

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Сигналы в подземных сцинтилляционных детекторах Якутской установки от мюонной компоненты широких атмосферных ливнейЛ. Г. Деденко^{1,a}, Т. М. Роганова², Г. Ф. Федорова²*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ¹ физический факультет, кафедра общей физики; ² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^a ddn@dec1.sinp.msu.ru*

Статья поступила 26.01.2011, подписана в печать 12.03.2011

Разработана модель подземной части Якутской установки. С помощью пакета GEANT4 проведены вычисления сигналов в сцинтилляционных детекторах мюонов, которые описываются в рамках этой модели. Показано, что величина сигнала сильно флуктуирует и может в несколько раз превышать средние ионизационные потери энергии одного мюона. Эти большие потери в случае малой плотности мюонов имитируют большую множественность мюонов. Показано, что гамма-кванты, которых много вблизи оси ливня, дают большой вклад в сигнал подземных детекторов и существенно затрудняют интерпретацию данных.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, мюоны, сигналы в подземных детекторах.

УДК: 539.171. PACS: 96.50.S–.

Введение

В настоящее время имеются возможности для использования новых подходов и методов интерпретации экспериментальных данных. Интуитивные оценки и соображения должны уступать место точным расчетам. В частности, для интерпретации показаний подземных сцинтилляционных мюонных детекторов Якутской установки (ЯУ), на которой проводятся исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ) в области сверхвысоких энергий, используется предположение о том, что только мюоны с энергией выше пороговой генерируют одинаковый сигнал. Величина этой пороговой энергии E_{th} определяется средними потерями энергии мюонов в грунте и принимается равной $E_{th} = 1$ ГэВ для случая вертикальных мюонов. В действительности ситуация несколько иная. Различные частицы ШАЛ, достигшие уровня наблюдения, имеют шанс распространиться сквозь толщу земли и вызвать сигнал в детекторе. Мюоны генерируют в толще земли над детектором тормозные гамма-кванты, рождают электрон-позитронные пары. Каскады от всех этих вторичных частиц могут достигнуть детектора и дать сигнал, величина которого сильно флуктуирует. Кроме того, мюоны с энергией ниже принятой пороговой могут пройти сквозь толщу земли и тоже дать сигнал в детекторе. Величина реального порога E_{th} зависит от химического состава, плотности и толщины грунта. Таким образом, необходимо рассматривать прохождение различных частиц ШАЛ, достигших уровня наблюдения, через толщу грунта, рассчитывать каскады вторичных частиц в этой толще и вычислять сигналы от всех вторичных частиц в подземных детекторах мюонов. Над детекторами первого поколения имеются пирамидальные конструкции из дюрала, которые также вносят вклад в конверсию гамма-квантов и генерацию

электронно-позитронных пар и увеличивают сигнал в сцинтилляционном детекторе.

В настоящей работе приводятся полученные с помощью пакета GEANT4 [1] результаты расчета сигналов в подземных сцинтилляционных детекторах второго поколения, которые подвешены к потолку подземного помещения, и делаются новые выводы об интерпретации этих сигналов.

1. Метод расчета

На ЯУ используются два типа подземных детекторов. Детекторы первого поколения расположены на дюралевом поддоне толщиной 2 мм, который лежит на грунте подземного помещения. Над этими детекторами имеются пирамидальные конструкции из дюрала толщиной 2 мм, крышка из дюрала толщиной 3 мм для крепления ФЭУ, слой воздуха и грунта. Толща грунта изменяется от 2.5 до 3.2 м для разных детекторов. По измерениям плотность грунта равна 1.6 г/см³. Состав грунта принимался следующим: кислород — 49%, кремний — 33%, алюминий (вместе с магнием и натрием) — 8.3%, железо — 3.8%, кальций (вместе с калием и титаном) — 3.4%, углерод (вместе с легкими элементами) — 2.5%. Состав дюрала принимался стандартным (медь — 4.9%). Детекторы второго поколения подвешены к потолку. Таким образом, над ними имеется только слой грунта толщины h , которая варьировалась от 2.3 до 3 м, и слой бетона, который эффективно учитывается как грунт.

Расчет сигналов в детекторах на основе пакета GEANT4 [1] проводился следующим образом. Моделировалось падение из атмосферы на грунт мюонов с различными энергиями и углами наклона к вертикали. Энергии мюонов варьировались от 0.5 до 100 ГэВ. Зенитный угол изменялся от 0 до 45°. Кроме того, прослеживалось прохождение через грунт электронов

и гамма-квантов с энергиями от 0.5 до 100 ГэВ. Рассчитывались как средние значения, так и распределения энергии, которая выделяется в сцинтилляционном детекторе толщиной 5 см. Химический состав сцинтиллятора принимался стандартным, а плотность $\rho=1.03$ г/см². Расчеты энергетических спектров мюонов и гамма-квантов в ШАЛ выполнялись с помощью пакета CORSIKA 6.616 [2] в рамках моделей QGSJET2 [3] и GHEISHA 2002 [4].

2. Результаты расчета

При интерпретации экспериментальных данных расчеты надо проводить для конкретных детекторов, в которые попали мюоны. Толща грунта над разными детекторами изменяется от 2.3 до 3.2 м. Для экономии места вместо нескольких однотипных рисунков авторы ограничились одним рисунком для детектора, над которым имеется 2.5 м грунта, чтобы показать, как зависит сигнал от энергии мюона, падающего на грунт из атмосферы. Аналогично ниже рассмотрены флуктуации сигнала в детекторе, над которым толща грунта равна 3.2 м.

Результаты расчета сигналов для толщи грунта 2.5 м и зенитных углов 0 и 45° приведены на рис. 1. Сплошной линией показан ожидаемый сигнал $\Delta E = 10.5$ МэВ в детекторе от вертикальных мюонов, принимаемый за эталон на ЯУ. Полые кружки — результаты расчета для вертикальных мюонов. Из рисунка видно, что, во-первых, имеются сигналы от мюонов с энергией ниже принятой пороговой $E_{th} = 1$ ГэВ (вплоть до энергии мюонов 0.65 ГэВ), а во-вторых, сигнал при малых и больших энергиях существенно (примерно в 1.5 раза) превышает принятую величину 10.5 МэВ. Статистика событий для каждой точки равна 100. Несмотря на такую статистику, средние величины испытывают большие флуктуации. Поскольку косинус среднего угла падения мюона на грунт в отобранных экспериментальных ливнях равен 0.983, то может возникнуть поправка порядка 1.7% на эффективную толщину грунта над детектором.

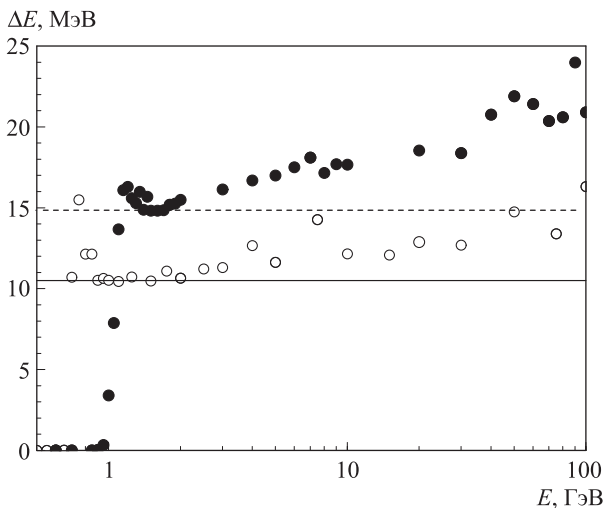


Рис. 1. Средняя величина сигнала в подземном детекторе от мюонов с разными энергиями, падающих на грунт толщины $h = 2.5$ м из атмосферы: светлые кружки — 0°, черные кружки — 45°, сплошная линия — 10.5 МэВ, штриховая линия — 14.85 МэВ

Примерно такие же выводы следуют и для случая падения мюонов на грунт под углом $\Theta = 45^\circ$. Штриховая кривая — это ожидаемый сигнал $\Delta E_{exp} = \Delta E / \cos \Theta = 14.85$ МэВ, а сплошные кружки — результаты расчета. И здесь видно, что имеется значительный вклад от мюонов с энергией ниже принятой пороговой $E_{th}(\Theta) = E_{th} / \cos \Theta = 1.41$ ГэВ (вплоть до энергии мюонов 0.9 ГэВ). Также видно, что при этих малых энергиях, как и при больших (больше 2 ГэВ), сигнал существенно превышает ожидаемое значение 14.85 МэВ, принятое как эталон на ЯУ для интерпретации экспериментальных результатов для зенитного угла 45°.

На Якутской установке имеются системы наземных детекторов, расположенных на расстоянии 500 и 1000 м друг от друга. Поэтому давно принято в качестве экспериментального параметра использовать сигнал на расстоянии 600 м от оси и соответственно этому рассчитывать величину сигнала. На рис. 2 приведены нормированные дифференциальные спектры мюонов в ШАЛ от первичных протонов с энергиями 10^{17} , 10^{18} , 10^{19} и 10^{20} эВ на расстоянии 600 м от оси ливня. С учетом энергетического спектра мюонов в ШАЛ следует ожидать основного вклада в средний сигнал от мюонов малых энергий. Результирующий средний вклад в сигнал оценивался по формуле

$$\langle \Delta E_\mu \rangle = \int_{0.65}^{100} \Delta E_\mu(E) F(E) dE / \int_1^{100} F(E) dE, \quad (1)$$

где $\Delta E_\mu(E)$ — расчетный вклад в сигнал от мюона с энергией E , $F(E) dE$ — энергетический спектр мюонов в ШАЛ на расстоянии 600 м от оси ливня. Интеграл в числителе формулы (1) учитывает вклад в сигнал от всех мюонов, которые долетели до детектора. Для определения среднего вклада $\langle \Delta E_\mu \rangle$ от одного мюона нижний предел интеграла в знаменателе должен быть равен 0.65 ГэВ. В этом случае сигнал $s_\mu(600)$ надо

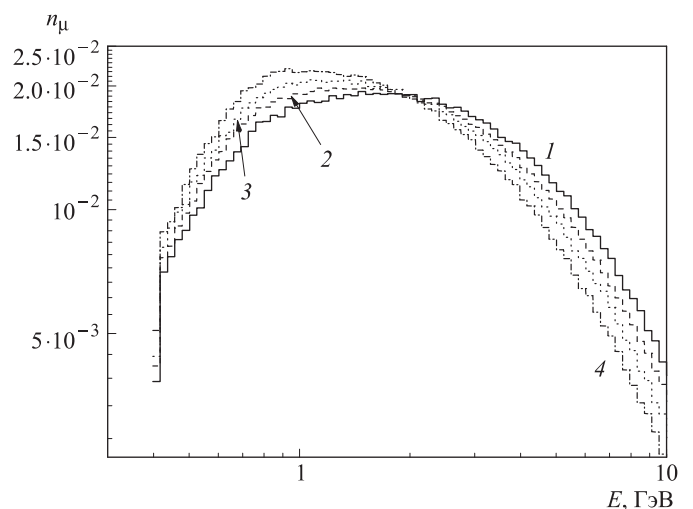


Рис. 2. Нормированные дифференциальные энергетические спектры мюонов на расстоянии 600 м от оси ливня для разных энергий E_0 первичного протона: 10^{17} эВ (1), 10^{18} эВ (2), 10^{19} эВ (3), 10^{20} эВ (4)

было бы оценивать по формуле

$$s_{\mu}(600) = \langle \Delta E_{\mu} \rangle \cdot \rho_{\mu}(600 \text{ м}, \geq 0.65 \text{ ГэВ}). \quad (2)$$

Однако из-за предположения о регистрации мюонов с энергией выше 1 ГэВ этот предел был выбран равным 1 ГэВ. Это позволяет учесть превышение реального сигнала по сравнению со случаем, когда пороговая энергия предполагается равной 1 ГэВ. Для учета этого превышения были рассчитаны отношения k среднего сигнала к принятому за эталон на ЯУ:

$$k = \langle \Delta E_{\mu} \rangle / \Delta E. \quad (3)$$

Именно эти значения k надо использовать для перевода вычисленной плотности мюонов $\rho_{\mu}(600 \text{ м}, \geq 1 \text{ ГэВ})$ с энергией выше 1 ГэВ и предполагаемого вклада ΔE в реальный сигнал $s_{\mu}(600)$ в подземных сцинтилляционных детекторах:

$$s_{\mu}(600) = k \cdot \langle \Delta E \rangle \cdot \rho_{\mu}(600 \text{ м}, \geq 1 \text{ ГэВ}). \quad (4)$$

Значения коэффициента k для нескольких энергий E_0 ШАЛ приведены в таблице. Как видно, сигнал существенно (на 30%) превышает принятое среднее значение (с учетом изменения порога).

Значения коэффициента k для разных энергий E_0 ШАЛ

E_0 , эВ	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}
k	1.25	1.29	1.3	1.33

Для анализа экспериментальных данных большой интерес представляет информация о флуктуациях величины сигнала ΔE_{μ} от мюонов, упавших на грунт из атмосферы. Для оценки этих флуктуаций были рассчитаны нормированные распределения сигнала ΔE_{μ} в подземном детекторе для разных толщин грунта. На рис. 3 для толщины грунта $h = 3.2 \text{ м}$ показаны нормированные распределения для мюонов с энергиями 1.05 ГэВ (а), 1.5 ГэВ (б) и 10 ГэВ (в), рассчитанные со статистикой 100 событий. Сигналы, величина которых превышает 20 МэВ (три события в случае а, одно в случае б и восемь в случае в), на этих гистограммах включены в последний правый интервал. Отметим, что максимальная величина сигнала равна $\Delta E_{\mu} = 68.4 \text{ МэВ}$ в случае а, 20.2 МэВ в случае б и 39.2 МэВ в случае в. Из рис. 3 видно, что флуктуации величины сигнала очень велики. При малой плотности мюонов такие флуктуации могут имитировать большую по сравнению со средней множественность мюонов и существенно затрудняют интерпретацию сигналов в подземных детекторах.

Новым важным элементом анализа данных является предложение об учете вклада гамма-квантов и других частиц в сигнал подземных детекторов.

Расчеты показали, что электроны не проходят через толщу грунта и не достигают детектора. Гамма-квантов в ливнях на порядок больше, чем электронов, и они доходят до детектора. Например, в ШАЛ с энергией 10^{19} эВ до уровня наблюдения доходят $4 \cdot 10^5$ гамма-квантов с энергией выше 1 ГэВ. Конечно, эти гамма-кванты сконцентрированы вблизи оси ливня. На рис. 4 для вертикальных ШАЛ с энергиями $10^{17}, 10^{18}$,

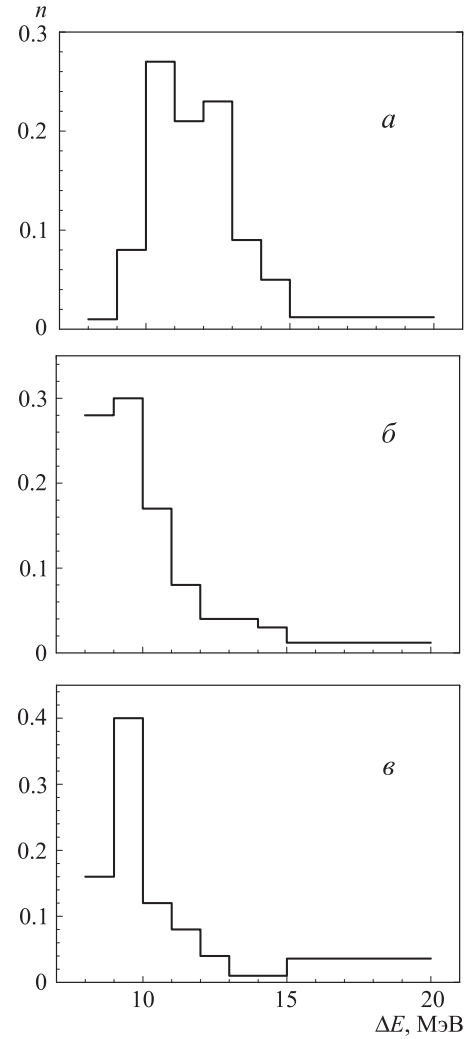


Рис. 3. Нормированные распределения сигналов в подземном детекторе от мюонов с разными энергиями, падающих на грунт толщины $h = 3.2 \text{ м}$ из атмосферы: $E_{\mu} = 1.05 \text{ ГэВ}$ (а), 1.5 ГэВ (б), 10 ГэВ (в)

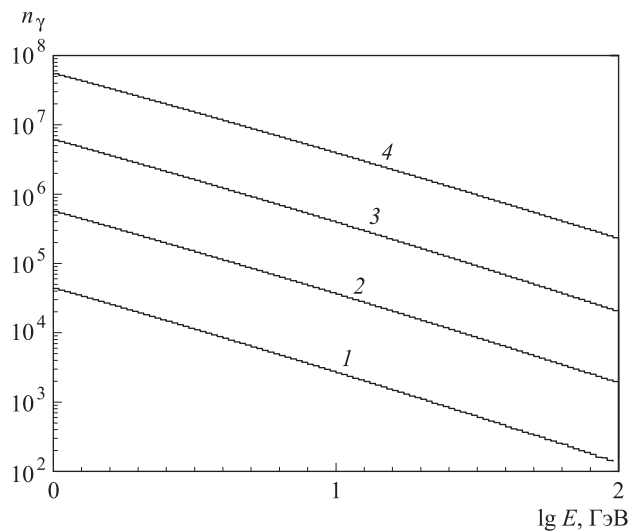


Рис. 4. Энергетические спектры гамма-квантов в вертикальных ШАЛ с различными энергиями E_0 : 10^{17} эВ (1), 10^{18} эВ (2), 10^{19} эВ (3), 10^{20} эВ (4)

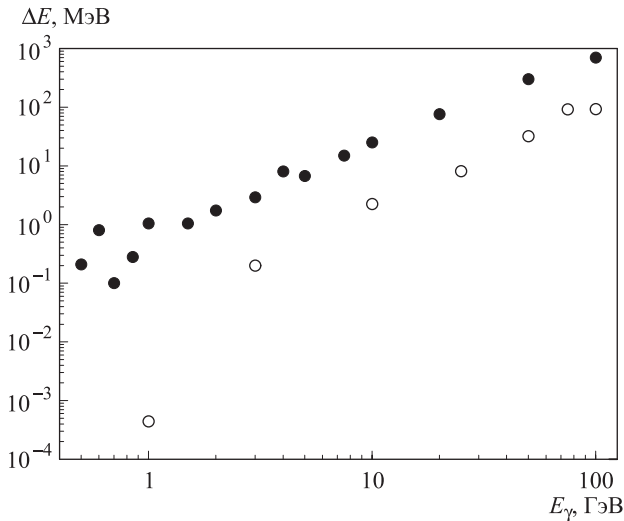


Рис. 5. Средняя величина сигнала в подземном детекторе от гамма-квантов с разными энергиями, падающих вертикально из атмосферы на грунт толщины $h = 2.3$ м (черные кружки) и 3.2 м (светлые кружки)

10^{19} и 10^{20} эВ представлены энергетические спектры гамма-квантов. Видно, что имеются гамма-кванты с очень большими энергиями и, в частности, с энергией $E_\gamma \sim 100$ ГэВ ($\sim 1.4 \cdot 10^3$ таких квантов при энергии 10^{18} эВ и $3.5 \cdot 10^5$ квантов при энергии 10^{20} эВ). Ось ливня может попасть в область вблизи детектора, и в этом случае необходимо вносить поправки в сигнал.

На рис. 5 представлен вклад в сигнал подземных детекторов от гамма-квантов с различными энергиями для двух значений толщины грунта над детектором (полые кружки для $h = 2.3$ м, сплошные кружки для $h = 3.2$ м). Видно, что для толщины 2.3 м вклад растет от ~ 1 МэВ при энергии гамма-кванта $E_\gamma = 1$ ГэВ до ~ 1 ГэВ при $E_\gamma = 100$ ГэВ. Важно отметить, что величина вклада сильно зависит от энергии и флуктуирует. Для толщины $h = 3.2$ м вклад меньше, но заметен, и для гамма-кванта с энергией $E_\gamma = 100$ ГэВ он составляет ~ 93 МэВ.

Как и для мюонов, важна информация о флуктуациях сигнала ΔE_γ от гамма-квантов. Для их оценки были рассчитаны нормированные распределения сигналов ΔE_γ . На рис. 6 для толщины 2.3 м приведены эти распределения сигналов от гамма-квантов с энергиями 5 ГэВ (а) и 10 ГэВ (б). Видно, что в 40% случаев вклад от одного гамма-кванта очень значителен: превышает 20 МэВ. Максимальный сигнал может быть в области 50 — 100 МэВ для кванта с энергией $E_\gamma = 5$ ГэВ и в области 100–150 МэВ для кванта с энергией $E_\gamma = 10$ ГэВ. Отметим, что при $E_\gamma = 1$ ГэВ только 23% квантов дают вклад в сигнал, причем в 10% случаев этот вклад превышает 2 МэВ, а в 2% случаев более 10 МэВ. При $E_\gamma = 10$ ГэВ уже в 5% случаев сигнал превышает 100 МэВ, а при $E_\gamma = 100$ ГэВ максимальный вклад в сигнал по статистике из 10 событий больше 1.3 ГэВ, что эквивалентно сигналу от 130 мюонов. Таким образом, как флуктуации сигнала ΔE_γ , так и его величина очень значительны. При самых высоких энергиях ($\sim 10^{20}$ эВ) вклад гамма-квантов важен до расстояний 600–700 м от оси ливня, где плотность гамма-квантов превышает 1 квант/м². Однако

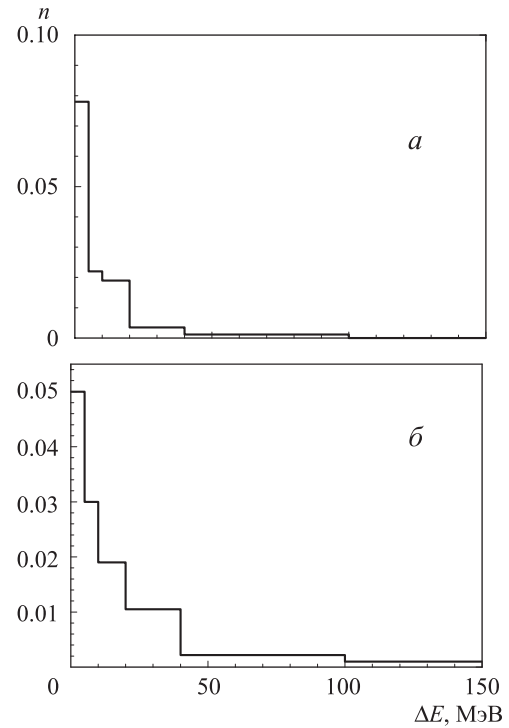


Рис. 6. Нормированные распределения сигналов в подземном детекторе от гамма-квантов с разными энергиями, падающих вертикально из атмосферы на грунт толщины $h = 2.3$ м: $E_\gamma = 5$ ГэВ (а) и 10 ГэВ (б)

в реальных условиях детектор может оказаться значительно ближе к оси ливня, и поэтому этот вклад может быть существен и в области меньших энергий. Для ШАЛ с энергиями 10^{17} , 10^{18} и 10^{19} эВ плотность потока гамма-квантов с энергией ≥ 1 ГэВ превышает 1 квант/м² до расстояний от оси ливня ~ 60 , ~ 140 и ~ 280 м соответственно.

Заключение

В рамках моделей QGSJET2 и GHEISHA 2002 с помощью пакета CORSIKA 6.616 в вертикальных ШАЛ с энергиями 10^{17} , 10^{18} , 10^{19} и 10^{20} эВ рассчитаны энергетические спектры гамма-квантов и энергетические спектры мюонов на расстоянии 600 м от оси ливня. С помощью пакета GEANT4 рассмотрено прохождение мюонов и гамма-квантов ШАЛ через толщу грунта над подземными сцинтилляционными детекторами и вычислены сигналы в детекторах второго поколения.

Показано, что детальное моделирование процесса распространения мюонов в грунте с учетом их энергетического спектра в ШАЛ приводит к уменьшению пороговой энергии мюонов и увеличению среднего сигнала, что в совокупности приводит к увеличению сигнала в подземном детекторе второго поколения на $\sim 30\%$ по сравнению со случаем, когда учитываются сигналы от мюонов с пороговой энергией выше 1 ГэВ со средними потерями энергии $\Delta E = 10.5$ МэВ в детекторе. Сделан вывод о больших флуктуациях сигнала в детекторе от одного мюона, что при малых плотностях мюонов затрудняет интерпретацию сигнала. Показано, что гамма-кванты могут давать существенный вклад

в сигнал подземных детекторов, оказавшихся вблизи оси ливня, что также затрудняет интерпретацию.

Авторы благодарны М.И. Правдину за предоставленную информацию о подземных детекторах ЯУ и полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт 02.740.11.5092,) и ВШШ (грант 3517.2010.2).

Список литературы

1. *The GEANT4 Collab.* <http://www.info.cern.ch/asd/geant4.html>.
2. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.-N. et al.* // Forschungszentrum Karlsruhe Technical Report. 1998. N 6019.
3. *Ostapchenko S.S.* // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2006. **151**. P. 143.
4. *Feseefeldt H.* // Report PITNA-85/02. RWTA. Aachen, 1985.

Signals in the underground scintillation detectors of the Yakutsk array from muons of the extensive air showers

L. G. Dedenko^{1,a}, T. M. Roganova², G. F. Fedorova²

¹*Department of General Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

¹*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^addn@dec1.sinp.msu.ru.

The model of the underground part of the Yakutsk array had been constructed. The signals of the scintillation detectors of muons have been calculated with the help of the code GEANT4 in terms of this model. It was shown that the signal fluctuates very much and may be several times higher than the mean ionization losses of energy by single muon. These large losses in case of the low multiplicity of muons may imitate large multiplicity of muons. It was also shown that there are many gammas which contribute much to signal in the underground detectors and thus considerably make it difficult to interpret data.

Keywords: extensive air showers, muons, signal in the underground detectors.

PACS: 96.50.S-

Received 26 January 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2011).

Сведения об авторах

1. Деденко Леонид Григорьевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-24-37, e-mail: ddn@dec1.sinp.msu.ru.
2. Роганова Татьяна Михайловна — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-36-82, e-mail: rogam@yandex.ru.
3. Федорова Галина Федоровна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-24-37, e-mail: fdr@dec1.sinp.msu.ru.