

УДК 537.591.15

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ КАСКАДОВ ОТ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ ОКОЛОЛУННОГО СПУТНИКА

В. И. Галкин¹, Г. А. Гусев, И. А. Кроль, Б. Н. Ломоносов, Н. Г. Полухина,
Т. М. Роганова¹, В. А. Рябов, В. А. Царев, В. А. Чечин

Предлагается гибридный метод регистрации каскадов космических лучей и нейтрино с использованием радиометода и традиционного метода регистрации каскадных частиц. Проводятся расчеты каскадов, рождаемых в лунном грунте вблизи поверхности космическими лучами и нейтрино ультравысоких энергий в области энергий 1 ГэВ – 100 ТэВ, приходящими сверху под разными углами. Рассчитанные энергетические и угловые распределения экстраполируются в область энергий 10^{20} эВ. С использованием этих результатов оценивается порог регистрации, он оказывается на уровне 10^{20} эВ, что приближенно совпадает с порогом для радиодетектора, рассмотренного ранее авторами.

1. В ряде работ (см., например, [1, 2]) обсуждается проект эксперимента ЛОРД по регистрации радиометодом, с борта окололунных спутников, каскадов, рождаемых вблизи лунной поверхности космическими лучами и нейтрино ультравысоких энергий (КЛУВЭ и НУВЭ). В этой связи представляет интерес рассмотрение возможности одновременной регистрации подобных каскадов также традиционными ядерно-физическими методами [3]. В качестве детекторов могут быть использованы различные детекторы, способные регистрировать каскадные частицы (фотоны, электроны, позитроны) с энергиями от

¹НИИЯФ МГУ им. Д. В. Скобельцына.

сотни КэВ. В данной работе мы не будем обсуждать выбор конкретного типа подобных детекторов каскадных частиц (ДКЧ), равно как и проблему отделения каскадных частиц от фона космических лучей низких энергий. Эти вопросы будут рассмотрены в последующей публикации. Целью данной работы является оценка плотности потока, а также энергетических и угловых распределений каскадных частиц на орбите окололунного спутника. Эти данные позволят оценить принципиальную возможность регистрации сигнала от каскада с помощью ДКЧ, помещенного на окололунном спутнике и, таким образом, реализации схемы “гибридного” детектирования сигналов от КЛУВЭ и НУВЭ. Суть ее состоит в регистрации совпадения сигналов черенковского радиоизлучения от каскадов с сигналами от каскадных частиц, выходящих из приповерхностного слоя реголита (см. рис. 1). Такая ситуация может иметь место для каскадов высоких энергий, которые, из-за большого сечения взаимодействия, рождаются на очень малых глубинах (типично менее метра). В этом случае часть каскадных частиц может выходить из среды, достигать детектора на спутнике, и может быть зарегистрирована специальным детектором фотонов или электронов и позитронов. Одновременная регистрация двух сигналов (радио и ДКЧ) и могла бы составить очень существенное достоинство метода, обеспечивая высокоэффективный способ подавления фонов и уверенный отбор полезных событий, обусловленных взаимодействием КЛУВЭ и НУВЭ с реголитом.

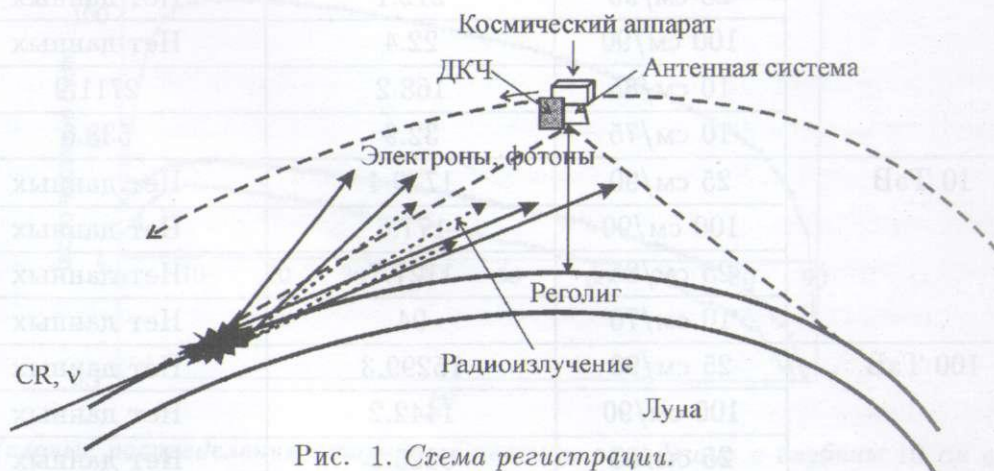


Рис. 1. Схема регистрации.

2. *Результаты моделирования.* КЛУВЭ и НУВЭ, взаимодействующие с лунным реголитом, рождают в нем каскады вторичных частиц [4, 5], причем часть каскадных частиц покидает лунный грунт и свободно распространяется в космическом пространстве. В настоящее время, в силу технических причин, мы не имеем возможности

моделировать каскады от частиц очень больших энергий, поэтому мы проводим моделирование для доступных энергий (на интервале 1 ТэВ – 100 ТэВ) и затем экстраполируем результаты в область очень больших энергий. Для расчета распределений частиц, выходящих из лунного грунта, использован пакет GEANT 3.21 [6–9]. Поверхностная часть реголита была аппроксимирована однородным прямоугольным параллелепипедом с соответствующим химическим составом (средняя атомная масса 27.7, средний заряд 13.5) и плотностью (1.17 г/см^3). Слой вакуума над реголитом также был представлен прямоугольным параллелепипедом. На реголит падали первичные протоны с энергиями от 1 ТэВ до 100 ТэВ с зенитными углами от 70 до 90 градусов. Ливни от горизонтальных протонов (зенитный угол 90 градусов) рассматривались на глубинах от 0.1 до 5 м от поверхности. Вторичные частицы (электроны, позитроны и гамма-кванты), выходящие из реголита в вакуум, запоминались для дальнейшего анализа.

Т а б л и ц а

Число вторичных частиц при разных параметрах каскада

Энергия каскада	Глубина/угол	Число электронов	Число гамма-квантов
1 ТэВ	1 см/90	1439.2	6788.8
	10 см/90	537.4	6037.4
	25 см/90	212.1	Нет данных
	100 см/90	22.4	Нет данных
	10 см/85	168.2	2711.9
	10 см/75	32.9	538.6
10 ТэВ	25 см/90	1770.4	Нет данных
	100 см/90	177.6	Нет данных
	25 см/85	1127.7	Нет данных
	10 см/70	94	Нет данных
100 ТэВ	25 см/90	15299.3	Нет данных
	100 см/90	1442.2	Нет данных
	25 см/85	8025.2	Нет данных

На рис. 2 и 3 приведены энергетические спектры и угловые распределения выходящих с глубины 10 см вторичных частиц в горизонтальном ливне от протона с энергией 1 ТэВ (угол θ отсчитывается от оси каскада). В таблице приведено число вторичных частиц, выходящих из реголита, от ливней указанной энергии и геометрии.

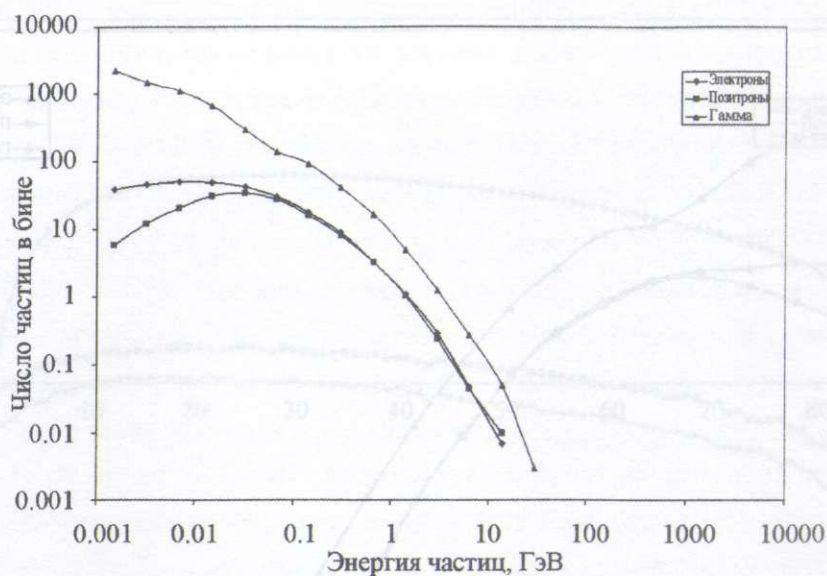


Рис. 2. Энергетические спектры вторичных частиц, выходящих с глубины 10 см, в горизонтальном ливне от протона с энергией 1 ТэВ.

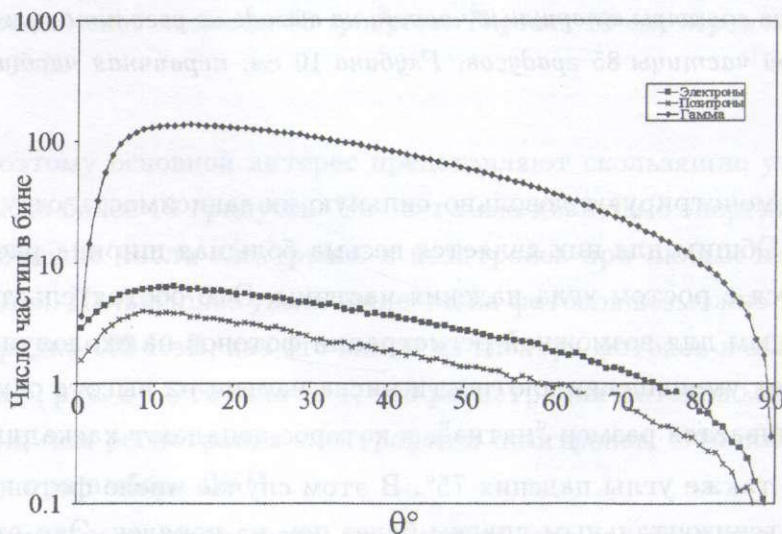


Рис. 3. Угловые распределения вторичных частиц, выходящих с глубины 10 см в горизонтальном ливне от протона 1 ТэВ.

Сравнение рис. 2 и 4 показывает, что имеется довольно сильная зависимость числа вылетающих вторичных частиц от угла падения первичной частицы. Угловые распределения для фотонов (см. рис. 3 и 5), которые в дальнейшем нас будут, в основном, ин-

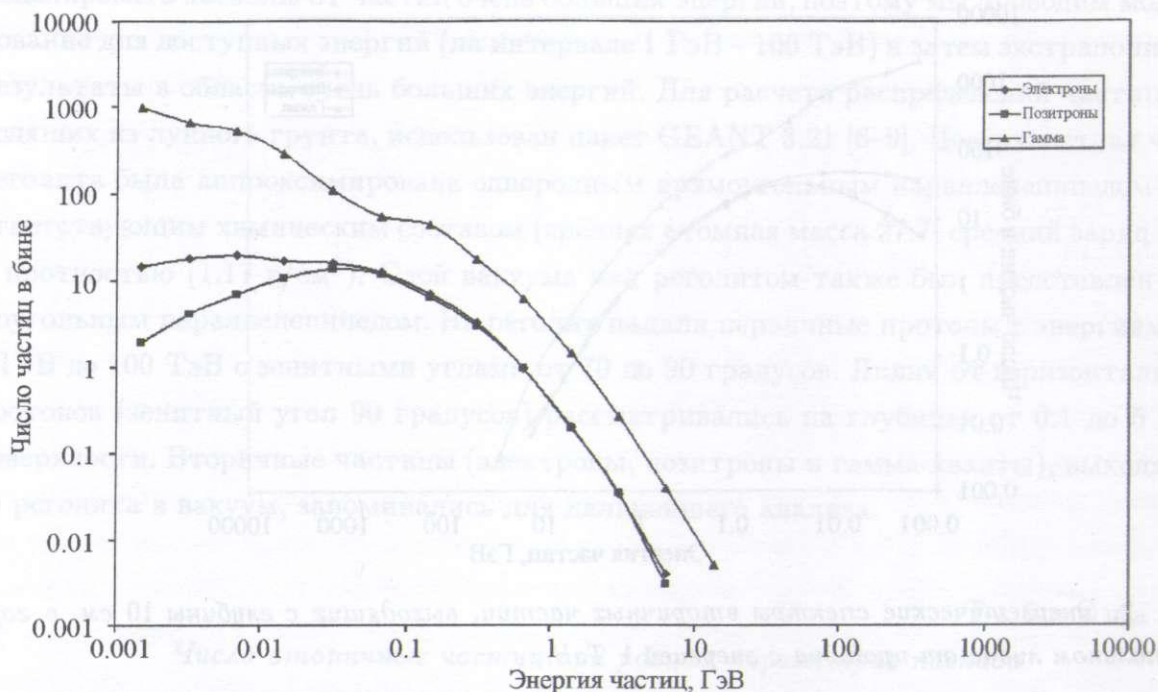


Рис. 4. Энергетические спектры вторичных частиц на выходе из реголита при угле падения первичной космической частицы 85 градусов. Глубина 10 см, первичная частица – протон с энергией 1 ТэВ.

тересовать, также демонстрируют довольно сильную их зависимость от угла падения первичной частицы. Общим для них является весьма большая ширина распределения, которая увеличивается с ростом угла падения частицы. Это обстоятельство является не очень благоприятным для возможной регистрации фотонов на окололунном спутнике, поскольку означает уменьшение плотности числа частиц на высоте спутника, хотя одновременно увеличивается размер “пятна”, в которое попадают каскадные частицы.

Рассматривались также углы падения 75°. В этом случае число фотонов уменьшается по сравнению с горизонтальным ливнем более чем на порядок. Это означает, что при малой общей статистике регистрации КЛУВЭ, ливни с углами падения более 75° регистрироваться практически не будут.

3. Анализ возможности регистрации вторичных частиц. Анализ результатов моделирования показывает, что число электронов и фотонов растет с первичной энергией E_0 примерно как E_0^S , где $S < 1$, причем S составляет 0.9 для горизонтальных ливней, 0.84 для ливней с зенитным углом 85 градусов и 0.5 для ливней с зенитным углом 75

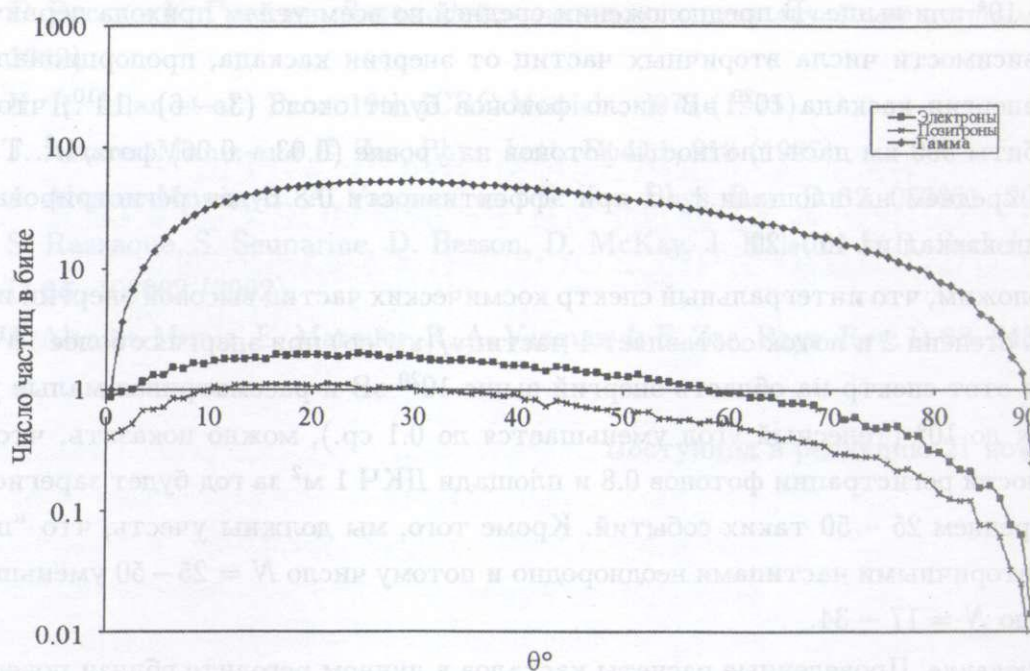


Рис. 5. Угловые распределения вторичных частиц на выходе из реголита при угле падения первичной космической частицы 85 градусов. Глубина 10 см, первичная частица – протон с энергией 1 ТэВ.

градусов. Поэтому основной интерес представляют скользящие углы падения первичной частицы не более 10 градусов. Число гамма-квантов с энергиями 2 МэВ примерно в 40-50 раз больше числа электронов и позитронов при любых первичных энергиях и зенитных углах. Дальнейшее увеличение числа фотонов возможно также при переходе к энергиям порядка 100 КэВ, как это видно из спектра фотонов в области энергий 2 МэВ (см., например, рис. 2). Это означает, что регистрация фотонов может быть более предпочтительной, чем регистрация электронов и позитронов. Это обстоятельство следует иметь в виду при выборе ДКЧ.

Анализ угловых распределений показывает, что вылетающие частицы по уровню 0.5 на высоте спутника около 500 км покрывают площадь порядка 10^6 км² или, что то же самое, спутник “видит” каскады с этой площади на поверхности Луны. Для более надежных оценок необходимо иметь результаты моделирования выхода вторичных частиц в области энергий порядка 100 КэВ. При экстраполяции кривой на рис. 2 для числа фотонов от каскада с энергией 1 ТэВ в область энергий вторичных частиц порядка 100 КэВ можно получить, что число фотонов с энергией порядка 100 КэВ будет на уров-

не $10^4 - 2 \cdot 10^4$ или выше. В предположении средней по всем углам прихода первичных частиц зависимости числа вторичных частиц от энергии каскада, пропорциональной $E^{0.8}$, для энергии каскада 10^{20} эВ число фотонов будет около $(3 - 6) \cdot 10^{10}$, что при высоте орбиты 500 км даст плотность фотонов на уровне $(0.03 - 0.06)$ фот./м². Таким образом, в среднем на площади 1 м² при эффективности 0.8 будет регистрироваться только один каскад из 40 - 20.

Предположим, что интегральный спектр космических частиц высокой энергии имеет показатель степени 2 и поток составляет 1 частицу/(км²ср) при энергиях более 10^{19} эВ. Продолжая этот спектр на область энергий выше 10^{20} эВ и рассматривая малые углы скольжения до 10° (телесный угол уменьшается до 0.1 ср.), можно показать, что при эффективности регистрации фотонов 0.8 и площади ДКЧ 1 м² за год будет зарегистрировано в среднем 25 - 50 таких событий. Кроме того, мы должны учесть, что "пятно засветки" вторичными частицами неоднородно и потому число $N = 25 - 50$ уменьшится в среднем до $N = 17 - 34$.

4. *Заключение.* Проведенные расчеты каскадов в лунном реголите вблизи поверхности Луны позволяют сделать приближенные оценки плотности потоков вторичных частиц (электронов, позитронов и фотонов) на орбите окололунного спутника. Для этого проведена экстраполяция результатов выполненных расчетов из области относительно малых энергий 10^{14} эВ в область ультравысоких энергий до 10^{20} эВ. Это позволило сделать предварительный вывод о возможности регистрации на спутнике Луны каскадных частиц сравнительно небольшим ДКЧ с площадью ~ 1 м². Порог регистрации при таком методе может составлять величину $W_{th} = 10^{20}$ эВ, что практически совпадает с порогом радиодетектирования в эксперименте ЛОРД. Статистика регистрации таких событий будет порядка 10 в год.

Работа поддержана грантом РФФИ N 08-02-00515-а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов, К. М. Пичхадзе и др., Доклады РАН 406(3), 327(2006).
- [2] Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов, К. М. Пичхадзе и др., Космические исследования 44(1), 22 (2006).
- [3] В. И. Калашникова, М. С. Козодоев, Детекторы элементарных частиц (М., Наука, 1966).

- [4] Б. Росси и К. Грейзен, *Взаимодействие космических лучей с веществом* (М., Мир, 1948).
- [5] H. R. Allan et al., Proc. 19th ICRC Munich., 3077 (1975).
- [6] J. Alvarez-Muniz and E. Zas, Phys. Lett. **B 411**, 218 (1997).
- [7] J. Alvarez-Muniz, R. A. Vazquez, and E. Zas, Phys. Rev. D **62**, 063001 (2000).
- [8] S. Razzaque, S. Seunarine, D. Besson, D. McKay, J. Ralston & D. Seckel, Phys. Rev. D **65**, 103002 (2002).
- [9] J. Alvarez-Muniz, E. Marques, R. A. Vazquez & E. Zas, Phys. Rev. D **68**, 043001 (2003).

Поступила в редакцию 21 ноября 2008 г.