

УДК537.591

Детектирование космических лучей супервысоких энергий с помощью искусственного спутника Луны

П. И. Голубничий, А. Д. Филоненко

Східноукраїнський державний університет

Надійшла до редакції 14.04.99

Узагальнено літературні дані про радіодетектування космічних променів високих енергій. Коротко проаналізовані основні досягнення за 1965—1985 рр. Наводяться фізичні основи механізму радіоемісії, викликані рухом δ -електронів електрон-фотонної лавини. Показано, що найуспішніша реалізація радіодетектора може бути здійснена за межами навколоземного простору, зокрема на штучному супутнику Місяця. В цьому випадку виявляються доступними для досліджень космічні частинки з енергіями, що на кілька порядків перевищують теперішню межу.

ВВЕДЕНИЕ

Около 90 лет назад впервые обнаружены космические потоки элементарных заряженных частиц. Наука о космических лучах стала за это время одной из главных составляющих астрофизики высоких энергий, объектами исследования которой являются сверхновые звезды, радиогалактики, квазары, пульсары, сверхмассивные черные дыры и пр. Особое место в этой науке отводится космическим лучам с очень высокой энергией ($W_0 > 10^{20}$ эВ). Сейчас практически никто не сомневается в том, что их источники находятся за пределами Галактики. Частицы с такой колоссальной энергией приносят к нам информацию из чрезвычайно отдаленных (более 10^8 световых лет) областей Вселенной, поскольку их траектория почти не отклоняется от прямолинейной в галактических и межгалактических магнитных полях [5].

За все время зарегистрировано более десятка таких событий. Распределение потока J частиц от энергии W_0 представляется степенной зависимостью $J(W_0) = AW_0^{-\gamma}$. Для диапазона энергий 10^{16} —

10^{19} эВ показатель энергетического спектра $\gamma \approx 3$. Коэффициент пропорциональности таков, что на 1 км^2 за столетие попадает только одна частица с энергией $E > 10^{20}$ эВ. Поэтому современные детекторы космических лучей имеют рабочие площади порядка нескольких десятков квадратных километров [14].

При традиционном методе детектирования на такой огромной площади устанавливаются десятки тысяч сцинтилляционных счетчиков, данные от которых поступают на ЭВМ для расчета энергии, наклона траектории и других характеристик космической частицы. Такие установки требуют постоянной профилактики, многочисленного персонала для ее обслуживания, и стоимость их весьма значительна.

Однако, несмотря на это, готовятся проекты детекторов на 1000 км^2 (Россия) и даже на 5000 км^2 (США), энергетический «потолок» которых лежит в диапазоне энергий 10^{20} — 10^{21} эВ [20, 23]. Является ли эта граница пределом наших возможностей? С технической точки зрения это будет весьма грандиозное сооружение, поскольку увеличение

энергетической границы на порядок требует применения детектора с площадью около миллиона квадратных километров. Стоимость его поднимется от 100 млн. долларов (проект США) до суммы на несколько порядков большей. По-видимому, рассчитывать на реализацию такого проекта даже в отдаленном будущем нельзя.

Есть и другие обстоятельства, вынуждающие осторожно подходить к таким грандиозным проектам. Согласно теоретическим расчетам энергетический спектр космических лучей должен резко обрываться при энергиях частиц выше 10^{19} эВ вследствие потерь на взаимодействие с микроволновым фоновым излучением. Этот эффект имеет пороговый характер ($\approx 10^{19}$ эВ) и связан с фоторождением электрон-позитронных пар и π -мезонов [12]. Плотность реликтовых фотонов во Вселенной приблизительно в 1000 раз больше, чем остальных частиц, и пробег протона между взаимодействиями с фотонами — около 10^7 световых лет. Это значит, что космические лучи (в основном протоны) с энергией более 10^{20} эВ проходят в целом путь, не превышающий 10^8 световых лет.

Эти факты порождают ряд задач, решить которые в настоящее время нельзя. Во-первых, нет объяснения самому факту существования частиц с такими энергиями. Во-вторых, до сих пор не обнаружено в направлении прихода ни одного источника космических лучей. И наконец, остаются неизвестными процессы, ускоряющие частицы до столь фантастических энергий.

Очевидно, что проблемы физики частиц высоких энергий не ограничиваются этими задачами, и решение практически каждой из них связано с необходимостью иметь рабочую площадь детектора 10^3 — 10^7 км².

В связи с этим возникает естественный вопрос — существуют ли другие, более удобные методы сбора информации с больших площадей.

В 1961—1966 гг. были обоснованы две идеи о возможности детектирования космических лучей посредством анализа когерентного радиоизлучения, сопровождающего широкий атмосферный ливень.

Согласно первой из них [1] причиной радиоэмиссии должен быть черенковский механизм излучения избыточными электронами ливня. Согласно второй [22] эмиссия является следствием взаимодействия заряженных частиц ливня с магнитным полем Земли.

В последующие 15—20 лет интенсивно исследовалась возможность практической реализации этих идей. Было обнаружено несколько важных факторов. Во-первых, амплитуда радиосигнала, вызванного этими механизмами излучения не настолько

велика, как ожидалось [2, 21]. Во-вторых, максимум спектральной плотности радиоэмиссии лежит в диапазоне метровых волн (~ 30 МГц). Наконец, пространственная диаграмма излучения довольно сложна, ее главный лепесток совпадает с направлением оси ливня. Это не позволяет эффективно использовать такое электромагнитное излучение ливня в целях детектирования космических лучей.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ МЕТОДА РАДИОДЕТЕКТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Попытки реализовать радиодетектор продолжают до настоящего времени. Более того, есть надежда на скорое практическое внедрение метода радиодетектирования. Однако точка зрения на физические принципы метода существенно изменилась. Еще в 1970-х гг. было обнаружено многократное превышение амплитуды радиоимпульса над теоретически предсказанным в диапазоне средних и длинных волн [19]. Теоретический анализ показал [10], что низкочастотная радиоэмиссия может быть результатом торможения δ -электронов ливня. Такой подход к этой проблеме оказался, с нашей точки зрения, весьма перспективным.

Ниже представлены основные результаты теоретических разработок метода, в основу которого положен принцип детектирования космических лучей по тормозному когерентному излучению δ -электронов электрон-фотонной лавины, сопровождающей прохождение частицы высокой энергии через вещество.

Известно, что космическая частица высокой энергии вызывает в веществе (например, в атмосфере) электрон-фотонную лавину с числом частиц, зависящим от ее энергии (например, $N_0 = 10^{10}$ для $W_0 = 10^{19}$ эВ). Каждый из этих электронов (или позитронов) с энергией порядка 10^8 эВ, проходя через вещество, выбивает из атомов так называемый δ -электрон. Процесс его ускоренно-замедленного движения сопровождается излучением электромагнитного импульса с частотным спектром $0 \leq \nu < \infty$. Время, в течение которого электрон-фотонная лавина активно взаимодействует с веществом окружающей среды определяется величиной $\tau = L/c$, где L — величина пройденного пути, а $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость распространения лавины.

Поэтому электромагнитные волны, излучаемые δ -электронами в диапазоне частот $0 < \nu < 1/\tau$, на входе радиоприемного устройства сложатся когерентно. Фактически это означает, что мощность излучения в этом диапазоне на много порядков

больше, чем в остальных участках спектра [9].

Важным свойством такой электромагнитной эмиссии является ее пространственная диаграмма излучения. Она описывается простой функцией и практически целиком совпадает с диаграммой направленности полуволнового диполя. В частности, если ось ливня вертикальна, то излучение в поперечной плоскости полностью изотропно. Этот факт имеет решающее значение для метода радиодетектирования, т. е. это значит, что для анализа характеристик космической частицы высокой энергии по характеру радиоэмиссии достаточно иметь несколько антенн вместо десятков тысяч сцинтилляционных счетчиков, используемых в современных детекторах.

Теоретический анализ показал также, что амплитуда радиосигнала пропорциональна энергии первоначальной частицы. Однако попытка использовать эмиссию δ -электронов для радиодетектирования широкого атмосферного ливня, по-видимому, будет затруднительна [7, 8], поскольку рабочий диапазон частот в этом случае лежит в области длинных волн ($1/\tau \approx 10^5$ Гц), а он, как известно, чрезвычайно насыщен атмосферными и промышленными помехами.

Обратимся к численным результатам теоретических оценок напряженности электромагнитного поля радиосигнала. Согласно оценкам [7, 8] для ливня с числом частиц $N_0 = 10^{11}$ (для первоначальной энергии $W_0 = 10^{20}$ эВ) напряженность электрического поля на расстоянии $R_0 = 10^4$ м от электрон-фотонной лавины в частотном диапазоне максимальной интенсивности радиоэмиссии (т. е. $\nu_m \sim 1/\tau$) составляет $E \approx 50$ мкВ/м·МГц. Для широкого атмосферного ливня максимум радиоэмиссии лежит в области частоты 10^5 Гц.

Согласно справочным данным уровень атмосферных помех зависит от времени года и времени суток. Например, для средней полосы европейской части бывшего СССР для частоты 10^5 Гц он лежит в пределах $10^2 < E_{\text{пом}} < 10^5$ мкВ/м·МГц [4], что намного превышает напряженность поля полезного сигнала.

По тем же данным для частот метрового диапазона (~ 30 МГц) уровень помех не превышает несколько микровольт на полосу в 1 МГц, т. е. значительно ниже полезного сигнала. Однако, чтобы реализовать случай $\nu_m \sim 1/\tau \approx 30$ МГц, путь лавины L должен быть таким, чтобы $L/c = \nu_m^{-1} = 0.5 \cdot 10^{-8}$ с, т. е. порядка 5—10 м. Если для атмосферы $L = (3—5) \cdot 10^3$ м, то $L = 5—10$ м будет соответствовать твердому или жидкому веществу, где концентрации атомов в тысячи раз больше [3].

О ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕТЕКТОРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СУПЕРВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ (10^{21} — 10^{23} ЭВ) С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЛУНЫ

Реализовать такие условия в поверхностном слое Земли из-за наличия атмосферы и высокой проводимости почвы невозможно. Расчеты показывают [16, 17], что для этого можно использовать поверхность Луны, площадь которой составляет приблизительно 10^7 км².

Электромагнитные волны метрового диапазона испытывают незначительную дифракцию на сферической поверхности Луны. Поэтому для регистрации сигнала вышедшего из любой точки одного полушария Луны, необходимо расположить приемное устройство на высоте не менее 2000 км. Это легко сделать с помощью искусственного спутника Луны с радиусом орбиты 3700 км ($R_{\text{л}} \approx 1700$ км). В этом случае рабочая площадь детектора близка к 10^7 км² (т. е. площади Луны) и позволяет фиксировать частицы с энергией $W_0 = 10^{23}$ эВ. Учитывая, что $E \sim R_0^{-1}$ и $E \sim W_0 \sim N_0$, нетрудно убедиться на основании предыдущих оценок, что напряженность поля, вызванного электрон-фотонной лавиной в поверхностном слое Луны, составляет $E \approx 250$ мкВ/м·МГц на расстоянии от нее $R_0 = 2000$ км.

Поскольку единственным видом радиопомех являются галактические радиощумы, определяемые температурой неба ($T_a \sim 2 \cdot 10^4$ К), то нетрудно убедиться с помощью формулы Найквиста, что средняя квадратичная амплитуда шумов равна $U = \sqrt{kT_a R_a \Delta\nu} \approx 7$ мкВ, где $R_a = 75$ Ом — входное сопротивление полуволнового вибратора, $\Delta\nu$ — рабочая полоса частот. ЭДС, наводимая в антенне сигналом, равна $U = Eh = 7.5 \cdot 10^{-4}$ В, где $h = \lambda/\pi = 3$ м — действующая высота полуволнового вибратора, $\lambda = 10$ м — длина волны, $k = 1.6 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана. Очевидно, что величина полезного сигнала превышает сигнал помехи более чем на два порядка. Такая антенна уверенно регистрирует сигнал и от частицы с $W_0 = 10^{22}$ эВ. Амплитуда его в этом случае будет $U = 7.5 \cdot 10^{-5}$ В, что на порядок больше галактических радиощумов. Для энергий космической частицы $W_0 = 10^{21}$ эВ высоту спутника следует уменьшить на порядок (т. е. $R_0 = 100$ км), тогда сигнал увеличивается до прежней величины $U = 7.5 \cdot 10^{-5}$ В. Рабочая площадь детектора в этом случае снизится до 10^5 км², что соответствует частоте событий ~ 5000 год⁻¹.

Следует упомянуть также отсутствие атмосферных помех и влаги на Луне. Электромагнитные

волны практически не поглощаются при выходе на поверхность сухого грунта.

Даже в простейшем варианте одного спутника можно решить несколько неразрешимых на Земле задач. Например, установить величину показателя спектра γ , проверить гипотезу о реликтовом обрезании энергетического спектра, оценить величину анизотропии космических лучей при энергиях 10^{21} — 10^{23} эВ. Наличие двух или более спутников с несколькими антеннами даст возможность определить траекторию частицы и попытаться найти ее источник.

РЕГИСТРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ (10^{22} — 10^{23} эВ) С ПОМОЩЬЮ РАДИОТЕЛЕСКОПА

Очевидно, реализация проекта с искусственным спутником Луны потребует значительных материальных затрат. Поэтому такая идея нуждается в предварительной проверке. Например, в лабораторных условиях вызвать электрон-фотонную лавину частицей с энергией $\sim 10^{15}$ эВ. Однако пока таких ускорителей нет.

Предварительные опыты можно провести, не выходя в космическое пространство. Более того, есть возможность непосредственно убедиться в принципиальной возможности зафиксировать радиосигналы, вызванные прохождением космической частицы через поверхность Луны [16, 17]. Расстояние от Земли до Луны приблизительно в 400 раз больше, чем от спутника до Луны, и напряженность поля сигнала на Земле составит 1.2 мкВ/м.МГц, что недостаточно для регистрации обычными антеннами. Однако мощность, выделяемая в нагрузке согласованной антенны, пропорциональна ее эффективной площади A : $P = A|S|$, где S — вектор Умова—Пойтинга. Поэтому применением антенн с большей площадью можно добиться значительного превышения сигнала над радишумами. Например, антенна декаметрового радиотелескопа УТР-2 (г. Харьков) на частоте 30 МГц имеет эффективную площадь $A = 10^5$ м², что в 100 раз больше, чем для полуволнового диполя ($A = D_0\lambda^2/(4\pi) \approx 13$ м²). Сравним амплитуду сигнала на клеммах антенны с галактическими радишумами, которые для этого диапазона дают основной вклад в общий шум. Известно, что полная энергия ΔW , выделяемая в нагрузке антенны в частотном интервале $\Delta\omega$, равна $\Delta W = \epsilon_0 c E^2(\omega) A \Delta\omega / \pi$. Амплитуда сигнала на нагрузке R выражается как $U = \sqrt{\Delta W R / \tau}$, где $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ с — длительность импульса. Среднюю квадратичную амплитуду шумов определяем по

формуле Найквиста для согласованной нагрузки $U^2 = kT\Delta\nu R$, где $T = 2 \cdot 10^4$ К — шумовая температура антенны. Отсюда отношение сигнал-шум $U_s/U_n = [2\epsilon_0 c E^2(\omega) A / (kT\tau)]^{1/2} \approx 250$, где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $E(\omega) = 1.2 \cdot 10^{-12}$ В/МГц, $A = 10^5$ м², $k = 1.4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Очевидно, что результат более чем обнадеживающий.

Эти оценки показывают также, что можно наблюдать частицы даже с энергией 10^{22} эВ. В этом случае частота событий увеличивается в 50 раз. Абсолютное число событий в единицу времени можно указать только приблизительно, так как показатель энергетического спектра в области энергий 10^{22} — 10^{23} эВ пока неизвестен. Если принять значение $\gamma \approx 2.7$ [15], то число частиц N_1 с энергией 10^{23} эВ, пересекающих одно полушарие Луны, должно составлять $N_1 = 0.2 \cdot 10^4 (W_0)^{-1.7} S_M t_0 = 60$ год⁻¹ (здесь $S_M = 2 \cdot 10^{13}$ м² — площадь Луны, $t_0 = 3 \cdot 10^9$ с и $W_0 = 10^{14}$ ГэВ).

Кроме шумов космического происхождения, в радиочастотный канал детектора могут проникнуть импульсные индустриальные помехи, особенно через силовые цепи установки. Однако их устранение не является принципиальной проблемой, а представляет собой техническую задачу с известным решением. Более того, конструкция антенны позволяет использовать ее второй «луч», не направленный на Луну. Если эту часть антенны подключить к такому же приемнику, то можно воспользоваться схемой антисовпадений. Техногенный сигнал пройдет по обоим каналам одновременно, а космический — только из одного приемника.

РЕГИСТРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСРЕДСТВОМ НАБЛЮДЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО ОТ ИОНОСФЕРЫ СИГНАЛА

Существует еще одна возможность провести предварительные эксперименты, не отправляясь в космос [18]. Как известно, подавляющая часть ледового покрытия Антарктиды находится на высоте около 3.5 км на уровне моря, и путь, пройденный в атмосфере вертикальным ливнем с первоначальной энергией 10^{22} — 10^{23} эВ, составляет там всего 18 t -единиц (вся атмосфера до уровня моря 28 t -единиц). Максимум ливня с такой энергией должен находиться на глубине 35 t -единиц, т. е. приблизительно на 2 км ниже уровня моря. Другими словами, у поверхности льда даже наклонный ливень только начнет развиваться ($S \approx 0.7$), и число частиц на этой стадии на порядок меньше, чем в максимуме N_0 , а эффективная часть ливня (с точки зрения количества частиц в нем) будет полностью

проходить через лед. Эти оценки остаются справедливыми даже при угле наклона ливня 30° . Элементарные оценки показывают также, что длина пути ливня L , на которой число частиц его изменяется в несколько раз, составляет приблизительно 20 t -единиц или $L = 7.5$ м для льда. Если не учитывать близость поверхности льда к источнику ($h \sim \lambda$) излучения, то протяженность электромагнитного импульса L_1 , вышедшего в атмосферу (например, для вертикальной лавины), будет определяться зависимостью $L_1 = L(\sqrt{\varepsilon - \sin^2\alpha} + 1)$, где $\varepsilon \approx 3$ – диэлектрическая проницаемость льда, а α – угол между направлением выхода и вертикалью. Для среднего угла $\alpha = 45^\circ$ величина $L_1 \approx 20$ м. Это значит, что когерентный прием можно осуществлять на длинах волн $\lambda_{\min} > 2L > 40$ м.

Так как на частотах порядка нескольких мегагерц тангенс угла потерь для льда $tg\delta \approx 0.2$ [13], то показатель поглощения

$$\chi = \left[\frac{\varepsilon}{2} (1 + tg^2\delta - 1) \right]^{1/2}$$

равен приблизительно 0.18, и уменьшение амплитуды волны в e раз происходит на длине пути $l > c/\omega\chi = 25$ м. Это существенно больше, чем L , и следовательно, поглощением излучения во льду на этом пути можно пренебречь. Пространственная диаграмма этого излучения близка к диаграмме диполя Герца, и поэтому с достаточно высокой интенсивностью волны будут излучаться не только под низкими, но и под высокими углами к горизонту. Это обстоятельство создает благоприятные условия для регистрации отраженной от ионосферы волны почти без потерь практически на всем материке.

Если первоначальная частица имеет энергию 10^{23} эВ, то напряженность поля электромагнитного импульса, вызванного электрон-фотонной лавиной на расстоянии 1000 км, будет иметь значение около 10^3 мкВ/м.МГц. Это очень высокая напряженность, и для сравнения достаточно указать, что согласно данным нескольких исследовательских групп напряженность зарегистрированного электрического поля радиоимпульса, вызванного взаимодействием ШАЛ с магнитным полем Земли, составляла всего около 10 мкВ/м.МГц в области частот 30 МГц с максимальной интенсивностью излучения [2]. При регистрации отраженного от ионосферы радиосигнала нужно учитывать ее состояние в этом географическом районе и прогнозируемые значения максимально применяемых частот (МПЧ).

Напряженность поля радиосигнала от космиче-

ских частиц с энергиями более 10^{22} эВ в десять раз меньше при том же удалении от источника. Однако на этой площади полный поток таких частиц с такой энергией предположительно больше на полтора-два порядка, чем для диапазона энергий $W_0 \geq 10^{23}$ эВ. Это позволяет почти без изменения частоты событий (по отношению к $W_0 = 10^{23}$ эВ) уменьшить контролируемую площадь во столько же раз, что, в свою очередь, приведет к необходимости регистрировать радиоимпульсы, направление которых составит существенно больший угол с горизонтом. В этом случае МПЧ понизится. Однако даже в августе МПЧ на этих широтах составляет 3–4 МГц [11].

Для способа регистрации космических лучей сверхвысоких энергий посредством приема отраженного от ионосферы радиосигнала характерен такой же недостаток, как и для радиотелескопа: невозможно установить точное направление прихода космической частицы из-за неконтролируемого поворота плоскости поляризации радиоволны после ее взаимодействия с плазмой в магнитном поле Земли [6]. Этот недостаток связан с нестабильностью условий в верхних слоях атмосферы и, по-видимому, не может быть восполнен. Однако оба этих способа могут дать представление, например, об энергетическом спектре космических лучей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из двух представленных выше вариантов проверки метода радиодетектирования космических лучей высокой энергии, первый кажется наиболее предпочтительным. Для его реализации можно использовать уникальный радиотелескоп Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины (г. Харьков). Антенна радиотелескопа имеет широкий диапазон частот (15–32 МГц), и ее электрическая система управления позволяет ориентировать луч в пределах конуса с углом $\pm 70^\circ$ от вертикали. Диаграмма антенны содержит несколько лучей, что позволяет два из них использовать в системе антисовпадений. Ширина данного луча практически полностью покрывает Луну (0.5°). Телескоп достаточно удален от промышленных объектов. Можно надеяться, что удачное завершение этого эксперимента будет стимулировать реализацию метода радиодетектирования космических лучей с помощью космических аппаратов.

Представляет также интерес реализация при благоприятных обстоятельствах пробного эксперимента в Антарктиде.

1. Аскарьян Г. А. Когерентное радиоизлучение от космических ливней в воздухе и в плотных средах // ЖЭТФ.—1965.—48.—С. 988—990.
2. Атрашкевич В. Б., Веденеев О. В., Аллан Х. Р. и др. Напряженность электрического поля радиоизлучения ШАЛ // Ядерная физика.—1978.—28, № 3(9).—С. 712—716.
3. Беленький С. З. Лавинные процессы в космических лучах. — М.: ОГИЗ, 1948.—243 с.
4. Бобров Н. В., Максимов Г. В., Мичурин В. Н. и др. Радиоприемные устройства. — М.: Сов. радио, 1971.—495 с.
5. Гинзбург В. Л. Астрофизика космических лучей // Успехи физ. наук.—1966.—166, № 2.—С. 169—183.
6. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967.—683 с.
7. 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.
8. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Радиодетектирование атмосферных ливней сверхвысоких энергий // Письма в ЖТФ.—1994.—20, № 23.—С. 59—62.
9. 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.
10. 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.
11. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. — М.: Связь, 1972.—336 с.
12. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. О верхней границе спектра космических лучей // Письма в ЖЭТФ.—1966.—4.—С. 114—116.
13. Кэй Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. — М., 1962.—247 с.
14. Лонгейр М. Астрофизика высоких энергий. — М.: Мир, 1984.—396 с.
15. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. — М.: Изд-во МГУ, 1988.—319 с.
16. 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.
17. Филоненко А. Д. Перспективы детектирования космических лучей сверхвысоких энергий // Письма в ЖТФ.—1997.—23, № 10.—С. 57—62.
18. Филоненко А. Д. Регистрация космических лучей высокой энергии посредством наблюдения отраженного от ионосферы радиосигнала // Письма в ЖТФ.—1998.—24, № 24.—С. 65—68.
19. Филоненко А. Д. О вкладе переходного излучения в механизм радиоэмиссии широкого атмосферного ливня на низких частотах // Изв. РАН.—1999.—63, № 3.—С. 565—567.
20. Христиансен Г. Б., Вашкевич В. В., Веденеев О. В. и др. Установка ШАЛ-1000 // Изв. АН СССР. Сер. физ.—1989.—53, № 2.—С. 286—289.
21. Jelley J. V., Charman W. N., Fruin J. H. Radio pulses from extensive air showers // Nuovo Cimento.—1966.—46A, N 4.—P. 649—667.
22. Kahn F. D., Lerche I. Radiation from cosmic ray air showers // Proc. Phys. Soc., A.—1966.—289.—P. 206—213.
23. Scharzschild B. Auger project seek to study highest energy cosmic rays // Physics to day.—1997.—50, N 2.—P. 19—21.

DETECTION OF COSMIC RAYS OF SUPERHIGH ENERGIES WITH A MOON'S ARTIFICIAL SATELLITE

P. I. Golubnichii and A. D. Filonenko

Previously published results of the radio detection of cosmic rays are generalized. Fundamental achievement over the 1965—1985 period are analyzed. Physical radio emission mechanism due to the motion of δ -electrons in an extensive air shower are discussed. We conclude that a radio detector can be most successfully realized in the outer space, for example, on an artificial satellite of the Moon. In this case cosmic rays of superhigh energies (10^{21} — 10^{23} eV) can be investigate. Two projects of radio detectors of cosmic rays are discussed. The first one is associated with the decameter radiotelescope UTR-2, and the second one suggests the detection of signals reflected from the ionosphere. That signal is generated by the motion of a shower through the Antarctic ice.