

УДК 537.591

А. Д. Филоненко

Східноукраїнський національний університет, Луганськ

Определение энергии и направления прихода космической частицы с помощью лунного орбитального модуля

Надійшла до редакції 13.02.01

Знайдено практичний розв'язок задачі про напрямок осі каскадної зливи за допомогою двох навколосіятельських модулів і системи трьох взаємно перпендикулярних диполів, встановлених на кожному з них. Цей розв'язок доповнює раніше опубліковані результати дослідження можливості визначення енергії електромагнітного каскаду за радіочастотним компонентом випромінювання δ -електронів зливи. Отримані результати можуть відкрити нові можливості для дослідження космічних променів з енергією понад 10^{21} еВ.

Известно, что успехи физики космических лучей очень высокой энергии ($W_0 > 10^{19}$ эВ) связаны в основном с развитием традиционных методов детектирования. Однако верхняя энергетическая граница этих установок, по-видимому, не поднимется в ближайшем будущем выше 10^{20} — 10^{21} эВ. Например, гигантский детектор известного проекта «Пьер Оже» будет иметь суммарную рабочую площадь обоих полушарий 6000 км^2 . Это соответствует частоте событий 60 частиц в год для диапазона энергий $W_0 > 10^{20}$ эВ. Имеющиеся на сегодня данные о потоке космических лучей для таких энергий свидетельствуют о незначительном изменении показателя энергетического спектра. С учетом этого факта частота событий для частиц с энергией $W_0 > 10^{21}$ эВ составит для этой установки всего около одной частицы за год. Для получения надежной информации о космических лучах эту величину следует поднять хотя бы на один порядок. Сохранение прежней частоты регистрации (60 событий в год) для частиц с энергией $W_0 > 10^{21}$ эВ потребует увеличения площади детектора почти на два порядка. Эти данные свидетельствуют о том, что детектор, основанный на традиционных принципах с площадью около 10^6 км^2 , в настоящее время построить практически невозможно.

Однако, по нашему мнению, уже сейчас имеется другая возможность увеличить площадь детектора до 10^7 км^2 . Имеется в виду метод радиодетектирования. Характеристики поля излучения, вызванного δ -электронами каскадного ливня в газообразной или конденсированной среде, могут вполне обеспечить его реализацию [1, 2, 4]. Особенно перспективной представляется такая возможность для радиоастрономического метода [7, 8], а также для детектирования частиц высокой энергии с лунной орбиты [3, 6].

В методе радиодетектирования имеется одно существенное обстоятельство. Ни в одной из опубликованных работ по этому направлению вплоть до настоящего момента не было ни единой попытки указать на возможность определения направления прихода космической частицы с помощью антенн радиодетектора. В нашей работе показано, что такая возможность есть. Она особенно легко реализуема, если каскадный ливень распространяется в конденсированной непроводящей электрический ток среде. В этом случае можно не только определить направление прихода частицы, но и с достаточной для практических целей точностью найти ее энергию. Доказательство этих фактов, вместе с ранее опубликованными результатами исследования ме-

ханизма радиоэмиссии δ -электронов каскадного ливня в области длин волн $\lambda > L$ (где L — продольный размер ливня), ставит на принципиально новую основу метод радиодетектирования космических лучей сверхвысокой энергии ($W_0 > 10^{21}$ эВ).

Определение направления оси каскадного ливня осуществляется с помощью трех взаимно перпендикулярных вибраторов. Известно, что пространственная диаграмма излучения изолированного вибратора длиной $2a$ определяется выражением

$$F(\alpha) = \frac{\cos(ma\cos\alpha) - \cos ma}{(1 - \cos ma)\sin\alpha}, \quad (1)$$

где $m = 2\pi/\lambda$, α — угол между осью диполя и направлением наблюдения \mathbf{n} [5]. Обычно в качестве простых антенн (и как элементы более сложных) используются полуволновые вибраторы. Однако в реальной конструкции детектора на орбите искусственного спутника Луны [3, 6] применение полуволнового вибратора ($a = \lambda/4$) длиной около $2a = 5m$ ($\nu = 30$ МГц) может вызвать определенные технические трудности. В таких случаях используют укороченные вибраторы, в цепь которых включают последовательно индуктивности для сохранения резонансной частоты. Легко убедиться, что выражение (1) с достаточной точностью можно заменить простейшей функцией $F_1(\alpha) = \sin\alpha$. Например, при укорочении полуволнового вибратора в два раза ($a = \lambda/8$) отличие между этими диаграммами не превышает 2 %. Поэтому будем использовать далее нормированную функцию $F_1(\alpha) = \sin\alpha$ в качестве пространственной диаграммы направленности приемной антенны детектора. Как будет видно далее, это требование не является принципиальным. Кроме этого, согласно [1, 2, 4] будем учитывать, что пространственная диаграмма излучения ливня в диапазоне длин волн $\lambda > L$ приблизительно выражается также с помощью функции $F_1(\alpha)$, т. е. напряженность поля излучения в произвольной точке равна $E = E_0 \sin\alpha$, где α — угол между направлением излучения \mathbf{n} и осью каскада. Кроме этого известно, что вектор напряженности \mathbf{E} лежит в плоскости, составленной осью ливня (или диполя) и направлением наблюдения. В дальней зоне вектор \mathbf{E} всегда перпендикулярен к \mathbf{n} .

Для определения направления оси каскадного ливня, а следовательно и направления прибытия космической частицы, на орбите Луны должны находиться два модуля, каждый из которых должен иметь три одинаковых взаимно перпендикулярных вибратора, усилители сигналов и измерители амплитуды э.д.с., наводимых в каждой антенне, а также комплекс приборов для определения положе-

ние модуля относительно системы координат, связанной с Луной. Модули должны находиться на расстоянии прямой видимости, и для уменьшения ошибки измерений быть не слишком близко один от другого. Например, если радиус орбиты модуля порядка $2R_m$, то расстояние между модулями может составлять $(0.5 \div 1)R_m$.

Каскадный ливень в грунте Луны, вызванный прохождением заряженной частицы сверхвысокой энергии, наведет э.д.с. u_{1x} , u_{1y} , u_{1z} и u_{2x} , u_{2y} , u_{2z} на клеммах соответствующих антенн первого и второго модулей. Очевидно (см. [5]), она может быть выражена через величину напряженности поля E и направляющие косинусы углов φ , ξ , η . Это дает систему из восьми уравнений для определения направляющих косинусов векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 в системе координат каждого из модулей:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= \frac{lE_1}{R_1} \sin\alpha_1 \cos\varphi_1, \\ u_{1y} &= \frac{lE_1}{R_1} \sin\alpha_1 \cos\xi_1, \\ u_{1z} &= \frac{lE_1}{R_1} \sin\alpha_1 \cos\eta_1 \end{aligned} \quad (2)$$

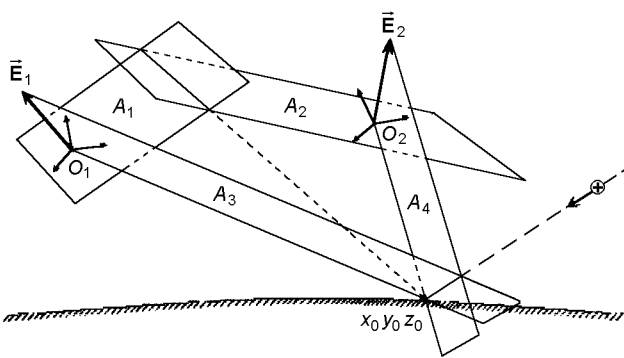
$$\cos^2\varphi_i + \cos^2\xi_i + \cos^2\eta_i = 1, \quad i = 1, 2,$$

где l — эффективная длина антенны, i — номер модуля, R_i — расстояние от модуля с номером i до ливня, α_i — угол между направлением оси ливня и вектором \mathbf{R}_i .

Рассмотрим прямую, определяемую пересечением плоскостей A_1 и A_2 , проведенных через начало координат каждого модуля. Направляющим вектором для каждой плоскости выберем соответственно \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , составляющие которых пропорциональны э.д.с., наводимой в соответствующих антеннах:

$$\begin{aligned} u_{1x}x' + u_{1y}y' + u_{1z}z' &= 0, \\ u_{2x}x'' + u_{2y}y'' + u_{2z}z'' &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Если источник поместить в произвольной точке прямой (3) то направление излучения \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 на каждый из модулей будет перпендикулярно к \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 соответственно для произвольно выбранных углов α . Другими словами, каскадный ливень (как точка) для данного набора величин u_{1x} , u_{1y} , u_{1z} и u_{2x} , u_{2y} , u_{2z} может находиться только на прямой (3). Известно, что каскадный ливень будет всегда находиться на поверхности Луны. Поэтому пересечение (3) со сферой $x^2 + y^2 + z^2 = R_m^2$, где R_m — радиус



Определение положения оси каскадного ливня

Луны, однозначно определяет его координаты x_0 , y_0 , z_0 (см. рисунок).

Согласно сказанному выше, ось ливня должна лежать одновременно в плоскости векторов \mathbf{R}_1 , \mathbf{E}_1 и \mathbf{R}_2 , \mathbf{E}_2 . Чтобы найти ее направление, необходимо провести две плоскости; плоскость A_3 через начало координат $O_1(x_1, y_1, z_1)$ первого модуля, точку x_0 , y_0 , z_0 и направление \mathbf{E}_1 и плоскость A_4 через начало координат $O_2(x_2, y_2, z_2)$ второго модуля, точку x_0 , y_0 , z_0 и направление \mathbf{E}_2 :

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ E_{1x} & E_{1y} & E_{1z} \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{vmatrix} x - x_2 & y - y_2 & z - z_2 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ E_{2x} & E_{2y} & E_{2z} \end{vmatrix} = 0.$$

Прямая (4), определяемая пересечением этих плоскостей, и есть направление оси каскадного ливня.

Такая методика расчета направления движения космической частицы позволяет найти количество N_0 электронов в максимуме каскадного ливня (а следовательно, и его энергию). Согласно [1, 2, 4] амплитуда напряженности поля радиоимпульса равна $E = BN_0 \sin \alpha / R$, где величина B известна и зависит только от физических констант. Поэтому определение направляющих косинусов из (3), а также отношения $\sin \alpha / R$ согласно описываемой здесь методике однозначно решает вопрос о количестве N_0 электронов в ливне и о энергии W_0

космической частицы. К схеме определения направления движения космической частицы нужно добавить следующее. Уравнения (2) для $i = 1, 2$ определяют координаты E'_{ix} , E'_{iy} и E'_{iz} вектора \mathbf{E}_i в системе первого ($i = 1$) или второго ($i = 2$) модулей. Для решения уравнений (3), (4) необходимо выразить проекции E'_{ix} , E'_{iy} и E'_{iz} через соответствующие проекции E_{ix} , E_{iy} и E_{iz} этих векторов в системе координат, связанной с Луной. Это можно сделать с помощью матрицы преобразований векторов при повороте декартовой системы координат. Ее компоненты в любой момент могут быть получены системой определения ориентации модулей, и эта операция давно решена технически.

1. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Радиоизлучение в диапазоне средних и низких частот, вызванное широким атмосферным ливнем // Письма в ЖТФ.—1994.—20, № 12.—С. 57—61.
2. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Когерентное низкочастотное излучение, вызванное δ -электронами широких атмосферных ливней // Укр. физ. журн.—1996.—41, № 7-8.—С. 696—699.
3. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей сверхвысоких энергий с помощью искусственного спутника Луны // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 4.—С. 87—92.
4. Голубничий П. И., Филоненко А. Д., Яковлев В. И. Низкочастотное радиоизлучение ШАЛ и возможность его использования в методе радиодетектирования // Изв. РАН. Сер. физ.—1994.—58, № 12.—С. 115—118.
5. Пистолькорс А. А. Антенны. — М.: Связьиздат, 1947.—479 с.
6. Филоненко А. Д. Перспективы детектирования космических лучей сверхвысоких энергий // Письма в ЖТФ.—1997.—23, № 10.—С. 57—62.
7. Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей с первоначальной энергией 10^{22} — 10^{23} эВ с помощью радиотелескопа // Изв. РАН. Сер. физ.—1997.—61, № 3.—С. 543—546.
8. Филоненко А. Д. Регистрация космических лучей очень высокой энергии декаметровым радиотелескопом УТР-2 // Письма в ЖТФ.—1999.—70, № 10.—С. 639—641.

DEFINING ENERGY AND DIRECTION OF ARRIVAL OF COSMIC PARTICLE WITH THE HELP OF THE MOON'S SATELLITE

A. D. Filonenko

A practical solution of the problem of direction of the axis of a cascade shower within the Moon's soil with a help of two lunar satellites, each having a crossed antenna, has been found. This solution is a development of already published results of research into possibility of defining energy of electromagnetic shower by radio-frequency emission of δ -electrons of the shower.