

НЕОБЫЧНЫЕ СОБЫТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С РЕНТГЕН-ЭМУЛЬСИОННЫМИ КАМЕРАМИ

© 2025 г. С. Е. Пятовский^{1,2),*}, Е. А. Каневская¹⁾

Поступила в редакцию 23.08.2024 г.; после доработки 23.10.2024 г.; принята к публикации 23.10.2024 г.

Рассмотрены события, зарегистрированные в эксперименте с рентген-эмульсионными камерами (РЭК) по изучению стволов широких атмосферных ливней (ШАЛ) с энергиями ядер первичного космического излучения (ПКИ) $E_0 > 100$ ТэВ и не имеющие к настоящему времени своего объяснения в рамках Стандартной модели ядерных взаимодействий (СМ). Метод РЭК — единственный, позволяющий изучать стволы ШАЛ с высоким координатным разрешением ~ 100 мкм. Стволы ШАЛ содержат максимально полную информацию о первичных актах ядерных взаимодействий, вследствие чего все необычные события, регистрируемые методом РЭК, представляют большой научный интерес. Несколько типов необычных событий, зарегистрированных методом РЭК, удалось объяснить в рамках СМ.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, экзотические события в ядерных взаимодействиях, рентгеновская эмульсионная камера

DOI: 10.31857/S0044002725010057, EDN: GSKTFV

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования ПКИ высоких и сверхвысоких энергий с E_0 более сотни ТэВ позволяют изучать многие астрофизические аспекты, такие как природа источников космических лучей (КЛ), механизмы ускорения КЛ, возможные нарушения СМ и другие. Например, в ряде экспериментов делаются попытки обнаружить частицы странной кварковой материи в составе ПКИ [1] или так называемые странглеты, возможно, имеющие отношение к темной материи.

Методы изучения ПКИ с $E_0 > 100$ ТэВ относятся к непрямым методам изучения КЛ и образованных ПКИ ШАЛ. Поток ПКИ при данных E_0 относительно небольшие, и их характеристики изучаются моделированием ШАЛ — электронно-фотонной и ядерно-активной компонент (ЭФК и ЯАК). Кроме того, характеристики ШАЛ, такие как количество электронов N_e и мюонов N_μ , сильно флуктуируют. Последнее затрудняет определение параметров первичного взаимодействия ядер ПКИ с атомами атмосферы. Однако в исследованиях [2, 3] показано, что в стволе ШАЛ на расстоянии $R < 15$ см от оси ливня флуктуации минимальны и регистрируемые характеристики ШАЛ максимально пол-

но несут информацию об акте первичного взаимодействия ядер ПКИ с атмосферой.

Таким образом, цель экспериментов, позволяющих изучать структуру стволов ШАЛ, состоит не только в изучении, например, массового состава ПКИ [4], но и в поиске необычных событий, возможно, выходящих за рамки теории СМ. Примерами таких событий могут быть так называемые выстроенные и проникающие события, зарегистрированные в РЭК. В частности, к таким событиям относится событие JF 2af2, состоящее из ~ 40 γ -квантов, выстроенных вдоль прямой линии [5], а также γ -адронное семейство СТРАНА, образованное ядром ПКИ с $E_0 > 10$ ПэВ и зарегистрированное в стратосферном эксперименте в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук под руководством К.А. Котельникова [6]. Для описания подобного рода событий, имеющих $p_\perp \sim 10$ ГэВ/с, необходима специальная теория.

Однако для разработки указанной выше теории необходима регистрация необычных событий, обоснованно указывающая на принадлежность подобных событий к данному типу частицы или взаимодействия, например, выстроенных, проникающих или образованных странглетами событий. В частности, до недавнего времени к необычным событиям, регистрируемым методом РЭК, относились гало — большие пятна потемнений с площадями до 1000 и выше кв. мм на рентгенографической пленке (РГП). Выполненными исследованиями было показано [3, 7],

¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

²⁾ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия.

* E-mail: vgsep@ya.ru

что данные события не относятся к необычным и образованы перекрытием (функций пространственного распределения (ФПР)) подпороговых относительно метода РЭК γ -квантов.

В настоящее время при изучении стволов ШАЛ в части поиска экзотики необходимы как регистрация необычных событий, так и доказательство, что данное событие невозможно объяснить в рамках СМ.

2. МЕТОД РЭК

Основная цель метода РЭК — исследование стволов ШАЛ путем регистрации событий с высоким координатным разрешением. Одна из конфигураций экспериментальной установки РЭК, экспонировавшейся в эксперименте ПАМИР (594 г/см² стандартной атмосферы), приведена на рис. 1. РЭК состоит из Г-блока, где происходит основное поглощение и регистрация ЭФК, и адронного Н-блока для регистрации ЯАК ШАЛ, отделенного от Г-блока слоем углерода (радиационные единицы Pb и углерода $t_0^{\text{Pb}} = 6.4$ г/см² и $t_0^{\text{C}} = 43.3$ г/см²).

Как показано на рис. 1, первичные γ -кванты и $e^\pm$ ЭФК ШАЛ (первичная ЭФК, приходящая из атмосферы в составе ШАЛ), попадая в свинцовый поглотитель Pb, образуют вторичные каскады γ' -квантов (вторичные ЭФК от γ -квантов и $e^\pm$, образовавшиеся в веществе РЭК), распределение которых по глубине Pb определяет площадь S и уровень потемнения D пятен на РГП. РГП отличается от ядерной фотографической эмульсии, где оптическая плотность трека частицы $\sim Z^2$, и имеет отличные от ядерной эмульсии физико-химические характеристики. РГП представляет собой подложку толщиной ≈ 200 мкм, залитую с двух сторон фотоэмульсией толщиной $\approx 30 \times 2$ мкм. γ' -кванты, проходя через микрокристаллы галоидного серебра AgHal, формируют латентное изображение, проявляемое и фиксируемое в процессе дальнейшей обработки РГП. В процессе экспозиции кристаллы AgHal абсорбируют γ' -кванты, энергия которых идет на образование металлического Ag. При наличии нескольких атомов металлического Ag в кристалле AgHal последний фиксирует латентное изображение уже во всем своем объеме с коэффициентом усиления $>10^7$ и вне зависимости от энергий γ -квантов. Таким образом, степень потемнения D на РГП зависит только от потока вторичных γ' -квантов n и поперечного сечения взаимодействия s для кристалла AgHal, характеризующего РГП, используемую в данном эксперименте:

$$D = 4(1 - e^{-ns}), \quad (1)$$

где $s = (3.3 \pm 0.1)$ мкм² для РГП в эксперименте ПАМИР, коэффициент 4 соответствует $D(n \rightarrow \infty)$. В процессе обработки экспериментальных данных РЭК переход от D к энергии первичного γ -кванта E_γ выполняется по калибровочным кривым.

Экспонированная РГП просматривается с целью поиска и дальнейшей обработки отдельных пятен потемнения (“отдельных γ -квантов”, образованных всеми электромагнитными частицами) или групп пятен потемнения (“семейств γ -квантов”). Минимальные значения потемнения и площади, D_{th} и S_{th} , визуально наблюдаемые на РГП от отдельных γ -квантов, имеют значения 0.05 и 0.1 мм² соответственно, что является “визуальными” порогами регистрации γ -квантов на РГП. Меньшие потоки γ' -квантов как отдельные γ -кванты на РГП визуально не наблюдаются, но со временем образуют вуаль и в дальнейшем фон потемнения D_ϕ , который учитывается при экспонировании и обработке РГП.

Плотности потемнений D' от γ -квантов, измеренные фотометром на РГП с общим фоновым потемнением D_ϕ , пересчитаны в плотности потемнения D'_0 с учетом фона, как следует из формулы (1):

$$D'_0 = 4(D' - D_\phi)/(4 - D_\phi), \quad (2)$$

и дальнейшие расчеты выполнены для значений плотностей потемнения $D \equiv D'_0$, пересчитанных с учетом фона РГП.

В случае, когда в данную точку на РГП приходит N -е количество γ -квантов с разными энергиями $E_{i\gamma}$, дающими разные значения D_i , из формулы (1) следует суммарное потемнение

$$D_\Sigma = 4 \left(1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{D_i}{4} \right) \right), \quad (3)$$

или в случае равенства энергий γ -квантов $D_i = D$:

$$D_\Sigma^{(N)} = 4 \left(1 - \left(1 - \frac{D}{4} \right)^N \right). \quad (4)$$

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА С РЭК

Моделирование экспериментальных данных, получаемых методом РЭК, требует как моделирования развития ШАЛ в атмосфере, так и прохождения ствола ШАЛ через РЭК. Характеристики ШАЛ на уровне наблюдения, полученные в модельном расчете, не должны противоречить данным РЭК, а также характеристикам

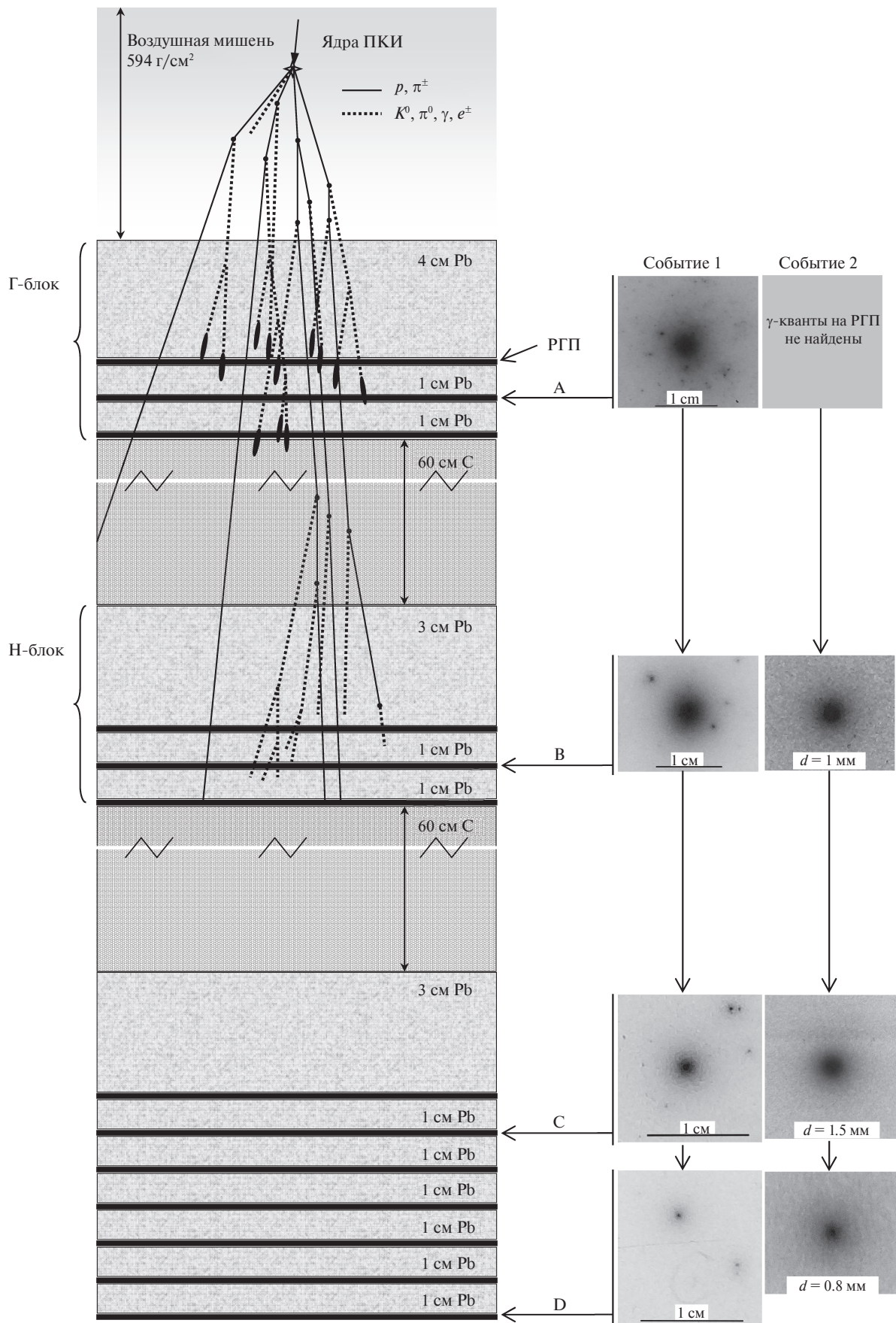


Рис. 1. Схема РЭК, а также примеры зарегистрированных на РГП так называемых проникающих событий (события 1 и 2). Ряды РГП нумерованы сверху вниз от 1 до 13 с общей глубиной Pb 20 см.

ядерных взаимодействий, получаемых в экспериментах LHCf. Сравнительный анализ моделей ШАЛ и вопросы выбора модели ШАЛ для описания экспериментальных данных РЭК рассмотрены в [3]. Показано, что модель ШАЛ должна обеспечивать проведение расчетов с порогом по энергиям отслеживаемых частиц 100 ГэВ и ниже, а также порогом по E_0 до 3 ЭэВ и выше, описывать средний радиус семейств γ -квантов и соответствовать данным LHCf в диапазоне $x_F > 0.06$, при том, что данные LHCf здесь немногочисленны и представлены узкими интервалами η [8].

Модель ШАЛ, соответствующая перечисленным требованиям, разработана Р.А. Мухамедшиным [9] и получила название FANSY. В отличие от широко применяемых моделей ШАЛ комплекса CORSIKA [10], в FANSY моделируются генерации более 300 адронов, что необходимо при изучении параметров стволов ШАЛ, регистрируемых методом РЭК.

Моделирование прохождения ЭФК ШАЛ через Pb РЭК требует значительных вычислительных мощностей. ФПР для вторичных $e^\pm$ и γ' -квантов, образованных первичными $e^\pm$ и γ -квантами различных энергий, получены моделированием в работах В.В. Учайкина [11] со значениями фитирования, приведенными в табл. 1. Моделирование ФПР выполнено с учетом эффекта Ландау–Померанчука–Мигдала (ЛПМ) и в осевом приближении (малые r и большие энергии лавинных $e^\pm \gg \varepsilon(\text{Pb}) = 7.4 \text{ МэВ}$, $N_\gamma = f(Er)$) на расстояниях $\sim$ длины когерентности. Эффект ЛПМ проявляется при энергиях γ -квантов, начиная с 1–10 ТэВ. Учет эффекта ЛПМ показывает рост пробега $e^\pm$ с энергией γ -квантов, что меняет формы каскадных кривых.

4. НЕОБЫЧНЫЕ СОБЫТИЯ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В РЭК

На рис. 1 приведены примеры двух групп необычных событий, зарегистрированных в РЭК. Семейства γ -квантов, относящиеся к первой группе событий, объяснение которым ранее не предлагалось, обозначены на рис. 1 как “Событие 1”. Ко второй группе событий, обозначенной на рис. 1 как “Событие 2”, отне-

сены события, объясняемые в исследованиях как события, образованные странной кварковой материей [1]. Оба события прослежены в рядах РГП на глубину 20 см Pb РЭК.

Основные особенности события 2 состоят в том, что данное событие представляет собой пятно потемнения небольшой площади, а также в отсутствии γ -квантов, составляющих семейства γ -квантов. События, аналогичные событию 2, регистрировались также в экспериментах с РЭК на аэростатах и Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС), примеры которых приведены на рис. 2.

Характеристики двух групп необычных событий, зарегистрированных в РЭК эксперимента ПАМИР, приведены в табл. 2: усредненное по площади диафрагмы денситометра потемнение D , потоки $e^\pm$ и γ' -квантов и площадь пятна потемнения S . Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что потоки γ' -квантов существенно меняются с глубиной Pb – событие 1 затухает, ЭФК в событии 2 развивается, достигает максимума на глубине $\sim 30 \text{ г.л.}$ и также затухает. Однако, согласно теории странглетов [14], последние должны генерировать ЭФК по всей глубине РЭК.

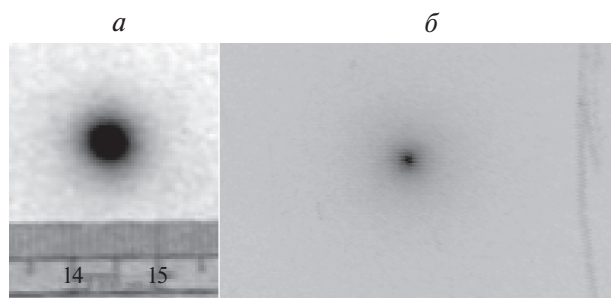


Рис. 2. Пятна потемнений на РГП (от одиночных γ -квантов), зарегистрированные в стратосферном эксперименте JACEE (The Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment) (5 г/см^2) [12] (a) и на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС, эксперимент “Адрон”, 695 г/см^2) [13] (б).

Таблица 1. Параметры ФПР $e^\pm$ и γ -квантов, полученных для РЭК в работах [11]

Параметры ФПР	min	max
Расстояние от оси каскада	1.58 мкм	6.56 см
Глубина свинцового поглотителя, г.л.	1	60
Энергии первичных $e^\pm$ и γ -квантов	1 ГэВ	1 ПэВ
Потоки вторичных $e^\pm$ и γ' -квантов	0	$\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$

5. ПРИРОДА НЕОБЫЧНЫХ СОБЫТИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В РЭК

Результаты моделирования значений потоков вторичных $e^\pm$ и γ' -квантов приведены на рис. 3 для рассмотренных выше событий 1 и 2 (см. табл. 2). Моделирование выполнено в рамках СМ без привлечения специальных теорий.

Результаты моделирования события 1 показали практически идентичные кривые потемнения, полученные как экспериментально в РЭК, так и в модели. Расчеты показали, что событие 1 образовано $\sim 30\text{--}40$ тыс. подпороговых γ -квантов, ~ 120 γ -квантами с энергиями до 10 ТэВ и ~ 30 γ -квантами с энергиями > 100 ТэВ. Как следует из каскадной теории, полученная зависимость $\log(N_\gamma) = f(\log(E_\gamma))$ линейна с $R_a^2 > 95\%$ и соответствует результатам моделирования распределения $e^\pm$ и γ -квантов в ШАЛ по энергиям, выполненного в [3].

Основываясь на результатах моделирования события 1 и большой статистике модельных параметров ШАЛ, полученных в разработанной специально для экспериментов с РЭК модели FANSY [9], можно с высокой степенью определенности утверждать, какой тип ядра ПКИ образовал ШАЛ, ствол которого был зарегистрирован в РЭК как событие 1. Для решения данной задачи необходимо обратить внимание, что энергии и потоки высокоэнергичных γ -квантов в стволе ШАЛ являются маркерами необычных событий, в частности позволяющими отнести ядра к легкой ($p + \text{He}$) или тяжелой ($> \text{He}$) группе ПКИ, как в событиях, показанных на рис. 1.

В случае события 1 один-два γ -кванта в стволе ШАЛ должны иметь энергии ~ 300 ТэВ — меньшие энергии дадут расчетные потоки вторичных $e^\pm$ и γ' -квантов ниже экспериментальных, более высокие энергии γ -квантов — выше экспериментально полученных. В соответствии с результатами моделирования стволов ШАЛ, регистрируемых в РЭК, событие 1 образовано ядром, относящимся к легкой компоненте ПКИ $p + \text{He}$, в данном случае протоном, так как согласно расчетам максимальные энергии γ -квантов, образованные ядрами тяжелой компоненты ПКИ, существенно меньше даже 200 ТэВ. Также из моделирования ШАЛ с применением FANSY получено, что энергия ядра легкой компоненты ПКИ, образовавшего событие 1, составляет ~ 60 ПэВ.

Природа события 2 более сложная, нежели события 1. Причина состоит в том, что пятна потемнения на РГП в событиях 2 имеют заметно меньшую площадь, а значит, образованы γ -квантами с меньшими энергиями. Однако ЭФК от данных γ -квантов также проходят на боль-

шую глубину Pb, т.е. энергии γ -квантов должны быть большими. Но одновременно вторичные ЭФК γ' -квантов в первых рядах РГП не зарегистрированы. Перечисленные выше противоречивые условия могут реализоваться, когда ЭФК ствола ШАЛ состоит из относительно небольшого количества низкоэнергичных γ -квантов, которые полностью поглотились в Г-блоке РЭК. При этом в Н-блоке РЭК произошло взаимодействие адрона, в котором образовались один-два высокоэнергичных γ -кванта и которые образовали ЭФК, идущий вглубь РЭК. Очевидно, что данный каскад будет образовывать пятна потемнений малых площадей и без “семейств γ -квантов” в первых рядах РЭК.

Моделирование показало, что начало вторичного ЭФК события 2 должно быть образовано ЯАК на глубине ~ 13 г.л. РЭК или в первом слое углерода толщиной 60 см. В частности, в [15] показано, что пробег неупругого взаимодействия протонов $\lambda_{\text{inel}} = 115\text{--}120$ г/см², что соответствует началу взаимодействия в Н-блоке на глубине 128 г/см² РЭК. В силу сказанного, с высокой вероятностью данный ШАЛ, ствол которого зарегистрирован в РЭК как событие 2, образован вторичным адроном.

Рассмотрим каскадные кривые вторичных γ' -квантов различных энергий в РЭК. На рис. 4 показано потемнение на РГП, вызванное ЭФК от первичного γ -кванта, в зависимости от глубины Pb. Чтобы γ' -квант был виден при визуальной обработке РГП, площадь пятна потемнения S должна быть > 0.1 мм² с плотностью потемнения $D > 0.05$. Уровень видимости γ' -квантов на РГП, соответствующий $D = 0.05$, формируется потоком $e^\pm$ и γ' -квантов $N_{e^\pm, \gamma} = 0.004$ мкм⁻² на расстоянии $R = 178$ мкм от оси первичного γ -кванта (см. формулу (1)).

Анализ рис. 4 показывает, что минимальная энергия одиночного γ -кванта, который может быть визуальным зарегистрирован методом РЭК, составляет ~ 1 ТэВ. С ростом E_γ каскадные кривые сдвигаются вглубь РЭК, а уровень потемнения D — увеличивается. Из рис. 4 также следует, что на определенной глубине Pb в РЭК будет наблюдаться избыток (относительно фона РГП) визуальным регистрируемых γ -квантов. В случае 1 ТэВ-го γ -кванта — это 5–6 см Pb или 2–3 ряда РГП. Очевидно, что глубина, на которой будет наблюдаться указанный избыток γ -квантов, определяется распределением γ -квантов по E_γ в регистрируемых стволах ШАЛ и массовым составом ПКИ при данном пороге по энергии экспериментальной установки, который в методе РЭК связан со средним радиусом семейств γ -квантов, равным (1.96 ± 0.06) см. В частности,

Таблица 2. Характеристики событий, зарегистрированных в эксперименте с РЭК, схема которой приведена на рис. 1

№ ряда РГП	“Событие 1”			“Событие 2”			h , г/см ²	T , г.л.
	D	n , мкм ⁻²	S , мм ²	D	n , мкм ⁻²	S , мм ²		
2	1.50	0.1444 ± 0.0008	66	—	—	—	57	8.9
4	—	—	—	0.9 ± 0.1	0.07 ± 0.00	0.8	162	17.3
5	1.77	0.1792 ± 0.0009	49	1.3 ± 0.2	0.12 ± 0.02	0.8	173	19.1
6	—	—	—	1.7 ± 0.2	0.17 ± 0.03	1.1	185	20.9
7	—	—	—	1.8 ± 0.2	0.18 ± 0.03	1.3	279	27.6
8	1.61 ± 0.07	0.158 ± 0.009	10	1.9 ± 0.2	0.20 ± 0.03	1.8	290	29.4
9	—	—	—	2.2 ± 0.2	0.24 ± 0.03	1.8	301	31.1
10	—	—	—	2.0 ± 0.2	0.21 ± 0.02	1.8	313	32.9
11	—	—	—	1.5 ± 0.2	0.14 ± 0.02	1.1	324	34.7
12	—	—	—	1.3 ± 0.2	0.12 ± 0.02	0.8	335	36.4
13	0.60 ± 0.05	0.050 ± 0.004	1	0.9 ± 0.1	0.08 ± 0.01	0.5	347	38.2

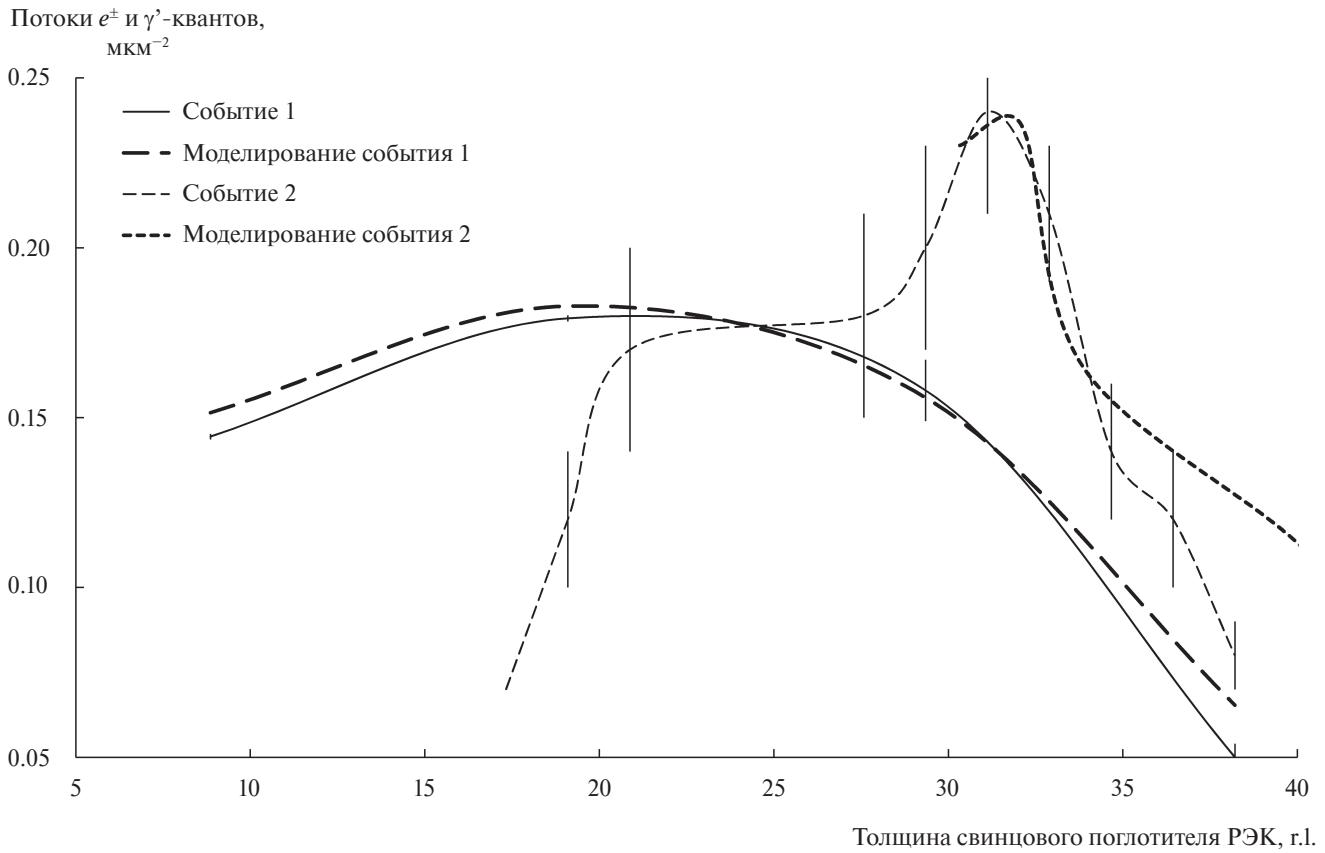


Рис. 3. Зависимости потоков вторичных $e^\pm$ и γ' -квантов экспериментальных и модельно полученных событий от толщины свинцового поглотителя РЭК.

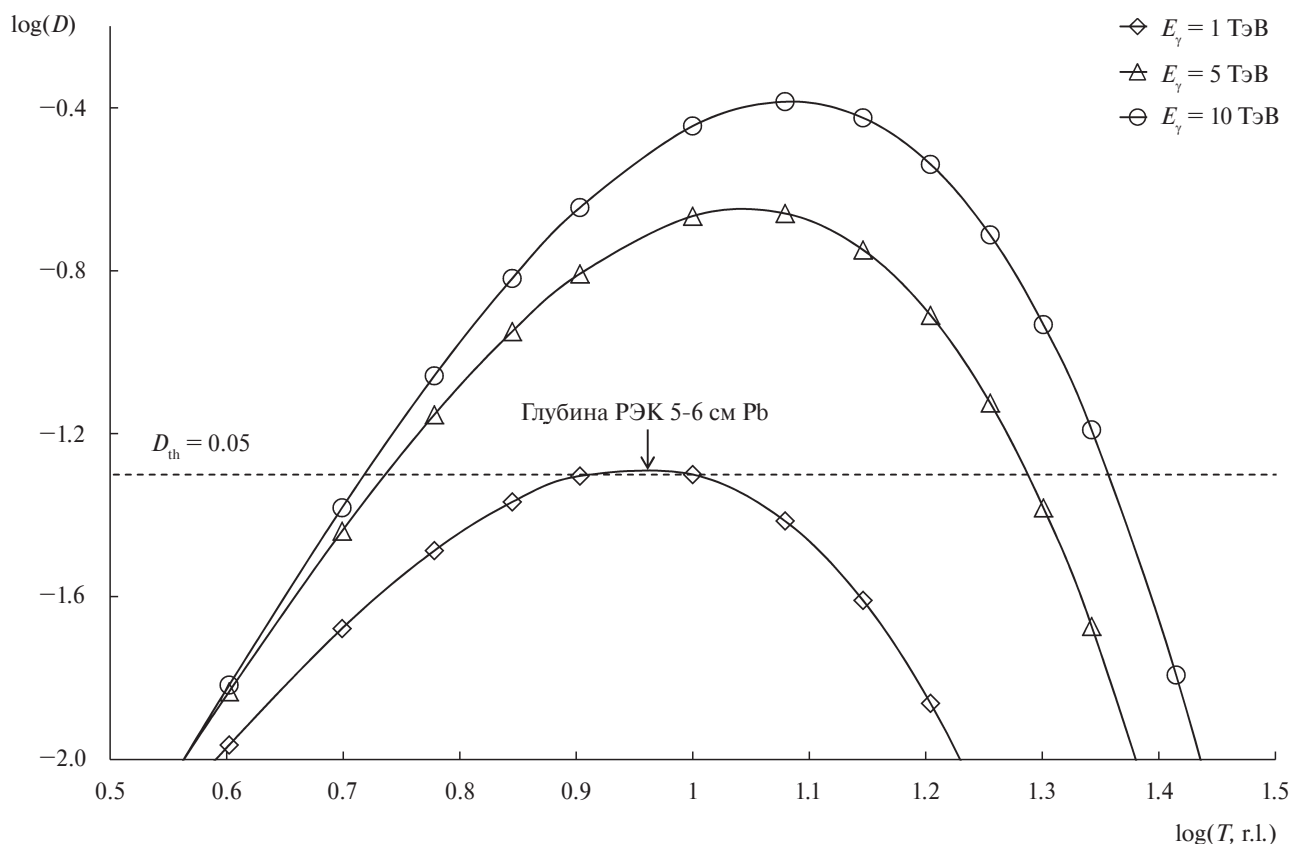


Рис. 4. Потемнение на РГП, вызванное ЭФК от первичного γ -кванта, в зависимости от глубины РЭК. Порог видимости γ' -кванта показан горизонтальной штриховой линией, соответствующей $D_{th} = 0.05$. Расстояние от первичного γ -кванта $R = 208 \text{ мкм}$ (значение, фитированное в модельном расчете [11]).

при $E_0 = 5 \text{ ПэВ}$ средневзвешенные средние радиусы семейств γ -квантов стволов ШАЛ, образованных протонами и ядрами Fe, различаются в 2 раза [3].

6. ОБСУЖДЕНИЕ

В экспериментах с РЭК регистрируются разнообразные события, не все из которых сразу находят свое объяснение. Например, пятно потемнения на РГП большой площади (гало) 745 мм^2 по изоденсе $D = 0.5$ с $\Sigma E_\gamma \sim 6 \text{ ПэВ}$, названное “Андромеда”, зарегистрированное в 1970 г. на установке в горах Чакалтая (520 г/см^2), при рода которого долгое время оставалась необъясненной. Только много позднее был показан механизм образования гало таких и существенно больших площадей [3] без привлечения так называемой “экзотики” и в рамках СМ.

С другой стороны и в силу сказанного, нестандартные модели, в частности, модель странной кварковой материи, весьма удобны, так как подобными моделями можно объяснить практически все наблюдаемые в РЭК события. В модели прохождения странглета через РЭК последний, проходя на любую глубину Pb, излучает

Λ -гипероны, продукты распада которых регистрируются на РГП как γ' -кванты. Это объясняет, например, регистрацию проникающих событий в глубокой свинцовой камере. Однако существование странглетов необходимо подтвердить экспериментально. В частности, поиск странглетов определен как одна из научных целей в исследованиях КЛ на ТШВНС [13] (38 Всероссийская конференция по космическим лучам ВККЛ-2024, ФИАН).

Очень вероятно, что существуют простые объяснения природы наблюдаемых в экспериментах с РЭК необычных событий, не выходящие за рамки СМ. Одно из таких объяснений рассмотрено в данной работе и связано с особенностями развития и регистрации ЭФК в Pb РЭК. Очевидное преимущество данной точки зрения состоит в том, что для описания событий, считающихся необычными, не требуются новые теории. Необходимы только достаточные вычислительные мощности, которых несколько десятков лет назад не было. Например, для расчета гало необходим учет очень больших потоков подпороговых относительно метода РЭК γ' -квантов [3], а фитирование ФПР γ' -квантов для эксперимен-

тов с РЭК [11] представляло собой весьма трудоемкую задачу, выполнение которой было возможно только на больших вычислительных комплексах.

7. ВЫВОДЫ

- 1) Объяснена природа двух типов необычных событий в стволах ШАЛ, зарегистрированных методом РЭК и прошедших на большую глубину Рб РЭК: событие с семействами γ -квантов и событие, представляющее собой равномерное пятно потемнения на РГП без отдельных γ' -квантов. Показано, что первое событие образовано несколькими высокоэнергичными γ -квантами, второе событие образовано вторичным адроном, образовавшим ЭФК в глубине РЭК.
- 2) Результаты экспериментов с РЭК достаточно сложны для описания в методической части. В экспериментах с РЭК можно получить много необычных событий, включая и, возможно, выходящие за рамки СМ. Однако для целей дальнейших исследований необычные события должны быть тщательно обработаны и изучены.
- 3) Эксперименты с РЭК позволяют изучать стволы ШАЛ с высоким координатным разрешением, недостижимым в других экспериментах, и где информация о первичных ядерных взаимодействиях минимально искажена. Дальнейшая обработка экспериментальных данных РЭК перспективна, так как позволяет получать новые результаты на стыке астрофизики и ядерно-физического аспекта ПКИ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. Б. Шаулов, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов, С. Е. Пятковский, В. В. Жуков, Е. А. Куприянова, Е. Н. Гудкова, Письма в ЖЭТФ **116**, 3 (2022); doi: 10.31857/S1234567822130018 [JETP Lett. **116**, 1 (2022); doi: 10.1134/S002136402260104X].
2. *Взаимодействие адронов космических лучей сверхвысоких энергий (эксперимент "Памир")*, Под ред. Н. Г. Басова, С. И. Никольского (Наука, Москва, 1984) [*Interaction of Ultra-High-Energy Cosmic Ray Hadrons (Pamir Experiment)* (Moscow, 1984), Vol. 154].
3. С. Е. Пятковский, Дис. ... канд. физ.-мат. наук, ФИАН (Москва, 2021); <https://www.lebedev.ru/file/3555>
4. R. A. Mukhamedshin, V. S. Puchkov, S. E. Pyatovsky, and S. B. Shaulov, *Astropart. Phys.* **102**, 32 (2018); <https://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.05.005>
5. J. N. Capdevielle, *J. Phys. G.* **14**, 503 (1988).
6. И. В. Ракобольская, Т. М. Роганова, *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия*, № 4, 47 (2010); <https://elibrary.ru/item.asp?id=15209759> [I. V. Rakobol'skaya and T. M. Roganova, *Moscow Univ. Phys. Bull.* **65**, 283 (2010); <https://dx.doi.org/10.3103/S0027134910040077>].
7. Ю. А. Гулов, Дис. ... канд. физ.-мат. наук (Душанбе, 1983).
8. T. Sako for the LHCf Collaboration, *EPJ Web Conf.* **145**, 09002 (2017).
9. R. A. Mukhamedshin, *Eur. Phys. J. Plus* **134**, 584 (2019); <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12933-2>
10. D. Heck, T. Antoni, W. D. Apel, F. Badea, K. Bekk, A. Bercuci, K. Bernlöhner, H. Blümer, E. Bollmann, H. Bozdog, I. M. Brancus, C. Büttner, A. Chilingarian, K. Daumiller, P. Doll, J. Engler, et al., in *Proceedings of 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001)*, 7–15 Aug., 2001, Hamburg, Germany, p. 233.
11. В. В. Учайкин, Дис. ... докт. физ.-мат. наук (Барнаул, 1988).
12. H. Wilczynski (Jacee Collab.), *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.* **52**, 81 (1997); [https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(96\)00851-1](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(96)00851-1)
13. И. В. Амурина, В. П. Антонова, Г. М. Аутова, М. К. Бабаев, А. С. Байгубеков, П. А. Бейль, Р. У. Бейсембаев, А. Е. Бодунов-Скворцов, А. С. Борисов, Ю. Н. Вавилов, А. В. Варгасов, Л. И. Вильданова, Н. Г. Вильданов, Е. Н. Гудкова, А. В. Гуревич и др., *Изв. РАН. Сер. физ.* **69**, 356 (2005) [*Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **69**, 406 (2005)].
14. E. Witten, *Phys. Rev. D* **30**, 272 (1984); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.30.272>
15. G. F. Fedorova and R. A. Mukhamedshin, *Bull. Soc. Sci. Lett. Lodz, Ser. Rech. Def.* **XVI**, 137 (1994).

THE UNUSUAL EVENTS IN X-RAY EMULSION CHAMBER EXPERIMENTS

© 2025 S. E. Pyatovsky^{1),2)}, E. A. Kanevskaya¹⁾

¹⁾ *P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²⁾ *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

The article considers events recorded in an experiment with X-ray emulsion chambers (XREC) to study the cores of extensive air showers (EAS) with energies of nuclei of primary cosmic radiation (PCR) $E_0 > 100 \text{ TeV}$, which currently have no explanation within the Standard Model of nuclear interactions (SM). The XREC method is the only one that allows studying EAS cores with a high coordinate resolution of about 100 microns. EAS cores contain the most complete information about primary acts of nuclear interactions, as a result of which all unusual events recorded by the XREC method are of great scientific interest. Several types of unusual events recorded by the XREC method were explained within the SM.