

## ОБ АНОМАЛЬНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ОТКЛИКЕ НАПРЯЖЕННОЙ СРЕДЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕЙТРИННОГО ПУЧКА

О.Б. Хаврошкин\*, В.А. Царев, В.В. Цыплаков\*, В.А. Чечин.

УДК 123; 550.348.42

*Показано, что акустический сигнал, генерируемый нейтринным пучком в Земле, может оказаться существенно больше термоакустического сигнала, если учесть наличие в земной коре областей с напряжением, близким к критическому.*

В последнее время значительный интерес вызывает возможность исследования Земли с помощью нейтринных пучков высоких энергий [1,2]. В настоящей работе рассматривается взаимодействие нейтринных пучков с веществом Земли, находящимся в напряженном состоянии. Такое состояние типично для пород, слагающих литосферу, и обусловлено целым рядом причин, таких как давление, течения в подстилающем литосферу астеносферном слое, лунно-солнечные приливы и т.д. Наличие в земной коре областей с напряжением, близким к критическому, подтверждается разнообразными сейсмическими процессами, в частности, региональными высокочастотными сейсмическими шумами (ВСШ), которые повсеместно генерируются в породах как результат образования и роста трещин, сдвигов и т.п. Обнаружена также глубокая модуляция ВСШ слабыми низкочастотными деформирующими процессами (например, лунными приливами) [3]. Все это дает основание рассматривать некоторую часть объема  $\eta$  земной коры как сейсмически активную среду, которая при воздействии относительно малых возмущений излучает запасенную в ней упругую энергию в виде сейсмических волн.

Роль "спускового механизма" в данных условиях может играть ядерный каскад, образующийся при взаимодействии высокоэнергичного нейтрино с веществом. Наиболее эффективно возникновение микротрещин в напряженной породе будет происходить, по-видимому, на "тепловых пиках" вдоль треков малоэнергичных осколков ядер, где линейная плотность энерговыделения  $dW_T/dx$  может достигать  $\sim 10^{10}$  эВ/см. Поперечный размер области

\* Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР.

энерговыведения  $\gamma_0$  определяется пробегом  $\delta$ -электронов с энергией  $\sim 1$  кэВ и имеет порядок  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$  см. Образование самопроизвольно растущей микротрещины на таком "тепловом пике" энергетически возможно [4] при  $dW_T/dx \cdot 2r_0 \geq \gamma$  (а) и  $\sigma > \sigma_0 = (2/\pi) \sigma_* \arccos \exp(-d/r_0)$  (б). Здесь  $\gamma$  — поверхностная энергия;  $\sigma$  и  $\sigma_0$  — напряжение в породе и предельное напряжение разрушения;  $d = \pi \gamma E / 4\sigma_*^2$ ;  $E$  — модуль Юнга.

Условие (а) дает  $\gamma \leq 10^{-3} - 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>. Такие значения  $\gamma$  характерны для твердых хрупких веществ (например,  $\gamma \approx 2 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup> для силикатного стекла и  $0,4 \cdot 10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup> для каменной соли) и вполне соответствуют свойствам горных пород. Условие (б) требует, чтобы напряжение  $\sigma$  было весьма близко к критическому  $\sigma_*$ . Учитывая характерные свойства земных пород, будем полагать  $(\sigma - \sigma_*)/\sigma_* = 10^{-8}$ .

Образовавшаяся квазицилиндрическая микротрещина растет вначале в поперечном направлении, а затем и в продольном. Рост трещины прекращается, если ее край встречается с какой-либо неоднородностью, другой трещиной или же областью с меньшим напряжением. Акустический сигнал от трещины, достигшей размеров  $l$ , на расстоянии  $R \gg l$  имеет вид:

$$P_1(R, t) \sim \sigma \frac{l}{R} I \left( \frac{c_0 t - R}{l} \right), \quad (1)$$

где  $c_0$  — скорость звука;  $I(\xi)$  — безразмерная биполярная функция единичной амплитуды, заметно отличающаяся от нуля при  $|\xi| \lesssim 1$ . Конкретный вид  $I(\xi)$  зависит от деталей развития трещины и ее формы. Суммарный акустический сигнал, обусловленный образованием микрополостей при прохождении нейтринного пучка через сейсмически активную среду, определяется выражением

$$P(R, t) \sim \sigma l \eta \int \frac{d\vec{r}}{|\vec{R} - \vec{r}|} I \left( \frac{c_0 t - |\vec{R} - \vec{r}|}{l} \right) \frac{dn_\nu}{d\vec{r}}, \quad (2)$$

где  $dn_\nu/d\vec{r}$  — число  $\nu N$ -взаимодействий в единице объема. Поскольку поперечный размер нейтринного пучка много больше  $l$ , функцию  $I(\xi)$  можно заменить на бесконечную узкую функцию  $d\delta(\xi)/d\xi$ . После этого (2) совпадает с выражением для термоакустического сигнала [2,5], если в нем сделать формальную замену коэффициента Грюнайзена  $A$  на  $A_{an} = \sigma l^3 \eta / E_0$ , где  $E_0$  — энергия, выделяющаяся при  $\nu N$ -взаимодействии. Для оценки  $A_{an}$  возьмем следующие приемлемые с геофизической точки зрения значения параметров:  $\sigma \approx 10^5$  Н/см<sup>2</sup>,  $l = 1$  см,  $\eta = 10^{-8}$ . Тогда при  $E_0 = 1$  ТэВ  $A_{an} = 10^2$ . Это

значение следует сравнить с коэффициентом Грюнайзена, который для характерных земных пород имеет значение  $A \sim 0,1$ .

Следовательно, рассмотренный "аномальный" акустический сигнал может иметь величину, существенно большую, чем термоакустический. Это может оказаться важным для целого ряда геофизических приложений, таких как разведка нефти и газа, исследование напряженных зон Земли, "профилактика" землетрясений и т.п. Другой аспект связан с возможным использованием сейсмически активной среды Земли для детектирования потоков космических нейтрино.

Поступила в редакцию 2 июля 1985 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова Л. В., Зацепин Г. Т. Изв. АН СССР, сер. физ., 38, 1060 (1974).
2. De Rujula A. et al. Phys. Repts., 99, 341 (1983).
3. Рыкунов Л. Н., Хаврошкин О. Б., Цыплаков В. В. ДАН СССР, 252, 836 (1980).
4. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев, Наукова думка, 1968.
5. Аскарьян Г. А., Долгошеин Б. А. Письма в ЖЭТФ, 25, 5 (1977).