

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН,
Г. Г. Валявин
«03» июня 2025 года



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) на диссертацию Цурикова Григория Николаевича «Исследование молекулы NO как потенциального биомаркера в атмосферах экзопланет», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

Диссертационная работа Цурикова Григория Николаевича посвящена решению актуальной проблемы современной астрономии по поиску потенциально обитаемых экзопланет. Эффективной стратегией решения этой задачи считается поиск в атмосферах экзопланет спектральных линий молекул, которые могут свидетельствовать о наличии биологической активности на планете. Такие молекулы принято называть биомаркерами. В диссертационном исследовании Г. Н. Цурикова предлагается рассмотреть молекулу NO в качестве потенциального биомаркера. Эта молекула является прямым индикатором N_2 - O_2 доминантной атмосферы, которая может сформироваться на планете за счёт биологических и геологических процессов. NO является перспективным биомаркером для поиска на экзопланетах в ультрафиолетовом диапазоне длин волн с помощью создаваемого в России космического телескопа (КТ) «Спектр-УФ». Это формирует прикладной интерес к поставленной задаче.

Полученные в диссертационной работе результаты, несомненно, обладают высокой научной ценностью и новизной. В работе впервые показано, что спектральные линии NO возможно зарегистрировать с помощью КТ «Спектр-УФ» в атмосферах типичных суперземель и мининептунов, которые находятся в зоне обитаемости у более активных чем Солнце звёзд спектральных классов G и K. Предельные расстояния до экзопланет для обнаружения NO составляют до 8 пк у суперземель, и до 30 пк для мининептунов. По результатам исследования сформирован список из 7 экзопланет, которые войдут в научную программу КТ «Спектр-УФ» с целью поиска NO в их атмосферах. Для решения поставленной задачи соискателем разработан комплекс программ, с помощью которого возможно моделировать: 1) образование NO в N_2 - O_2 атмосферах планет; 2) спектры пропускания и излучения NO; 3) отношение сигнала к шуму, необходимого для регистрации спектральных линий NO с помощью КТ «Спектр-УФ». Разработанные численные коды позволяют исследовать состояние земной термосферы в области работы низкоорбитальных спутников, и легли в основу калькулятора экспозиций «Спектра-УФ». Это подчеркивает практическую значимость данной работы.

Содержание работы

Диссертация Г. Н. Цурикова состоит из Введения, четырёх Глав и Заключения. Полный объём работы составляет 167 страниц, включая 31 рисунок и 10 таблиц. Список литературы содержит 230 наименований.

Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи работы, раскрывается научная новизна и практическая значимость, указывается личный вклад соискателя.

В **Главе 1** проведён анализ современного состояния проблемы поиска молекул – биомаркеров в атмосферах экзопланет: представлены общие критерии к выбору биомаркеров; проанализированы спектральные особенности потенциальных биомаркеров, которые можно обнаружить с помощью современных телескопов. По результатам анализа выделена молекула NO в качестве наиболее перспективного и надёжного биомаркера для поиска на экзопланетах с помощью ультрафиолетовых миссий, таких как КТ «Спектр-УФ».

В **Главе 2** представлено описание разработанного соискателем комплекса программ для определения условий, при которых возможно обнаружить молекулу-биомаркер NO в атмосферах экзопланет с помощью планируемого к запуску КТ «Спектр-УФ». Комплекс включает в себя 3 модели, которые объединены единым потоком данных: а) модель теплового и нетеплового образования NO в N_2 - O_2 атмосферах планет земного типа; б) модель для построения спектров излучения и пропускания NO в спектральных γ -полосах в ближнем УФ диапазоне длин волн; в) модель расчёта отношения сигнала к шуму, необходимого для регистрации спектральных линий молекул в атмосферах экзопланет в пределах заданного времени наблюдений. В Главе подробно обсуждается валидация моделей, в ходе которой было показано хорошее соответствие получаемых результатов с результатами наблюдений NO в земной атмосфере и моделями других авторов.

В **Главе 3** представлены результаты расчётов образования молекулы NO в N_2 - O_2 атмосферах экзопланет у активных звёзд. По результатам расчётов показано, что содержание NO на экзопланетах у активных звёзд может существенно увеличиться за счёт ее образования в реакции O_2 с надтепловыми атомами азота, которые эффективно образуются во время высыпаний электронов в верхнюю атмосферу планеты. За счёт этого нетеплового канала прирост концентрации NO в атмосфере может составить 2 порядка величины (по сравнению с тепловым каналом) – он имеет линейный характер при увеличении потока энергии высыпавшихся электронов.

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 со «Спектра-УФ» возможна при $S/N \geq 3$, а суммарное время наблюдений не превышает 200 часов наблюдений (8 орбит КТ «Спектр-УФ»). По результатам проведенных расчётов было показано, что предельные расстояния для обнаружения NO на экзопланетах в зоне обитаемости у спокойных звёзд солнечного типа не превышают 1 пк. Однако, пределы обнаружения NO могут увеличиться до 8 и 30 пк для суперземель и мининептунов, которые находятся в зоне обитаемости у активных звёзд, и подвержены: а) интенсивным высыпаниям электронов в атмосферу (с потоком энергии $80 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$), и б) высоким потокам жесткого УФ излучения (равным 5-ти солнечным XUV-потокам). По результатам исследования отобраны 7 экзопланет, наиболее подходящих для поиска в их атмосферах молекулы NO с помощью «Спектра-УФ».

В **Заключении** представлены основные итоги выполненной диссертационной работы и обсуждаются некоторые направления дальнейших исследований.

Достоверность результатов, публикации и апробация работы

Достоверность полученных результатов, положений и выводов обеспечивается применением обоснованных теоретических моделей. Валидация разработанных моделей показала хорошее соответствие с результатами наблюдений молекулы NO в верхней атмосфере Земли, и с моделями других авторов. Также достоверность подтверждается публикацией полученных результатов в 6-ти статьях в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК. Результаты проведенных исследований были представлены на 12-ти всероссийских и международных конференциях.

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в результате совместных исследований, опубликованных с соавторами в научных статьях. Автор принимал прямое непосредственное участие в написании всех статей. Г. Н. Цуриков самостоятельно получил

основные результаты, представленные в диссертации, активно участвовал в постановке задачи, построении моделей, анализе и обсуждении результатов исследования.

Отметим некоторые **замечания** к работы:

1) Использование некорректных терминов. Хотя направление исследований экзопланет является очень молодым в мировой астрономии, особенно в русскоязычной её части, тем не менее определённая номенклатура даже в русскоязычном сегменте уже сложилась. Записанные в тексте диссертации обозначения «супер-земля» и «суб-нептун» являются калькой с английских словообразований «Super-Earth» и «Sub-Neptune» (или «Mini-Neptune»), но в современном русском языке термины «суперземля» и «мининептун» (или «субнептун», по аналогии с «субземля», «миниземля») записываются строчными буквами без использования дефиса после приставки.

В термине «зона потенциальной обитаемости» слово «потенциальная» лишнее. Понятно, что с точки зрения науки термин «зона потенциальной обитаемости» более корректен, чем «зона обитаемости», но последний уже сложился в русском языке (так же, как и в английском «habitable zone»). Широко известно, что в астрономии много терминов сложилось исторически, часто не отражают суть явления и применяются просто как удобные короткие обозначения чего-либо. К примеру, астрономические «металлы» включают в себя и химические неметаллы, «планетарные туманности» не имеют отношения к планетам (или очень опосредованное), «сверхновые» вовсе не являются новорождёнными звёздами, и т.д.

2) Все отобранные в работе экзопланеты, потенциально пригодные для обнаружения НО с помощью «Спектра-УФ», были открыты методом лучевых скоростей, и с большой вероятностью транзитными не являются. Некоторые из систем, в которых находятся эти планеты, дополнительно исследовались на предмет наклона плоскостей орбит, а также поиска транзитов (например, τ Ceti, HD 10180, HD 69830), и было показано, что их планеты не являются транзитными. Также, поскольку большинство планетных систем являются «плоскими», т.е. динамически холодными, то обнаружение транзитов хотя бы одной планеты в системе существенно увеличивает вероятность обнаружения транзитов и у каких-нибудь других планет в той же системе. Однако, представленных в диссертации систем нет в нынешней версии каталога транзитных кандидатов TESS.

3) Все отобранные для поиска биомаркеров в диссертации экзопланеты по признаку массы относятся к нептонам или мининептонам (даже не к суперземлям), причём это в лучшем случае, – если наклоны их орбит не слишком велики относительно луча зрения. В противном случае, из-за параметра наклона орбиты i в выражении $m \cdot \sin(i)$, реально эти планеты могут оказаться газовыми гигантами.

Нептун и мининептун не являются хорошими объектами для потенциальной обитаемости, а значит и для поиска у них биомаркеров, хотя некоторые из таких веществ на (мини)нептунах могут быть обнаружены (к примеру, метан, вода), но иметь абиогенное происхождение.

Учитывая современные знания о такого типа планетах, можно с огромной уверенностью утверждать, что (мини)нептун обладают слишком плотными атмосферами из водорода-гелия, либо из более тяжёлых веществ, а достаточно тонкие атмосферы, допускающие присутствие жидкой воды, маловероятны. По данным наблюдений даже более сильно освещённые родительской звездой, чем Земли и Венера планеты с массами более 3–4 масс Земли с большой вероятностью имеют более низкие плотности, чем можно было бы ожидать от планет с силикатным составом, а значит они имеют заметную долю летучих веществ в своём составе. Для наглядности, атмосфера Венеры, имея почти в 90 раз более массивную атмосферу, чем у Земли, увеличивает её оптический транзитный радиус на 120–130 км, т.е. примерно на 1%, что не сильно влияет на её среднюю плотность, значение которой даже с учётом толщины атмосферы не сдвигает планету в область океанид и мининептунов по доле летучих веществ. Но у многих даже нагретых мининептунов измеренная средняя плотность слишком низка для объяснения её присутствием тонкой

атмосферы, подобной атмосфере Венеры, тем более земной. По определению, (мини)нептуны – это планеты с атмосферами, по сравнению с которыми атмосфера Венеры, составляющая около 10^{-4} её полной массы, является очень тонкой.

Ожидается, что мининептуны в зоне обитаемости за время жизни солнцеподобных звёзд могут сохранять свои обширные атмосферы даже при меньших массах, чем 3–4 массы Земли.

Чрезвычайно мощный парниковый эффект в плотной атмосфере не позволит существовать океану из воды в обычной жидкой фазе в любом месте консервативной или оптимистической зоны обитаемости звёзд. Вместо этого, на мининептунах под внешней атмосферой, вероятно, присутствует толстый, в тысячи км, слой воды в сверхкритическом состоянии. Вода может быть смешана с другими летучими компонентами, например водородом-гелием, углекислым газом, метаном. В глубоких слоях сверхкритической оболочки при огромных температурах и давлениях происходит растворение горных пород в воде, поэтому резкой границы с силикатным ядром также ожидать не приходится. Кроме того, химические реакции в тех условиях могут порождать экзотические соединения, к примеру, моносилан, на некоторой глубине сам образующий слой тумана-облачности. Аммиак и азот же могут эффективно растворяться в восстановительном магматическом океане.

Над сверхкритическим «океаном» атмосферная вода на планете в классической зоне обитаемости образует слой облаков. Там могут идти дожди. Этот облачный слой – единственное место на (мини)нептунах, где вода может находиться в обычном жидком состоянии в виде капелек. Зарождение и развитие каких-то форм жизни в облачных слоях является предметом будущих исследований.

4) В таблицах 7 и 10 ошибка в названии системы – вместо HD 31527 записано HD 31257.

Указанные в отзыве замечания не снижают общую положительную оценку диссертации, не влияют на основные выводы и положения, выносимые на защиту.

Заключение

Диссертационная работа Цурикова Григория Николаевича «Исследование молекулы NO как потенциального биомаркера в атмосферах экзопланет» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, является законченным научным исследованием, существенно дополняющим возможности поиска биосфер при наблюдениях потенциально пригодных для жизни планет. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам). Автореферат диссертации в полном объеме отражает основные результаты, полученные в работе. Соискатель Цуриков Григорий Николаевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

Текст отзыва обсуждён и утверждён на астрофизическом семинаре CAO РАН 3 июня 2025 г.

Директор CAO РАН,
кандидат физико-математических наук
тел.+7 988 918 90 37
email: gvalyavin@gmail.com



Г. Г. Валявин

Научный сотрудник CAO РАН,
кандидат физико-математических наук
тел. +7 988 918 29 85
email: gdamir-85@mail.ru



Д. Р. Гадельшин

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

369167, п. Нижний Архыз, Зеленчукский район, Карачаево-Черкесская республика

Тел.: +7 87878 46336

Факс: +7 87878 46315

Email: admsao@sao.ru