атомов и молекул. Большинство из этих атмосфер исследовано у горячих газовых гигантов. С запуском современных КТ (например, КТ им. Джеймса Уэбба) появилась возможность получать спектры атмосфер экзопланет земного типа

и исследовать их на предмет наличия молекул-биомаркеров. Эта задача будет входить и в научную программу разрабатываемого в России КТ Спектр-УФ [8], который будет получать данные в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн.

Среди молекул-биомаркеров, индикаторов  $N_2-O_2$  доминантной атмосферы, перспективной для поиска с КТ Спектр-УФ является молекула окиси азота. Из спектральных наблюдений верхней атмосферы Земли (спутники SNOE, SME, AE-C, AE-D, обсерватория OGO) известно, что наиболее интенсивными спектральными полосами этой молекулы в ближнем УФ диапазоне являются  $\gamma$ -полосы, 203–248 нм. При высоком содержании NO  $\gamma$ -полосы практически не блендируются полосами Шумана-Рунге  $O_2$  и Хартли  $O_3$ . Наблюдения земной атмосферы также показывают [9], что NO эффективно образуется в ее верхних слоях при: (а) высыпаниях энергичных электронов (1-10 кэВ) из магнитосферы; (б) воздействии мягкого рентгеновского излучения Солнца (X-ray, 1-10 нм).

В связи с этим особую актуальность приобретает работа по созданию численных моделей, которые позволяют: 1. Исследовать образование молекулы NO в  $N_2-O_2$  атмосферах экзопланет земного типа; 2. Моделировать спектры пропускания и излучения NO в  $N_2-O_2$  атмосферах в УФ диапазоне длин волн; 3. Определить отношение сигнала к шуму, S/N, необходимого для регистрации спектральных линий биомаркера NO в атмосферах экзопланет земного типа с помощью планируемого к запуску КТ Спектр-УФ, с целью формирования научной программы данного телескопа. Решение этих задач позволит определить шансы для обнаружения биомаркера NO в атмосферах экзопланет и сформировать список наиболее перспективных целей для КТ Спектр-УФ. Само же обнаружение NO на экзопланетах позволит сделать выводы об их обитаемости.

## **Цели и задачи**

Основными целями диссертационной работы являются: исследование молекулы NO как перспективного биомаркера в атмосферах экзопланет; определение условий, при которых возможно обнаружить этот биомаркер с помощью планируемого к запуску российского КТ Спектр-УФ; формирование списка экзопланет для поиска NO с КТ Спектр-УФ.

В работе предлагается решить ряд задач:

1. Исследование тепловых и нетепловых механизмов образования молекулы NO в верхних атмосферах экзопланет земного типа. Построение модели химии нечетного азота и ее валидация на атмосфере Земли. Определение высотных профилей молекулы NO в верхних атмосферах планет земного типа.
2. Определение возможности обнаружения молекулы NO в атмосферах экзопланет методами трансмиссионной и эмиссионной спектроскопии с помощью КТ Спектр-УФ. Моделирование спектров пропускания и излучения NO в предполагаемой N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосфере экзопланеты. Определение наблюдательного времени для надежного ( $S/N \geq 3$ ) обнаружения NO с КТ Спектр-УФ.
3. Исследование влияния жесткого УФ (XUV, 1-91.2 нм) излучения звезды и высыпания магнитосферных электронов в атмосферы экзопланет на изменение содержания NO. Определение возможности обнаружения NO в таких планетных системах.
4. Отбор экзопланет, наиболее подходящих для поиска NO с КТ Спектр-УФ.

## **Научная новизна**

В диссертационной работе впервые:

1. Исследована возможность обнаружения потенциального биомаркера NO в атмосферах экзопланет земного типа с помощью планируемого к запуску КТ Спектр-УФ. Установлено, что с помощью спектрографа с длиной щелью (СДЩ,  $R = 1000$ ) КТ Спектр-УФ обнаружение NO возможно на типичных супер-землях и суб-нептунах, находящихся в радиусе вплоть до 30 пк от Земли.
2. Разработана химическая модель, позволяющая исследовать нетепловое образование молекулы-биомаркера NO при высыпании магнитосферных электронов в верхние  $N_2-O_2$  атмосферы планет земного типа. Установлено, что при продолжительном высыпании электронов даже с небольшими потоками энергии ( $1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) прирост концентрации NO за счет нетеплового канала ее образования составляет 2 порядка величины по сравнению с тепловым каналом.
3. Исследовано образование молекулы NO в атмосферах экзопланет у активных звезд. Показано, что с увеличением интенсивности высыпания электронов в атмосферу экзопланеты (при увеличении потока звездного ветра) содержание NO растет линейно за счет нетеплового канала образования этой молекулы. Рекомендован поиск NO на экзопланетах в зоне потенциальной обитаемости у активных звезд спектральных классов G и ранних K.
4. Проанализированы и отобраны наиболее перспективные экзопланеты для поиска NO с помощью КТ Спектр-УФ.

## **Научная и практическая значимость**

Проведено исследование возможности обнаружения потенциально-го биомаркера NO в атмосферах экзопланет земного типа. Показано, что с помощью КТ Спектр-УФ возможно обнаружить NO на типичных супер-землях и суб-нептунах в радиусе вплоть до 30 пк от Земли.

В ходе выполнения диссертации выработаны рекомендации для научной программы КТ Спектр-УФ по поиску биомаркера NO в атмосферах экзопланет. Отобраны экзопланеты-кандидаты для поиска в их атмосферах NO с помощью КТ Спектр-УФ.

Модель расчета отношения сигнала к шуму, S/N, разработанная в рамках выполнения диссертации, использовалась при создании калькулятора экспозиций КТ Спектр-УФ (код государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686952). Эта модель позволяет планировать эксперимент по основным научным задачам КТ Спектр-УФ и будет использоваться при отборе заявок на наблюдения данного КТ.

Разработанная в диссертации модель образования NO в верхней N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосфере Земли может использоваться при формировании краткосрочного прогноза изменения структуры термосферы как отклика на воздействие факторов космической погоды. Это необходимо при исследовании динамики низкоорбитальных спутников.

## **Методология и методы исследования**

В ходе выполнения диссертационной работы создан программный комплекс для исследования молекулы-биомаркера NO в N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосферах экзопланет и определения возможности обнаружения этой молекулы с помощью КТ Спектр-УФ. Комплекс включает следующие модели и алгоритмы:

1. Для исследования образования молекулы NO в N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> доминантных атмосферах планет земного типа разработана одномерная модель химии нечетного азота с учетом молекулярной и турбулентной диффузии. Эта модель позволяет описать процессы химии нечетного азота в верхней атмосфере планеты при высыпании в нее энергичных электронов. Численное решение задачи осуществляется методом расщепления по физическим процессам. Для решения системы уравнений химической кинетики используется программный пакет CVODE [10], предназначенный для решения жестких систем дифференциальных уравнений. Численное решение уравнения диффузии производится методом Кранка-Николсона. В качестве входных данных используются результаты расчетов процессов высыпания электронов в верхнюю атмосферу планеты. Расчеты производятся с помощью следующих моделей: а) Кинетической модели Монте-Карло (КММК) высыпания электронов в верхнюю атмосферу планеты [11]. На основе решения уравнения Больцмана данная модель описывает взаимодействие высыпающихся электронов с окружающим атмосферным газом и перенос электронов. Выходными данными этой модели являются скорости диссоциации, ионизации, диссоциативной ионизации молекулярного азота N<sub>2</sub> электронным ударом. б) Модели КММК кинетики и переноса надтепловых атомов азота в верхней атмосфере [A4], [A5], которые образуются при диссоциации N<sub>2</sub> электронным ударом. Результат работы модели – частоты нетеплового образования NO.

2. Для моделирования спектров пропускания N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосфер экзопланет в УФ диапазоне длин волн модифицирована line-by-line модель переноса излучения Py4CArS [12]. Модификация модели заключалась в ее переориентации с ИК на ближний УФ спектральный диапазон

(180–250 нм) путем расчета и обновления сечений поглощения. Помимо спектральных линий молекулы NO,  $\gamma$ -полос (203–248 нм), в модели также учитывается поглощение света в полосах молекул O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, а также рэлеевское рассеяние на молекулах N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar в ближнем УФ диапазоне. Модель позволила рассчитать коэффициенты поглощения исследуемых атомов и молекул в каждом атмосферном слое, оптическую толщину, эффективную высоту атмосферы и наблюдаемую глубину транзита экзопланеты.

Моделирование излучения молекулы NO в  $\gamma$ -полосах производилось с помощью разработанного соискателем численного кода, основанного на методиках [13], [14], которые предназначены для обработки результатов наблюдений излучения NO в  $\gamma$ -полосах в атмосфере Земли.

3. Для расчета отношения S/N, необходимого для обнаружения спектральных полос NO в атмосферах экзопланет методами трансмиссионной и эмиссионной спектроскопии, использовалась методика [15]. Для более точных расчетов в модели были учтены все полезные и шумовые характеристики измерительного канала спектрографа, а также зодиакальный свет и свечение земной атмосферы. Разработанная модель использовалась при создании калькулятора экспозиций КТ Спектр-УФ.

Исследование возможности обнаружения излучения NO на экзопланетах с помощью коронографа на борту КТ Спектр-УФ производилось на основе методики [16], которая предназначена для поиска экзопланет методом прямого обнаружения.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Установлено, что с помощью спектрографа с длинной щелью космического телескопа (КТ) Спектр-УФ возможно обнаружить молекулу-биомаркер NO в атмосферах экзопланет земного типа. Пределы обнаружения NO на экзопланетах в зоне потенциальной обитаемости у спокойных звезд солнечного типа не превышают 1 пк. Пределы обнаружения NO могут увеличиться до 8 и 30 пк для типичных супер-земель и суб-нептунов в зоне потенциальной обитаемости у активных звезд, которые подвержены высоким потокам энергии высывающихся электронов ( $80 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) и XUV излучения (5 солнечных XUV потоков).
2. Сформирован список экзопланет для поиска молекулы NO с КТ Спектр-УФ в их атмосферах. Среди 35 ближайших (<100 пк) экзопланет в зоне потенциальной обитаемости кандидатами для обнаружения NO с КТ Спектр-УФ являются:  $\tau$ Cet e (14 транзитов для регистрации сигнала), HD 192310 c (4 транзита), HD 31527 d (17 транзитов), а также HD 102365 b, HD 69830 b, HD 216520 c и HD 10180 g.
3. Разработан программный комплекс для исследования молекулы-биомаркера NO в  $\text{N}_2\text{-O}_2$  атмосферах экзопланет и определения возможности обнаружения этой молекулы с помощью КТ Спектр-УФ. В комплексе алгоритмически объединены модели, позволяющие: исследовать тепловое и нетепловое образование молекулы NO в  $\text{N}_2\text{-O}_2$  атмосферах экзопланет; строить спектры пропускания и излучения NO в УФ диапазоне длин волн; рассчитывать отношение S/N, необходимое для регистрации спектральных линий NO с помощью спектрографов Спектр-УФ.

4. Для расширения списка потенциальных целей КТ Спектр-УФ по поиску NO исследованы возможные пути увеличения концентрации этой молекулы в атмосферах экзопланет у активных звезд. Установлено, что за счет вклада надтепловых атомов азота в образование NO при интенсивных высыпаниях электронов прирост содержания NO в атмосфере может а) составить 2 порядка величины и б) иметь линейный характер с увеличением потока высыпающихся электронов. Показано, что поиск молекулы NO оптимально вести на экзопланетах в зоне потенциальной обитаемости у активных звезд спектральных классов G и ранних K.

**Достоверность представленных в диссертационной работе результатов** исследования потенциального биомаркера NO в атмосферах экзопланет обеспечивается применением хорошо обоснованных теоретических моделей. Валидация моделей и их тонкая настройка была проведена на основе сравнения результатов с наблюдениями земной атмосферы и другими моделями. Результаты работы на всех этапах докладывались на конференциях и семинарах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК.

**Личный вклад автора** Соискатель в равной степени участвовал в постановке задач. Им самостоятельно разработан программный комплекс для исследования молекулы-биомаркера NO в N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосферах экзопланет. С помощью созданного комплекса соискателем были проведены расчеты: содержания NO в N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосферах экзопланет; спектров излучения и пропускания NO в УФ диапазоне; отношения S/N для регистрации спектральных полос NO и отобраны экзопланеты для поиска NO с КТ Спектр-УФ. Соискатель активно участвовал в написании статей, в которых изложены результаты диссертации.

## **Апробация работы**

Основные результаты работы представлены на следующих российских и зарубежных конференциях:

1. 7-я, 8-я и 9-я Международные школы для студентов и молодых ученых «Исследования экзопланет 2022, 2023, 2024». г. Москва, Россия, 17-18.10.2022, 04-05.11.2023, 18-19.11.2024.
2. Всероссийская конференция «Звездообразование и планетообразование», г. Москва, Россия, 15-17.11.2022.
3. Всероссийская конференция «Исследования звезд с экзопланетами – 2022», г. Сузdalь, Россия, 23-27.11.2022.
4. 50-я Всероссийская студенческая научная конференция «Физика Космоса», с. Слобода, Россия, 30.01 – 03.02.2023
5. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звёзд: теория и наблюдения», г. Москва, Россия, 26 – 30.06.2023.
6. XX Международный симпозиум по молекулярной спектроскопии высокого разрешения, г. Иркутск, Россия, 03 – 07.07.2023.
7. 1-я и 2-я Всероссийские школы по экспериментальной и лабораторной астрофизике и геофизике, г. Саров, 10 – 14.07.2023, 1 – 5.07.2024.
8. Региональная конференция МАС для Азиатско-Тихоокеанского региона APRIM 2023, г. Корияма, Япония, 7 – 11.08.2023.
9. Всероссийская конференция «Ультрафиолетовая Вселенная - 2023», г. Москва, Россия, 16 – 19.10.2023.
10. 45-я Научная ассамблея COSPAR 2024, г. Пусан, Корея, 12-21.07.2024
11. Генеральная ассамблея МАС 2024, г. Кейптаун, ЮАР, 6-15.08.2024
12. Всероссийская астрономическая конференция 2024 года (ВАК-2024), п. Нижний Архыз, Россия, 25-31.08.2024

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Число страниц в диссертации — 169, рисунков — 31, таблиц — 10. Список литературы содержит 230 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы и степень ее разработанности; формулируются цели и задачи работы; описаны методология и методы исследований; показана научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость, апробация; представлены основные положения, выносимые на защиту; обосновывается достоверность результатов и указывается личный вклад соискателя; представлен список публикаций соискателя.

В Главе 1 проведен анализ современного состояния проблемы поиска биомаркеров в атмосферах экзопланет. Сформулирована задача по созданию программного комплекса для исследования потенциального биомаркера - молекулы NO и определению возможности обнаружения этой молекулы в атмосферах экзопланет с помощью КТ Спектр-УФ. В разделе 1.1 представлены общие критерии к выбору молекул-биомаркеров и обсуждаются некоторые известные из литературы биомаркеры. В разделе 1.2 проанализированы молекулы-индикаторы N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> доминантной атмосферы планеты. Выделена молекула NO как перспективный биомаркер для поиска на экзопланетах с помощью КТ Спектр-УФ. В разделе 1.3 проведен анализ а) спутниковых наблюдений NO в ближнем УФ диапазоне земной атмосферы и б) известных из наблюдений [9] источников образования NO в верхней атмосфере Земли.

В **Главе 2** представлено описание разработанного программного комплекса для исследования образования молекулы-биомаркера NO в атмосферах экзопланет и определения условий, при которых возможно обнаружить NO с помощью планируемого к запуску КТ Спектр-УФ. В **разделе 2.1** приводится описание разработанной модели теплового и нетеплового образования NO в N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосфере планеты земного типа при высыпании в нее энергичных электронов (1-10 кэВ). В модели решается система уравнений химической кинетики, а также учитывается вертикальный перенос компонентов за счет молекулярной и турбулентной диффузии. В качестве входных данных в модели используются результаты расчетов высыпания электронов в верхнюю атмосферу планеты, полученные с помощью кинетических моделей [11], [A4-A5]. В разделе также представлена валидация разработанной модели на примере атмосферы Земли.

В **разделе 2.2.1** представлена модель излучения молекулы NO в спектральных  $\gamma$ -полосах (203–248 нм). Проведено сравнение разработанной модели с существующими моделями и наблюдениями NO в земной атмосфере [13]. В **разделе 2.2.2** представлено описание модели, предназначеннной для построения спектров пропускания N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосфер экзопланет в УФ диапазоне длин волн. Эта модель, основанная на line-by-line модели переноса излучения Py4CAtS [12], позволяет рассчитать коэффициенты поглощения исследуемых атомов и молекул, оптическую толщину атмосферы и наблюданную глубину транзита экзопланеты. Помимо  $\gamma$ -полос NO, в модели также учитывается поглощение света в полосах молекул O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, а также рэлеевское рассеяние в ближнем УФ диапазоне.

В **разделе 2.3** описана методика расчета отношения S/N для ре-

гистрации спектральных линий NO методами эмиссионной и трансмиссионной спектроскопии. Описана также методика расчета S/N для регистрации излучения NO с помощью коронографа.

В Главе 3 представлены результаты расчетов образования молекулы NO в N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> атмосферах экзопланет у активных звезд. В разделе 3.1 представлен перечень предположений, в рамках которого были проведены расчеты: 1) На экзопланете сформировалась N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> доминантная атмосфера, аналогичная земной; 2) Экзопланета подвержена более интенсивному воздействию звездного ветра, чем Земля, и, следовательно, более интенсивным высыпаниям электронов в атмосферу; 3) Структура нейтральной верхней атмосферы не изменяется под действием высоких потоков высыпающихся электронов. Допустимость последнего предположения показана в разделе 3.4 на основе оценки теплового баланса в атмосфере.

В разделе 3.2 представлены результаты расчетов нетеплового образования NO при высыпании электронов с потоком энергии 1 эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. В разделе 3.3 представлены результаты расчетов образования NO, которые проводились для разных потоков энергии высыпающихся электронов в атмосферу, 1-80 эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, и при рассмотрении теплового и нетеплового каналов формирования NO. По результатам расчетов показано, что существует как минимум два пути увеличения содержания NO на экзопланетах у активных звезд. Оба пути связаны с нетепловым каналом образования NO во время высыпаний энергичных электронов в верхнюю атмосферу планеты: 1) При продолжительных высыпаниях электронов (в отличие от Земли, где эти процессы спорадичны) прирост концентрации NO за счет нетеплового канала может составить 2 порядка величины по сравнению с тепловым каналом; 2) С ростом потока

энергии высыпающихся электронов (при увеличении потока звездного ветра) увеличение концентрации NO за счет нетеплового канала имеет линейный характер, в отличие от теплового случая, для которого характерна нелинейная степенная зависимость с положительной дробной частью.

В **Главе 4** исследуется возможность обнаружения молекулы NO в атмосферах экзопланет земного типа с помощью КТ Спектр-УФ. Основным результатом данного исследования являются предельные расстояния от Земли до экзопланет, при которых регистрация сигнала с КТ Спектр-УФ возможна с  $S/N \geq 3$ , а суммарное время наблюдений не превышает 120-200 часов ( $\approx 5\text{-}8$  орбит КТ Спектр-УФ). Расчеты проводились для типичных экзо- и супер-земель, суб-нептунов, которые находятся в ЗПО у звезд разных спектральных классов. Описание модельных и реальных экзопланет и звезд, для которых проводятся расчеты, представлены в **разделе 4.1**. Также обсуждаются предположения, которые были сделаны при расчетах.

В **разделе 4.2** по результатам расчетов показано, что при условиях в атмосферах экзопланет, аналогичных земной атмосфере, обнаружение NO с помощью спектрографа СДЦ (R=1000) КТ Спектр-УФ возможно на экзопланетах, расположенных на расстояниях от Земли, не превышающих 1 пк, если для поиска NO используются методы трансмиссионной и эмиссионной спектроскопии. Предложены условия, при которых обнаружение NO может быть возможно: если экзопланета подвержена более высоким потокам XUV излучения и звездного ветра, чем Земля.

В **разделе 4.3** проверяется одна из указанных гипотез – исследуется возможность обнаружения NO на экзопланетах, подверженных высоким потокам XUV излучения звезды. По результатам расчетов показано,

что рост температуры и расширение атмосферы, вызванные этим фактором, повышают шансы обнаружить NO с помощью спектрографа СДЩ-КТ Спектр-УФ. Предельные расстояния до экзопланет для обнаружения NO методом трансмиссионной спектроскопии могут увеличиться до 5 и 20 пк для типичных супер-земель и суб-нептунов, которые подвержены XUV потоку звезд, в 5 и более раз превышающему солнечный поток. Для наблюдений предпочтительны экзопланеты у звезд G и ранних K классов. Также показано, что регистрация излучения NO при тех же условиях в атмосферах экзопланет возможна только с использованием коронографа с контрастом  $10^{-8} - 10^{-9}$  на борту КТ Спектр-УФ.

В разделе 4.4 определяется возможность обнаружения NO на экзопланетах у звезд с высокими потоками звездного ветра и XUV излучения. Показано, что рост содержания NO при интенсивных высыпаниях электронов в атмосфере экзопланет у активных звезд может привести к расширению границ для обнаружения данной молекулы. Предельные расстояния для обнаружения NO могут увеличиться до 8 и 30 пк для типичных супер-земель и суб-нептунов, которые подвержены интенсивным высыпаниям электронов с потоком энергии  $80 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и потоку жесткого XUV излучения, равного 5 солнечным XUV потокам. Среди 35-ти ближайших ( $< 100$  пк) экзопланет земного типа в ЗПО подходящими кандидатами для обнаружения NO с КТ Спектр-УФ являются:  $\tau$ Cet e (14 транзитов для регистрации сигнала) и HD 192310 c (4 транзита), HD 31527 d (17 транзитов), а также HD 102365 b, HD 69830 b, HD 216520 c и HD 10180 g.

В **Заключении** представлены основные итоги выполненного исследования. Обсуждаются рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы, а также приводятся благодарности.

## **Публикации по теме диссертации**

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК**

- [A1] Tsurikov G., Bisikalo D., On the Possibility of Observing Nitric Oxide on Terrestrial Exoplanets Using the WSO-UV Observatory // Astronomy Reports. 2023. V. 67, No. 2. pp. 125–143.
- [A2] Tsurikov G., Bisikalo D., NO Biomarker: Transmission and Emission Methods for Its Potential Detection in Exoplanet Atmospheres with Spektr-UF (WSO-UV) // Astronomy Reports. 2023. V. 67, No. 11. pp. 1123–1138.
- [A3] Tsurikov G., Bisikalo D., Shematovich V., Zhilkin A., Searching for Biomarkers with Spektr-UF Observatory: Nitric Oxide Molecule in Atmospheres of Exoplanets near the Active Host Stars // Astronomy Reports. 2024. V. 68, No. 12. pp. 1406–1422.
- [A4] Shematovich V., Bisikalo D., Tsurikov G., Non-Thermal Nitric Oxide Formation in the Earth's Polar Atmosphere // Atmosphere. 2023. № 14. C. 1092.
- [A5] Shematovich V., Bisikalo D., Tsurikov G., Zhilkin, A., Non-Thermal Processes of Nitric Oxide Formation during Precipitation of Auroral Electrons into the Upper Atmospheres of Terrestrial Planets // Astronomy Reports. 2024. V. 68, No. 8. pp. 843–864.
- [A6] Zhilkin, A., Shematovich V., Bisikalo D., Tsurikov G., 3D Numerical Model for Studying Electron Precipitation in the Upper Atmospheres of Venus-Like Exoplanets // Astronomy Reports. 2024. V. 68, No. 12. pp. 1252–1265.

## **Другие публикации автора по теме диссертации**

[B1] Щуриков Г. Н., Бисикало Д. В., Оценка возможности обнаружения окиси азота на экзопланетах земного типа — с обсерваторией Спектр-УФ // Физика космоса: труды 50-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 января — 3 февраля 2023 г.). Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2023. С. 494-498. URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/126086>.

## **Цитируемая литература**

1. Meadows V. S., Barnes R. K. Factors Affecting Exoplanet Habitability // Handbook of Exoplanets, H. J. Deeg and J. A. Belmonte, Eds., 2018, P. 57.
2. Kasting J. F., Whitmire D. P., Reynolds R. T. Habitable Zones around Main Sequence Stars // Icarus. 1993. V. 101, № 1. P. 108–128.
3. Lammer H., Sproß L., Grenfell J. L., Scherf M., et al. The Role of N<sub>2</sub> as a Geo- Biosignature for the Detection and Characterization of Earth-like Habitats // Astrobiology. 2019. V. 19, № 7. P. 927–950.
4. Sproß L., Scherf M., Shematovich V. I., Bisikalo D. V., Lammer H. Life as the Only Reason for the Existence of N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Dominated Atmospheres // Astronomy Reports. 2021. V. 65, № 4. P. 275–296.
5. Schwertner E. W., Olson S. L., Pidhorodetska D., et al. Evaluating the Plausible Range of N<sub>2</sub>O Biosignatures on Exo-Earths: An Integrated Biogeochemical, Photochemical, and Spectral Modeling Approach // Astrophysical Journal. 2022. V. 937, № 2. P. 109.
6. Misra A., Meadows V., Claire M., Crisp D. Using Dimers to Measure Biosignatures and Atmospheric Pressure for Terrestrial Exoplanets // Astrobiology. 2014. V. 14, № 2, P. 67–86.

7. Hill M. L., Bott K., Dalba P. A., Fetherolf T., et al. A Catalog of Habitable Zone Exoplanets // Astronomical Journal. 2023. V. 165, № 2. P. 34.
8. Sachkov M., Kopylov E. The World Space Observatory - Ultraviolet mission: science program and status report // Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray. 2024, V. 13093, № 130933F.
9. Barth C. A., Mankoff K. D., Bailey S. M., Solomon S. C. Global observations of nitric oxide in the thermosphere // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108, № A1. P. 1027.
10. Cohen S. D., Hindmarsh A. C., Dubois P. F. CVODE, A Stiff/Nonstiff ODE Solver in C // Computers in physics 10, No 2, 138–143 (1996).
11. Bisikalo D., Shematovich V., Hubert B. The Kinetic Monte Carlo Model of the Auroral Electron Precipitation into N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Planetary Atmospheres // Universe. 2022. V. 8. P. 437–451.
12. Schreier F., Gimeno Garcá S., Hochstafl P., Stadt S. Py4CAtS PYthon for Computational ATmospheric Spectroscopy // Atmosphere. 2019. V. 10, № 5. P. 262.
13. Eparvier F., Barth C. Self-absorption theory applied to rocket measurements of the nitric oxide (1, 0)  $\gamma$  band in the daytime thermosphere // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97, № A9.
14. Stevens M.H. Nitric oxide  $\gamma$  band fluorescent scattering and self-absorption in the mesosphere and lower thermosphere // Journal of Geophysical Research. 1995. V. 100. P. 14735–14742.
15. Rauer H., Gebauer S., Paris P. V., Cabrera J., et al. Potential biosignatures in super-Earth atmospheres. I. Spectral appearance of

- super-Earths around M dwarfs // Astronomy and Astrophysics. 2011. V. 529. P. A8.
16. Robinson T. D., Stapelfeldt K. R., Marley M. S. Characterizing Rocky and Gaseous Exoplanets with 2 m Class Space-based Coronagraphs // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2016. V. 128. P. 22.

**Благодарности** Соискатель выражает особую благодарность научному руководителю Бисикало Д. В. за всестороннюю помощь в проведении исследований, критические замечания, переданные знания и формирование научного мышления и мировоззрения. Соискатель благодарен Шематовичу В. И., Жилкину А. Г. за всестороннюю помощь, переданные знания и совместные научные обсуждения, которые очень помогли соискателю при проведении научных исследований. Отдельную благодарность соискатель выражает сотрудникам отделов звездной спектроскопии, физики и эволюции звезд, отделу экспериментальной астрономии ИНАСАН, лаборатории исследования звезд с экзопланетами ИНАСАН за передачу практического и научного опыта и знаний. Соискатель благодарен коллективу Института астрономии РАН за научные обсуждения, дружелюбную обстановку, которые были очень важны при проведении научных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-12-00364-П.