

УДК 537.591.15

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ШАЛ СО СПУТНИКОВ

К. М. Пичхадзе¹, В. К. Сысоев¹, В. А. Царев, В. А. Чечин

Предлагается использовать антенны, расположенные на спутниках, для регистрации радиосигналов от широких атмосферных ливней, инициированных космическими частицами ультравысоких энергий. Дается оценка ожидаемой мощности радиосигнала и скорости счета событий. Рассматривается возможная реализация предложения на основе проекта "Солнечный Парус".

Наблюдения, накопленные за последние 35 лет, свидетельствуют о присутствии в потоке космических лучей (КЛ) частиц с энергиями выше 10^{19} эВ (так называемых космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ)). Обнаружение таких частиц поставило ряд принципиальных вопросов относительно их источников, механизмов рождения и распространения.

Как известно, обрезание Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) [1] означает, что если КЛУВЭ (за исключением нейтрино), наблюдаемые на Земле, обусловлены известными стабильными частицами, то эти частицы должны быть рождены относительно недалеко от Земли (в пределах нескольких десятков Mpc). При столь высоких энергиях эффекты отклонения в галактических и межгалактических магнитных полях несущественны. Поэтому реконструированные направления таких частиц должны указывать на их источники (в пределах нескольких градусов). Однако никаких известных источников, способных давать КЛУВЭ, в указанных направлениях не наблюдается.

Поток КЛУВЭ чрезвычайно мал – на уровне одной частицы на $км^2$ в столетие. Поэтому для получения качественных статистически обеспеченных данных необходимы специализированные установки с гигантской апертурой. В настоящее время планируется создание подобных установок, которые нацелены на регистрацию заряженных частиц

¹НИЦ им. Г. Н. Бабакина.

или фотонов (черенковское или флуоресцентное излучение), возникающих в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), инициированных в атмосфере частицами УВЭ. Характерные размеры просматриваемой площади должны достигать 6000 км^2 в наземной установке (Обсерватория Ожэ [2]) и $10^5 - 10^6 \text{ км}^2$ при регистрации флуоресцентного света со спутника (проект OWL [3]).

В настоящей работе предлагается использовать радиоантенны, расположенные на спутниках, для регистрации радиоизлучения от горизонтальных ШАЛ, инициированных частицами УВЭ, и рассматривается возможная реализация этой идеи на основе проекта "Солнечный Парус". В этом случае эффективная площадь регистрации сопоставима с площадью регистрации в проекте OWL или превосходит ее, но имеется преимущество (по крайней мере, на порядок) в полном времени наблюдения, поскольку оптический метод регистрации в OWL может быть использован только в ясные безлунные ночи. Кроме того, как отмечено в [4], радиоизлучение может дать дополнительную информацию относительно состава первичного излучения. С технической точки зрения, детектирование радиометодом представляется более простым, чем оптическое. В литературе приводятся сообщения о регистрации радиосигналов от ШАЛ высоких энергий ($> 10^{16} - 10^{17} \text{ эВ}$) наземными приемниками [5].

В этой работе мы не ставим своей целью обсуждение детальной картины радиоизлучения ШАЛ, учитывающей такие явления, как разведение зарядов геомагнитным полем [6], излучение дельта-электронов [7], торможение зарядов электрическим полем в атмосфере [8], вклад от излучения мюонов [9] и, наконец, черенковского излучения с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала [10]. Эти эффекты будут рассмотрены в дальнейшем. Здесь мы ограничимся лишь оценкой по порядку величины с целью демонстрации реальности регистрации ШАЛ от КЛУВЭ на расстояниях масштаба 1000 км радиометодом. Конкретные числовые оценки будут приведены для энергии ШАЛ равной 10^{19} эВ .

Будем рассматривать радиоизлучение от ШАЛ как излучение, генерированное объемным движущимся переменным зарядом. Заряд $eN(t)$ ливневого диска (суммарный электроотрицательный избыток [11, 12]) возникает в вершине ШАЛ, возрастает до максимального значения в максимуме развития ШАЛ, и затем постепенно исчезает.

Стандартные формулы дают для плотности энергии излучения (на расстоянии R от ШАЛ) объемного заряда с плотностью тока $\mathbf{j} = e\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)N(t)n(\mathbf{r}, t)$:

$$dW/dS = (e/2\pi)^2 |\mathbf{L}|^2 k^2 dk / R^2,$$

где

$$\mathbf{L} = \int [\mathbf{n}\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)] N(t) \exp(i\omega t) n(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}).$$

Здесь \mathbf{n} – направление излучения, $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ – скорость частиц ШАЛ, пространственное распределение которых внутри диска ШАЛ описывается функцией $n(\mathbf{r}, t)$, нормированной на единицу.

Строгое вычисление излучения требует учета флуктуаций и корреляций плотности тока в различных пространственно-временных точках внутри ШАЛ. Если длина волны рассматриваемого излучения сравнима с характерными размерами ливневого диска ШАЛ (10-100 м), можно пренебречь этими флуктуациями и считать все функции заданными. Имея в виду длинноволновый предел, удобно записать

$$dW/dS = (e/2\pi)^2 (\eta L)^2 \sin^2(\theta) k^2 dk F((1 - \cos(\theta)\beta)k\delta l; (\mathbf{k}\delta\mathbf{r}))/R^2,$$

где L – полная длина треков частиц ШАЛ, $\eta \approx 0.1 - 0.2$ – электроотрицательный избыток, а функция F – фурье-разложение пространственно-временного распределения объемного заряда ШАЛ: $F(0,0) = 1$, причем $\tau = \delta l/c$ и $\delta\mathbf{r}$ – время развития и размеры ливневого диска ШАЛ. Функция F обеспечивает обрезание спектра излучения при длине волны $\lambda < \lambda_{min} \approx \max\{(1 - \cos(\theta)\beta)\delta l; \mathbf{n}\delta\mathbf{r}\}$. Поскольку длительность импульса излучения $T \approx \lambda_{min}/c$, для плотности мощности длинноволнового когерентного излучения получим следующую оценку:

$$dW/(TdS) \approx e^2 c (\eta L/R)^2 \sin^2(\theta) / \lambda_{min}^4.$$

При энергии ШАЛ порядка 10^{19} эВ, характерные размеры диска ШАЛ $\delta r_{tr} \approx 100$ м, $\delta r_{long} \approx 10$ м, пробег ШАЛ $\delta l \approx 3$ км, лоренц-фактор $\gamma \approx 100$.

Для очень малых углов излучения $\theta < 0.01$, $\lambda_{min} \approx \delta r_{long}$. За пределами этой малой области углов, $\lambda_{min} \approx \delta l\theta^2$. Следовательно,

$$dW/(TdS) \approx e^2 c (\eta L/R)^2 / (\delta l^4 \theta^6).$$

Полная длина треков ШАЛ $L(\text{см}) \approx E/(2 K \text{эВ})$, поэтому при $\eta \approx 0.2$

$$dW/(TdS) \approx 10^{-17} \text{ Ватт/м}^2 E^2 (10^{19} \text{ эВ}) / \{R^2 (10^3 \text{ км}) \delta l^4 (\text{км}) \theta^6\}.$$

Для значений параметров $E = 10^{19}$ эВ, $R = 1000$ км, $\delta l = 3$ км, $\theta = 0.1$ получим следующую оценку

$$dW/(TdS) \approx 10^{-14} \text{ Ватт/м}^2.$$

Полученная выше величина сигнала, для интересующего нас здесь диапазона длин волн $\sim 10 - 20$ м, оказывается на много порядков выше чувствительности современных радиоастрономических антенн. Заметим, что когерентный характер излучения приводит к квадратичной зависимости мощности сигнала от энергии первичной частицы, инициировавшей ШАЛ. Измеряя плотность потока мощности радиосигнала, можно измерять энергию первичной частицы.

Оценим теперь скорость счета событий регистрации горизонтальных ШАЛ от КЛУВЭ в данном методе. Очевидно, что приемник, расположенный на спутнике, будет контролировать объем атмосферы, равный

$$V = \pi h^2(3R - h)/3 \approx \pi h^2 R \approx 2 \cdot 10^6 \text{ км}^3.$$

Здесь R – радиус Земли и h – толщина атмосферы. Для грубой численной оценки мы отбросили вклад атмосферы выше 10 км. Полученный объем соответствует массе мишени порядка 10^{12} т. Эта величина сопоставима с ожидаемой в проекте OWL. Для сравнения числа регистрируемых событий необходимо еще учесть, что при регистрации радиоизлучения угловая апертура составляет $\Omega \approx 10^{-1}$ (для OWL $\Omega \approx 1$), но имеется выигрыш (≈ 10) в полезном времени наблюдения. С учетом полученных выше оценок можно найти, что ожидаемая скорость счета ШАЛ от КЛУВЭ при $E > 10^{20}$ эВ составит (в предположении отсутствия обрезания ГЗК) около 15 событий в сутки.

Мы хотели бы здесь подчеркнуть, что полученные оценки дают нижнюю границу для мощности радиосигнала от ШАЛ, генерированных частицами ультравысоких энергий. Как будет показано в последующей публикации, аккуратный учет микроскопической картины когерентного излучения увеличивает эту оценку на один-два порядка.

Кратко обсудим теперь одну из возможных реализаций данного предложения, связанную с использованием космической системы "Солнечный Парус" (СП) [13]. В этом проекте предполагается вывод на околоземную орбиту спутника, на котором будет развернут "парус" из тонкой пленки общей площадью до нескольких тысяч квадратных метров. Пленка может быть металлизированной, а "парусу" может быть придана требуемая пространственная форма (например, параболоид). Полученная таким образом структура может быть использована как радиоантенна, сопоставимая с антеннами действующих наземных радиотелескопов. Предполагается возможность пространственной ориентации "паруса", а также передачи информации на Землю. Заметим, что подобная радиоантенна, размещенная на искусственном спутнике Луны, могла бы быть использована для регистрации радиоизлучения, генерированного нейтрино ультравысоких энергий в приповерхностном слое лунного грунта [14].

Авторы благодарны Н. С. Кардашеву за полезные обсуждения затронутых в статье вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Greisen K. Phys. Rev. Lett., **16**, 748 (1966). Zatsepin G. T., Kuzmin V. A. JETP Lett., **4**, 78 (1966).
- [2] The Pierre Auger Project Design Report, Fermilab, October 1995 (Web site: www.auger.org/admin/).
- [3] "Workshop on observing giant Cosmic Ray Air Showers from $E > 10^{20}$ particles from space" AIP Conf. Proc. 433, nov. 1997.
- [4] Allan H. R. in Progress in Elementary Particles and Cosmic Ray Physics, v. 10, edited by J. G. Wilson and S. G. Wouthuysen (North-Holland, Amsterdam, 1971), p. 171, and references therein; Atrashkevich V. B. et al. Yad. Phys., **28**, 366 (1978).
- [5] Rosner J. L., Wilkerson J. F. Preprint Enrico Fermi Institute, Univ. Chicago, IL, EFI-97-10, hep-ex/9702008 and references therein.
- [6] Kahn F. D. and Lerche I. Proc. Roy. Soc., **A289**, 206 (1966); Colgate S. A. J. Geophys. Res., **72**, 4869 (1972).
- [7] Gusev G. A., Zheleznykh I. M. JETP Lett., **38**, 505 (1983).
- [8] Kadota K. et al. Proc. of the Tokyo Workshop on Techniques for the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays; ICRR, Univ. Tokyo, 1993.
- [9] Tsarev V. A., Chechin V. A. Generation of radiowaves by high-energy neutrino beams, LPI preprint N248 (1984); On a possibility to detect neutrino beams in the atmosphere and near earth space, LPI preprint N 87 (1985).
- [10] Landau L., Pomeranchuk I. Dokl. Akad. Nauk SSR, **92**, 535 (1953). Migdal A. B. Phys. Rev., **103**, 1811 (1956).
- [11] Аскарьян Г. А. ЖЭТФ, **41**, 616 (1961); **48**, 988 (1965).
- [12] Saltzberg D. et al. arXiv:hep-ex/0011001, 1 Nov 2000.
- [13] The "Solar Sail" Project: <http://infoart.nsk.su/spacenews/00/03/02-239.htm>.
- [14] Дагкесамаманский Р. Д., Железных И. М. Письма в ЖЭТФ, **50(5)**, 233 (1989).

Поступила в редакцию 6 декабря 2000 г.