

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФЭ - АНФ - 92 - 66

ИФЭ 92-66

ОНФ

А.Б.Борисов¹⁾, Д.А.Катадымов¹⁾, В.И.Кочетков,
А.И.Мухин, Р.А.Рзаев, Ю.М.Свиридов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ
ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ В МЮОННОМ ПУЧКЕ
И ЗАМЕЧАНИЕ ОБ ОДНОЙ ИЗ ПЕРСПЕКТИВ
НЕЙТРИННОЙ ГЕОФИЗИКИ**

¹⁾ ИТЦ КИФИ РАН, Саратов

Противно 1992

Аннотация

Борисов А.Б. и др. Исследование генерации звуковых сигналов в муонном пучке и замечание об одной из перспектив нейтринной геофизики: Препринт ИФЭЭ 92-66. - Протвино, 1992. - 11 с., 6 рис., 2 табл., библиогр.: 11.

Исследован акустический сигнал, образующийся в стальном стержне при облучении импульсным лучком мюонов. Показано его согласие с предсказанием термоакустического механизма генерации звука в геометрическом приближении *линейной цилиндрической антенны*. На этой основе проведены оценки ожидаемых акустических сигналов от нейтринных пучков мультитевных ускорителей для определения возможностей их использования в геофизике для прогноза землетрясений.

Abstract

Borisov A.B. et al. On Studying the Generation of Sonic Signals in Muon Beams and Some Remark on One of Possibilities of Neutrino Geophysics: IHEP Preprint 92-66. - Protvino, 1992. - p. 11, figs. 6, tables 2, refs.: 11.

A sonic signal, produced in a steel rod irradiated by a pulsed muon beam, has been studied. Its agreement with the predictions of the thermo acoustic mechanism of generation in the geometric approximation of linear cylindrical antenna has been shown. The expected sonic signals from the neutrino beam of multi-TeV machines have been estimated with the view to define possibilities to use them in geophysics to forecast earthquakes.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес, проявляемый к звуковым явлениям, возникающим при взаимодействии проникающего излучения с веществом, в значительной мере стимулируется теми перспективами, которые открыло бы их использованием в прикладных целях.

Так, в ряде работ^[1,2] отмечается, что нейтринный пучок высокой энергии как источник звуковых волн мог бы стать весьма тонким инструментом для исследования свойств геологических пород, поиска и разведки месторождений полезных ископаемых (рис.1). Использование пучка нейтрино в сейсмологии, как будет показано ниже, могло бы помочь в решении проблемы прогноза места, времени и силы землетрясения.

Авторы^[1,2] использовали ряд приближений при расчете возможных параметров нейтринных пучков. В настоящей работе для вычисления акустических сигналов используются результаты проведенных в ИФВЭ расчетов реально достижимых параметров пучков нейтрино от ускорителя с энергией протонов 3 ТэВ и их экстраполяции до энергий 25 и 50 ТэВ^[3].

Методику регистрации акустических сигналов от пучков нейтрино целесообразно отработать, используя в качестве генератора звука мюонный поток нейтринного канала ускорителя Л-70, который из-за своих размеров и значительной проникающей способности мюонов может служить хорошей динамической моделью пучка нейтрино.

Возможность экспериментальной регистрации устойчивого акустического сигнала от пучка мюонов показана в работе^[4]. В данной работе наблюдалась головная волна акустического импульса без влияния отражений, что дало возможность провести детальную оценку степени соответствия сигналов, полученных в ходе эксперимента и рассчитанных теоретически.

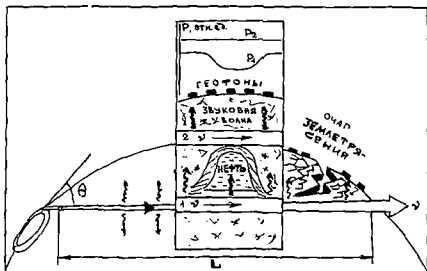


Рис. 1. Схема использования нейтринного пучка в геофизических исследованиях.

1. РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ МЮОННОГО ПОТОКА НА НЕЙТРИННОМ КАНАЛЕ У-70 И СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ТЕОРИЕЙ

Процесс генерации акустических волн пучком проникающих частиц (нейтрино, мюонов) высокой энергии в веществе был рассмотрен в работе^[1]. Согласно этой работе источник звуковых сигналов в этом случае может быть представлен в виде линейной цилиндрической антенны (см. рис.2). Импульс давления $P(t)$, регистрируемый детектором на расстоянии R от оси пучка, рассчитан в работе^[1] в виде

$$P(t) = 4AWR^{-1/2}\sigma^{-3/2} \left[\frac{1 - y^2 - y\sqrt{y^2 + 1}}{8(y^2 + 1)^{3/2}(y + \sqrt{y^2 + 1})^{1/2}} \right], \quad (1)$$

где $y = (V_p t - R)/\sigma$. Здесь $A = G/4\pi$, G - коэффициент Грюнайзена вещества; V_p - скорость продольных акустических волн в веществе; 2σ - эффективная ширина области энерговыделения пучка; W - погонное энерговыделение (эрг/см). Для мюонного пучка $W = N_\mu dE_\mu/dz$, где dE_μ/dz - ионизационные потери мюона с энергией E_μ в веществе мишени, N_μ - интенсивность пучка мюонов в импульсе. Характерная частота сигнала $f_0 = V_p/2\pi\sigma$.

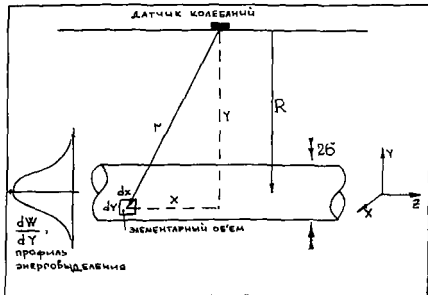


Рис. 2. Геометрия нейтринного пучка в приближении линейной цилиндрической антенны для вычисления акустического сигнала.

Схема эксперимента приведена на рис.3. В качестве мишени использовался стальной стержень длиной 274 см и диаметром 4,5 см, который для уменьшения уровня акустических шумов в электрических наводках был подвешен перпендикулярно оси пучка в первый разрез мюонного фильтра нейтринного канала ускорителя У-70. Детекторами акустических волн служили два пьезодатчика с чувствительностью 0,5 мВ/Па и слабой зависимостью амплитуды отклика от частоты сигнала. Они были закреплены на торцах стержня, который помещался в зону излучения таким образом, что расстояние от оси пучка до ближайшего к ней датчика составило 40 см, а до дальнего — 233 см.

Измерения проводились при следующих параметрах пучка мюонов: длительность ≈ 5 мкс, средняя энергия мюонов $\langle E_\mu \rangle = 10$ ГэВ, поперечные размеры пучка характеризовались параметром $2\sigma = 110$ см, интенсивность пучка менялась от $2.7 \cdot 10^9$ до $4.2 \cdot 10^{10}$ частиц/импульс¹. Снятые с пьезопреобразователей сигналы после усиления в диапазоне 1-10 кГц

¹Здесь и в дальнейшем указывается плотность потока мюонов в области с радиусом $r = 70$ см. И-поверхности на стержень падает около $3 \cdot 10^{-2}$ от полного потока мюонов.

подавались на 1024-разрядный параллельный АЦП с шагом квантования 5 мкс и затем выводились на ЭВМ.

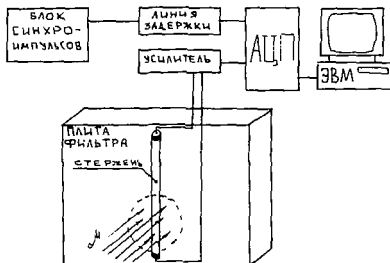


Рис. 3. Блок-схема эксперимента.

По формуле^[1] были рассчитаны давления акустического импульса в стали при предельных интенсивностях мюонного пучка. Для оценок принималось $A=0,1$, $V_p = 5,8$ км/с. При расчете отношения сигнал/шум учитывалось, что чувствительность измерительной аппаратуры в нашем эксперименте определяется собственными шумами усилителя звуковых частот и равна 10 мкВ. Результаты вычислений приведены в табл.1.

Таблица 1. Расчетные значения акустических сигналов от мюонного пучка в стальном фильтре: нейтронного канала У-70.

$\langle E_p \rangle$, ГэВ	N_p	R , см	σ , см	W , эрг/см	$P_{акст}$, дин/см ²	f_{01} , кГц	Сигнал/ шум
10	$2,7 \cdot 10^6$	40	55	$6,75 \cdot 10^4$	0,3	$\approx 1,7$	1,5
10	$4,2 \cdot 10^{10}$	40	55	$10,5 \cdot 10^6$	6,2	$\approx 1,7$	31

Полученные графики сигналов с обоих датчиков показаны на рис.4. Сигнал с ближнего датчика (рис.4а-1, $N_p = 3,1 \cdot 10^{10}$ частиц/имп) представляет собой "чистую" головную волну, тогда как сигнал с дальнего

го датчика (рис.4б-1, $N_p = 1,2 \cdot 10^{10}$ частиц/импульс), как и в работе¹⁴, является результатом многократного заложения первичной и отраженных волн. Теоретические кривые (рис.4а-2,3) рассчитаны по формуле¹⁴ в полубесконечной среде без учета (4а-2) и с учетом (4а-3) влияния входной цепи усилителя.

Формула (1) справедлива в предположении бесконечной области генерации звукового импульса/1/. С другой стороны, для одномерной задачи, когда лучок пересекает мишень в виде струны, звуковой импульс представляет собой униполярную волну сжатия. Геометрия нашей мишени является промежуточной. Поэтому ряд отличий экспериментального сигнала от вычисленного теоретически (увеличение доли положительной полу волны в суммарной мощности импульса, более крутой задний фронт отрицательной полу волны) объясняются малой протяженностью области генерации по длине лучка (она ограничена диаметром стержня), которую прослушивает датчик.

При расчете головной волны сигнала с дальнего датчика (рис.4б-3) использовался метод мнимых источников аналогично¹⁴. В обоих случаях наблюдается хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными.

Длительность фронта нарастающего сигнала с ближнего датчика (рис.4а-1) составляет ≈ 70 мкс и определяется расстоянием от оси лучка R и скоростью звука V_p в мишени. Отсюда скорость звука в стержне $V_p \approx 5,7$ км/с, что согласуется с табличными значениями (от 5,6 до 6,1 км/с в зависимости от марки стали).

Зависимость амплитуды сигнала в ближнем датчике от интенсивности мюонного пучка представлена на рис.5.

Теоретические кривые на рис.4 рассчитаны в приближении непрерывного энерговыделения (плотного пучка). Удовлетворительно согласие теоретических и экспериментальных кривых подтверждает справедливость такого предположения при плотности потока мюонов ($3 \cdot 10^5 \div 4 \cdot 10^6$ $\mu/\text{см}^2$). Взаимодействие нейтринного пучка с энергией несколько ТэВ сопровождается образованием большого числа ядерно-электромагнитных каскадов, что позволяет использовать и в этом случае приближение непрерывного энерговыделения.

Проведенные исследования подтверждают справедливость термоакустического механизма генерации звука концентрирующим излучением в твердых средах и позволяют использовать этот механизм и модель линейной цилиндрической антенны для расчетов параметров акустических сигналов, генерируемых нейтринными пучками высоких энергий.

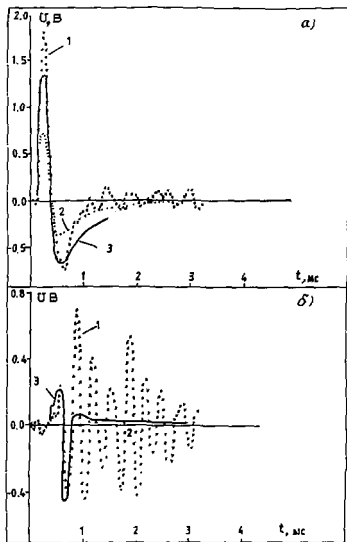


Рис. 4. Акустический сигнал в стальном стержне от мюонного пучка с ближнего (а) и дальнего (б) датчиков: 1 - экспериментальные данные; 2,3 - теоретический расчет без учета (2) и с учетом (3) входной цепи усилителя.

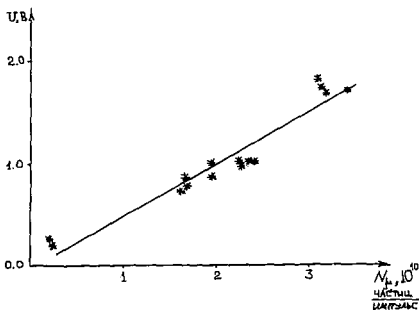


Рис. 5. Зависимость амплитуды сигнала от интенсивности мюонного пучка.

2. ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ ПУЧКОВ НЕЙТРИНО БУДУЩИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

В настоящее время ведется или планируется строительство протонных ускорителей мультитизных энергий: УНК с $E = 3$ ТэВ (Россия), LHC с 8 ТэВ (ЦЕРН), SSC 20 ТэВ (США). Обсуждается также возможность создания в нашей стране ускорителя на энергию протонов 25(50) ТэВ на "теплых" магнитах с перспективой их замены на сверхпроводящие и соответствующим увеличением энергии протонов до 250 (500) ТэВ. В связи с этим для анализа перспектив использования нейтринных пучков от новых ускорителей для решения прикладных задач, основанных на регистрации акустических сигналов, проведены расчеты параметров этих сигналов для энергии протонов $E_p = 3 \div 50$ ТэВ при числе протонов N_p в цикле ускорения. Они помещены в табл.2 (характеристики среды: плотность $2,5$ г/см³, параметр Грюнайзера 1,26, скорость продольных волн 6 км/с). Для оценок отношения сигнал/шум использовались данные об уровне сейсмических шумов, приведенные в работе¹¹.

Таблица 2. Расчетные значения акустических сигналов от мультитронных протоновых ускорителей.

E_p , ТэВ	N_p	L_1^* , км	L_2^{**} , км	R , км	σ , м	W , эрг/см	$P_{\text{макс}}$, дпк/см	f_0 , Гц	Сигнал/ шум
3	$4 \cdot 10^{14}$	3,7	10	0,025	1	4,2	$4 \cdot 10^{-6}$	800	$2 \cdot 10^{-3}$
3	$4 \cdot 10^{14}$	3,7	1000	1	100	4,2	$6 \cdot 10^{-10}$	8	10^{-8}
25	10^{15}	1	1000	1	8	30	$1,6 \cdot 10^{-7}$	120	$7,3 \cdot 10^{-6}$
50	10^{15}	1	1000	1	4	60	10^{-6}	240	$7,7 \cdot 10^{-5}$

* L_1 - длина распадного канала, в котором формируется нейтринный пучок;

** L_2 - расстояние от места формирования нейтринного пучка до области регистрации акустического излучения.

Предсказываемое расчетами чрезвычайно малое отношение сигнал/шум ставит задачу разработки специальных методов обнаружения слабых акустических сигналов от пучков частиц. Такие методы интенсивно развиваются в настоящее время^{15,16}, экспериментальное изучение слабых сигналов возможно на мюонном пучке нейтринного канала У-70 при отношении сигнал/шум порядка $10^{-1} \div 10^{-4}$.

Также актуален поиск новых методов и задач использования акустических сигналов от нейтринных пучков, облегчающих их выделение на фоне сейсмического шума. Одна из таких задач рассмотрена ниже.

3. ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ОЧАГОВЫХ ЗОН НЕЙТРИННЫМ ПУЧКОМ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Одним из признаков приближающегося землетрясения является изменение отношения $(V_p/V_s)^{17,18}$, где V_p и V_s - скорости продольных и поперечных волн в очаговой зоне (рис.6), причем отмечается, что V_s остается практически постоянной. При этом главный толчок приходится на отрезок времени, составляющий около 10% от продолжительности аномального периода¹⁹. Также была установлена эмпирическая зависимость между максимальным отклонением (V_p/V_s) в очаге и магнитудой землетрясения¹⁰.

Экспериментальное наблюдение этого явления проводится путем определения времен пробегов продольных и поперечных волн от глубинных сейсмических толчков через последующий очаг землетрясения (см. рис.6). Для искусственной генерации сейсмических волн проводят взрывы на

поверхности земли, однако возникающая после взрыва сложная картина распространения и отражения волн в неоднородных земных массивах затрудняет наблюдение за поведением сейсмоскоростей, и, кроме того, такой способ не позволяет контролировать развитие сейсмических процессов по глубине очага.

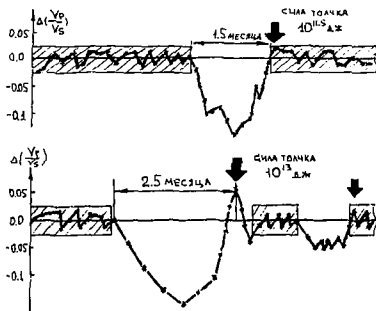


Рис. 6. Изменение отношений сейсмических скоростей, предшествовавшее землетрясениям разной силы в Гарме, СССР. По оси ординат откладывается относительное отклонение величины (V_p/V_s) от нормального значения, полученное из отношения времени пробега P- и S-волн (t_p и t_s соответственно), получаемых близкорасположенным очагом, через исследуемый регион. Затенены интервалы времени, в течение которых (V_p/V_s) не выходит за пределы статистического разброса.

Известно, что сейстринный пучок как глубинный генератор продольных акустических волн (рис.1), можно с хорошей точностью определять их скорость в веществе, лежащем между осью пучка и датчиком, по времени прихода сигнала в датчик. Разрешающая способность метода по вертикали, горизонтали и вдоль по пучку достаточно высока, поскольку характерные радиусы очагов землетрясений составляют единицы или десятки километров. Кроме того, волны, приходящие из глубинного источника, будут чувствительнее к факторам, вызывающим изменение V_p и

(V_p/V_s), чем если бы они поступали из источника, находящегося вблизи поверхности^[1].

В данном случае целью измерений является регистрация только времени прихода сигнала, а не анализ его амплитуды или формы, что, возможно, упрощает задачу.

Поскольку целью является измерение временных вариаций скорости звука в заранее известных областях сейсмической активности, то достаточно иметь стационарный распадный канал и использовать системы приемников-сейсмостанций, имеющих ее в настоящее время. Это позволяет рассчитывать на увеличение протяженности распадного канала и, следовательно, интенсивности нейтринного пучка, разработку эффективной регистрирующей аппаратуры в специальных лабораторных условиях сейсмостанций для выявления и накопления полезных сигналов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный экспериментальный материал по генерации звука импульсным пучком мюонов позволяет сделать вывод о правильности понимания механизма образования звуковой волны в твердом теле под действием проходящего через среду проникающего ионизирующего излучения. Это дает, по нашему мнению, основания для достаточно надежного прогнозирования возможностей применения интенсивных пучков нейтрино от протонных ускорителей следующих поколений в геофизических исследованиях.

Рассмотрена задача использования акустических сигналов от нейтринных пучков для прогноза землетрясений и показаны некоторые преимущества этой методики по сравнению с существующими.

Список литературы

- [1] De Rujula A. et al. // Phys. Rep. 1983. V.93. P.311.
- [2] Царев В.А., Чечин В.А. // ЭЧАЯ. 1986. Т.16. Вып.3. С.389.
- [3] Боллырев Е.М. и др. // Материалы 7 Рабочего совещания по нейтринному детектору ИФЗ-ОИЯИ. Дубна, 1986 г.
- [4] Борисов А.Б. и др. // ЖЭТФ. 1991. Т.100. Вып.4(10). С.1121.
- [5] Воронцов Ю.И. Теория и методы акустических измерений. М.: Наука, 1989.

- [6] Обнаружение изменяющихся свойств сигналов и динамических систем. / Под ред. М.Бассвилль, А.Баявентпста. - М.: Мир, 1989.
- [7] Саловский М.А. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. - М.: Наука, 1987.
- [8] Райс Д. - Механика очага землетрясения. - М.: Мир, 1985.
- [9] Рикитакэ Т. Предсказание землетрясений. - М.: Мир, 1979.
- [10] Геофизические условия в очаговых зонах сильных землетрясений. - М.: Наука, 1983.
- [11] Касахара К. Механика землетрясений. - М.: Мир, 1985.

Рукопись поступила 7 мая 1992 года.

А.Б.Борисов и др.
Исследование генерации звуковых сигналов в мюонном пучке и замечание
об одной из перспектив нейтринной геофизики.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы ИТЭХ
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Л.П.Тяпкина.

Подписано к печати 13.05.1992 г. Формат 60 x 90/16.
Офсетная печать. Печ.л. 0,70. Уч.-изд.л. 0,83. Тираж 250. Заказ 258.
Индекс 3649. Цена 1р 30к.

Институт физики высоких энергий, 142284, Протвино Московской обл.

1р.30к.

Индекс 3649

П Р Е П Р И Н Т 92-66, И Ф В Э, 1992
