

О возможности регистрации широких атмосферных ливней радиоастрономическим методом

А. Д. Филоненко

*Восточно-украинский национальный университет,
Украина, 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20-А
E-mail: uy5lo_mail@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 12 мая 2004 г.

Рассмотрена возможность регистрации радиосигналов от широких атмосферных ливней с помощью системы вибраторов, сфазированных определенным образом, в области частот 50 МГц. Найденные оценки спектрального потока энергии радиосигнала от космических частиц с энергиями $> 10^{15}$ эВ показывают, что для этого диапазона энергий амплитуда радиосигнала на нагрузке антенны намного превышает среднеквадратичную амплитуду космических радишумов для диапазона 48 ÷ 50 МГц. Обсуждаются возможности метода радиодетектирования широких атмосферных ливней.

Розглянуто можливість реєстрації радіосигналів від широких атмосферних злив за допомогою системи певним чином сфазованих вібраторів для частоти 50 МГц. Знайдені оцінки спектрального потоку енергії радіосигналу від космічних часток з енергіями $> 10^{15}$ еВ показують, що для цього діапазону енергій амплітуда радіосигналу на навантаженні антени набагато перевищує середньоквадратичну амплітуду космічних радішумів для діапазону 48 ÷ 50 МГц. Висловлюються можливості методу радіодетектування широких атмосферних злив.

Космические лучи, представляющие собой частицы сверхвысокой энергии (в основном протоны, в меньшем количестве – ядра легких или тяжелых элементов и γ -кванты), приходят к нам из ближних и дальних областей космического пространства, принося информацию о различных объектах Вселенной, а также о процессах, сопровождающих разные стадии их эволюции.

Как и электромагнитное излучение широкого диапазона длин волн, космические лучи являются объектом научных исследований многих лабораторий мира. За последние 50-70 лет в этом направлении сделан ряд фундаментальных открытий. При этом диапазон интересов здесь весьма широк. С одной стороны – это такие микрообъекты, как элементарные частицы (вспомним обнаружение позитрона в космических лучах), а с другой – объекты астрономичес-

кого масштаба. Например, сейчас считается весьма вероятным то [1], что квазары являются источниками частиц очень высокой энергии ($\sim 10^{19}$ эВ).

Инструментом исследования космических лучей служат детекторы, построенные на основе системы из сотен (и даже тысяч) сцинтилляционных или ионизационных счетчиков, расположенных на площади порядка нескольких десятков квадратных километров. Первоначальная космическая частица сверхвысокой энергии, проходя через слой атмосферы, вызывает т. н. широкий атмосферный ливень (ШАЛ). Это сгусток релятивистских элементарных частиц (в основном, электроны, позитроны и γ -кванты), имеющий форму диска толщиной 2 ÷ 3 м и диаметром около $d = 200$ м. Число частиц в таком диске достигает 10^{11} и более. Электрические импульсы, вызван-

ные прохождением быстрых электронов через счетчики, поступают на ЭВМ и подвергаются обработке. В результате регистрируется энергия первоначальной частицы, направление ее движения и некоторые параметры ШАЛ. Установка для регистрации ШАЛ – это сложное и дорогое сооружение, в мире их меньше десятка. Для примера следует указать, что в настоящее время в США завершается конструкция самой большой установки такого типа. Ее площадь составляет около 5000 км², а материальные расходы на строительство уже превышают сотни млн долларов. Энергетический потолок этой установки составит приблизительно 10²¹ эВ.

Следует добавить, что в некоторых экспериментальных установках для детектирования ШАЛ регистрируется оптическое черенковское излучение, вызванное прохождением ультрарелятивистских частиц ливня через атмосферу. Известно, кроме того, что прохождение частиц высокой энергии через атмосферу сопровождается ионизационным свечением возбужденных атомов азота. Это явление также положено в основу экспериментальных установок для регистрации ШАЛ. Ионизационное свечение имеет изотропное угловое распределение в отличие от направленного черенковского излучения. Это позволяет размещать детекторы фотонов на значительном удалении от оси ливня.

Приблизительно 40 лет назад было положено начало новому методу детектирования широких атмосферных ливней. Теоретические оценки показали [2, 3], что мощность черенковского когерентного радиоизлучения, вызванного избытком электронов в широком атмосферном ливне, вполне достаточна для его регистрации простыми антеннами. Несколько позже, в теоретической работе [4], было найдено, что движение заряженных частиц ливня в магнитном поле Земли сопровождается еще более мощным излучением, которое также с успехом может быть использовано для детектирования ШАЛ. Согласно этим работам эффективная часть спектра импульсного излучения находится в диапазоне 30 ÷ 60 МГц.

Однако перечисленные выше механизмы излучения ШАЛ могут быть дополнены, и в настоящее время обсуждаются такие, эффективная область спектра которых приходится на средние и длинные волны.

Первые результаты [5, 6] экспериментального исследования природы радиоизлучения ШАЛ показали преобладание излучения, вызванного геомагнитным механизмом. Почти одновременно с этим были опубликованы результаты исследований харьковской [7, 8] и московской [9, 10] групп, которые подтвердили результаты работ [5, 6] и обнаружили неизвестные ранее характеристики излучения. В частности, было найдено распределение потока излучения в зависимости от расстояния до оси ШАЛ, поляризация поля излучения, спектральные характеристики потока излучения и его абсолютные величины в зависимости от энергии первоначальной частицы. Была обнаружена высокая степень корреляции мюонной компоненты ливня с мощностью электромагнитного излучения и пр.

В конце 70-х годов сложилась единая точка зрения на природу высокочастотного излучения ШАЛ. Например, в работе [11], опубликованной тремя исследовательскими группами (Россия, Италия, Англия), на основании большой серии экспериментов было установлено следующее:

1) в диапазоне метровых волн доминирующим механизмом радиоизлучения ШАЛ является геомагнитный;

2) спектральная напряженность поля в этом диапазоне частот, вызванная частицей с энергией $W_0 = 10^{17}$ эВ на расстоянии 100 м от оси ливня, составляет в среднем $E_{0v} = 10^{-11}$ В/(м·Гц);

3) радиус “радиопятна” (т. е. поверхность земли, облучаемая источником) не превышает $R = 200$ м (см. [9]).

Приведенная в 2) характерная спектральная напряженность поля, а также данные работ [5, 6, 9, 10] показывают, что поток радиоизлучения ШАЛ ненамного превосходит поток космических радиосуммов для метрового диапазона длин волн. В этой связи возникает вопрос об увеличении от-

ношения сигнал/шум с помощью доступных в эксперименте средств. Фактически этот вопрос уже пытались решить в работах [5, 6] и [7, 8] путем усовершенствования антенных систем. В [5, 6] для этой цели использовалась система вибраторов с площадью 1800 м^2 для частоты 44 МГц и с шириной полосы пропускания приемника $\Delta\nu = 4 \text{ МГц}$, а в работе харьковской группы [7, 8] использовалась антенна с эффективной площадью 950 м^2 , состоящая из 24 диполей с резонансной частотой около 12.7 МГц . Эта частота лежит за пределом эффективной области спектра, однако в эксперименте был зарегистрирован ряд событий, отождествленных с радиоимпульсами ШАЛ.

Применение сложных антенных систем с целью регистрации радиоимпульсов ШАЛ кажется весьма привлекательным. Однако использование для этой цели радиоастрономических антенн с большой площадью не всегда дает желаемый результат. Причиной этого является конечная отдаленность источника излучения (ШАЛ) и конечность его размеров.

Как упоминалось выше, строительство детекторов ШАЛ связано с большими материальными затратами. Однако в ряде развитых в техническом отношении стран работы в этом направлении ведутся, поскольку знания фундаментального характера иным способом приобрести нельзя. С этой точки зрения можно обсудить возможность построения сложной антенны для регистрации радиоимпульсов ШАЛ, например, с целью регистрации очень слабых широких атмосферных ливней ($10^{14} + 10^{15} \text{ эВ}$), вызванных заряженными частицами или γ -лучами от источников галактического или внегалактического происхождения.

Фазировка элементов такой антенны должна учитывать конкретное расстояние до источника. Если бы источник (ШАЛ) был точечным, то принципиальные ограничения на площадь антенны практически отсутствовали бы. При известном расстоянии до источника всегда можно выбрать элементы задержки (фазировки) так, чтобы

на клеммах антенны сигналы от вибраторов сложились в одной фазе. Более того, такую антенну можно было бы сконструировать таким образом, чтобы фазировка изменялась в зависимости от расстояния до источника. Если для регистрации импульсов ШАЛ использовать параболическое или сферическое зеркало, то фазировка (при условии, что источник находится на оси зеркала) свелась бы к перемещению облучателя вдоль оси.

Реальный источник, как упоминалось выше, имеет диаметр $d \sim 200 \text{ м}$, и поэтому существует принципиальное ограничение на увеличение площади антенны. Чтобы учесть это, найдем разность хода между двумя диаметрально противоположными точками на поверхности источника. Будем для простоты расчетов рассматривать вертикальный ливень и антенную решетку на поверхности земли. Тогда расстояние z в плоскости земли от оси ливня до точки, в которой разность фаз от двух противоположных точек на источнике достигает $\lambda/2$, приблизительно равно $z = \lambda h/2d$, где h – расстояние до максимума ливня. Для ливня с энергией W глубина проникновения в атмосферу Земли определяется с помощью выражения [12, 13]:

$$t_{\max} = \ln \frac{W}{W_{\text{кр}}},$$

где $W_{\text{кр}}$ – критическая энергия, приблизительно равная для воздуха $0.8 \cdot 10^8 \text{ эВ}$, а t_{\max} – количество радиационных единиц длины $t_0 = 37 \text{ г/см}^2$, равных такой длине столба воздуха с площадью основания 1 см^2 , масса которого равна 37 г . Например, для частицы с энергией $10^{14} + 10^{15} \text{ эВ}$ величина t_{\max} приблизительно равна 14 единицам, т. е. $500 + 600 \text{ г}$. Такая глубина для вертикального ливня находится на высоте около 5 км . В этом случае находим, что $z = 75 \text{ м}$.

Легко определить, что максимально возможная площадь антенны, расположенной на поверхности земли под источником радиоизлучения, будет давать вклад в ампи-

литуду сигнала только с площади, не превышающей $S_A < 4z^2$. Например, выберем, согласно сказанному выше, длину волны $\lambda = 6$ м вблизи максимума частотного спектра сигнала. Тогда площадь антенны будет $S_A = 2.25 \cdot 10^4$ м².

Для оценки величины амплитуды сигнала или отношения сигнал/шум следует учесть, что поляризация поля излучения для геомагнитного механизма на всей площади "радиопятна" имеет одинаковое направление в отличие от черенковского механизма, при котором характерно радиальное направление поля, т. е. вектор напряженности \vec{E} черенковского излучения направлен вдоль прямой, соединяющей наблюдателя с осью ливня. Это принципиальный факт, поскольку он означает, что все элементы антенны дадут положительный вклад в радиосигнал, если вибраторы имеют одинаковую поляризацию. Учтем, кроме этого, что спектральная напряженность, создаваемая радиоимпульсом ШАЛ, пропорциональна энергии ливня и что эффективная площадь антенны приблизительно равна геометрической, если длина волны намного меньше ее характерных размеров.

Тогда мощность, выделяющаяся на нагрузке антенны в единичном интервале частот, приближенно равна:

$$F_v = \frac{\epsilon_0 c}{\pi \tau} \left| E_{0v} \frac{W}{W_0} \right|^2 S_A,$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость электромагнитных волн в вакууме; τ – длительность радиоимпульса, зависящая от величины активной нагрузки фильтра. Например, пусть для частоты $\nu = 50$ МГц антенна и приемное устройство имеют полосу порядка $\Delta\nu = 2 \div 5$ МГц. Тогда добротность контура $Q = \nu/\Delta\nu$ и

$$\tau = \frac{1}{\pi \Delta\nu} \approx 10^{-7} \text{ с.}$$

В том случае, когда облучаемая область только частично совпадает с поверхностью полотна антенны, амплитуда уменьшится, а ее расчет существенно усложнится. При значении энергии $W = 10^{15}$ эВ и $\tau = 10^{-7}$ с спектральная мощность равна $F_v \approx 20 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц.

Эту величину следует сравнить с выражением для спектральной мощности радиоизлучения небесной сферы $J_v = kT$, где T – ее характерная температура для частоты $\nu = 5 \cdot 10^7$ Гц. Яркостная температура T плавно изменяется от минимума, 2000 К вблизи галактического полюса, до 30000 К в направлении на галактический центр. Для вертикально направленных антенн в районе географической широты $40 \div 60^\circ$ диапазон температур составляет $2000 \div 10000$ К [11]. При $T = 5000$ К поток шумов дает величину $J_v = 0.7 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц. Это приблизительно в 30 раз меньше, чем спектральная мощность сигнала F_v .

Приведенные выше оценки и сравнения с традиционными детекторами ШАЛ показывают, что чувствительность обоих методов приблизительно одинакова. Однако ливень от частицы с энергией $W = 10^{15}$ эВ может быть надежно зарегистрирован традиционным детектором только высоко в горах ($3 \div 5$ км). Установка с радиодетектором может находиться на уровне моря или ниже. Больше того, при более высоких энергиях из-за того, что максимум ливня оказывается вблизи поверхности земли, имеет место потеря когерентности радиоволн в точке наблюдения, и это приводит к сильному ослаблению радиосигнала. Поэтому для частиц высокой энергии радиометод на уровне моря, по-видимому, не применим. Наиболее чувствительным ($10^{13} \div 10^{14}$ эВ) является метод, в котором регистрируется черенковский свет. Однако возможности такого метода сильно ограничены жестким требованием проводить эксперимент в условиях темной безлунной и безоблачной ночи. По-видимому, для дальнейшего изучения природы радиоизлучения ШАЛ могла бы оказаться полезной совместная работа двух детекторов.

Литература

1. А. В. Глушков. Известия РАН. 2002, **66**, №11, с. 1599-1602.
2. Г. А. Аскаръян. ЖЭТФ. 1961, **41**, №2(8), с. 616-618.
3. Г. А. Аскаръян. ЖЭТФ. 1965, **48**, №3, с. 988-990.
4. F. D. Kahn, I. Lerche. Proc. Phys. Soc. A. 1966, **289**, pp. 206.
5. J. V. Jelley, J. H. Fruin, N. A. Porter, T. S. Weeks, F. G. Smith, R. A. Porter. Nature. 1965, **205**, pp. 327-328.
6. J. V. Jelley, W. N. Charman, J. H. Fruin, F. G. Smith, R. A. Porter, N. A. Porter, T. C. Weeks, B. McBreen. Nuovo Cimento. 1966, **46A**, No. 4, pp. 649-667.
7. И. А. Боржковский, В. Д. Воловик, Е. С. Шматко. Известия АН СССР. Серия физическая. 1996, **30**, №10, с. 1705-1707.
8. И. А. Боржковский, В. Д. Воловик, В. И. Кобизской, Е. С. Шматко. Письма в ЖЭТФ. 1966, **3**, №4, с. 186-189.
9. С. Н. Вернов, А. Т. Абросимов, В. Д. Воловик и др. Письма в ЖЭТФ. 1967, **5**, №5, с. 157-162.
10. С. Н. Вернов, Г. Б. Христиансен, И. И. Залобовский и др. Известия АН СССР. Серия физическая. 1968, **32**, №3, с. 467-469.
11. В. Б. Атрашкевич, О. В. Веденеев, Х. Р. Аллан, Д. К. Джонс, Н. Мандолези, Г. Мориджи, Д. Д. Палумбо. Ядерная физика. 1978, **28**, №3(9), с. 712.
12. В. С. Мурзин. Введение в физику космических лучей. Москва, МГУ, 1988, 319 с.
13. С. З. Бельский. Лавинные процессы в космических лучах. Москва, Гостехиздат, 1948, 243 с.

On the Possibility of Radio Astronomy Aided Recording of Extensive Air Showers

A. D. Filonenko

The possibility of recording extensive air showers with a specifically phased array operating around 50 MHz has been considered. The estimated spectral energy flux of a radio signal from cosmic particles with energies $>10^{15}$ eV shows the antenna-load signal magnitude for this range of energies to be much more exceeding the root-mean-square amplitude of cosmic noise for the range of 48 ÷ 50 MHz. The capacities of radio detecting extensive air showers are also discussed.

On the Possibility of Radio Astronomy Aided Recording of Extensive Air Showers

A. D. Frlonko

The possibility of recording extensive air showers with a specially phased array operating around 50 MHz has been considered. The estimated spectral energy flux of a radio signal from cosmic particles with energies $> 10^{15}$ eV shows the antenna-load signal magnitude for this range of energies to be much more exceeding the root-mean-square amplitude of cosmic noise for the range of 48–50 MHz. The possibilities of radio detecting extensive air showers are also discussed.

Литература

1. A. B. Трыков, *Известия РАН*, 2002, № 9, с. 1599–1602.
2. T. A. Aarseth, *JCAP*, 1991, 6, 025(2), с. 616–618.
3. I. A. Aarseth, *JCAP*, 1992, 48, 061, с. 928–930.
4. E. D. Kahn, *Lectione Phys. Soc. A*, 1966, 139, pp. 206.
5. J. V. Jelley, J. H. Fain, N. A. Porter, T. S. Weeks, F. O. Smith, K. A. Porter, *Nature*, 1962, 195, pp. 323–325.
6. V. J. Jelley, W. M. Chanman, J. H. Fain, F. O. Smith, K. A. Porter, N. A. Porter, T. S. Weeks, B. McGeehan, *Nuovo Cimento*, 1966, 46A, No. 4, pp. 649–661.
7. B. A. Бокоросский, B. D. Боннар, E. C. Шварцман, *Известия АН СССР, Серия физическая*, 1966, 30, 1619, с. 1702–1707.
8. B. A. Бокоросский, B. D. Боннар, B. M. Коганов, E. C. Шварцман, *Известия АН СССР, Серия физическая*, 1966, 30, 1619, с. 1702–1707.
9. G. H. Babcock, A. T. Apcoson, B. D. Bonnar, and the Iliamna JCAP, 1967, 5, 065, с. 137–142.
10. G. H. Babcock, I. B. Kucharski, N. N. Jarno, *Известия АН СССР, Серия физическая*, 1967, 35, 063, с. 467–469.
11. B. D. Азаршварцман, O. B. Барцкая, X. P. Ананян, E. K. Лисков, H. Митюков, T. Мюллер, B. D. Лазариде, *Радиотехника*, 1972, 28, № 3(9), с. 113.
12. B. C. Митюков, *Вестник Ленинградского государственного университета*, 1928, 119, с. 13.
13. C. J. Heitsch, *Известия АН СССР, Серия физическая*, 1948, 243, с. 13.