

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 537.591

ЛИВНИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ ВНУТРИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ТИПА «МЕТЕОР»

И.П. Безродных, В.Т. Семенов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Обсуждаются вопросы генерации электронно-фотонных ливней и электронно-ядерных ливней релятивистских частиц¹ внутри космических аппаратов. Обращается внимание на то, что электронно-ядерные ливни релятивистских частиц способны модифицировать химический состав и структуру вещества космических аппаратов.

Ключевые слова: космические аппараты, космические лучи, электромагнитные и ядерные процессы, ливни частиц внутри космического аппарата.

Введение

Вторичное излучение генерируется при столкновении частиц. Оно может состоять из электромагнитного излучения, а также из элементарных частиц вещества и антивещества. Сам факт превращения кинетической энергии сталкивающихся частиц в элементарные частицы вещества и антивещества является одним из наиболее удивительных явлений в природе. Крупнейшая установка в России по регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), образованных потоками вторичных частиц от космических лучей, расположена в деревне Октемцы в шестидесяти километров южнее г. Якутска. Установка ШАЛ, площадью почти 24 км², способна регистрировать все виды заряженных частиц ливня, включая и мюоны [1, 2]. На установке наблюдались события, когда из кинетической энергии одной частицы космических лучей рождались миллиарды новых частиц и античастиц [3]. Аналогичные процессы могут происходить и при взаимодействии космических лучей высоких энергий с веществом космических аппаратов (КА).

Воздействие ядерно-активных частиц высоких энергий галактических космических лучей (ГКЛ) на электронные системы КА «Метеор-М», может привести к полному отказу работы этих систем.

Существующая радиационная защита КА «Метеор-М» №1 уменьшает эту вероятность этого события, но не исключает его полностью.

Частицы ГКЛ высоких энергий в околоземном пространстве

Показатель интегрального спектра γ для протонов галактических космических лучей (ГКЛ) в различных диапазонах энергий частиц имеет значения [4]:

$$\begin{aligned}\gamma &= 1,7 \text{ при } 10 \text{ ГэВ} < E < 10^6 \text{ ГэВ}; \\ \gamma &= 2,0 \text{ при } 10^6 \text{ ГэВ} < E < 10^{13} \text{ ГэВ}; \\ \gamma &= 1,31 \text{ при } E > 10^{13} \text{ ГэВ}.\end{aligned}$$

Ожидаемые интегральные потоки различных типов частиц ГКЛ в околоземном космическом пространстве в диапазоне энергий от 10 млрд. эВ до 10¹⁵ эВ [4 – 6] аппроксимируем простыми функциями. В полярных областях магнитосферы, где можно не учитывать влияние магнитного поля на частиц ГКЛ с энергией более 10 ГэВ, зависимость интенсивности интегральных потоков этих частиц от энергии (в ГэВ/нуклон) в первом приближении представим в виде:

$$\begin{aligned}F(>E) &= 3,60 \cdot 10^{+07} E^{-1,7}, \text{ протоны}/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 1,80 \cdot 10^{+04} E^{-1,7}, \text{ антипротоны}/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 2,60 \cdot 10^{+06} E^{-1,7}, \text{ (ядра гелия)}/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 3,10 \cdot 10^{+05} E^{-1,7}, \text{ (ядра } Z \geq 3)/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 2,60 \cdot 10^{+05} E^{-1,7}, \text{ (ядра } Z \geq 6)/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 6,84 \cdot 10^{+04} E^{-1,7}, \text{ (ядра } Z \geq 10)/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 1,44 \cdot 10^{+04} E^{-1,7}, \text{ (ядра } Z \geq 20)/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}); \\ F(>E) &= 0,36 \cdot 10^{+01} E^{-1,7}, \text{ (ядра } Z \geq 30)/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}).\end{aligned}$$

В этом описании интегральных потоков частиц ГКЛ не учитывается, что доля тяжелых ядер ($Z > 10$) с ростом энергии может быстро увеличиваться.

Вполне возможно, что при сверхвысоких энергиях ГКЛ в основном состоят из тяжелых ядер. В работе [7] показано, что вблизи нейтронной звезды протон не может быть ускорен до энергии более 10⁹ ГэВ, но такое ограничение на тяжелые ядра не распространяется. Если источниками частиц сверхвысоких энергий являются нейтронные звезды, то следуя логике работы [7], можно утверждать, что эти частицы представляют собой не протоны, а тяжелые ядра.

¹Релятивистские частицы – это частицы, кинетическая энергия которых превосходит их собственную энергию покоя (m_0c^2).

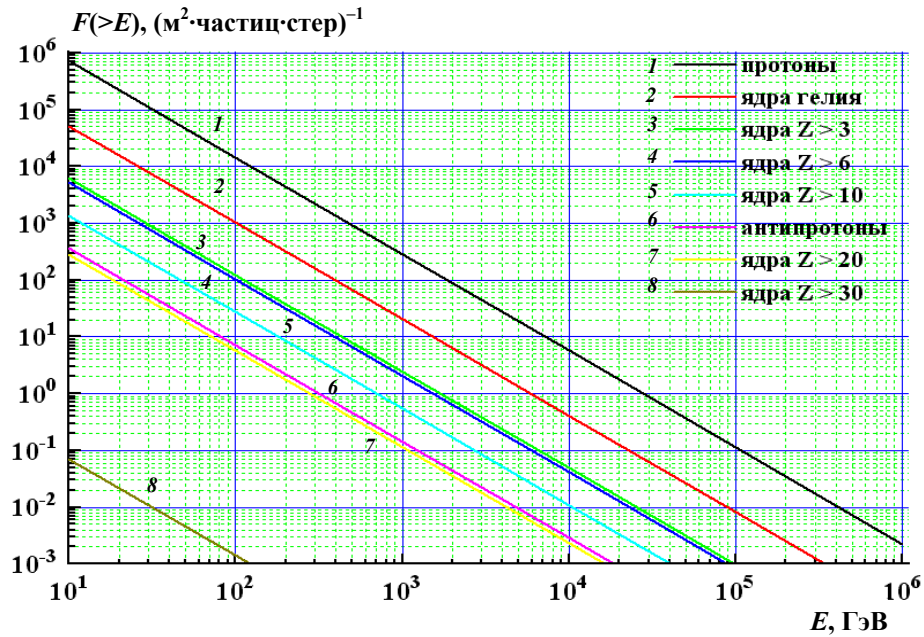


Рис. 1. Ожидаемые интегральные потоки частиц ядерной компоненты ГКЛ от 10 до 10⁶ ГэВ в околоземном космическом пространстве

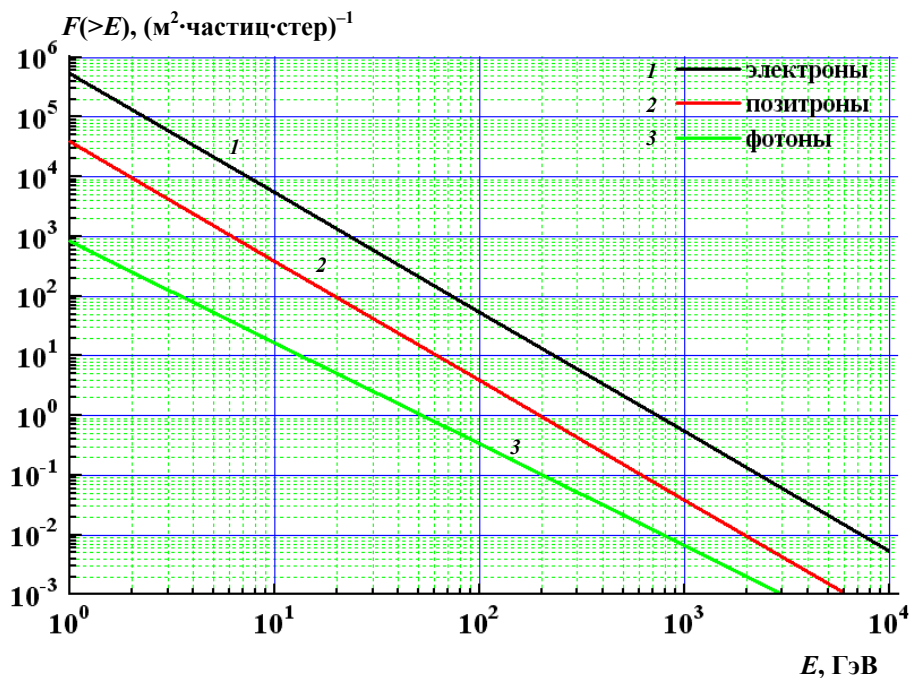


Рис. 2. Ожидаемые интегральные потоки частиц электронно-фотонной компоненты ГКЛ от 1 до 10⁴ ГэВ

Интегральные спектры электронов и позитронов ГКЛ можно представить в виде:

$$F(>E) = 5,40 \cdot 10^{+05} E^{-2,0} \text{ электроны}/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер});$$

$$F(>E) = 3,90 \cdot 10^{+04} E^{-2,0} \text{ позитроны}/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер}).$$

Поток фотонов с энергией больше заданной из центра Галактики:

$$F(>E) = 8,36 \cdot 10^{+02} E^{-1,7} \text{ фотоны}/(\text{м}^2 \cdot \text{частиц} \cdot \text{стер});$$

Спектр фотонов построен из предположения, что он образован распадом π^0 – мезонов рожденных при взаимодействии протонов ГКЛ с межзвездным веществом в центральных областях Галактики. Это предположение справедливо при

энергиях фотонов больше 0,3 ГэВ. В данных аналитических выражениях энергия для протонов, электронов, фотонов измеряется в единицах ГэВ, для ядер космических лучей – в единицах ГэВ на нуклон. Полученные таким образом функциональные зависимости интенсивности потока ядерной компоненты ГКЛ от энергии показано на рис. 1 и электронно-фотонной компоненты ГКЛ на рис. 2.

Потоки ГКЛ указанных энергий способны при наличии большой массы вещества КА порождать электронно-фотонные ливни и электронно-ядерные ливни аналогичные ШАЛ.

Электронно-фотонные ливни

Электронно-фотонные ливни представляют собой электромагнитный процесс. Электроны, проходя через вещество, теряют свою энергию, главным образом, вследствие неупругих столкновений и тормозного излучения. В результате неупругих столкновений электронов происходит ионизация, а в случае тормозного излучения – испускание фотонов.

Относительные потери энергии на ионизацию для частиц высоких энергий, в первом приближении, можно считать величиной обратно пропорциональной энергии частицы.

$$(dE_i / dx)/E \approx \text{const} / E, \text{ см}^2/\text{г}.$$

Относительные потери энергии на излучение, в первом приближении, можно считать величиной постоянной.

$$(dE_i / dx)/E \approx \text{const}, \text{ см}^2/\text{г}.$$

Независимо от первичной энергии, высокоэнергичные электроны (для которых ионизационные потери меньше потерь на излучение) теряют большую часть своей энергии уже при первых столкновениях.

Из этого следует, что пробег высокоэнергичных электронов не зависит от энергии. Напомним, что если энергия фотона много больше энергии покоя электрона, то пробег фотона в веществе тоже не зависит от энергии. Высокоэнергичный фотон, проходя через вещество в поле атомного ядра, «разваливается» на электрон и позитрон высоких энергий, т. е. происходит рождение пары новых частиц и на

это затрачивается вся энергия фотона. Электрон и позитрон высоких энергий, двигаясь через вещество, в поле атомного ядра, в результате тормозного излучения, генерируют новые фотоны высоких энергий, которые в дальнейшем также «разваливаются» на позитроны и электроны и т. д. При продолжении этого процесса первичная энергия распределяется по все большему числу вновь рожденных частиц.

Этот процесс образования лавины частиц заканчивается тогда, когда энергии вновь рожденных частиц будет не достаточно для генерации новых частиц. В конечном итоге все закончится потерей энергии на ионизацию. Такое представление правильно только приближенно. На самом деле, при очень высоких энергиях фотон может «развалиться» на частицу и античастицу любой природы и не обязательно в поле ядра атома, но и при столкновении с другим фотоном или каким-либо электроном.

Энергия, при которой потери на излучение равны потерям на ионизацию, называется критической энергией. Только частицы с энергией больше критической могут участвовать в генерации ливня. Путь, который проходит частица в веществе, имея критическую энергию, называется радиационной единицей длины.

Для электронов в алюминии радиационная единица и критическая энергия равны соответственно [8]:

$$t_r \approx 22,7 \text{ г}/\text{см}^2; \quad \xi \approx 37,2 \text{ МэВ}.$$

Схема формирования электронно-фотонного

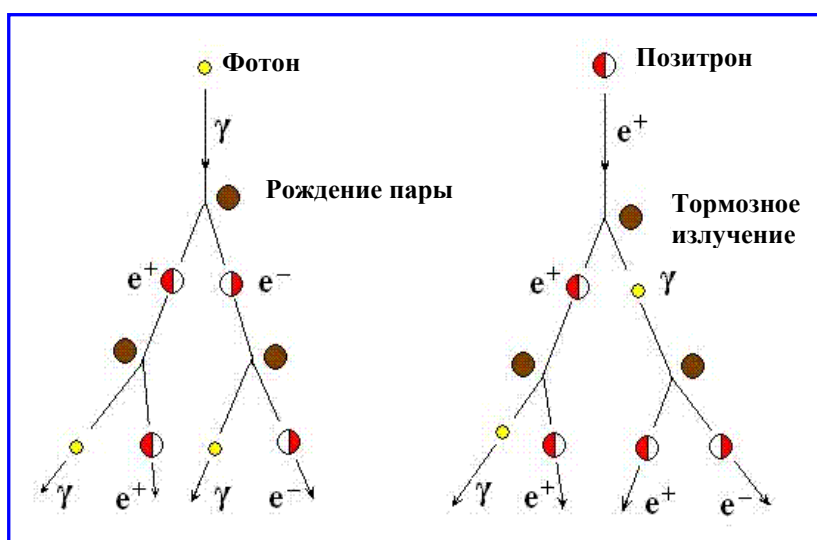


Рис. 3. Схема формирования электронно-фотонного ливня

ливня от фотона и позитрона высоких энергий падающих на слой вещества показана на рис. 3.

Полное число частиц в максимуме электронно-фотонного ливня при начальной энергии частицы E_0 [8]

$$N \approx [0,3(E_0 / \xi)] / (\ln(E_0 / \xi))^{0,5}.$$

Положение максимума электронно-фотонного ливня располагается на глубине вещества

$$x \approx t_r \ln(E_0 / \xi).$$

Процесс генерации ливня статистический, а это значит, что существуют средние характеристики ливня и некоторая дисперсия. Считается, что в среднем ливень зарождается на глубине одной радиационной единицы, в нашем случае на глубине 22,7 г/см² алюминия, но это не значит, что ливень не может начать формироваться на глубине 1 г/см² или 2 г/см².

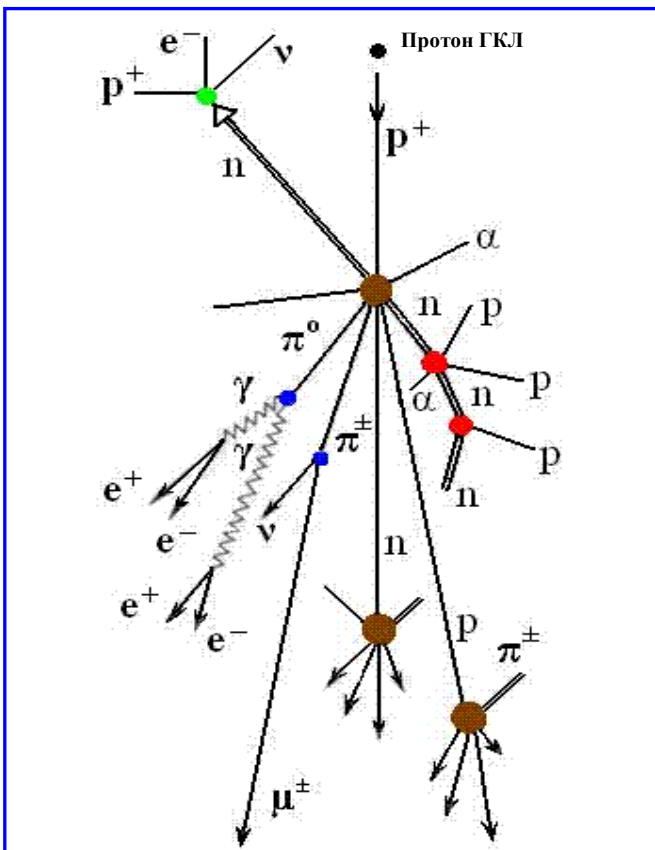


Рис. 4. Схема формирования электронно-ядерного ливня

Электронно-ядерные ливни

Электронно-ядерные ливни (рис. 4) представляют собой ядерный процесс, который порождает электромагнитный процесс как побочный продукт. Любая частица (фотон, электрон, протон, атомное ядро) космических лучей высоких энергий, попадая в ядро атома вещества КА, может вызвать электронно-ядерный ливень.

Электронно-ядерные ливни частиц оказывают разрушительное воздействие на ядра атомов вещества космических аппаратов. На микрофотографиях ядерное взаимодействие выглядит как взрыв ядра атома [6].

У высокоэнергичного протона (нуклона) длина волны много меньше размеров ядра атомов кремния и алюминия. Двигаясь внутри ядра, протон может несколько раз «столкнуться» с частицами ядра, тем самым «нагреть» его до высокой «температуры». В процессе этих столкновений рождается лавина ядерно-активных частиц и античастиц, среди которых есть и π^0 -мезоны. Ядерно-активные частицы – это частицы, участвующие в сильных взаимодействиях.

Частицы π^0 -мезоны в основном распадаются на два фотона, которые дают начало электронно-фотонным ливням. Образованные при ядерных взаимодействиях высокоэнергичные ядерно-активные частицы, взаимодействуя с ядрами атомов вещества, порождают новые лавины высокоэнергичных частиц и новые электронно-фотонные ливни. «Нагретые» вдоль ствола ливня ядра атомов вещества «охлаждаются» за счет «испарения» из них части наиболее энергичных нуклонов, это один из процессов, который приводит к изменению химического состава вещества вдоль ствола ливня. Другой процесс – ядро атома от «удара» быстрой частицы буквально «взрывается», его осколки разлетаются в пространстве и атом вещества перестает существовать.

Сечение ядерного взаимодействия можно упрощенно представить в виде:

$$\sigma \approx \pi(r_n + r_a - \Delta r)^2,$$

где r_n и r_a – радиус первичной частицы и радиус ядра атома вещества соответственно, а Δr – поправочный коэффициент, учитывающий неэффективность скользящих столкновений. Следовательно, чем больше радиус первичной частицы, тем меньше пробег частицы до ядерного взаимодействия. Средняя длина пробега протона до ядерного взаимодействия в кремнии составляет величину около 60 г/см², но для ядер ГКЛ с зарядом $Z > 16$ длина

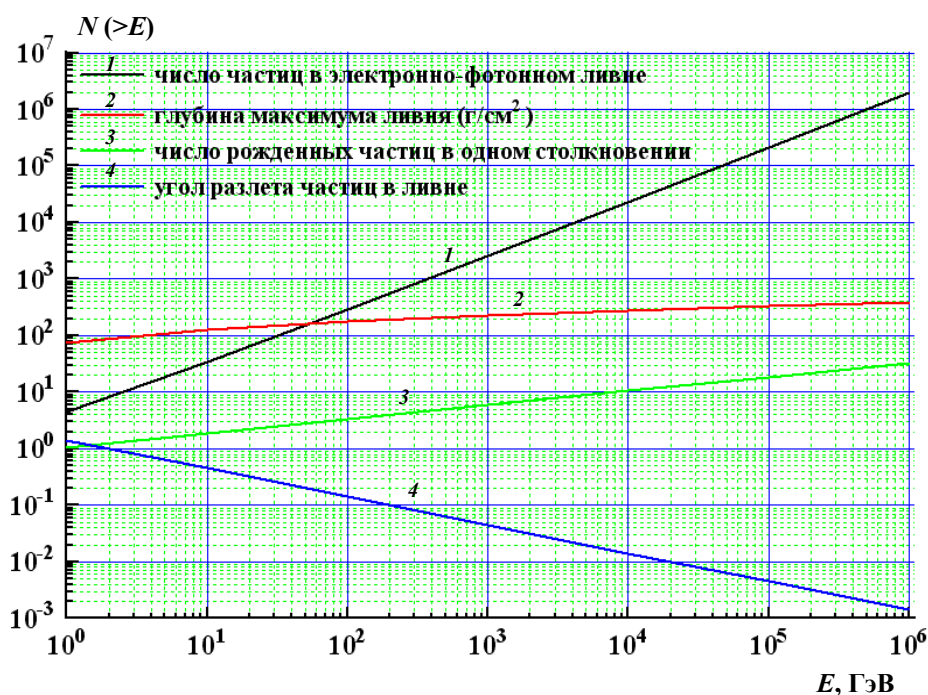


Рис. 5. Зависимость от энергии первичной частицы

свободного пробега составляет величину уже менее 20 г/см^2 . Несмотря на большое среднее значение пробега ядерно-активной частицы, в отдельных случаях, ядерный каскад может возникнуть и на гораздо меньших глубинах, например на 2 г/см^2 .

Среднее число частиц, рожденное при одном ядерном взаимодействии [6]:

$$N \approx 1,2(E / m_0 c^2)^{0,25},$$

где E – энергия налетающего нуклона в системе координат КА и m_0 – масса нуклона. Угол разлета наиболее энергичных частиц ядерного каскада (рис. 5) в системе координат КА:

$$\varphi \approx (2m_0 c^2 / E)^{0,5}.$$

При энергии первичной частицы более 10^6 ГэВ в одном ядерном взаимодействии могут рождаться более 30 частиц. Угол разлета основной массы этих высокоэнергичных частиц будет составлять менее $0,0015 \text{ рад}$. Фактически образуется струя высокоэнергичных ядерно-активных частиц, способная модифицировать химический состав и структуру вещества.

Выводы

При прохождении высокоэнергичных частиц ГКЛ через вещество космического аппарата формируются электронно-фотонные и электронно-ядерные ливни высокоэнергичных частиц. Электронно-фотонные ливни от первичной частицы с энергией более 10^6 ГэВ состоят из более миллиона частиц. Электронно-ядерные ливни начинаются с «ядерного взрыва» внутри атома. Причиной такого взрыва является «столкновение» с ядром атома вещества высокоэнергичной частицы космических лучей. Электронно-ядерные ливни представляют собой разрушительный процесс, способный изменить химический состав и структуру вещества электронных систем КА.

При энергии первичной частицы более 10^6 ГэВ ливни представляют собой релятивистские струи с высокой плотностью ядерно-активных частиц. Такие струи могут оказаться наиболее опасными для электронных систем КА.

Есть основания для предположения, что сечения ядерных взаимодействий для частиц космических лучей сверхвысоких энергий с веществом космических аппаратов может оказаться большим, чем принято считать в настоящее время. Это основание базируется на косвенных данных о том, что только тяжелые ядра могут ускоряться до сверхвысоких энергий вблизи релятивистских объектов, таких как нейтронные звезды. Если области вблизи ней-

тронных звезд являются источниками частиц сверхвысоких энергий, то этими частицами могут быть только тяжелые ядра. Другая точка зрения, например, утверждение о внегалактическом происхождении частиц сверхвысоких энергий космических лучей сталкивается с проблемой их взаимодействия с фотонами реликтового излучения.

Литература

1. Детектор мюонов Якутской установки ШАЛ / И.П. Безродных, А.В. Глушков, Л.И. Каганов [и др.] // Вопросы прикладной физики. – Якутск, 1974. – С. 184 – 188.
2. Расчеты эффективности детектора ионизационного излучения ШАЛ и параметров установки для регистрации мюонов малых энергий в составе ШАЛ / С.Н. Вер-

- нов, И.П. Безродных, А.В. Глушков [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1974. – Т. 38. – № 5. – С. 1070 – 1075.
3. Ефимов Н.Н. Широкие атмосферные ливни от космических лучей с энергией $10^{17} - 10^{20}$ эВ : дис. ... д-р физ.-мат. наук; рукопись / Н.Н. Ефимов. – М.: НИИЯФ МГУ, 1985. – 210 с.
4. В.С. Березинский. Астрофизика космических лучей / Березинский В.С. [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 527 с.
5. Мурзин В.С. Введение в физику космических лучей / В.С. Мурзин. – М.: Атомиздат, 1979. – 303 с.
6. Добротин Н.А. Космические лучи / Н.А. Добротин. – М.: Техничко-теоретическая литература, 1954. – 320 с.
7. Безродных И.П. Оценка верхней границы энергии частиц, ускоренных вблизи вращающейся нейтронной звезды / И.П. Безродных // Высокоэнергичные частицы в космосе. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 67 – 69.
8. Беленький С.З. Лавинные процессы в космических лучах / С.З. Беленький. – М.: Гостехиздат, 1948. – 243 с.

Поступила в редакцию 16.11.2009

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, т. 366-38-38, 8(916)963-15-33.
Владимир Тимофеевич Семенов, начальник лаборатории, т. 366-38-38.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.