

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЙ  
ЭФФЕКТОВ НОВОЙ ФИЗИКИ**

Научный руководитель

доц. д.ф-м.н., проф.

Студент

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

\_\_\_\_\_ Н. Г. Монаков

Москва 2021

# Содержание

Введение	5
1 Источник и перемещения АКЛ в пределах гелиосферы	5
2 Механизмы увеличения энергии АКЛ	6
3 Орбитальные станции как инструмент исследования АКЛ	7
Заключение	8
Список литературы	8

## **Используемые сокращения и обозначения:**

**АКЛ** Аномальные космические лучи

**СКЛ** Солнечные космические лучи

**ГКЛ** Галактические космические лучи

**КЛ** Космические лучи

**ЛМС** Локальная межзвёздная среда

**ППИ** Первый потенциал ионизации

**АСЕ** Advanced Composition Explorer

# Введение

Исследования новой физики предполагают анализ предсказаний аномальных компонент космических лучей, таких как антиядра, ускоренные частицы скрытой массы или ее составляющих. Подход к этой теме требует изучения традиционных представлений об аномальных космических лучах и их происхождении, чему посвящена данная работа.

В начале 70-х годов прошлого века изучение галактических космических лучей малых энергий, проводимое на космических аппаратах Pioneer-10, IMP-5 и др., привело к открытию аномальной компоненты космических лучей. Её составляют не полностью ионизованные атомы *He, C, N, O, Ne, Ar*. Аномальность проявляется в том, что в области энергий от нескольких единиц до нескольких десятков МэВ/нуклон спектр частиц существенно отличается от спектра галактических космических лучей.

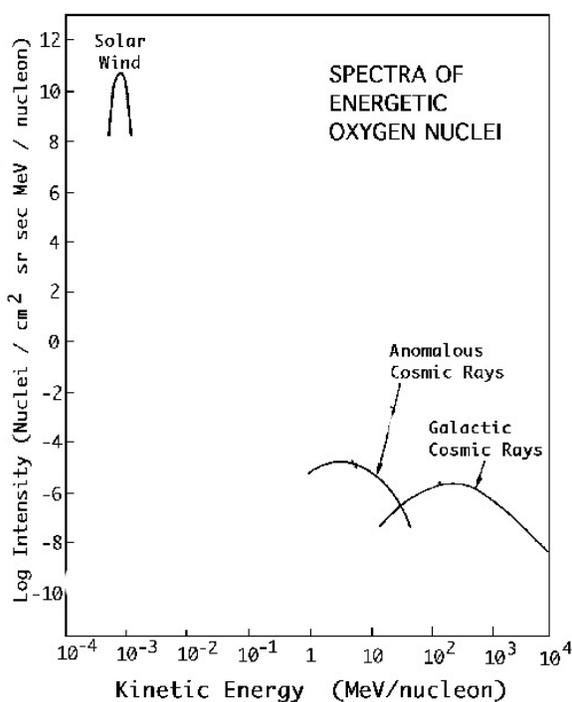


Рисунок 1 — Энергия частиц КЛ по данным ACE

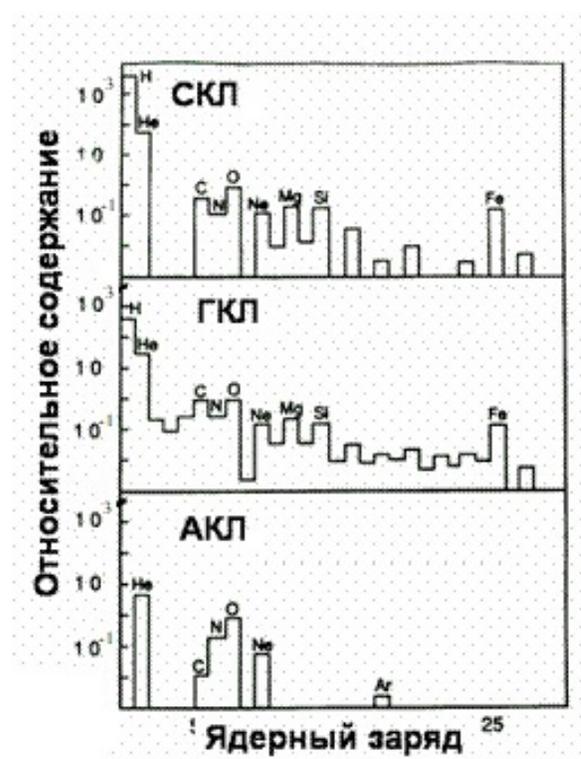


Рисунок 2 — Состав КЛ [1]

# 1 Источник и перемещения АКЛ в пределах гелиосферы

Исследования АКЛ привели к возникновению гипотезы их происхождения. Считается, что АКЛ образуются в результате проникновения в гелиосферу нейтральных атомов из ЛМС. Затем эти атомы ионизируются под действием солнечного ультрафиолета или посредством их перезарядки с ионами солнечного ветра и достигая окрестностей Солнца с энергией  $\sim 4\text{кэВ/нукл}$  выносятся солнечным ветром в направлении гелиопаузы, где они ускоряются до энергий  $\sim 10\text{МэВ/нукл}$  и вновь возвращаются в окрестности Солнца.

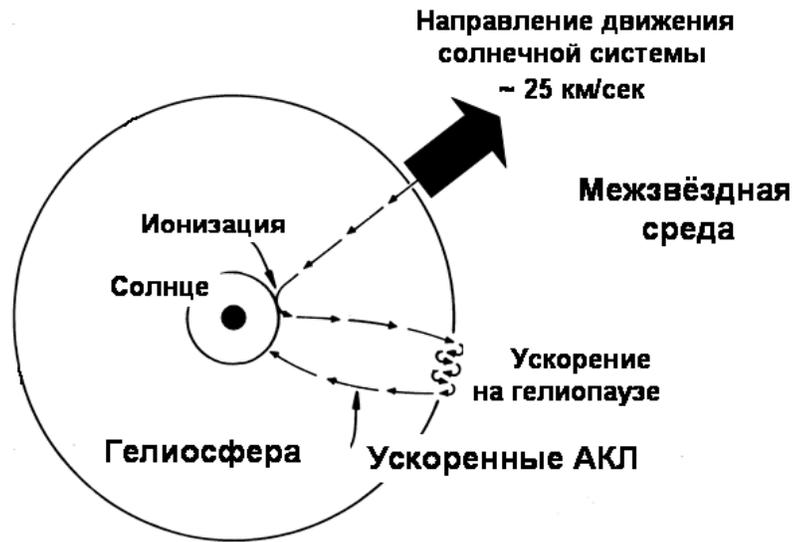


Рисунок 3 —Схема Формирования АКЛ

Данный механизм согласуется с наблюдаемыми свойствами АКЛ:

- исходя из плотности нейтрального водорода  $n_H = 0,1\text{ см}^{-3}$  в межзвездной среде и значении заряда АКЛ  $q < 2$  для ионов со скоростью  $v$  можно получить оценку  $d_{\text{max}} \sim 0,2\text{ пс}$  для расстояния до источника. При больших величинах  $d_{\text{max}}$  частицы, пройдя большее количество вещества, потеряют свои орбитальные электроны и приобретут заряд превышающий характерный для АКЛ. Таким образом, ЛМС – наиболее вероятный источник АКЛ. [2]
- для элементов с низким ППИ, таких, как  $Mg, Si, Fe$  не наблюдается локального возрастания их интенсивности, т.к. частицы с большим ППИ проникают глубже внутрь гелиосферы и поэтому подвергаются более эффективной фотоионизации под действием ультрафиолетовой эмиссии Солнца, а также перезарядки с ионами солнечного ветра.
- транспортировка посредством солнечного ветра, а, вернее говоря, посредством межпланетарного магнитного поля, образованных ионов АКЛ была подтверждена данными межпланетарного аппарата "Ulysses"

## 2 Механизмы увеличения энергии АКЛ

В научной литературе, данные механизмы сводятся к двум принципиальным механизмам ускорения: в непосредственно пространстве гелиопаузы и в процессе переноса АКЛ солнечным ветром. Касательно первого можно заключить следующее: в своей работе [3] Крымский Г.Ф. указывает, что наиболее эффективно ускорение частиц происходит при реализации механизма Ферми I-типа на параллельных и перпендикулярных ударных волнах в присутствии нерегулярностей магнитного поля. Для такого ускорения пространственная структура ударной волны, т.е. величина угла между нормалью к ударной волне и вектором магнитного поля, – играет ключевую роль в определении предела энергии ускоряемых на фронте ударной волны частиц.

Помимо этого, наличие нерегулярностей магнитного поля в окрестности ударной волны приводит к многократному пересечению частицами её фронта, что также увеличивает верхний предел ускорения.

Второй механизм освещается, в работах по анализу данных с упомянутого выше межпланетарного аппарата "Ulysses" [4]. Авторы заключают тот факт, что ионы  $^+He$  и  $^+H$  не солнечных КЛ ускоряются вращаясь вокруг силовых линий магнитного поля в  $\sim 100$  раз эффективнее нежели протоны и  $\alpha$ -частицы солнечного ветра в области взаимодействия потоков  $\sim 4.5$  а.е.

Однако выше описанные исследования не дают полной картины и требуют доработки, этой темы мы коснемся в заключении.

### 3 Орбитальные станции как инструмент исследования АКЛ

Частицы АКЛ захватываются магнитным полем Земли и могут быть исследованы на орбитальных станциях. Модель захвата описывается следующим образом: однократно заряженные ионы АКЛ, проникая внутрь геомагнитного поля, теряют свои орбитальные электроны на остаточной атмосфере в области высот  $\sim 300$  км и приобретают заряд  $q \gg 1$ . Увеличение зарядового состояния этих частиц обеспечивает условия для последующего их захвата на низких L-оболочках радиационных поясов. Эта модель была доказана с помощью спутников "Космос", где используя твёрдотельные детекторы, ориентированные в пространстве, удалось обнаружить захваченные ионы кислорода. Максимальная величина потока частиц  $\Phi_{\max}$  в разы превышала наблюдающуюся в межпланетном пространстве.

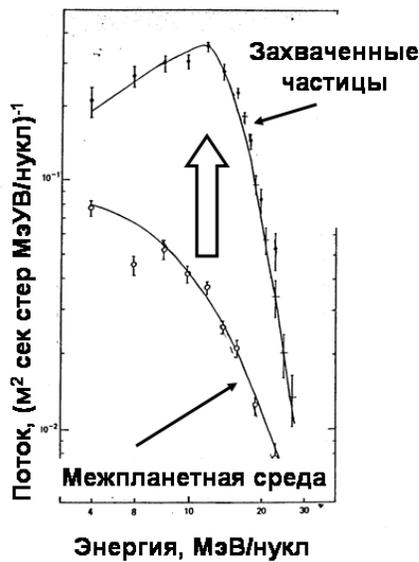


Рисунок 4 — Сравнения потоков АКЛ

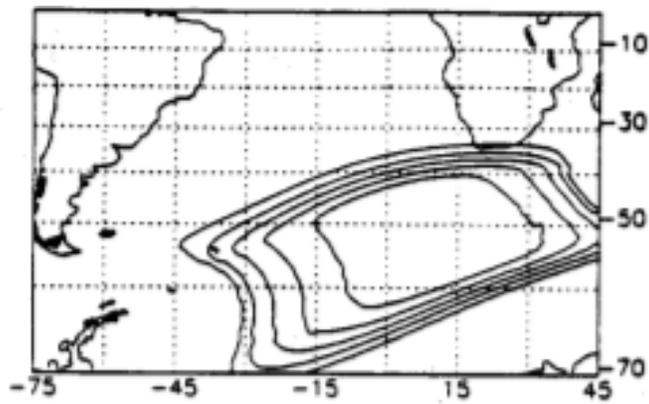


Рисунок 5 — Пояс захваченных АКЛ

Также удалось построить модель пространственного распределения пояса захваченных АКЛ, расположенного восточнее Южно-Атлантической магнитной аномалии, а в дальнейшем и подтвердить его существование прямыми измерениями.

## Заключение

АКЛ – весьма существенный компонент космического излучения. Плотность АКЛ во внешней гелиосфере в 3 раза больше, чем ГКЛ, а плотность энергии АКЛ составляет  $1/3$  от ГКЛ.

Понимание природы АКЛ важно, поскольку:

- АТЛ, как следует из исследований [5] подвергаются большей солнечной модуляции, чем ГКЛ. Поэтому они становятся более чувствительным инструментом для изучения электродинамики гелиосферы
- обеспечивают прямые измерения межзвёздного вещества ЛМС
- являются источником захваченной радиации внутри магнитосферы Земли

В конце напомню, что, как сказано в части 2 - модели увеличения энергии АКЛ удовлетворяют наблюдаемым данным, но, тем не менее не могут полностью объяснить источники и причины возрастания энергии до величин обнаруживаемых у АКЛ. Причины этого могут крыться как в потерях частиц на фронте волны, в особенностях геометрии границ гелиосферы, так и во влиянии факторов не рассматриваемых в предыдущих работах, а именно: антиядер, частиц скрытой массы и их составляющих, экзотических частиц. Дальнейшая работа будет заключаться в попытке ликвидации пробела в понимании данных процессов.

## Список литературы

- [1] Klecker. The Anomalous Component of Cosmic Rays in the 3-D Heliosphere. *ssr*, 72(1-2):419–430, April 1995.
- [2] Jr. Adams, J. H. and M. D. Leising. Maximum Distance to the Acceleration Site of the Anomalous Component of Cosmic Rays. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 3 of *International Cosmic Ray Conference*, page 304, August 1991.
- [3] G. F. Krymsky, A. I. Kuzmin, S. I. Petukhov, and A. A. Turpanov. Physical Principles of Regular Acceleration Mechanism of Charged Particles. In *International Cosmic Ray Conference*, volume 2 of *International Cosmic Ray Conference*, page 39, January 1979.
- [4] George Gloeckler, Johannes Geiss, E. Roelof, L. Fisk, F. Ipavich, K. Ogilvie, L. Lanzerotti, Rudolf Von Steiger, and B. Wilken. Acceleration of interstellar pickup ions in the disturbed solar wind observed on ulysses. *Journal of Geophysical Research*, 99, 10 1994.
- [5] Harm Moraal. Basic Properties of Anomalous Cosmic Ray Spectra. In *26th International Cosmic Ray Conference (ICRC26)*, Volume 7, volume 7 of *International Cosmic Ray Conference*, page 543, January 1999.