

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 524.1-52

**НЕРЕГУЛЯРНОСТЬ В МАССОВОМ СОСТАВЕ
ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ПРИ ЭНЕРГИИ ~ 10 ПЭВ**С. Е. Пятовский^{1,2}

Рассмотрена нерегулярность в массовом составе первичного космического излучения (ПКИ) при энергии ~ 10 ПэВ. Для оценки изменения массового состава ПКИ применен метод рентген-эмульсионных камер (РЭК) и метод гало, основанный на методе РЭК. Изучение изменения массового состава ПКИ выполнено по экспериментально полученным характеристикам стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ), где флуктуации данных характеристик минимальны и максимально сохранена информация о первичном взаимодействии ядер ПКИ с атомами атмосферы. Показано, что около $E_0 = 10$ ПэВ наблюдается локальный максимум доли тяжелых ядер. Данный максимум соотнесен с источниками ПКИ – звездами переменного типа SR (красные гиганты и сверхгиганты) и WR (Вольфа-Райе).

Ключевые слова: первичные космические лучи, массовый состав, звезды переменного типа.

Введение. Изменение массового состава ПКИ при высоких энергиях остается предметом научных дискуссий. Доля протонов при $E_0 = 1-100$ ПэВ оценивается от 5% до 20%, доля легких ядер $p+He$ – до 70% и выше, в зависимости от условий эксперимента и модели реконструкции развития ШАЛ в атмосфере [1]. Например, доля легких ядер

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sep@lebedev.ru.

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); 125993 Россия, Волоколамское ш., 4.

в массовом составе ПКИ в модели локального источника Vela Ерлыкина–Павлюченко [2] при $E_0 = 3\text{--}5$ ПэВ оценивается $\cong 88\%$, в то время как по данным эксперимента KASCADE-Grande [3] доля протонов в диапазоне $E_0 = 1\text{--}100$ ПэВ не превышает 10%. Одновременно, результаты эксперимента ARGO-YBJ [4] показали, что доля легких ядер начинает уменьшаться уже при $E_0 = 1$ ПэВ и массовый состав ПКИ существенно утяжеляется.

Для оценки массового состава ПКИ особый интерес представляет изучение характеристик стволов ШАЛ, где данные характеристики максимально чувствительны к массовому составу, а также имеют минимальные флуктуации при развитии ядерно-электромагнитного каскада (ЯЭК) в атмосфере. Стволы ШАЛ изучаются методом РЭК, который в настоящее время не имеет аналогов по пространственному разрешению регистрируемых γ -квантов. В экспериментах с РЭК при E_0 около 10 ПэВ наблюдаются события, лишь недавно получившие свое объяснение. В первую очередь, это семейства γ -квантов с гало, или просто гало. В исследованиях [5] показано, что гало больших площадей > 500 мм² образованы перекрытием подпороговых γ -квантов. Успешное моделирование всего спектра площадей гало позволило применить разработанный метод гало [6] для оценки массового состава ПКИ как малозависимый от моделирования прохождения ШАЛ через атмосферу. В настоящее время обработка данных РЭК эксперимента ПАМИР продолжается.

Метод РЭК. Для изучения стволов ШАЛ необходима установка с высоким координатным разрешением порядка десятка микрон и площадью десятки кв. м. Метод РЭК [7] – единственный, позволяющий решить данную задачу. Он является переходным между прямыми и модельно-зависимыми методами изучения событий в ШАЛ, образованных ядрами ПКИ с $E_0 \geq 100$ ТэВ. Результат экспериментов с РЭК – экспонированные рентгенографические пленки (РГП), на которых после проявки регистрируются области потемнения, т. н. γ -кванты. Измерение уровней потемнений D позволяет делать выводы об энергии электронно-фотонной компоненты (ЭФК) ШАЛ.

Схема РЭК эксперимента ПАМИР приведена на рис. 1. Цель эксперимента – получение статистики высокоэнергичных семейств γ -квантов в стволах ШАЛ и анализ характеристик данных семейств γ -квантов, образованных ядрами ПКИ с $E_0 \geq 0.1$ ПэВ. Полная экспозиция РЭК эксперимента ПАМИР составила $ST = 3000$ м²·год·ср на глубине атмосферы $H_{\text{ПАМИР}} = 594$ г/см².

Г-блок РЭК состоит из чередующихся слоев Рb и предназначен для регистрации ЭФК ШАЛ. ЭФК, проходя через Рb, образует вторичные каскады, оставляющие на

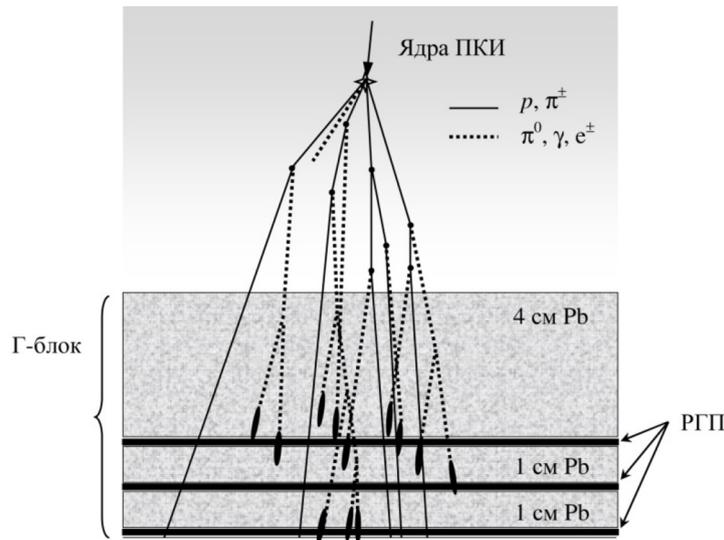


Рис. 1: Схема Г-блока РЭК эксперимента ПАМИР.

РГП области потемнений. γ -кванты фотометрируются, что позволяет оценить энергию E_γ частиц ЭФК ШАЛ, вызвавших электромагнитные каскады в Рб.

Исследования показали, что семейства γ -квантов образованы преимущественно протонами и, в меньшей степени, ядрами He, что позволяет изучать визуально наблюдаемые характеристики семейств γ -квантов на РГП как стволы ШАЛ, образованных легкой компонентой ПКИ.

Экспериментальные данные РЭК. Проанализированные экспериментальные данные РЭК содержат характеристики 1294 семейств γ -квантов и 29112 γ -квантов, входящих в семейства. В рамках решения поставленных задач изучены такие характеристики семейств γ -квантов, как зенитный угол θ прихода ШАЛ, координаты и энергии E_γ отдельных γ -квантов, энергии семейств γ -квантов ΣE_γ . Минимальная измеренная энергия γ -квантов составила 4 ТэВ, минимальная ΣE_γ , измеренная по данным γ -квантам, – 100 ТэВ.

В исследованиях [1, 5] показано, что энергия E_0 в несколько ПэВ является порогом образования гало – больших пятен потемнения на РГП. Примеры событий с гало приведены на рис. 2.

Площадь гало может достигать площади 1000 и более кв. мм. Исследования показали, что максимальная площадь гало на глубине эксперимента РЭК ПАМИР (594 г/см² атмосферы) не может превышать 4000 мм² по причине того, что в данном случае ЯЭК не успевает развиться. Однако такие события чрезвычайно редки, и максимально заре-

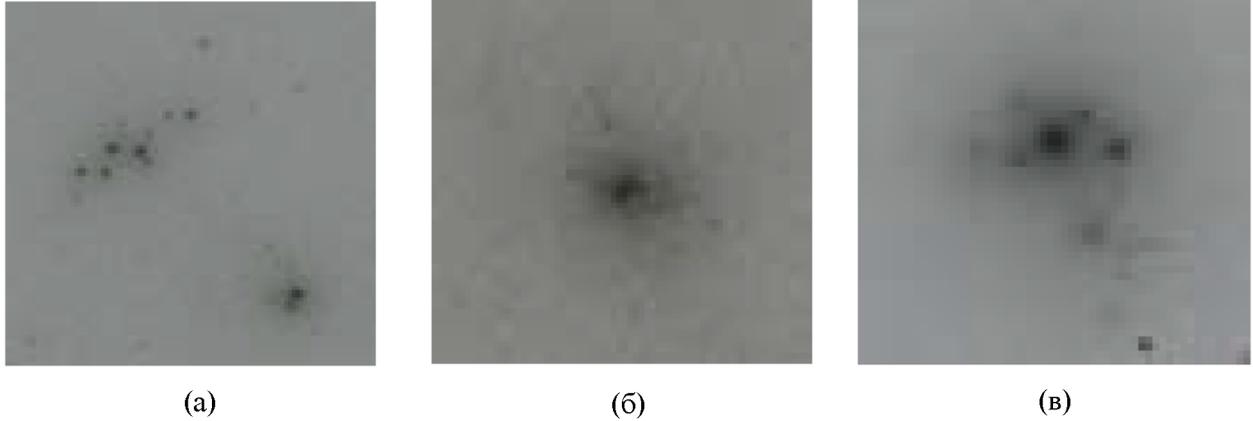


Рис. 2: Гало на РГП, полученные в эксперименте с РЭК: (а) $\Sigma E_\gamma = 882$ ТэВ, $S_{D=0.5} = (2.9 + 2.4)$ мм² (многоцентровое гало, большие p_\perp); (б) $\Sigma E_\gamma = 1084$ ТэВ, $S_{D=0.5} = 5.5$ мм²; (в) $\Sigma E_\gamma = 1688$ ТэВ, $S_{D=0.5} = 46.1$ мм².

гистрированная площадь гало составила 1450 мм² с $\Sigma E_\gamma = 8260$ ТэВ, что соответствует $E_0 > 80$ ПэВ.

Природа гало больших площадей объяснена в работе [8] и цитируемых там статьях, где показано, что данные события не относятся к экзотическим и образованы перекрытием функций пространственного распределения (ФПР) подпороговых γ -квантов. Так как методом РЭК регистрируются преимущественно ШАЛ, образованные ядрами легкой компоненты ПКИ, гало представляют собой рентген-изображения стволов ШАЛ, образованных ядрами $p+\text{He}$ ПКИ. Моделирование гало также позволило разработать и апробировать на экспериментальных данных малозависимый от условий моделирования ШАЛ метод гало [6], позволяющий оценивать долю $p+\text{He}$ в массовом составе ПКИ.

Моделирование экспериментальных данных РЭК. Программный комплекс, разработанный для моделирования экспериментальных данных РЭК, объединяет результаты расчетов по модели MC0-FANSY [9, 10], верифицированной по данным РЭК эксперимента ПАМИР и актуализированной по экспериментальным данным LHCf, а также результаты расчетов по моделированию ФПР e^\pm и γ -квантов при прохождении ШАЛ через Г-блок РЭК [11].

К параметрам ШАЛ, моделируемым на уровне РЭК, отнесены тип первичного ядра (p , He, Li, C, O, Mg, Si, V, Fe), E_0 , $\cos \theta$, энергии и x -, y -координаты отслеживаемых частиц в плоскости РЭК. Пороговая энергия отслеживаемых в ШАЛ частиц принята

равной 100 ГэВ с моделированием генераций более 300 адронов. ФПР получены с учетом эффекта Ландау–Померанчука–Мигдалла, включая осевое приближение для малых r и больших энергий лавинных e^\pm .

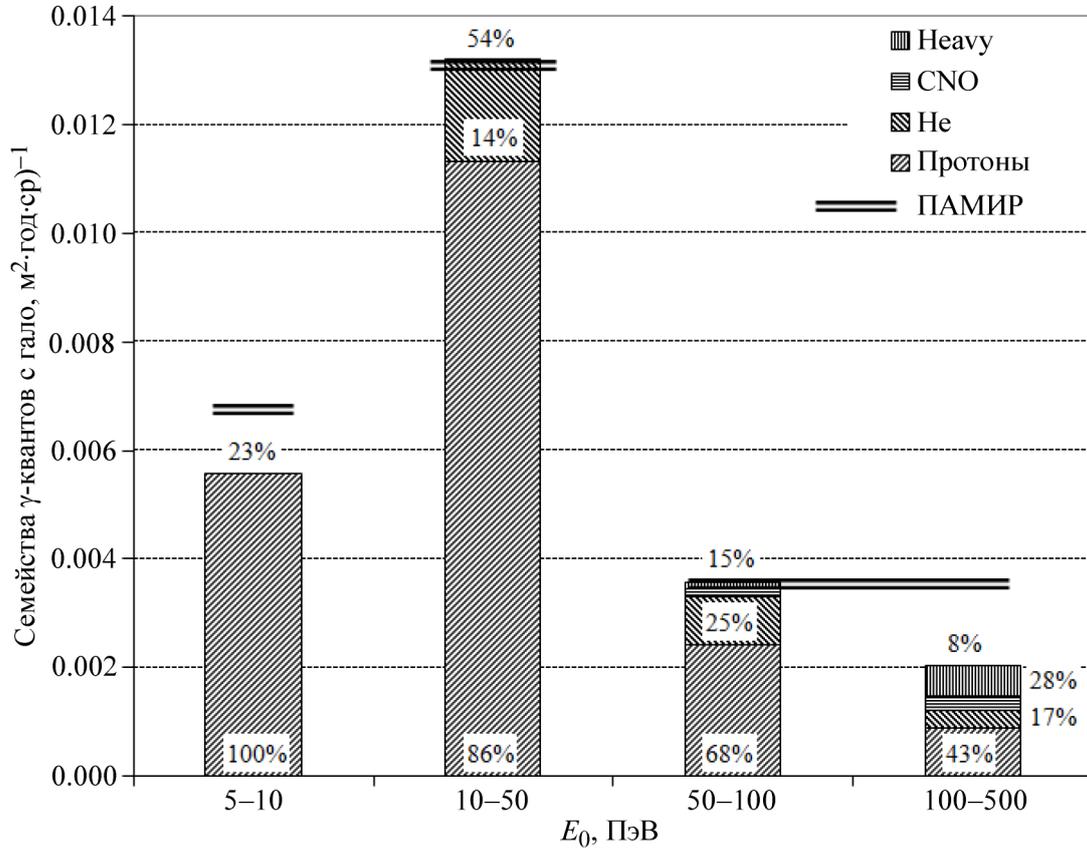


Рис. 3: Доля гало, образованных различными ядрами ПКИ в сравнении с данными эксперимента ПАМИР.

На рис. 3 приведены зависимости потоков событий с гало от E_0 , полученных в эксперименте ПАМИР. Из рис. 3 следует хорошее согласие расчетного и экспериментально полученного потоков гало, а также то, что гало образованы преимущественно легкими ядрами массового состава ПКИ. Из рис. 3 также следует, что пороговая энергия образования гало составляет несколько ПэВ. Начиная с энергий $E_0 \sim 100$ ПэВ, в образовании гало начинают участвовать все ядра ПКИ, от протонов до ядер Fe. Однако в силу степенного спектра по E_0 ПКИ поток событий, регистрируемых в РЭК, при $E_0 = 100$ ПэВ незначителен относительно событий при более низких энергиях и оценка массового состава ПКИ по событиям с гало относится к $E_0 = 10$ ПэВ (как средневзвешенной по вероятностям образования гало различными ядрами ПКИ).

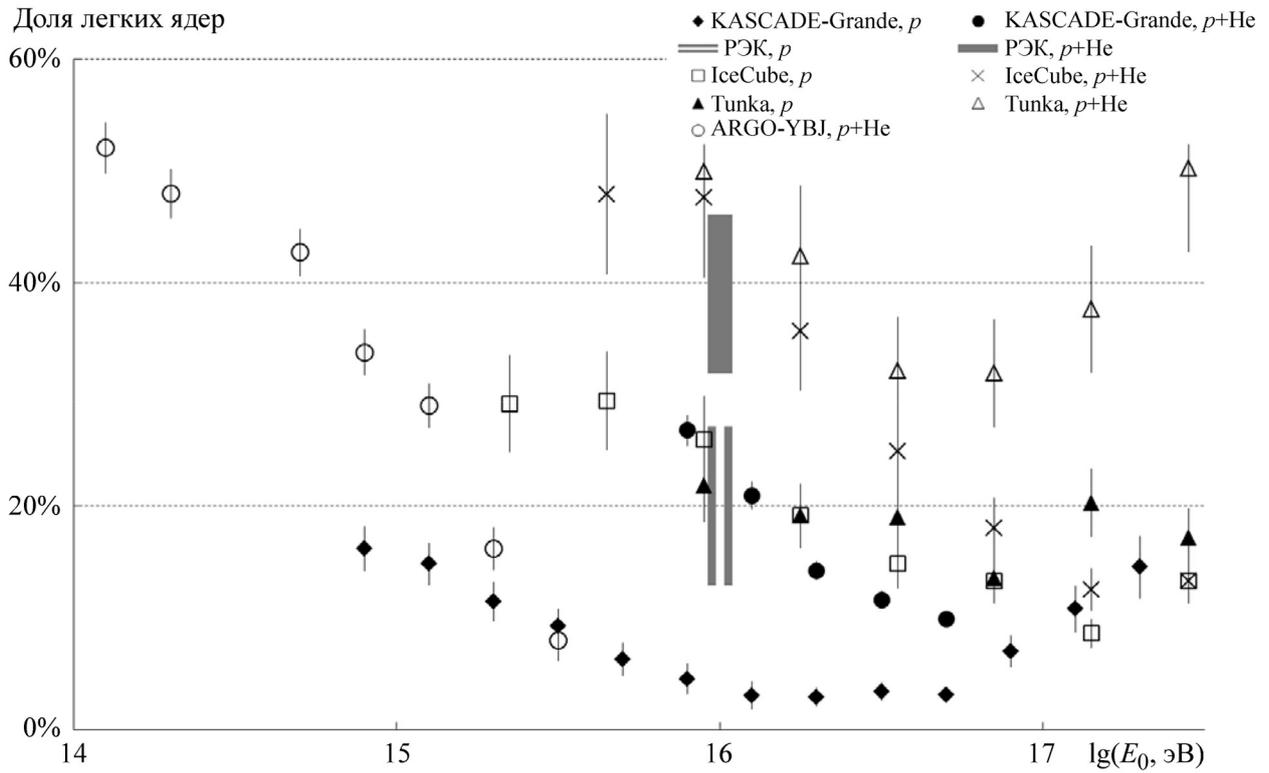


Рис. 4: Доля легких ядер в массовом составе ПККИ по данным экспериментов KASCADE-Grande [12, 13], ARGO-YBJ [14], Tunka [15], IceCube [16] и PЭК ПАМИР [8].

Доля легких ядер при $E_0 \sim 10$ ПэВ. На рис. 4 приведено изменение доли $p+He$ в массовом составе ПККИ в диапазоне $E_0 = 1-100$ ПэВ по данным эксперимента ПАМИР и ряда других. Из рис. 4 следует, что результаты эксперимента ПАМИР по оценке доли легких ядер при $E_0 = 10$ ПэВ на основе анализа событий с гало дают хорошее согласие с результатами экспериментов Tunka и IceCube. Из данных всех проанализированных экспериментов следует, что при энергиях ядер ПККИ ~ 10 ПэВ наблюдается локальное утяжеление массового состава ПККИ.

Т а б л и ц а 1

Зависимость среднего значения массового числа $\langle A \rangle$ ядер ПККИ от E_0 , полученная из анализа данных эксперимента KASCADE-Grande

$\lg(E_0, \text{эВ})$	14.0–14.5	14.5–15.0	15.0–15.5	15.5–16.0	16.0–16.5
$\langle A \rangle$	3 ($p+He$)	5	7	10	13 (CNO)

В частности, по данным эксперимента KASCADE-Grande выполнен анализ массового состава ПККИ [8], результаты которого приведены в табл. 1. Анализ показал, что при $E_0 \geq 5$ ПэВ доля протонов существенно снижается. Массовый состав ПККИ около 10 ПэВ соответствует группе CNO, что подтверждено, напр., исследованиями [17].

Моделирование доли легких ядер в РЭК. Стволы ШАЛ, регистрируемые на РГП методом РЭК, образованы преимущественно легкой компонентой массового состава ПККИ – более 95% всех 100-ТэВ-х семейств γ -квантов образованы ядрами $p+He$. В исследованиях эксперимента ПАМИР установлено, что энергия семейств γ -квантов ΣE_γ , измеряемая экспериментально, связана с E_0 соотношением $E_0 = k\Sigma E_\gamma$, где $k = 10$ для ШАЛ, образованных первичными протонами, с ростом до 70 для ШАЛ, образованных тяжелыми ядрами. По экспериментальным значениям ΣE_γ можно оценить E_0 ядер легкой группы ПККИ, генерирующих ШАЛ, характеристики которых изучаются.

Для оценки доли легких ядер, стволы ШАЛ от которых регистрируются в РЭК, и изменения доли $p+He$ с E_0 , по модели MC0-FANSY получены характеристики ШАЛ на уровне наблюдения РЭК начиная с E_0 несколько ТэВ, что ниже порога регистрации по E_0 экспериментальной установки. Экспериментальные характеристики стволы ШАЛ, полученные методом РЭК, сопоставлены посредством нейронной сети (НС) с аналогичными, модельно полученными данными. Использована НС типа многослойный перцептрон с алгоритмом оптимизации методом шкалируемых сопряженных градиентов. Наборы данных выбирались случайным образом для обучающей, критериальной и контрольной выборок. Контроль качества обучения нейронной сети выполнен по проценту неверных предсказаний.

Для целей решения задач моделирования ядра ПККИ разделены на две группы – легкие $p+He$ и тяжелые. Переменная “тип ядра ПККИ” принята как зависимая. К ковариатам отнесены экспериментально измеряемые характеристики семейств γ -квантов, такие как количество γ -квантов в семействе, $\cos \theta$, ΣE_γ и средневзвешенный по энергиям γ -квантов радиус семейства, прямо коррелированные с типами ядер ПККИ, генерировавших данные ШАЛ. В частности, по причине более высокой диссипации энергии и меньшего пробега до взаимодействия в атмосфере при заданной E_0 , семейства γ -квантов, образованные тяжелыми ядрами ПККИ, имеют больший средний радиус, нежели средний радиус семейств γ -квантов, образованных протонами. Например, экспериментально полученный в РЭК радиус семейств γ -квантов равен (1.94 ± 0.06) см, что не противоречит расчетному среднему радиусу (2.01 ± 0.03) см для легких ядер ПККИ [1].

Изменение доли легких ядер в массовом составе ПКИ. Ранее отмечено, что методом РЭК изучаются характеристики стволов ШАЛ, регистрируемых на РГП, такие как E_γ и ΣE_γ , измеренные по γ -квантам с установленным порогом регистрации. Значению ΣE_γ соответствует E_0 первичного ядра, значение E_γ определяет вероятность регистрации ШАЛ, генерированного данным типом ядра. Чем выше значение E_γ , тем с меньшей вероятностью зарегистрированный ШАЛ образован тяжелым ядром по причине более высокой диссипации энергии относительно легких ядер. Иными словами, измеряемый массовый состав ПКИ зависит от порога регистрации РЭК. При равной нулю пороговой энергии регистрации γ -квантов, регистрируемый и первоначальный массовый состав ПКИ идентичны, и при данной E_0 РЭК будет равновероятно регистрировать ШАЛ, образованные как легкими, так и тяжелыми ядрами.

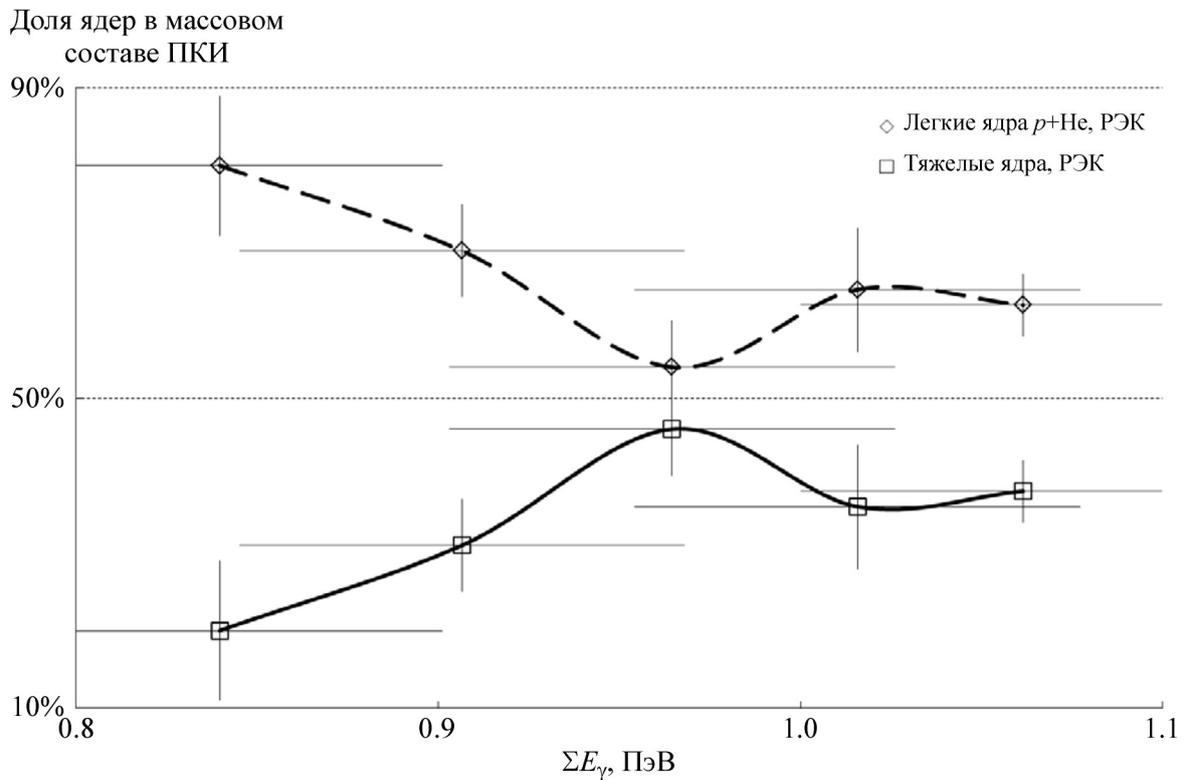


Рис. 5: Изменение доли легких ядер в массовом составе ПКИ с ΣE_γ .

В методе РЭК порог регистрации γ -квантов достаточно высокий и составляет несколько ТэВ, что отсеивает, в первую очередь, ШАЛ, образованные тяжелыми ядрами ПКИ. При низких E_0 установка работает как сепаратор легкой компоненты ПКИ, где регистрируется не более 5% тяжелых ядер. Однако вероятность регистрируемых

ШАЛ, образованных тяжелыми ядрами, возрастает с E_0 или с ΣE_γ , что позволяет получить информацию о доле тяжелых ядер в массовом составе ПКИ, анализируя семейства γ -квантов с более высокими значениями ΣE_γ .

Для обучения НС из базы данных (БД), содержащей модельные события, отобраны ШАЛ со значениями ΣE_γ 600, 700, 800, 900 и 1000 ТэВ, полученными по пороговым E_γ , равными 4, 6, 8 и 10 ТэВ и для которых известны типы первичных ядер. Из БД экспериментальных событий аналогичным образом отобраны семейства γ -квантов для тех же значений ΣE_γ и E_γ , но типы первичных ядер для которых необходимо оценить. Исследования показали, что для данной ΣE_γ зависимость доли легких ядер, регистрируемой методом РЭК, от E_γ линейна с $R_a^2 > 80\%$. Из полученных регрессий оценены доли легких ядер, соответствующие нулевому порогу регистрации установки. Результаты оценок, основанных на экспериментальных данных РЭК, долей легких и тяжелых ядер в массовом составе ПКИ в зависимости от ΣE_γ , приведены на рис. 5.

Анализ рис. 5 показывает, что доля легких ядер при низких энергиях, соответствующих 100-ТэВ-м семействам γ -квантов, та же, что и в ранее выполненных расчетах по модели MC0-FANSY [1] ($> 90\%$). Массовый состав ПКИ в рассматриваемом диапазоне энергий ΣE_γ утяжеляется, однако при $\Sigma E_\gamma = 800$ ТэВ наблюдается локальный минимум доли легких ядер с малой полушириной (максимум доли тяжелых ядер).

Переход от ΣE_γ к E_0 выполнен по оценочным коэффициентам перехода k для эксперимента ПАМИР. Изменение доли легких ядер в массовом составе ПКИ с E_0 приведено на рис. 6, где также показана минимальная доля легких ядер, полученная методом гало. Анализ рис. 6 показывает, что около $E_0 = 10$ ПэВ наблюдается локальный максимум доли тяжелых ядер. Добавление оценки доли легких ядер методом гало уменьшает полуширину данной неоднородности. Последнее указывает на наличие локального источника ПКИ, обеспечивающего поток тяжелых ядер с энергиями $E_0 = 8-13$ ПэВ. Здесь также необходимо отметить, что $E_0 = 10$ ПэВ – наивероятная энергия образования семейств γ -квантов с гало, вероятности образования которых приведены на рис. 3.

В исследованиях [18] показано, что нерегулярности в спектре ПКИ по E_0 можно объяснить распределением звезд затменно-переменного типа. В частности, спектр ПКИ по E_0 около 10 ПэВ сформирован звездами переменности SRx – полурегулярными красными гигантами и сверхгигантами промежуточных или поздних спектральных классов. На рис. 6 распределение звезд переменности SRx показано коротким пунктиром. Можно предположить, что звезды данного типа – источники тяжелых ядер в массовом составе ПКИ. В частности, в исследованиях [17] показано, что источники ядер ПКИ могут

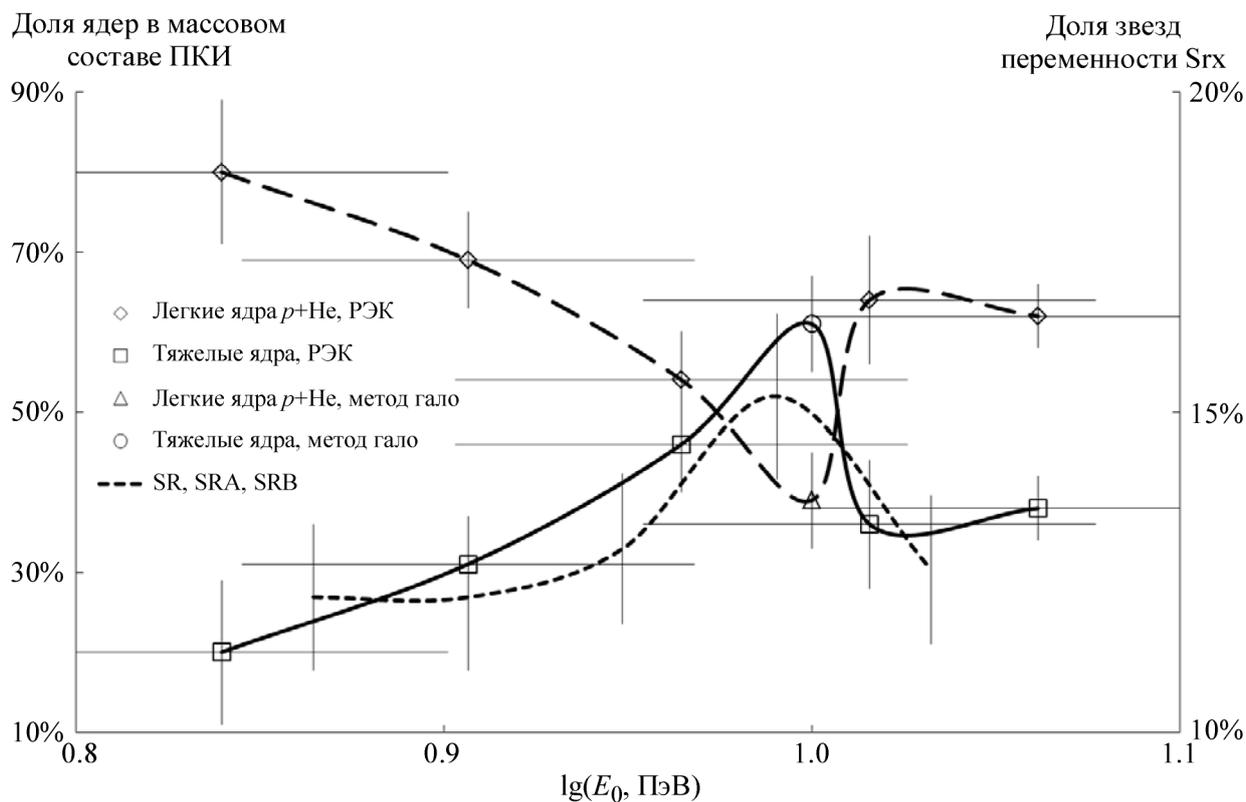


Рис. 6: Изменение доли легких ядер в массовом составе ПКИ (длинный пунктир) с E_0 , в сравнении с распределением звезд переменности SRx (короткий пунктир) (процент от всех звезд, соответствующих данной E_0).

находиться в Галактике и обеспечивать поток ПКИ вплоть до $E_0 = 10^{20}$ эВ, несмотря на большой гирорадиус ядер.

Основные переменные звезды, расположенные в диапазоне по $E_0 = 8\text{--}13$ ПэВ, – мириды и SRx. Однако как было показано в [18], мириды являются основными источниками ПКИ, вносящими вклад в бамп (максимум) около $E_0 = 100$ ПэВ, в то время как локальная нерегулярность в массовом составе ПКИ около $E_0 = 10$ ПэВ обеспечена звездами SRx-типа, максимум распределения которых приходится на данную E_0 . Также помимо звезд указанных типов, в данном диапазоне по E_0 находится локальный источник – звезда WR 136 спектрального класса WC5 из созвездия Лебедя. Как показано в [18], период звезды 136–139 дней обеспечивает энергию ядер ПКИ $\lg(E_0, \text{ПэВ}) = 0.94\text{--}0.96$, что не противоречит данным, представленным на рис. 6. Особенности звезд типа WR – это звезды на поздних этапах эволюции, содержащие мало H и с сильным звездным ветром. Данные звезды относительно редки, что делает звезды WR мощны-

ми и локальными по E_0 источниками тяжелых ядер в массовый состав ПКИ. Звезда WR 136 относится к звезде углеродной последовательности, что также не противоречит оценке массового состава около $E_0 = 10$ ПэВ, приведенного в табл. 1.

Обсуждение. Тонкая структура нерегулярностей массового состава ПКИ с изменением E_0 в настоящее время не изучена. По данным экспериментов с высокими флуктуациями изучаемых параметров ШАЛ это сделать практически невозможно, и в данном контексте метод РЭК является уникальным. С другой стороны, необходимы специализированные программные комплексы, позволяющие создавать цифровой образ ШАЛ с низкими порогами по отслеживаемым частицам, с одной стороны, и высокими по E_0 , с другой. Пример такого программного комплекса – MC0-FANSY, включая моделирование прохождения ШАЛ через РЭК.

Изучение ПКИ в двух сопоставленных аспектах – ядерно-физическом и астрофизическом – необходимо для понимания природы и механизмов ускорения ПКИ. Исследование локального изменения массового состава позволяет сопоставить данную нерегулярность с E_0 и, в конечном итоге, сделать предположение, звезды каких типов переменностей их формируют. В частности, последние исследования показали, что спектр ПКИ по E_0 вплоть до сверхвысоких энергий может формироваться исключительно источниками, находящимися в Галактике.

Выводы.

1. Экспериментальные данные, полученные методом РЭК, позволяют изучать характеристики стволов ШАЛ, где наблюдаются их минимальные флуктуации. Последнее позволяет исследовать тонкую структуру изменения массового состава ПКИ с E_0 .

2. В спектре массового состава ПКИ по E_0 наблюдаются локальные неоднородности, образованные определенными типами звезд-источников. По данным эксперимента с РЭК, около энергии $E_0 = 10$ ПэВ наблюдается локальный максимум доли тяжелых ядер.

3. Источниками ядер ПКИ при E_0 около 10 ПэВ, сформировавшими максимум в изменении доли тяжелых ядер, являются звезды переменностей SR и WR. Вклад звезд других типов переменностей, в частности мирид, также существенен, однако мириды не формируют около $E_0 = 10$ ПэВ локальную неоднородность в массовом составе ПКИ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. A. Mukhamedshin, V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, S. B. Shaulov, *Astroparticle Physics* **102**, 32 (2018). <https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.05.005>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35480614>.

- [2] V. P. Pavlyuchenko, R. M. Martirosov, et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **45**, 015202 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-6471/aa904d>.
- [3] W. Apel, J. C. Arteaga, et al., KASCADE-Grande Collaborations, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **620**(2-3), 202 (2010). <https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.147>.
- [4] I. De Mitri on behalf of the ARGO-YBJ Collaboration. Measurement of the cosmic ray all-particle and light-component energy spectra with the ARGO-YBJ experiment//ISVHECRI 2014. – 18th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, *EPJ Web of Conferences* **99**, 08003 (2015). <https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159908003>.
- [5] V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, *Physics of Atomic Nuclei* **81**(2), 222 (2018). <https://dx.doi.org/10.1134/S1063778818020151>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34857714>; <https://elibrary.ru/item.asp?id=35491989>.
- [6] Патент № 2023666660 Российская Федерация. Программное обеспечение для изучения массового состава первичного космического излучения методом гало / Пятковский С. Е.; заявитель и патентообладатель Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – 60 с. – № 2023665213; заявл. 19.07.2023; опубл. 02.08.2023 Бюл. № 8.
- [7] Взаимодействие адронов космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент «Памир»). Под ред. Н. Г. Басова, С. И. Никольского (М., Наука, 1984) (Труды ФИАН; т. 154).
- [8] С. Е. Пятковский, Природа гало в стволах широких атмосферных ливней и доля легких ядер в первичном космическом излучении при $E_0 = 10$ ПэВ (эксперимент ПАМИР): дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.16. – М. – 2021. – 139 с.
- [9] Р. А. Мухамедшин, Феноменологические ограничения на модель неупругих взаимодействий адронов с ядрами при энергиях выше 10^{15} эВ по данным рентген-эмульсионных камер: дис. д. физ.-мат. наук: 01.04.23. – М. – 2006. – 233 с.
- [10] R. A. Mukhamedshin, *The European Physical Journal Plus* **134**, 584 (2019). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12933-2>.
- [11] В. В. Учайкин, Концепция стохастической ценности в прикладных задачах теории переноса: дис. д. физ.-мат. наук: 01.04.12, 01.04.16. – Алтайский Госуниверситет, Барнаул. – 1988. – 313 с.
- [12] W. D. Apel, J. C. Arteaga, et al., *Astropart. Phys.* **31**(2), 86 (2009). <https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.11.008>.

- [13] S. Schoo, D. Kang, et al., KASCADE-Grande Collaboration. Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 339, Vol. 301.
- [14] I. De Mitri, on behalf of the ARGO-YBJ Collaboration. ISVHECRI 2014. – 18th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, EPJ Web of Conferences, 2015, Vol. 99, 08003. – DOI: <https://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20159908003>.
- [15] N. Budnev, I. Astapov, et al., Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 768, vol. 301.
- [16] C. Kopper, IceCube Collaboration. Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. – 2017. – PoS(ICRC2017). – 981, vol. 301.
- [17] V. N. Zirakashvili, V. S. Ptuskin, S. I. Rogovaya, On the galactic origin of ultra-high energy cosmic rays//arXiv:2312.13172v3 [astro-ph.HE] 23 Dec 2023
- [18] С. Е. Пятовский, Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(1), 11 (2024). DOI: 10.3103/S1068335623601024.

Поступила в редакцию 31 мая 2024 г.

После доработки 2 августа 2024 г.

Принята к публикации 5 августа 2024 г.