

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу
Цурикова Григория Николаевича
«Исследование молекулы NO как потенциального биомаркера в атмосферах
экзопланет»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.1. Физика космоса, астрономия

Актуальность темы диссертации. Диссертация посвящена теоретическому исследованию условий для обнаружения потенциально обитаемых экзопланет. Удаленность экзопланет не позволяет обнаружить на них жизнь напрямую с помощью современных телескопов. Поэтому важной и актуальной задачей является поиск в атмосферах экзопланет определенных молекул, потенциальных биомаркеров, которые могут указать на особый химический состав атмосферы, сформированный в результате биологических и геологических процессов. В диссертации Цурикова Г. Н. предлагается в качестве потенциального биомаркера вести поиск молекулы NO, которая является индикатором N_2 -O₂ атмосферы планеты. По современным представлениям N_2 -O₂ атмосфера может быть сформирована на планете в результате высокой биологической активности. В работе впервые детально исследуются условия для регистрации спектральных γ -полос NO в атмосферах экзопланет земного типа с помощью планируемого российского космического телескопа «Спектр-УФ». Таким образом, диссертационное исследование, несомненно, является актуальным, имеет теоретический и прикладной интерес.

Содержание диссертации и оценка ее соответствия заявленной специальности.

Во введении сформулированы актуальность и новизна диссертационной работы, ее цели и задачи, практическая и теоретическая значимость.

В первой главе проведен анализ современного состояния проблемы поиска потенциально обитаемых экзопланет. Проанализированы молекулы, которые являются потенциальными биомаркерами в атмосферах экзопланет. Обсуждаются спектральные линии этих молекул, которые можно потенциально обнаружить с помощью современных и планируемых телескопов. Показано, что молекула NO является надежным и перспективным биомаркером для поиска в ультрафиолетовой части спектра, в отличие от других молекул, состоящих из N и O. Ставится задача на исследование возможности обнаружения спектральных линий NO с помощью «Спектр-УФ».

Во второй главе представлено описание комплекса физико-математических моделей, предназначенных для исследования условий по обнаружению молекулы NO в атмосферах экзопланет с помощью «Спектр-УФ». На первом этапе для определения концентрации NO в атмосферах экзопланет используется химическая модель с учетом диффузии. На втором этапе используются модели для построения эмиссионного и трансмиссионного спектра NO в ультрафиолетовой части спектра. На третьем этапе используется модель расчета отношения сигнала к шуму, необходимого для регистрации NO в атмосферах экзопланет с помощью спектрографов «Спектр-УФ». Проверка этих моделей показала хорошее соответствие с измерениями NO в земной атмосфере и другими моделями.

Третья глава посвящена моделированию образования NO в атмосферах экзопланет у активных звезд. Показано, что интенсивные выбросы электронов в атмосферы планет, которые являются следствием больших потоков звездного ветра, могут привести к росту концентрации NO в атмосфере. Значительный вклад в образование NO при таких условиях вносит реакция надтепловых атомов азота с молекулярным кислородом. Из-за вклада этой реакции увеличение содержания NO может происходить линейно с ростом потока высыпавшихся электронов. Это приведет к большей концентрации NO, чем на планетах у спокойных звезд, и может увеличить шансы для обнаружения данной молекулы.

В четвертой главе представлены результаты расчетов предельных расстояний до экзопланет, на которых можно зарегистрировать спектральные линии NO в их атмосферах с отношением $S/N = 3$ за время < 200 часов. В качестве основного инструмента рассматривается спектрограф низкого разрешения телескопа «Спектр-УФ». Показано, что для экзопланет у спокойных звезд предельные расстояния не превышают 1 пк. Но для экзопланет у активных звезд, которые подвержены интенсивным выбросам электронов и XUV излучению предельные расстояния могут увеличиться до 30 пк. По результатам расчетов отобрано 7 экзопланет, наиболее пригодных для поиска на них молекулы NO с помощью «Спектр-УФ».

В заключении представлены основные итоги исследования и обсуждаются рекомендации для дальнейшей разработки темы диссертации.

Вышеперечисленные теоретические исследования условий для обнаружения потенциального биомаркера NO на экзоплантах с помощью космического телескопа «Спектр-УФ», составляющие содержание диссертации, полностью соответствуют заявленной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Автором диссертации впервые разработана модель нетеплового образования окиси азота как результат высыпания электронов в N_2-O_2 доминантную атмосферу планеты земного типа. Эта модель позволяет исследовать образование NO в атмосферах экзопланет у активных звезд с более высокими потоками звездного ветра, чем у Солнца. С помощью этой модели впервые было показано, что за счет высокой эффективности реакции надтепловых атомов N с O_2 концентрация NO в атмосфере может увеличиваться линейным образом с ростом потока высыпающихся электронов.

На основе проведенного моделирования впервые показано, что с помощью «Спектр-УФ» можно потенциально зарегистрировать спектральные линии молекулы NO на типичных супер-землях и суб-нептунах, которые находятся в зоне потенциальной обитаемости у активных звезд и расположены на расстояниях вплоть до 8-ми и 30-ти пк от Земли, соответственно. Впервые выделены экзопланеты, наиболее оптимальные для поиска молекулы NO в их атмосферах с помощью спектрографа на борту «Спектр-УФ». Полученные результаты являются новыми и представляют интерес для планируемых наблюдательных и теоретических исследований атмосфер экзопланет земного типа с помощью таких ультрафиолетовых космических миссий как «Спектр-УФ» или «Habitable World Observatory».

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность. Достоверность представленных результатов подтверждается использованием обоснованных теоретических моделей, проверка которых показала хорошее соответствие с результатами наблюдений земной атмосферы и признанными моделями других авторов. Все сформулированные выводы работы убедительно обосновываются на основе детального анализа физики рассматриваемых явлений. Основные результаты диссертации апробированы на многочисленных всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 6 статьях в ведущих российских и мировых рецензируемых научных журналах, которые входят в список, рекомендованный ВАК.

Научная и практическая значимость научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. По результатам выполненного исследования показано, что потенциальный биомаркер молекулу NO возможно обнаружить с помощью ультрафиолетового космического телескопа «Спектр-УФ» на экзопланетах земного типа, которые находятся в зоне обитаемости у активных звезд и расположены на расстоянии

вплоть до 30 пк от Земли. Практическая значимость заключается в том, что: 1) выработаны рекомендации для научной программы «Спектр-УФ» по поиску молекул-биомаркеров в атмосферах экзопланет; 2) разработанная химическая модель может быть использована для определения состояния земной термосферы в области работы низкоорбитальных спутников; 3) разработанная модель расчета сигнала к шуму использовалась при построении калькулятора экспозиций «Спектр-УФ». Результаты диссертации могут представлять интерес для астрофизиков и астрономов КрАО РАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, САО РАН, ГАО РАН, СПбГУ и других астрономических организаций, в которых проводятся исследования экзопланет.

Соответствие автореферата диссертации ее содержанию. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. В автореферате сформулированы и обоснованы цель и задачи диссертации, описано содержание диссертации по главам, приведены основные результаты работы, отмечены публикации автора.

Недостатки и замечания по диссертации.

1. В разделе 2.1.4 представлены результаты проверки модели образования молекулы NO на примере земной атмосферы. На Рисунке 8 проводится сравнение результатов моделирования с моделью (Bailey et al., 2002) и наблюдениями земной атмосферы для двух случаев высыпания электронов. На основе этого сравнения делается вывод, что построенная модель описывает наблюдения при промежуточном значении энергии высыпающихся электронов $1 \text{ кэВ} < E_0 < 4 \text{ кэВ}$. Автору следовало привести конкретное значение E_0 , при котором модель наилучшим образом совпадает с наблюдениями.
2. В диссертационной работе в качестве верхнего ограничения на суммарное наблюдательное время для поиска сигнала молекулы NO с помощью космического телескопа «Спектр-УФ» установлено 200 часов. Получение такого количества наблюдательного времени на орбитальном телескопе представляется сомнительным. Более эффективным нежели увеличение длительности накопления, для решения задач, озвученных диссертантом, видится коронограф (в рамках проекта Спектр-УФ) для работы в видимом диапазоне длин волн.
3. В разделе 2.3 представлена методика расчета наблюдательного времени для регистрации молекулы NO на экзопланете. Эта методика является идеализированной, так как не учитывает влияния вспышечной активности звезд и их запятненности на регистрируемый сигнал. Для обнаружения молекулы NO необходимо накапливать

сигнал более 6 транзитов. За это время изменяется активность звезды, на звезде появляются новые активные области. Эти факторы будут препятствием при получении статистически значимого сигнала. В диссертации данная проблема обсуждается на страницах 75-76. Без учета указанных факторов получаемую в работе оценку наблюдательного времени для регистрации сигнала следует называть теоретическим пределом.

4. Согласно полученным результатам, обнаружение молекулы NO на экзопланете возможно, если ее атмосфера подвержена высокому потоку XUV излучения, в 5 и более раз превышающему солнечный поток. Из текста диссертации неясно, остается ли атмосфера экзопланеты сферически симметричной при таких потоках XUV излучения звезды.

Указанные замечания не затрагивают основные положения и выводы работы, не снижают ее значимости и не влияют на общую высокую положительную оценку работы.

Заключение. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением ВАК о порядке присуждения ученой степени кандидата наук, а ее автор, Цуриков Григорий Николаевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
заместитель директора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Крымская
астрофизическая обсерватория РАН»,
298409, Республика Крым,
Бахчисарайский р-н., пгт. Научный,
ФГБУН «КраО РАН»
тел./факс: +7-36554-71010
e-mail: antoniuk@craocrimea.ru

Антонюк Кирилл
Анатольевич

Подпись Антонюка К. А. заверено
Ведущий специалист по кадрам
25.06.2025

«Крымская астрофизическая обсерватория РАН»
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

В. С. Мазова