

# Возможные акустический и электромагнитный сигналы от нейтринного пучка при прохождении его через напряженные земные породы

Ю.М. Сапунов\*

*ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия*

В работе представлены результаты моделирования акустического и электромагнитного излучений от нейтринного пучка, проходящего через земные породы на глубине порядка 10 км. Эффект акустического излучения при прохождении пучков заряженных частиц через вещество хорошо известен. Изучены и различные механизмы его образования [1]. В работе [2] приведены результаты анализа нового возможного источника акустического излучения — это рождение микротрещин (МТ). Образование МТ связано с неравновесностью среды, через которую проходят частицы. Актуальность данной работы связана с перспективой ее экспериментального изучения и, в случае успеха, широкой потенциальной возможностью применения в исследованиях фундаментальных проблем геофизики [3].

В настоящее время в ЦЕРНе и ФНАЛе готовятся эксперименты [4, 5] с нейтринными пучками, в которых расстояния между детектором нейтрино и их источником составляет  $\simeq 750$  км. В этих опытах нейтринный пучок проходит через вещество Земли и будет достигать глубину до  $\simeq 10$  км, где температура достигает  $\simeq 300^\circ\text{C}$ , а давление  $\simeq 2 \cdot 10^8$  Па. Поведение вещества, находящегося под силовой нагрузкой, в зависимости от температуры, времени и деформации описывается кинетической теорией прочности [6]. Согласно этой теории, при деформации твердого тела в нем образуются стабильные МТ на флуктуациях плотности. При прохождении ионизирующего излучения через вещество наряду с непрерывными существуют дискретные потери энергии, ведущие к локальным всплескам температуры и соответствующей термоупругой деформации, которая как бы эмитирует флуктуацию плотности.

Прохождение нейтринного пучка через вещество связано с взаимодействиями с нуклонами ядер и образованием мюонов. Если деформация среды близка к критической, то, согласно дилатонной модели кинетической теории прочности, на треках мюонов образуются МТ [2]. Образование МТ сопровождается акустическим и электромагнитным излучением.

Описания канала и моделируемого нейтринного пучка содержатся в работах [7, 8]. Параметры первичного протонного пучка, сбрасываемого на мишень, при однооборотном выводе следующие: энергия — 600 ГэВ, интенсивность за цикл —  $3 \cdot 10^{14}$  протонов, длительность отдельного сброса составит  $\sim 70$  мкс. Расчетные значения потока нейтрино с широким энергетическим спектром на расстоянии 1000 км в радиусе 500 м составляют  $0,158 \cdot 10^{-2}$  на протон, средняя энергия нейтрино — 46,6 ГэВ.

Чтобы определить величину акустического и электромагнитного излучения, необходимо знать количество мюонов, их энергию, плотность МТ на треке и энергию, излучаемую при образовании МТ. Плотность МТ на треках мюонов определяется, с одной стороны, условием их рождения, а, с другой стороны, ограничивается концентрационным критерием разрушения. Согласно этому критерию [6],  $N$  — предельная концентрация МТ и их размер  $L$  связаны условием  $N^{-1/3}L^{-1} = 3 \div 6$ .

---

\*E-mail: Sapunov@mx.ihep.su

Условие рождения микротрещины упруго выбитым атомом или  $\delta$ -электроном с энергией  $E$  записывается в виде [2]

$$a/G\Lambda \leq 3\epsilon + 0,308\alpha E(1 + \mu)/(\gamma\rho C)(1 - \mu), \quad (1)$$

где  $a$  — межатомное расстояние;  $G$  — термодинамический коэффициент Грюнайзена;  $\Lambda$  — длина свободного пробега фононов;  $\epsilon$  — средняя деформация;  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\gamma$  — структурно-чувствительный активационный объем;  $\rho$  — плотность;  $C$  — теплоемкость.

В работе [2] показано, что для горных пород возможная линейная плотность МТ, возникающая на треке релятивистского мюона, изменяется от величины, определяемой сечением рождения выбитого атома с энергией, удовлетворяющей условию (1), и равным  $\sim 340 \text{ м}^{-1}$ , до плотности, ограниченной предельной концентрацией МТ ( $\sim 1300 \text{ м}^{-1}$ ).

Сечение образования мюона бралось равным сечению заряженного тока с нуклоном —  $0,67 \cdot 10^{-38} \cdot E_\nu (\text{см}^2/\text{ГэВ})$ , где  $E_\nu$  — энергия нейтрино. Распределение мюонов по энергии полагалось равномерным ( $0 \div E_\nu$ ), а средний угол между направлением нейтрино и образованным мюоном составляет  $\bar{\theta}_\mu = (2m\bar{x}/E_\nu)^{1/2}$ , где  $m$  — масса нуклона,  $\bar{x} = 0,2$  — среднее значение скейлинговой переменной.

Полная длина трека мюона, рожденного во взаимодействии нейтрино с нуклоном с энергией  $E_\mu$ , определялась соотношением

$$R = (1/b)\ln(1 + bE_\mu/a), \quad (2)$$

где параметры  $a$  и  $b$  входят в стандартную формулу потери энергии на ионизацию, излучение, рождение пар и ядерное взаимодействие:

$$dE_\mu/dx = -a - bE_\mu. \quad (3)$$

Значения параметров  $a$  и  $b$  для грунта взяты из работы [10]:  $a = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ ГэВ} \cdot \text{г}^{-1} \text{ см}^{-2}$ ;  $b = 4,75 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ .

Интенсивность звука при образовании дискообразной МТ длиной  $L$  и раскрытием  $\sim 0,1 L$  найдем, полагая, что породы хрупкие и энергия, выделяемая при рождении МТ, идет на акустическое излучение. Упругая энергия равна произведению объема МТ  $\sim 0,1 L^3$  на плотность энергии  $\sim \sigma^2/2E$ , где  $E = (3 \div 11) \cdot 10^{10} \text{ Па}$  — модуль Юнга, а  $\sigma = 1,8 \cdot 10^8 \text{ Па}$  — средняя прочность гранитных пород [9]. Экспериментальные данные [11] показывают, что размеры МТ в гранитных породах имеют значения  $L \sim (2 \div 8) \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Отсюда следует, что на акустическое излучение тратится  $1,3 \cdot 10^{-7} \div 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$ .

Интенсивность акустического излучения от нейтринного пучка определяется суммированием силы звука от каждой МТ с множителем равным обратному квадрату расстояния до МТ. Суммирование велось для трех расстояний до нейтринного пучка — 5, 10 и 20 км, в результате получено  $1,72 \cdot 10^2$ ;  $0,87 \cdot 10^2$  и  $0,36 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2$  соответственно. Расчет велся без учета затухания колебаний. Затухание учтем следующим образом.

Исследования акустической эмиссии при деформировании твердых тел показывают, что частотный спектр импульсов описывается гауссовской кривой и ширина спектра определяется длительностью образования МТ. Время образования МТ [11] составляет  $10^{-7} \div 10^{-5} \text{ с}$ , тогда частотный спектр простирается от нуля до  $0,1 \div 10 \text{ МГц}$ . Коэффициент затухания акустических волн  $\beta$  и добротность горных пород  $Q$  связаны соотношением  $\beta = w/2vQ$ , где  $w$  — круговая частота, а  $v$  — скорость звуковых волн. Для гранита  $v = 6000 \text{ м/с}$  и  $Q=200$ , тогда для  $f = 100 \text{ Гц}$  имеем затухание  $\beta = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ . Промышленные приборы имеют чувствительность к колебательным смещениям —  $10^{-12} \text{ м}$ , что вполне достаточно

для уверенной регистрации полученной интенсивности звука для частот меньше килогерца. Достигнутая чувствительность пьезоэлектрического преобразователя к смещениям [12] составляет  $10^{-16}$  м, что позволяет продвинуться в килогерцевую область.

Экспериментальное значение энергии электромагнитного излучения при образовании МТ [11] составляет  $10^{-13} \div 3 \cdot 10^{-10}$  Дж. Тогда мощность электромагнитного излучения от нейтринного пучка на расстоянии 5; 10 и 20 км составляет  $2 \cdot 10^{-3}$ ;  $10^{-3}$  и  $0,6 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Поэтому для трассы с электрическим сопротивлением горных пород больше  $\sim 10^5 \div 10^6$  Ом·м возможна регистрация электромагнитного излучения на расстоянии нескольких десятков километров.

Таким образом, проведенное моделирование показало, что акустическое и электромагнитное излучение от нейтринного пучка ускорителя УНК на энергию 600 ГэВ имеет характер цилиндрических волн, поскольку зависимость интенсивности от расстояния линейная, и величину, достаточную для проведения экспериментальных исследований.

### Список литературы

- [1] Залюбовский И.И., Калиниченко А.И., Лазурик В.Т. Введение в радиационную акустику. Вища Школа. Харьков, 1986.
- [2] Сапунов Ю.М. Механизм образования микротрещин ионизирующим излучением в нагруженных телах. Препринт ИФВЭ 98-30, Протвино, 1998.
- [3] В.А.Царев, В.А.Чечин. Нейтринная геофизика. Изв. АН СССР, сер. физика Земли, 1986, № 9, с.81-89.
- [4] E.Ables, W.W.M.Allison, G.J.Ahner et.al. P-875: A Long-baseline Neutrino Oscillation Experiment at Fermilab. February 1995.
- [5] G.Aguistapace, J.L.Baldy, A.E.Ball et.al. The CERN Neutrino Beam to Gran Sasso (NGS). Preprint CERN - 98-02 and INFN/AE-98/05. Geneva, 1998.
- [6] В.А.Петров, А.Я.Башкарев, В.И.Веттегрень. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. Политехника, Санкт-Петербург, 1993.
- [7] М.К.Булгаков, П.С.Васильев, П.И.Галкин и др. Препринт ИФВЭ 95-18, Протвино, 1995.
- [8] П.С.Васильев, В.И.Гаркуша, С.С.Герштейн и др.// Ядерная физика, 1995, т. 58, № 12, с.2210-2218.
- [9] Берч Фр., Шерер Дж., Спайсер Г. Справочник для геологов по физическим константам. Изд. иностр. лит. М., 1949.
- [10] A.Bottino, V.de Alfaro, N.Fornengo et.al.// Phys.Lett. B265, 1991, p.57.
- [11] Иванов В.В., Пимонов А.Г., Егоров П.В., Колпакова Л.А. Изв. АН СССР, сер. физика Земли, 1990, № 7, с.78-84.
- [12] Константинов В.А., Лыков Ю.И., Панин В.И.// Дефектоскопия, 1974, № 3, с.134-135.