

Заявка на конкурс научных работ ИКИ 2025 г. в номинации «Лучшая научная работа или цикл работ молодого учёного»

1. Автор

Балюкин Игорь Игоревич, к.ф.-м.н., н.с. лаб. 534 отд. 53

2. Название

Исследование пояса энергичных частиц на основе кинетической модели транспорта захваченных протонов в пределе отсутствия рассеяния

3. Ссылка на публикацию

Baliukin I. I., Izmodenov V. V. «Understanding the IBEX ribbon using the kinetic model of pickup proton transport in a scatter-free limit» // *Advances in Space Research*, 2025, 76, 1917–1938, DOI: [10.1016/j.asr.2025.05.030](https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.030)

4. Общая формулировка научной проблемы и её актуальность

Одним из ключевых открытий космического аппарата (КА) *Interstellar Boundary Explorer (IBEX)* стало обнаружение так называемого «пояса энергичных частиц» — узкой полосы повышенных потоков энергичных нейтральных атомов (ЭНА) на небесной сфере. Общепринятое объяснение природы пояса связано с механизмом генерации вторичных ЭНА, в котором (1) первичные атомы водорода, рождённые в гелиосфере, покидают её пределы, затем (2) испытывают процесс перезарядки с протонами локальной межзвёздной среды (ЛМС), образуя захваченные протоны, (3) которые, в свою очередь, вновь перезаряжаются (с межзвёздными атомами водорода), порождая вторичные ЭНА, часть которых возвращается к Солнцу и регистрируется космическим аппаратом *IBEX* на орбите Земли. Несмотря на значительный прогресс в моделировании, многие аспекты формирования пояса остаются не до конца ясными, включая роль различных популяций первичных ЭНА и эффективность рассеяния захваченных протонов по питч-углу за пределами гелиопаузы. Уточнение этих механизмов критически важно для понимания структуры границы гелиосферы и свойств локальной межзвёздной среды.

5. Конкретная решаемая в работе задача и её значение

В представленной работе разработана кинетическая модель, позволяющая вычислять потоки вторичных ЭНА из внешнего ударного слоя (области между гелиопаузой и головной ударной волной) в рамках механизма генерации вторичных ЭНА. В работе впервые на основе кинетического подхода были учтены все основные популяции первичных ЭНА:

- (1) «нейтральный солнечный ветер» (атомы водорода, рожденные в процессе перезарядки тепловой компоненты протонов в сверхзвуковом солнечном ветре);
- (2) нейтрализованные захваченные протоны (атомы водорода, рожденные в процессе перезарядки захваченных протонов в области сверхзвукового солнечного ветра);

(3) ЭНА из внутреннего ударного слоя (области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой).

Транспорт захваченных протонов за пределами гелиопаузы описывался кинетическим уравнением для гиротропной функции распределения по скоростям в пределе отсутствия рассеяния (scatter-free limit). В работе было проведено детальное сравнение результатов моделирования потоков ЭНА с данными прибора *IBEX-Hi* (0.7–6 кэВ), которое позволило оценить вклад различных популяций первичных энергичных атомов в формирование пояса ЭНА и обоснованность используемых физических предположений.

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

Новизна работы заключается в использовании комплексного кинетического моделирования всей цепочки генерации потоков ЭНА из области пояса *IBEX*:

- Учёт всех популяций первичных ЭНА, включая ЭНА из внутреннего ударного слоя, которые ранее в моделях не рассматривались.
- Решение транспортного уравнения для анизотропной функции распределения захваченных протонов за гелиопаузой в пределе отсутствия рассеяния по питч-углу и диффузии в пространстве скоростей.
- Использование глобальных распределений плазмы и атомов водорода, полученных в рамках современной трехмерной кинетико-МГД модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС (Izmodenov & Alexashov 2020).
- Применение метода характеристик для решения кинетических уравнений, которое позволило эффективно моделировать перенос частиц и повысить точность расчетов.

7. Полученные результаты и их значимость

- Показано, что разработанная модель качественно воспроизводит данные наблюдений пояса энергичных частиц и демонстрирует хорошее количественное согласие в областях карты неба на низких гелиоширотах.
- Установлено, что основной вклад в потоки пояса ЭНА на низких энергиях (0.7–1.7 кэВ) вносят вторичные ЭНА, рожденные из нейтрального солнечного ветра, тогда как на высоких энергиях (2.7–4.3 кэВ) доминируют вторичные ЭНА, рожденные от популяции ЭНА из внутреннего ударного слоя.
- Впервые в рамках кинетического подхода показана ключевая роль ЭНА из внутреннего ударного слоя в формировании пояса на высоких энергиях, что указывает на необходимость их учёта для корректной интерпретации данных.

Результаты работы являются важным шагом в понимании физики пояса *IBEX* и демонстрируют потенциал кинетического подхода для диагностики свойств границы гелиосферы. Анализ потоков ЭНА из пояса *IBEX* является одним из основных способов определения ориентации и величины межзвездного магнитного поля. Разработанная модель может быть использована для интерпретации данных будущих миссий, таких как недавно запущенная миссия *Interstellar Mapping and Acceleration Probe (IMAP)*.