

**ПРИРОДА ИМПУЛЬСОВ, ЗАДЕРЖАННЫХ НА $\tau \geq 5$ мкс,
В СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРАХ В ЛИВНЯХ С ЭНЕРГИЕЙ $E_0 \geq 10^{18}$ эВ**

Ю.А. Егоров, С.П. Кнуренко, А.В. Сабуров

**ORIGIN OF IMPULSES DELAYED BY $\tau \geq 5$ μ s IN SCINTILLATION DETECTORS
FOR $E_0 \geq 10^{18}$ eV SHOWERS**

Y.A. Egorov, S.P. Knurenko, A.V. Saburov

На Якутской установке ШАЛ проводятся временные измерения отклика от различных детекторов частиц ШАЛ. Особенностью таких измерений является то, что все они регистрируют в некоторых ШАЛ импульсы от частиц, приход которых на детектор относительно регистрации первой частицы задержан на $\tau_3 \gg 5$ мкс, тогда как по модельным расчетам все основные частицы диска ШАЛ должны приходиться компактно в течение порядка 1–5 мкс.

The Yakutsk EAS array provides measurement of the temporal structure of signals from EAS particle detectors. These measurements have revealed that in some shower events there are pulses from particles with arrival time delayed relative to the first registered particle by $\tau \sim 3-5$ mcs. At the same time, according to model calculations, all the main components of a shower disk must arrive closely packed, within $\tau \sim 1-5$ mcs.

Введение

На временной развертке отклика сцинтилляционного детектора при определенных условиях в ливнях с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ наблюдаются импульсы, задержанные на время более 5 мкс [Knurenko et al., 2008, 2013]. Согласно расчетам в работе [Ерлыкин, 2007], это позволяет говорить о наблюдении на уровне моря на больших расстояниях от оси наклонной компоненты, а именно нейтронов. Для интерпретации полученных результатов мы провели собственные расчеты временных распределений нейтронов для ливней с $E_0 \geq 10^{18}$ эВ и зенитными углами θ от 0 до 60°. Для этого мы использовали пакет программ «Корсика» и модели QGSJET-II. Расчеты проводились для условий и детекторной базы Якутской установки ШАЛ.

Установка ПВИ (пункты временных измерений)

Установка для регистрации частиц ШАЛ разными детекторами кратко описана в работах [Knurenko et al., 2008, 2013]. В установку входят три пункта регистрации, которые находятся на расстоянии 300–500 м друг от друга (рис. 1). Синхронизация пунктов осуществляется с помощью системы GPS.

Результаты наблюдения временной структуры диска ШАЛ с помощью системы сцинтилляционных детекторов с разными порогами

Анализ сигналов предполагал рассмотрение как отдельных детекторов, так и их комбинации. Связано это было с тем, что детекторы имели разные пороги регистрации частиц, а именно 10.5, 1.8 и 0.2 МэВ, и по их соотношению можно было судить об энергии и типе частиц. Временное распределение импульсов на развертке позволяло говорить не только о количестве зарегистрированных частиц, но и о кривизне и толщине диска, если имелись данные на разных расстояниях от оси ливня. Таким образом, кроме интегральных характеристик, определяемых по функциям пространственного распределения (ФПР) разных компонент ливня, стало возможным различать ливни и по структуре импульсов. Например, в ливнях четко прослеживается разница в форме им-

пульсов, зарегистрированных на разных расстояниях от оси ливня, и особенно в наклонных ливнях, где эта разница возникает за счет разделения на надосевые и подосевые частицы. Различие в форме импульсов наблюдается и в случае наземных и подземных детекторов (мюонов). Отмечено, что в большинстве сильно наклонных ливней имеются и задержанные на большое время импульсы.

Распределение задержанных импульсов

На рис. 2 показано распределение по времени импульсов, зарегистрированных детекторами в ливнях с энергией выше 10^{17} эВ. Рассмотрено более 6000 ливней с зенитными углами θ от 0° до 70°. Из рис. 2 видно, что основная масса частиц ливня приходит в течение 2–3 мкс и только небольшая часть ливней (в основном наклонные и с энергией выше $5 \cdot 10^{18}$ эВ) имеют импульсы с временами задержки более 3–5 мкс.

Выполнены расчеты импульсов для разных частиц по модели QGSJET-II, сделаны расчеты ФПР для адронов, мюонов, электронов и гамма-квантов для ШАЛ с $E_0 \geq 10^{18}$ эВ и зенитным углом $\theta = 30^\circ$ [Knurenko et al., 2008, 2013].

Из рис. 3 видно, что ФПР нейтронов по отношению к другим компонентам, т. е. нейтроны могут распространяться на большие расстояния от оси ливня. На расстояниях более 2.5 км от оси ливня нейтронная компонента количественно превосходит как электронную, так и мюонную компоненты. Следовательно, нейтроны могут быть обнаружены по продуктам их замедления в среде, обычно далеко за максимумом развития ШАЛ и на больших расстояниях от оси ливня. Это будут медленные нейтроны малой энергии, а продуктами замедления их в веществе могут быть электроны малых энергий. Это мы и установили, регистрируя электроны сцинтилляционными детекторами с порогом $\epsilon_{thr} \geq 1.8$ МэВ. На рис. 4 показано распределение времени прихода электромагнитной, мюонной и нейтронной компонент, рассчитанное для первичного протона с $E_0 = 1 \cdot 10^{18}$ эВ и расстояния $R \leq 1000$ м от оси ливня. Расчет выполнен для высоты 110 м над уровнем моря. Видно, что на расстоянии 1000 м и при задержках более 5 мкс

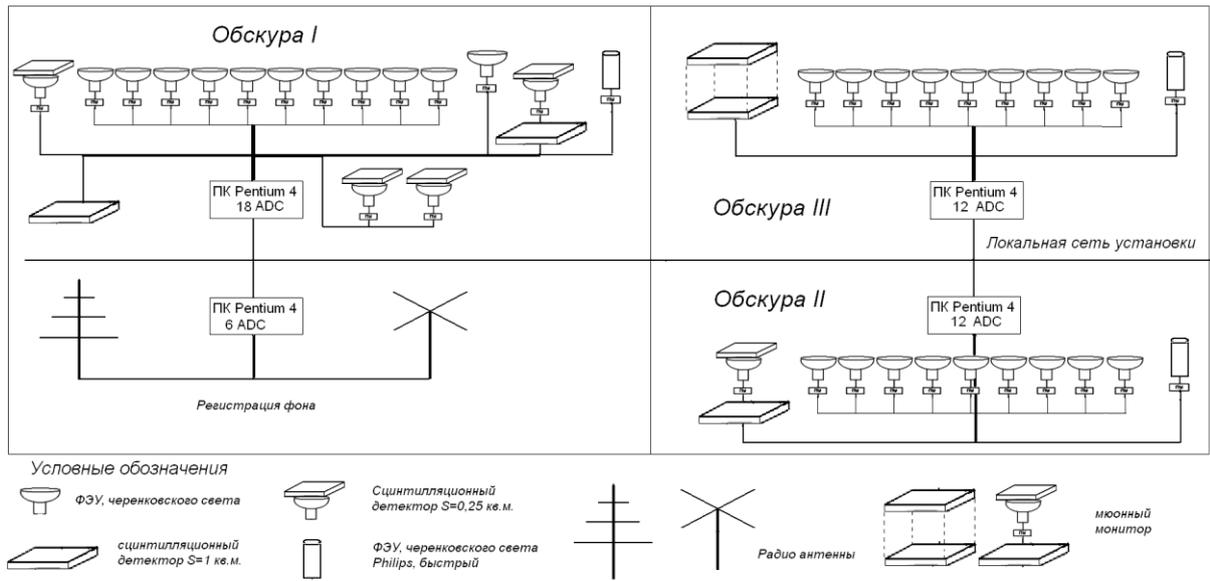


Рис. 1. Блок-схема установки для регистрации откликов от частиц ШАЛ в сцинтилляционных, мюонных и черенковских детекторах.

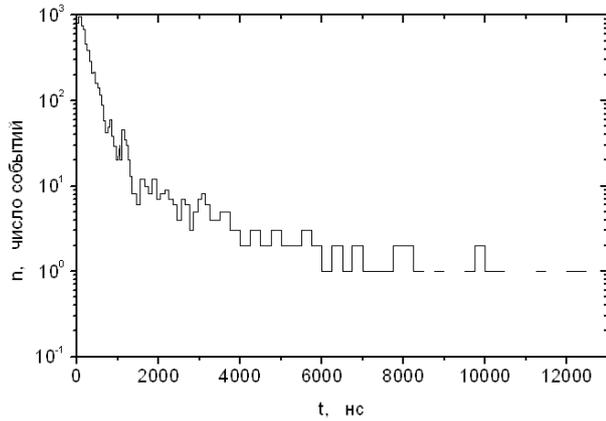


Рис. 2. Распределение по времени запаздывающих частиц ШАЛ.

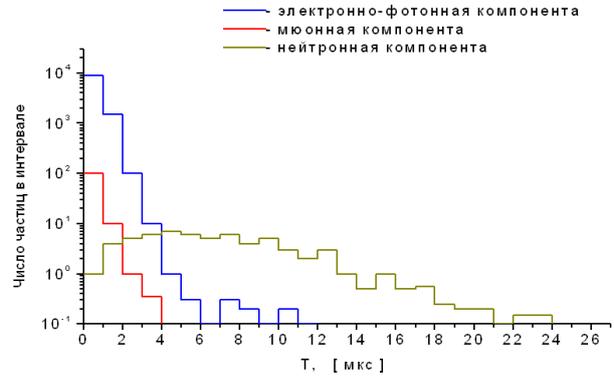


Рис. 4. Распределение времени прихода электромагнитной, мюонной и нейтронной компонент ШАЛ.

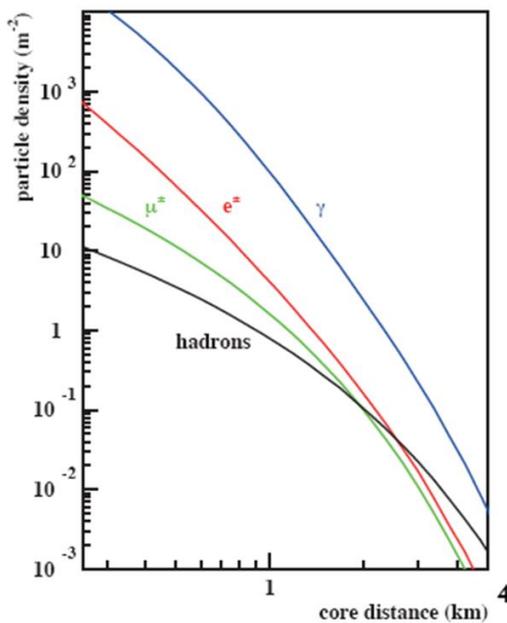


Рис. 3. Пространственное распределение адронов, мюонов, электронов и гамма-квантов ШАЛ.

нейтроны становятся доминирующей компонентой ШАЛ.

Из рис. 5 видно, что в ливне зарегистрированы запаздывающие частицы с задержкой 5–11 мкс. Нужно отметить, что не в каждом ливне с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ регистрировались задержанные на большое время импульсы. Поэтому наша задача состояла в том, чтобы собрать как можно больше таких ливней и затем, проанализировав, выяснить природу задержанных частиц.

Природа задержанных на большое время импульсов, регистрируемых в сцинтилляционных детекторах

Было установлено, что задержанные на большое время импульсы эффективно регистрируются в ливнях с энергией выше 10^{19} эВ и зенитным углом $\theta \sim 45^\circ$. По нашему мнению, при таких условиях начинает нарушаться принцип симметрии в развитии ливня относительно центральной его части, который имеет место в вертикальных событиях ШАЛ. В наклонных ливнях, начиная с $\theta \geq 45^\circ$, происходит значительное разделение состава по типу частиц. Состав частиц в случае надосевого и подосевого развития

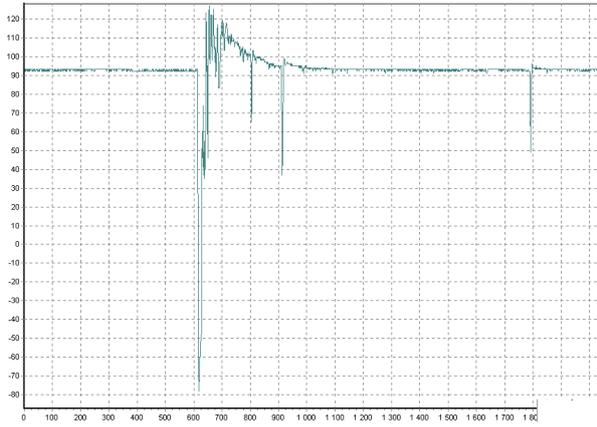


Рис. 5. Ливень 23.05.2008 г.: $\theta=45.6^\circ$, $\varphi=315.5^\circ$, $E_0=4.8 \cdot 10^{19}$ эВ, $R_{\text{obs1}}=464$ м, $S=1$ м², $\epsilon_{\text{thr}}=1.8$ МэВ. Цена одного деления шкалы составляет 1 мкс.

смещается в сторону мюонной компоненты (надосевая область), с наличием в потоке в том числе и нуклонной компоненты, которая выносится на дальнюю периферию пространственного распределения частиц ШАЛ. Такие нейтроны, по-видимому, и являются источником задержанных импульсов. Как указывается в работе [Ерлыкин, 2007], эти частицы

могут быть нейтронами низких энергий, которые, будучи нейтральными, не взаимодействуют с веществом детектора или его окружения, но, замедляясь в среде, порождают электроны и гамма-кванты низких энергий, которые эффективно регистрируются сцинтилляционными детекторами с порогом 1.8 МэВ, в то время как детекторы с порогом 10.5 МэВ их не регистрируют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ерлыкин А.Д. Нейтронный «гром», сопровождающий широкий атмосферный ливень // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, № 4. С. 554–557.

Knurenko S., Petrov Z., Yegorov Y. Spatio-temporal structure of a shower disk in the ultra-high energy region observed by different components // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. 012090. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012090.

Knurenko S., Petrov Z., Yegorov Y., Dyachkovsky N. Spati-temporal distribution of cascade particles below the maximum of EAS development with $E \geq 10^{17}$ eV // arXiv:0810.3958. 2008.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия