

ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СУПЕРВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ($\sim 10^{20}$ эВ) С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Г.А. Гусев, Л.Г. Деденко, И.М. Железных

УДК 539.17.02

Показана возможность регистрации нестационарной стадии образования плазмы в следе широкого атмосферного ливня при энергиях $10^{19} \div 10^{20}$ эВ с помощью высокоточного фазового интерферометра на частотах порядка 100 МГц. Предложенная схема интерферометра {5 передатчиков, 20 приемников} в принципе позволяет продвинуться до энергий $5 \cdot 10^{20}$ эВ.

Недавно было предложено детектирование широких атмосферных ливней (ШАЛ) в области энергий более 10^{20} эВ по их радиоизлучению [1, 2/ с учетом отражения и рассеяния от Земли и ионосферы [3/ При этом главной проблемой в предложенных экспериментах было выделение полезного сигнала на фоне шумов. Возможность детектирования ШАЛ при энергиях не более 10^{20} эВ обсуждалась в работе [4/], в которой для подавления шумов предлагалось использовать систему плоских диэлектрических волноводов. Здесь мы рассмотрим возможность использования фазового метода регистрации ШАЛ супервысоких энергий, имея в виду наблюдение нестационарной фазы образования столба ионизации, порождаемого ШАЛ.

Приведем весьма приближенную картину явления образования и дальнейшей эволюции столба ионизации в атмосфере при энергиях ШАЛ в интервале $10^{20} \div 10^{21}$ эВ. Подчеркнем, что это весьма грубая схема, достаточная лишь для общих оценок по порядку величины. Предположим, что значительная доля энергии каскада расходуется на ионизацию. Тогда с учетом того, что на один акт ионизации требуется около 30 эВ, полное число ионов на пути ШАЛ порядка 10 км в интервале энергий $10^{20} \div 10^{21}$ эВ есть $3 \cdot (10^{18} \div 10^{19})$. Поскольку примерно половина ионов находится в столбе радиусом 20 м, то средняя плотность ионизации в нем будет около $2 \cdot (10^5 \div 10^6)$ см⁻³. За время порядка 10^{-7} с происходит прилипание электронов к атомам и молекулам кислорода, так что образовавшаяся в следе ШАЛ слабоионизованная плазма состоит из положительных и отрицательных ионов, рекомбинация которых, как легко показать, для первичной энергии $E_0 = 10^{21}$ эВ протека-

ет достаточно медленно (время рекомбинации порядка 1 с). Правда, такая оценка справедлива лишь в сухом воздухе. Мы рассмотрим возможность обнаружения следа ШАЛ с помощью фазового интерферометра в радиодиапазоне /5/.

Фазовые интерферометры в радиодиапазоне широко применяются для диагностики как лабораторной, так и космической плазмы (например, ионосферы и магнитосферы Земли) /5/. Суть этого метода, как хорошо известно, состоит в измерении набега фазы монохроматической волны (от высокостабильного генератора) при ее прохождении через исследуемую среду. В нашем случае при прохождении волной с частотой 100 МГц столба плазмы с плотностью $\sim 2 \cdot (10^5 \div 10^6) \text{ см}^{-3}$ перпендикулярно его оси возникает набег фазы /5/*).

$$\Delta\Phi = \frac{(2\pi)^2 e^2 f}{M_i c (\nu_{\text{eff}}^2 + \omega^2)} \int_0^D N dr \simeq \frac{e^2 N D}{2 M_i f c} \approx (10^{-6} \div 10^{-5}), \quad \omega \simeq \nu_{\text{eff}}. \quad (1)$$

Здесь D — диаметр столба, e — заряд иона, c — скорость света, N — средняя плотность плазмы, M_i — масса ионов. В формуле (1) мы подставили вклад ионов в диэлектрическую проницаемость слабоионизованной плазмы на частоте $f = \omega/2\pi$

$$\delta\epsilon = -4\pi N e^2 / M_i (\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2), \quad (2)$$

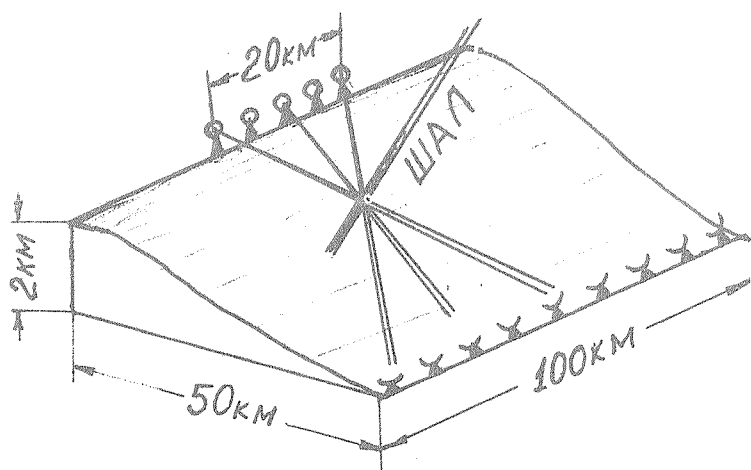
$\nu_{\text{eff}} \simeq 4 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ — эффективная частота соударений ионов с нейтралами.

Показатель преломления нормальной тропосферы (в средних условиях, давление 1,013 бар, температура 15 °С, относительная влажность 60%) $n = 1,000325$ /6/, а формула (2) дает при энергии 10^{21} эВ для вклада плазмы в показатель преломления значение $\delta n \simeq 10^{-7}$. Таким образом, абсолютная величина изменения показателя преломления весьма мала, и для регистрации скачка фазы (1) требуется высокоточная аппаратура. Если учесть, что атмосферные флуктуации фазы /6/ могут достигать $10^{-3} \div 10^{-2}$ за времена порядка 1 с, то наблюдать фазовый сдвиг (1) за время порядка 1 с невозможно. Однако, время образования фазового сдвига (1) очень мало. Именно, оно порядка времени "наплывания" столба ионизации на область наблюдения, имеющую размеры L порядка первой зоны Френеля приемника

*) Г.А. Аскаръян обратил наше внимание на то, что оценка (1) фазового скачка на фронте ШАЛ в условиях реальной атмосферы является сильным упрощением из-за возможности конденсации на ионах воздуха в пересыщенной водяными парами атмосфере.

($L \approx \sqrt{R\lambda}$), которая при $\lambda = 3$ м и $R \approx 10$ км (здесь R — расстояние от приемника до ШАП) составляет около 200 м. Следовательно, время образования фазового сдвига (1) есть $\tau = L/c \approx 5 \cdot 10^{-7}$ с.

Кратковременный сдвиг фазы (1) может быть обнаружен при следующих условиях. Во-первых, фазовые шумы, обусловленные возмущениями за малые времена, должны быть меньше $\Delta\Phi$. Во-вторых, фазовые шумы измерительной системы также должны быть ниже $\Delta\Phi$. В-третьих, можно представить существование механизмов, имитирующих быстрые флуктуации фазы (3) (например, быстрые флуктуации солнечного потока ионизирующего излучения). Первые два вопроса изучались для временных разрешений порядка $10^{-3} \div 10^{-4}$ с в связи с созданием высокочувствительных авиационных доплеровских радаров [7]. Было показано, что главным ограничением чувствительности в измерении фазовых сдвигов является фазовый шум генераторов. Согласно работам [7, 8] для кварцевых генераторов в области характерных времен порядка 100 — 1 мкс чувствительность в измерении фазовых сдвигов $\Delta\Phi$ составляет величину около $5 \cdot 10^{-5}$ на частоте $90 \div 100$ МГц. Более хорошие стандарты частоты, использующие рубидиевые пассивные ячейки, за времена порядка 10^{-6} с имеют фазовые шумы на уровне $\delta\Phi \approx \approx 10^{-6}$, то есть позволяют наблюдать ШАП с энергией $3 \cdot 10^{20}$ эВ при отношении сигнал/шум порядка 3. Если же для подавления фазовых шумов ста-



Р и с. 1. Схема фазового интерферометра с эффективной площадью регистрации порядка 10^3 км², состоящего из 5 передатчиков и 20 приемников

бильного генератора при малых временах (порядка 10^{-6} с) использовать узкополосный фильтр, то при снижении шумов, скажем, в 30 раз можно зарегистрировать ШАЛ с энергией 10^{19} эВ.

Кратко опишем схему установки из 5 передатчиков, расположенных на прямой линии протяженностью 10 км через 2,5 км, и 20 приемников, расположенных через 5 км и имеющих разнесенные до 1 км антенны. Расстояние между линией передатчиков, расположенных на высоте порядка 2 км, и линией приемников (см. рис. 1), расположенных на равнине или на склоне долины, порядка 50 км. Эффективная площадь регистрации составляет около 10^3 км². С учетом телесного угла около 2π ср при статистике 1 событие в год на площади 1 км² в 1 стерадиане для $E_0 \leq 10^{19}$ эВ и в предположении интегрального спектра ШАЛ $\sim E^{-2}$ можно надеяться зафиксировать 1 событие в год для ШАЛ с энергией $5 \cdot 10^{20}$ эВ.

В заключение, выражаем благодарность за обсуждение М.А. Маркову и Г.А. Аскарьяну.

Институт ядерных исследований АН СССР

Поступила в редакцию
5 июня 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А. Аскарьян, ЖЭТФ, 41, 616 (1961).
2. L.G. Dedenko et al., Proc. 17 th ICRC, Paris, 10, 383 (1981).
3. Г.А. Гусев, Л.Г. Деденко, И.М. Железных, Труды Всесоюзной конференции по детектированию нейтрино, Алма-Ата, 1983 г.
4. Г.А. Гусев и др., Письма в ЖЭТФ, 36, вып. 6, 216 (1982).
5. Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг, Распространение радиоволн, Гостехиздат, М., 1953 г.
6. М.П. Долуханов, Распространение радиоволн, "Связь", М., 1965 г.
7. D.B. Leeson, G.F. Johnson, Proc. of IEEE, 54, № 2, 244 (1966).
8. S.L. Johnson, B.H. Smith, D.A. Colder, Ibid., p. 258.
9. Дж. Вильсон, Камера Вильсона, ИЛ, М., 1954 г.