

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

Диссертационная работа Цурикова Г. Н. посвящена исследованию газовой кинетики молекулы монооксида азота NO, произведенной N_2 -O₂ доминантной атмосферой по аналогии с Землей, а также переносу газокинетических моделей на другие типы экзопланет, такие как суперземли и субнептуны. Проанализированы эволюционные модели N_2 -O₂ атмосферы, исследованы механизмы формирования и удержания NO в верхней атмосфере планеты, рассчитаны вертикальные профили концентрации и температур, которые верифицированы по спутниковым наблюдениям (КА SNOE). Предложено наблюдение потенциального биомаркера монооксида азота NO в атмосферах экзопланет в зоне потенциальной обитаемости (ЗПО).

Показано, что идентификация неблэндируемых спектральных линий молекулы NO является надежным индикатором N_2 -O₂ доминантной атмосферы, которая, возможно, была сформирована в результате биологической активности, и потенциальной обитаемости. Исследована возможность практического наблюдения молекул монооксида азота спектроскопическими трансмиссионным и эмиссионным методами. Так, измерение глубины транзита в зависимости от длины волны производят методом трансмиссионной спектроскопии, которая, следуя приведенным расчетам, детектирует молекулы NO при многотранзитном наблюдении γ -полос в ближнем УФ диапазоне 203-248 нм длин волн у ближайших транзитных экзопланет на межзвездном расстоянии до 30 пк, посредством космического телескопа метрового класса и спектрографа. Проведены расчеты детектирования NO методами эмиссионной спектроскопии при согласованной работе звездного коронографа.

Диссертационная работа актуальна, так как показано, что с помощью планируемого к запуску космического телескопа «Спектр-УФ» возможно обнаружить спектральные полосы NO в атмосферах супер-земель и суб-нептунов, у ближайших звезд G и K класса с высокими потоками жесткого УФ излучения и солнечного ветра. Составлен список экзопланет, где рекомендовано вести поиск NO с помощью орбитального телескопа «Спектр-УФ», оценены экспозиции.

Диссертация Цурикова Г. Н. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 169 страниц, включает в себя 31 рисунок и 10 таблиц. В списке литературы содержится 230 наименований.

Во **Введении** обоснованы актуальность исследования, описаны цели и задачи, резюмированы научная новизна, научная и практическая значимость полученных в работе результатов.

В **Главе 1** проведен анализ молекул, которые, во-первых, являются индикаторами N_2 -O₂ доминантной атмосферы на планете земного типа и, во-вторых, спектральные линии которых возможно практически зарегистрировать на экзопланетах с помощью современных телескопов. Основное внимание уделено молекуле NO, которая в отличие от других молекул из N и O атомов может в наблюдаемых концентрациях формироваться в верхней N_2 -O₂ атмосфере

планеты, поэтому ее спектральные γ -полосы могут выделяться (не блендироваться) на фоне полос O_2 и O_3 в ближнем УФ диапазоне спектра. По результатам проведенного анализа сформирована задача создания комплекса моделей для расчета условий наблюдения для обнаружения NO на экзопланетах с помощью орбитального телескопа «Спектр-УФ».

В **Главе 2** приводится подробное описание следующих численных моделей: а) химической модели образования NO в N_2 - O_2 доминантной атмосфере планеты в результате высыпания электронов; б) модели переноса излучения для построения спектров излучения и пропускания NO в ближнем УФ диапазоне; в) модели расчета S/N, необходимого для регистрации γ -полос NO в спектрах экзопланет с помощью «Спектр-УФ». Каждая из моделей прошла положительную проверку сравнением с результатами наблюдений земной атмосферы и моделями других авторов и публикаций.

В **Главе 3** исследованы возможные механизмы образования NO в предполагаемых N_2 - O_2 доминантных атмосферах экзопланет, которые находятся в зоне обитаемости у активных звезд с высокими потоками звездного ветра. Атмосферы таких планет подвержены интенсивным высыпаниям электронов, что способствует увеличению скорости образования NO. По результатам моделирования показано, что существенный вклад в образование NO на таких планетах может вносить реакция надтепловых атомов азота с O_2 . За счет этой реакции содержание NO увеличивается линейно с ростом потока энергии высыпающихся электронов. Поэтому на планетах в зоне обитаемости у активных звезд содержание NO может быть высоким, как и вероятность обнаружить эту молекулу.

В **Главе 4** исследованы условия обнаружимости монооксида азота NO на экзопланетах с помощью орбитального телескопа «Спектр-УФ», находящегося на этапе подготовки. Были рассчитаны предельные расстояния до модельных экзопланет, на которых с помощью спектрографа «СДЦ» («Спектр-УФ») с разрешением $R = 1000$ возможно зарегистрировать γ -полосы NO с $S/N = 3$ с экспозицией, не превышающей 200 часов. Показано, что для экзопланет у спокойных звезд (условия в атмосферах которых аналогичны земным) предельные расстояния обнаружения NO не превышают 1 пк. Однако, если экзопланета находится в зоне обитаемости у активной звезды G и раннего K спектральных классов и подвержена интенсивным высыпаниям электронов $\sim 80 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и высокому потоку жесткого УФ излучения $> 15 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, предельные расстояния обнаружения NO – увеличены. Так, предельное расстояние для регистрации NO методом трансмиссионной спектроскопии может составить 8 пк для супер-земель и 30 пк для суб-нептунов. Обнаружение излучения NO на таких планетных системах методом эмиссионной спектроскопии возможно только с помощью коронографа с номинальным контрастом 10^{-8} – 10^{-9} на борту «Спектр-УФ». Исходя из предельных расстояний были предложены экзопланеты, на которых рекомендуется вести поиск NO с помощью телескопа «Спектр-УФ».

В **Заключении** изложены основные выводы работы и намечены некоторые направления дальнейших исследований.

Научная новизна работы определяется, в частности, следующими положениями:

- В работе показано, что с помощью спектрографа с длиной щелью создаваемого космического телескопа «Спектр-УФ» возможно обнаружить NO в атмосферах ближайших (<30 пк) супер-земель и суб-нептунов, которые находятся в зоне обитаемости у более активных чем Солнце звезд G и K класса. Составлен список экзопланет для поиска признаков монооксида азота NO;
- Разработаны газокинетическая и химическая модели нетеплового образования NO в результате высыпания электронов. На их основе показано, что за счет вклада надтепловых атомов азота в образование NO прирост содержания окиси азота в атмосфере может составить 2 порядка величины относительно теплового механизма образования NO и имеет линейный характер при увеличении потока энергии высыпающихся электронов.

Достоверность и обоснованность полученных Цуриковым Г. Н. результатов связана с применением тщательно протестированных моделей и согласием полученных результатов с наблюдательными спутниковыми данными и признанными моделями других авторов.

Результаты диссертационной работы апробированы на 12-ти научных конференциях и семинарах, в том числе на 4-х международных. По теме диссертации опубликованы 7 работ, в том числе 6 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Выводы по диссертации соответствуют выводам, опубликованным в автореферате.

Имеются следующие замечания к диссертации:

1. Диссертационная работа логично и тематически организована по четырем главам, но после каждой главы отсутствуют выводы (по главам), что затрудняет прочтение, так как приходится обращаться к Заключение, где не конкретизированы выводы по каждой из глав.
2. В работе при расчетах используется понятие экзобазы, где взаимные соударения не могут удерживать частицы от потери их в космос, но не указан диапазон высот в км, (предположительно диапазон 500 -1000 км) данная оценка могла быть наглядной.
3. Не проанализированы возможности по наблюдению признаков монооксида азота NO еще функционирующего орбитального УФ телескопа им. Хаббла.
4. В подразделе 1.1 упомянуты абиотические механизмы производства O₂ и O₃ в верхней атмосфере и резюмируется, что кислород – в некоторой мере, *ненадежный биомаркер*, в этой связи интересно мнение соискателя по поиску протяженной кислородной OI *геокороны* у экзопланет, так как на существование такой короны оказывает влияние биотическое (*пере*)производство кислорода и др. связанные реакции, известные на Земле и, например, отсутствующие на внутренних планетах Марсе и Венере.
5. В тексте диссертации встречаются непрокомментированные или разъясняемые много позже сокращения, например стр. 30, «ре», «ае» затрудняющие понимание.
6. В настоящее время существование внутри первичной He-H атмосферы признаков вторичной атмосферы является наблюдательным фактом, в основном по измерениям космического телескопа и Дж. Уэбба (например, K2-18b). Считается, что суб-нептун с массой в 3 массы Земли скапливает первичную He-H атмосферу. Но все же о совместном сосуществовании первичной (*произошедшей сверху*) и вторичной N₂-O₂ – доминантной (*произошедшей снизу*) атмосфер и возможности наблюдения на высотах экзобазы следует говорить с большей осторожностью (чем в работе), или рассчитать, или

7. Сейчас, очевидно не существует единой классификации экзопланет по типам суб-нептунов, поэтому принятое деление допустимо см. Таблицу 6, но суб-нептун2 – это практически Уран С.С. $4R_{\text{Earth}}$, $15 M_{\text{Earth}} \approx 14.5 M_{\text{Earth}}$, почему же суб-нептун...
8. Поскольку большинство ближайших к Солнечной системе звезд – М спектрального класса, интересно посмотреть аналогичные расчеты экспозиций и для них.
9. В работе проанализированы возможности эмиссионной спектроскопии по детектированию признаков содержания монооксида азота (п. 2.3.2, 4.2 б). Этот вопрос связан с возможностью получения прямого изображения экзопланет (direct imaging), где оптимально положение планеты в элонгации (для наблюдателя), важные вопросы наблюдения фазовой кривой и число фотонов, пока решается задача разделить свет звезды и планеты в изображении, точный спектральный анализ, по-видимому, в будущем.
10. В тексте написаны не единым образом пере-излучение (например, стр. 28), переизлучение (стр. 78), последнее правильно.
11. В связи с содержанием работы в Таблице 10 было бы полезно указать, если известен, возраст рекомендованных планет для наблюдения орбитальным телескопом «Спектр-УФ», так как доминантная N_2-O_2 атмосфера имеет даже по земным меркам начальный временной интервал.
12. В подрисуночной подписи Рисунка 16 ошибочно указаны графики «на верхней панели» и «нижней панели», но Рисунок 16 состоит только из одной панели.
13. Таблицы 6 и 9 и Таблица 8 имеют разные обозначения сокращения суб-нептунов, лучше иметь единые обозначения, также в Таблице 8 есть сноски 1 и 2 без разъяснения.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук

Тавров А. В.

Подпись Александра Викторовича Таврова заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН

Садовский А. М.

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, +7(495)333-41-33, e-mail: tavrov@iki.rssi.ru

