

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Шематовича В.И.

на диссертацию Балюкина Игоря Игоревича

«Особенности распределения нейтральных компонент в гелиосфере и экзосфере Земли», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.03 – Физика Солнца и 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

В диссертационной работе Балюкина И. И. исследуются распределения межзвездных атомов кислорода и энергичных нейтральных атомов (ЭНА) водорода в гелиосфере, потоки которых измеряются приборами IBEX-Lo и IBEX-Hi на космическом аппарате (КА) Interstellar Boundary Explorer (IBEX), а также проведен анализ данных прибора Solar Wind Anisotropies (SWAN) на КА Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) по измерениям рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в водородной экзосфере Земли.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертационной работы составляет 182 страницы и содержит 47 рисунков. Список литературы содержит 149 библиографических ссылок.

Во Введении изложены цели и задачи работы, обоснована их актуальность, сделан обзор литературы по исследуемой тематике, сформулирована цель и показаны научная новизна исследований и практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе диссертации проведено исследование особенностей распределения потоков межзвездных атомов кислорода в гелиосфере, которые

были измерены прибором IBEX-Lo (0.01 – 2 кэВ) на орбите Земли. Анализ данных наблюдений КА IBEX выполнен с использованием разработанной автором кинетической модели распределения атомов в гелиосфере.

Во второй главе проведен анализ данных прибора IBEX-Hi (0.3 – 6 кэВ) по измерению потоков ЭНА водорода, которые рождаются в области внутреннего ударного слоя при перезарядке захваченных протонов с межзвездными атомами водорода. На основе разработанной автором кинетической модели и данных КА IBEX были исследованы пространственное и энергетическое распределения захваченных протонов в гелиосфере.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования распределения атомов водорода в экзосфере Земли (геокоороне). Приведены результаты моделирования солнечного Лайман- α излучения, рассеянного на атомах водорода в геокоороне, на основе разработанной автором кинетической модели. В главе также выполнено детальное сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными прибора SWAN на КА SOHO.

В Заключение изложены основные выводы диссертационной работы.

Диссертантом получены новые и важные результаты, а именно:

- Сравнение результатов численных расчетов с данными прибора IBEX-Lo позволило впервые получить теоретическое объяснение особенности, которая наблюдается на карте потоков атомов кислорода. Было установлено, что эта особенность формируется вторичной компонентой межзвездного кислорода, которая образуется на границе гелиосферы вследствие процесса перезарядки.
- С использованием данных прибора IBEX-Hi, измеряющего потоки ЭНА, и при помощи трехмерной нестационарной кинетической модели были по-

лучены количественные оценки параметров функции распределения захваченных протонов по скоростям за гелиосферной ударной волной.

- Детальный анализ данных измерений SWAN/SOHO позволил установить, что геокорона простирается до расстояний порядка 100 радиусов Земли, что превышает все предыдущие оценки. На основе кинетической модели распределения атомов водорода в экзосфере и данных прибора SWAN/SOHO были восстановлены профили концентрации водорода в экзосфере.

Имеется несколько замечаний по диссертационной работе.

1) По главе 1 в основном замечания технического характера, и относительно используемой терминологии. Так, на стр. 22, приводится число Кнудсена как отношение характерных времен, хотя обычно оно задается как отношение характерного микро- к макро- размеру в системе. На стр. 36 говорится об существенном влиянии магнитного поля на направление вторичных атомов кислорода. Надо более детально объяснить как это происходит? Стр. 37 - почему задается максвелловское распределение для вторичных атомов кислорода на внешней границе на 70 а.е. - требуется более ясное обоснование.

2) Так же, на взгляд оппонента, некоторые рисунки в Главе 1 переусложнены, например, Рис. 1.6. Представляется, что проще было бы разбить на два рисунка, на которых представлено несколько панелей. На некоторых из рисунков показаны штрих-пунктирные кривые, описания которых нет в легендах к рисункам. Или это накладка одной кривой на другую, например, на рис. 1.6(А, (2))? Необходимы пояснения в подписях к рисункам.

3) По Главе 3 есть важное замечание относительно использованной кинетической модели и выбранных условий на нижней границе кинетической модели - на экзобазе (стр. 115). Опять использовано распределение Максвелла по скорости для атомов водорода на уровне экзобазы. Сейчас из тех же измерений све-

тимости экзосферы Земли в линии Лайман-альфа, полученных другими инструментами, например, спектрографом GUVI на КА TIMED, УФ-спектрометром на КА TWINS, спектрометром SI-12 на КА IMAGE и др., выявлен вклад надтепловых атомов водорода в распределение H как в переходной от термосферы к экзосфере области, так и собственно в геокороне. Это отмечено, например, в недавних работах (Qin & Waldrop. (2016). Non-thermal hydrogen atoms in the terrestrial upper thermosphere. *Nature Communications*, 7:1365; Joshi et al. (2019). Quantification of the vertical transport and escape of atomic hydrogen in the terrestrial upper atmosphere. *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 124, <https://doi.org/10.1029/2019JA027057>; Qin et al. (2018). Nonparametric H density estimation based on regularized nonlinear inversion of the Lyman alpha emission in planetary atmospheres. *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 123, 8641–8648), и др., в которых приводятся распределения водорода с учетом вклада надтепловой фракции вплоть до нескольких десятков радиусов Земли. Интересно было бы сравнить с приведенными в диссертации оценками и возможно в последующих работах уточнить используемое граничное условие с учетом надтепловой фракции атомов водорода.

4) В используемой кинетической модели для расчета распределения H в геокороне возможно учесть также и источник атомов водорода с высокими энергиями, которые образуются за счет перезарядки протонов солнечного ветра с экзосферными атомами H за пределами земной магнитосферы. Данное замечание можно скорее рассматривать и как пожелание учесть перечисленные выше процессы и явления в дальнейшей работе диссертанта.

В тексте диссертации также присутствует целый ряд неудачных выражений - "... классической горячей модели" (стр. 21); "...сумма двух трижды максвелловских функций распределения" (стр. 29); "... предполагается, что число Кнудсена много больше 1" (стр. 112; число Кнудсена должно быть рассчитано!).

Вместе с тем, приведенные выше замечания не умаляют значимости результатов диссертационного исследования.

В целом, диссертационная работа Балюкина И.И. представляет собой законченное исследование в области изучения Солнечной системы. Результаты диссертационного исследования опубликованы в российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных системах цитирования, а так же представлены на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Диссертационная работа Балюкина И.И. отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальностям 01.03.03 -- Физика Солнца и 01.02.05 -- Механика жидкости, газа и плазмы, а её автор - Балюкин Игорь Игоревич - несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, заведующий отделом

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук



Шематович Валерий Иванович

Подпись В.И. Шематовича заверяю:

Ученый секретарь ИНАСАН

10 июня 2022 г.



А.М. Фатеева