

ИЯИ РАН, Семинар отдела ФВЭ,
Март 2013

Гидроакустическое детектирование нейтрино сверхвысоких энергий

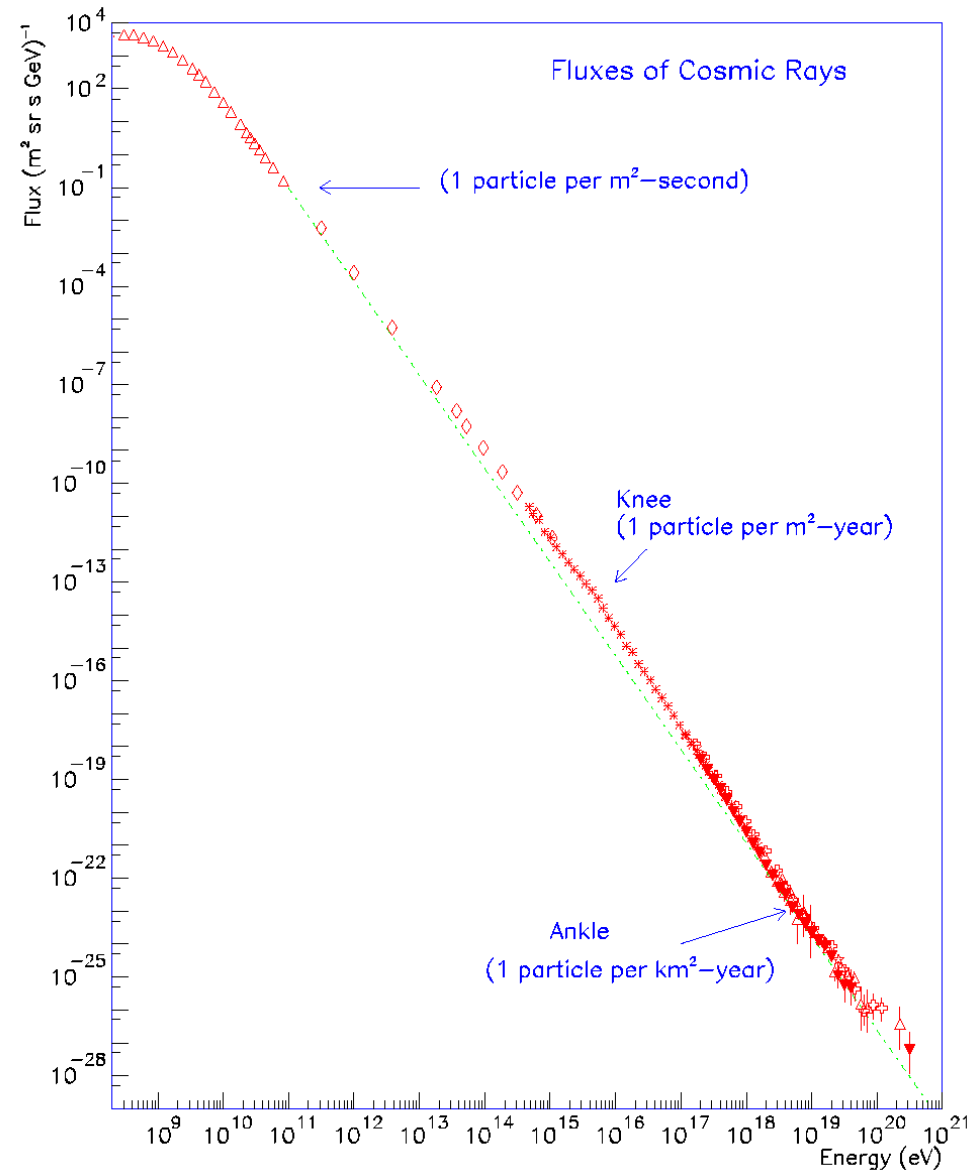
МИРОНОВИЧ Анна Александровна

Мотивация

Изучение энергетического спектра космических лучей, в частности нейтрино сверхвысоких энергий (10^{15} - 10^{21} эВ), необходимо для решения фундаментальных проблем астрофизики, в том числе может ответить на вопрос: какие астрофизические объекты являются источниками космических лучей максимальных энергий.

Экспериментальный спектр космических лучей

Частицы с
энергиями выше
 10^{18} эВ –
внегалактического
происхождения.



Два сценария генерации КЛ сверхвысоких энергий

- 1) Ускорительный сценарий “bottom-up”.
Например ускорение в ударных волнах при взрыве сверхновых, ускорение в АЯГ, и т.д.
- 2) Сценарий “top-down” . Распад сверхтяжёлых исходных частиц, которые возникли на ранних стадиях развития Вселенной и сохранились до наших дней.

Возможные перспективные экспериментальные методы

- 1) КМЗ оптические нейтринные телескопы с черенковскими детекторами (глубоководные, антарктический лёд)
- 2) Гидроакустические нейтринные телескопы, предложенные еще в 70-х годах [1-3].

[1] Askaryan G.A., et al., Nucl. Inst. Meth., 1979. 164: p. 267.

[2] Bowen, T., Conference Papers, 15th Int. Cos. Ray Conf., 1977. 6: p. 277.

[3] Learned, J., *Acoustic radiation by charged atomic particles in liquids: An analysis*. Phys. Rev. D, 1979. 19: p. 3293

Цель исследования

Целью данной работы является расчёт параметров акустических импульсов от электронно-фотонных и электронно-ядерных каскадов генерируемых нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в воде, что позволит теоретически изучить возможность детектирования нейтрино сверхвысоких энергий методами гидроакустики.

**Гидроакустический метод
регистрации каскада
от КЛ СВЭ**

Основные методы регистрации каскадов от СВЭ нейтрино

На сегодняшний день основными методами регистрации каскадов от СВЭ нейтрино являются: *оптический, радиоволновой и акустический.*

Акустический метод основан на эффекте возбуждения звуковых колебаний при образовании каскада частиц. Механизм генерации звука – термоакустический. В результате ионизационных потерь происходит нагрев и соответствующее расширение среды.

Основная система уравнений

Считая, что не происходит изменения агрегатного состояния, и что скорость расширения среды много меньше скорости звука, получается система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p' + \eta \Delta \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla(\nabla, \mathbf{v}) \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\rho(\nabla, \mathbf{v}) \\ \rho T \frac{\partial s'}{\partial t} = \kappa \Delta T' + \frac{\partial Q}{\partial t} \\ p' = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_v s' \equiv c^2 \rho' + \frac{\alpha c^2 \rho T}{C_p} s' \\ s' = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p + \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T p' \equiv \frac{C_p}{T} T' - \frac{\alpha}{\rho} p' \end{array} \right.$$

Здесь $\rho, \mathbf{v}, p, T, s$ – плотность, скорость, давление, температура и удельная энтропия жидкости, штрих означает малое приращение соответствующего параметра среды; η и ζ – коэффициенты сдвиговой и объёмной вязкости; C_p, C_v – удельные теплоёмкости; α, κ, χ – коэффициенты объёмного теплового расширения, тепло- и температуропроводности; Q –

Уравнение генерации звука

Воспользовавшись системой, можно написать искомое уравнение генерации звука:

$$\Delta p' - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + 2\Gamma \Delta \frac{\partial p'}{\partial t} = \frac{\alpha \rho T}{C_p} \left(\frac{4/3\eta + \xi}{\rho} - \chi \right) \Delta \frac{\partial s'}{\partial t} - \frac{\alpha}{C_p} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2},$$

$$\Gamma \equiv \frac{1}{2c^2} \left[\frac{4/3\eta + \xi}{\rho} + \chi \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) \right].$$

Поскольку характерные времена для температурной проводимости и вязкости $\frac{l^2}{\chi}$ и $\frac{l^2}{\eta/\rho}$ и $\frac{l^2}{\rho c^2}$, где

l - характерный поперечный размер траектории) намного больше характерной длительности акустического микроимпульса, то их влиянием можно пренебречь и не учитывать первый член в правой части уравнения.

Решение уравнения

То есть, уравнение термогенерации звука может быть представлено в виде:

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{C_p} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}$$

В приближении цилиндрически-симметричного каскада можно записать:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial p}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\alpha}{C_p} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}$$

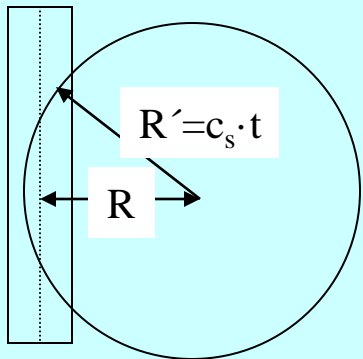
Решение уравнения определяется интегралом Кирхгофа:

$$p(R, t) = \frac{\alpha}{4\pi C_p} c^2 \frac{\partial}{\partial R'} \int_{S_R^{R'}} \frac{Q(R)}{R'} d\sigma$$

Геометрия расчёта решения

Поскольку энергия каскада выделяется за время порядка 10^{-7} с, а длительность сигнала порядка 10^{-5} с, то можно считать, что энергия каскада выделилась мгновенно. В этом случае имеем:

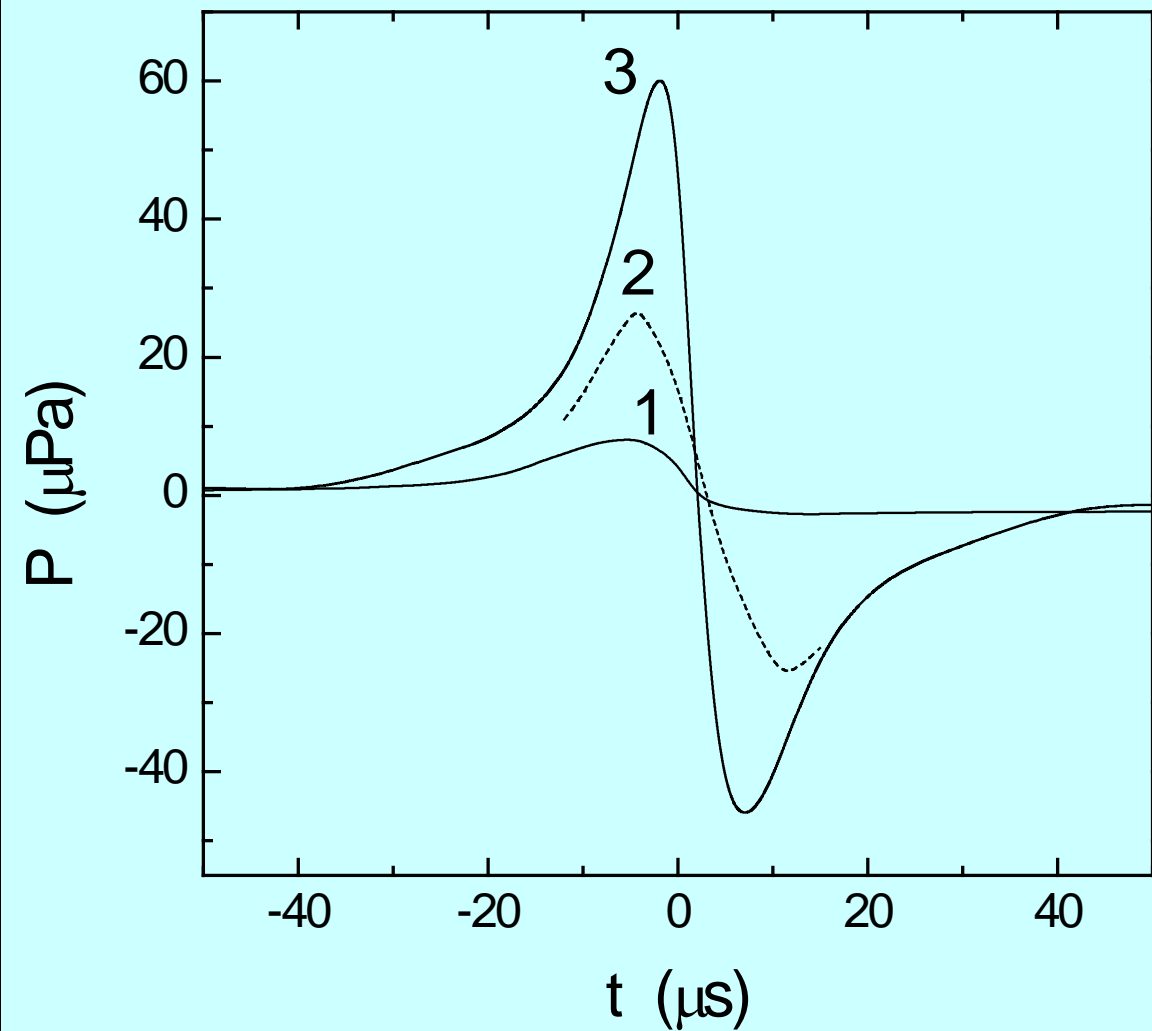
$$p(R, t) = \frac{\alpha}{4\pi C_p} c^2 \frac{\partial}{\partial R'} \int_{S_R^{R'}} \frac{Q(R)}{R'} d\sigma$$



где интегрирование проводится по сфере с центром в R и радиусом $R' = c_s \cdot t$.

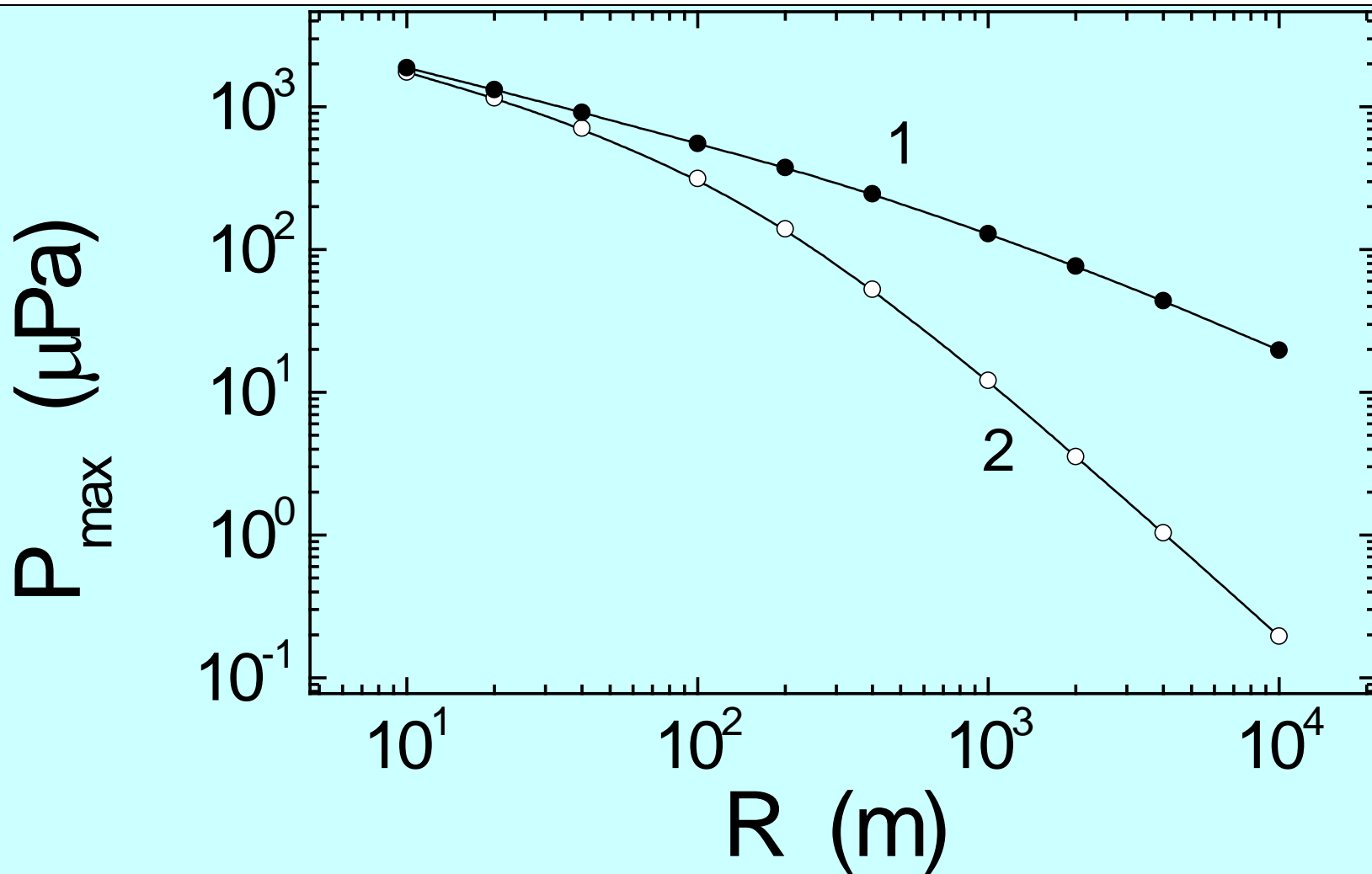
**Оценка параметров
гидроакустического сигнала
для каскада от частицы с
 $E_0=10^7$ ГэВ**

Акустический импульс в морской воде от каскада с $E_0 = 10^7$ ГэВ



- 1 – Learned**
- 2 – Аскарян**
- 3 – наш расчёт**

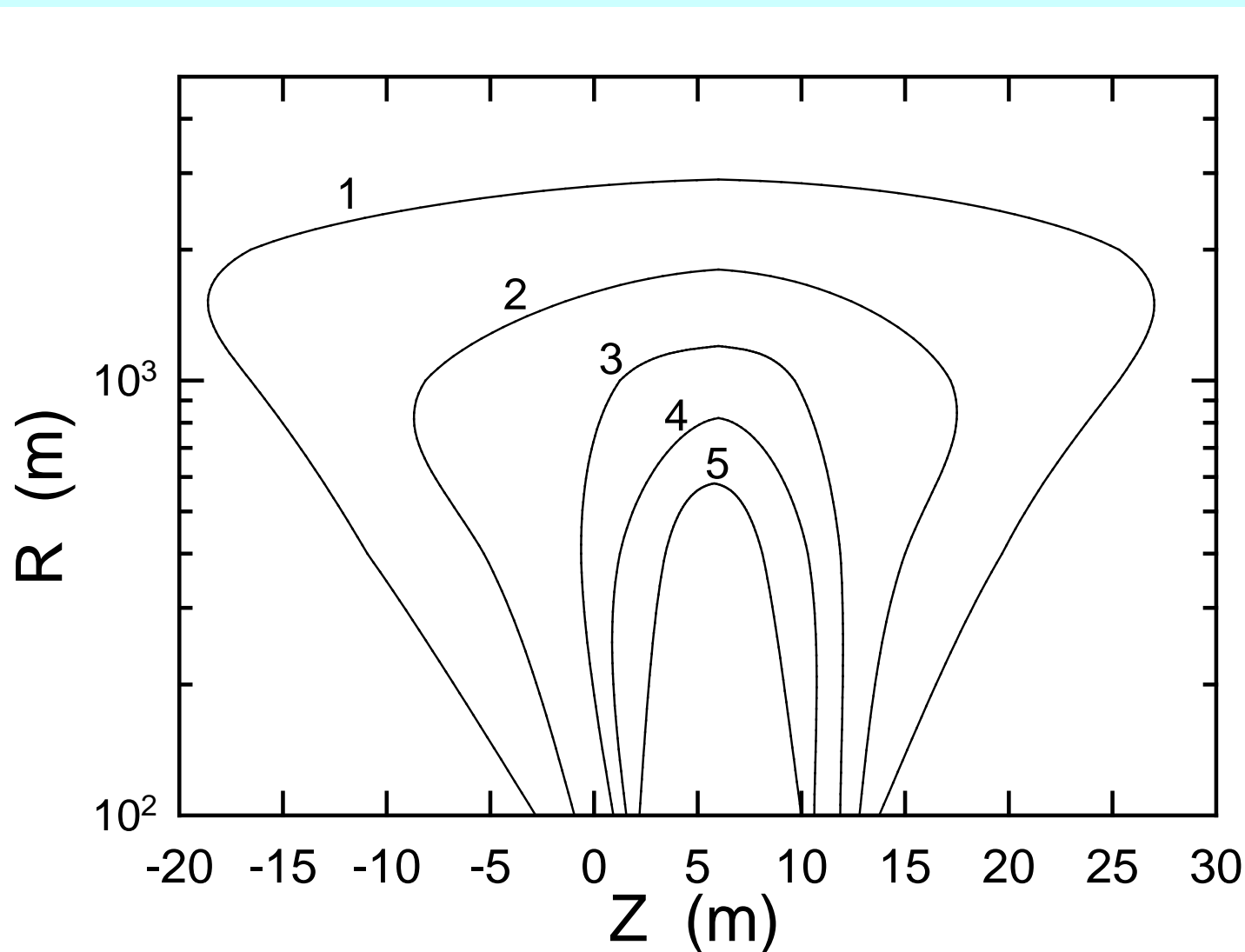
Амплитуда акустического импульса в морской воде от расстояния до оси каскада ($E_0 = 10^7$ ГэВ)



1 – без учёта затухания
2 – с учётом затухания

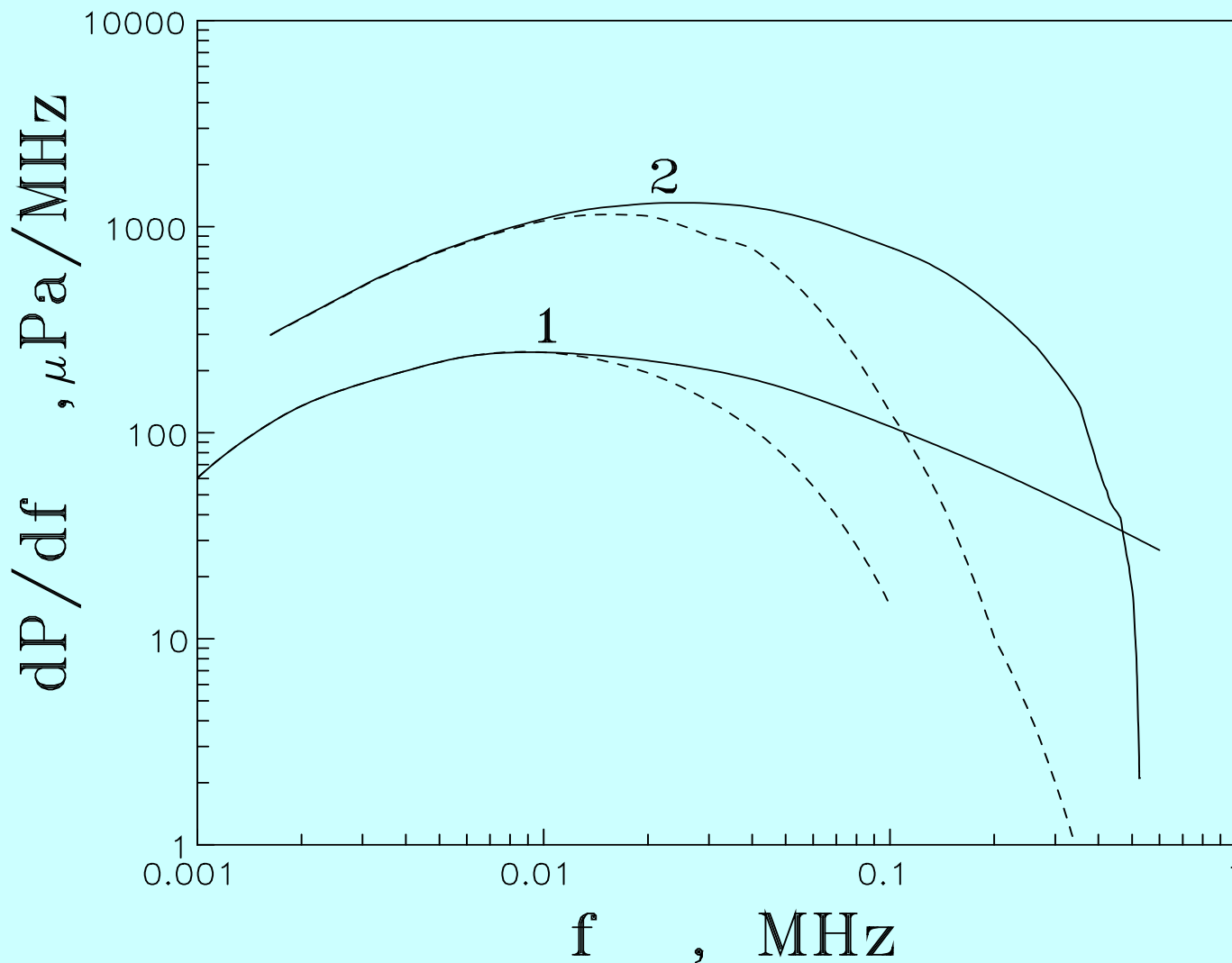
Очевидно, что учёт затухания существенен при $R > 50$ м

Изобары для пространственного распределения акустического импульса



(1) 2 мкПа, (2) 4 мкПа, (3) 10 мкПа, (4) 20 мкПа, (5) 40 мкПа ($E_0=10^7$ ГэВ)

Частотные характеристики акустического импульса ($E_0=10^7$ ГэВ)



(1) Аскарян, (2) наш расчёт

Преимущества и недостатки гидроакустического метода

Основной недостаток: энергетический порог детектирования в акустическом методе на несколько порядков больше чем для оптического глубоководного метода ($E_{opt} \sim 10-50$ ГэВ).

Достоинство: затухание сигнала намного слабее, чем в других методах, можно строить детекторы гигантских размеров – кубический километр и больше (KM3 детекторы).

Оценка эффективного объёма детектирования от параметров системы детектирования (SADKO)

Эффективный объем, $V_{\text{eff}} \cdot 10^{-7}, \text{ m}^3$	0.53	1.6	4.3	21	95
Max расстояние, $R, \text{ m}$	600	800	1200	1800	2900
Min уровень сигнала, $P, \text{ Pa}$	40	20	10	4	2
Число гидрофонов, n	100	400	1600	10000	40000
Отношение, $V_{\text{eff}} / V_{\text{g}}, \%$	0.59	0.75	0.59	0.86	0.93

Butkevich A.V., Dedenko L.G., Karaevsky S.K., Mironovich A.A., Provorov A. L. , Zheleznykh I. M., "Prospects for radio-wave and acoustic detection of ultra- and superhigh-energy cosmic neutrinos (cross sections, signals, thresholds)", Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra, May-June 1998, vol.29, (no.3):659-74. Translation: Physics of Particles and Nuclei, May-June 1998, vol.29, (no.3):266-272.

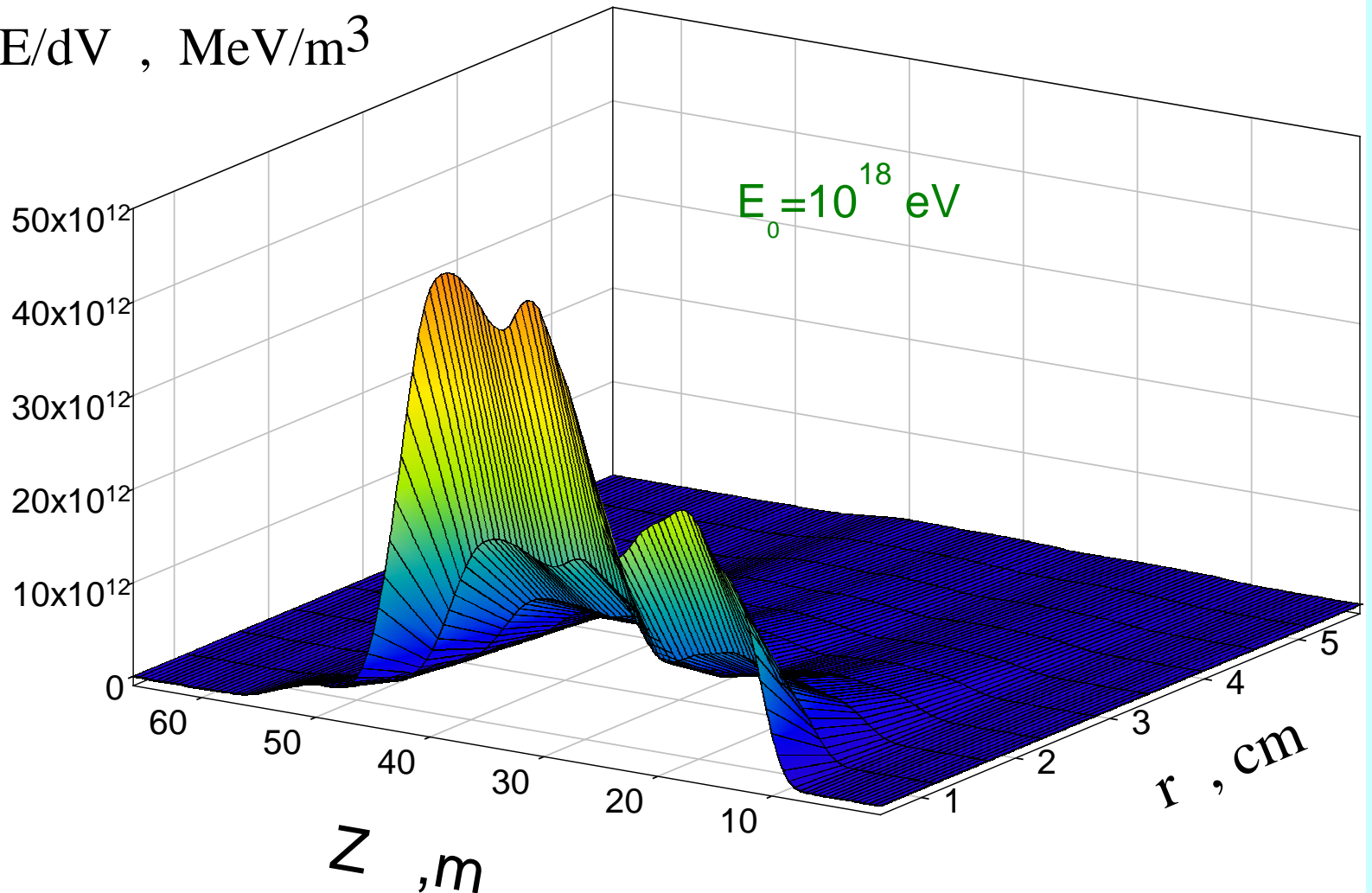
**Расчёт параметров сигнала
для каскадов от частиц с**

$$E_0 = 10^{18} - 10^{21} \text{ эВ}$$

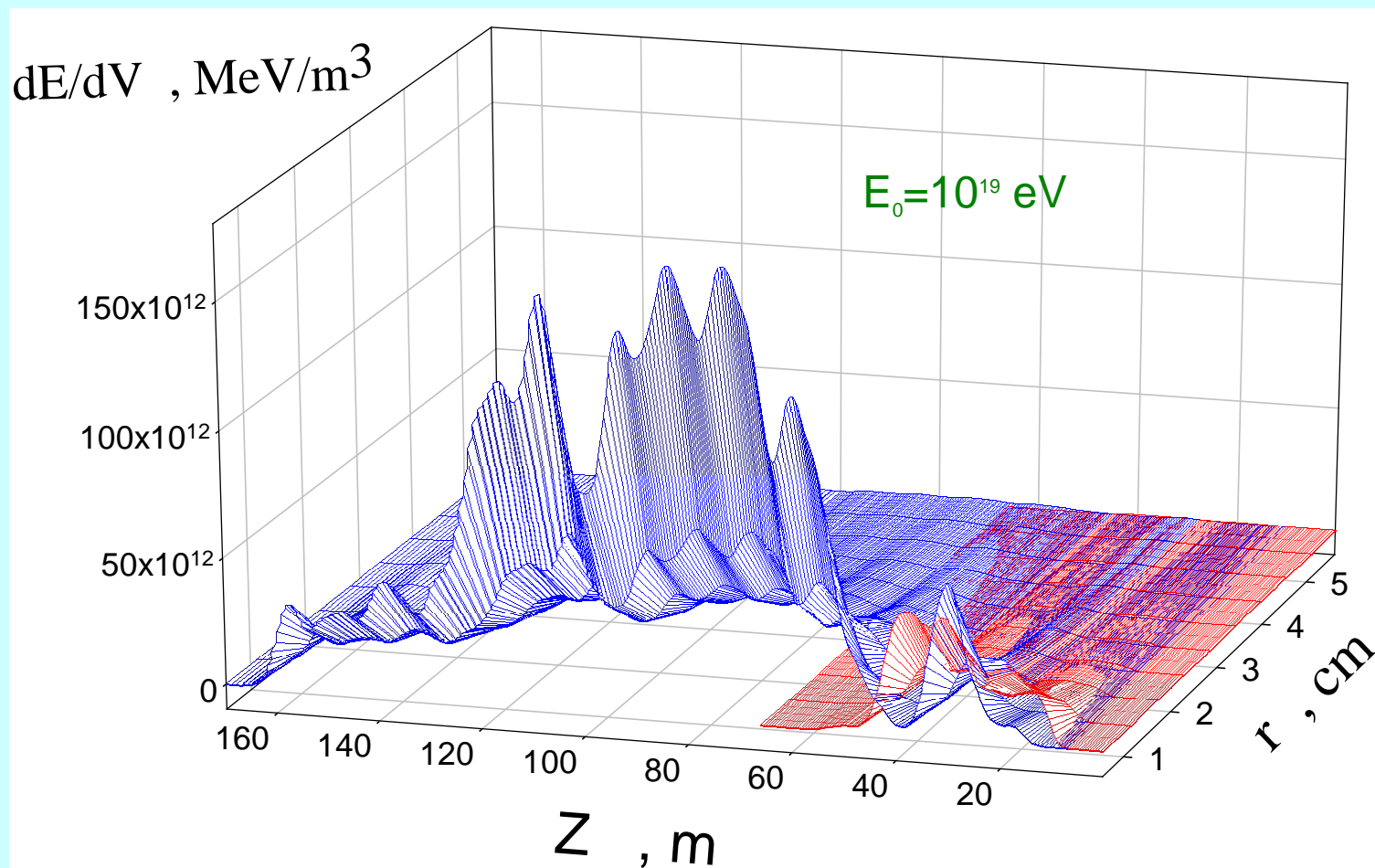
**Гибридный метод на основе
NKG функции**

Функция источника для каскада с LPM эффектом (NKG, $E_0=10^{18}$ эВ)

dE/dV , MeV/m^3



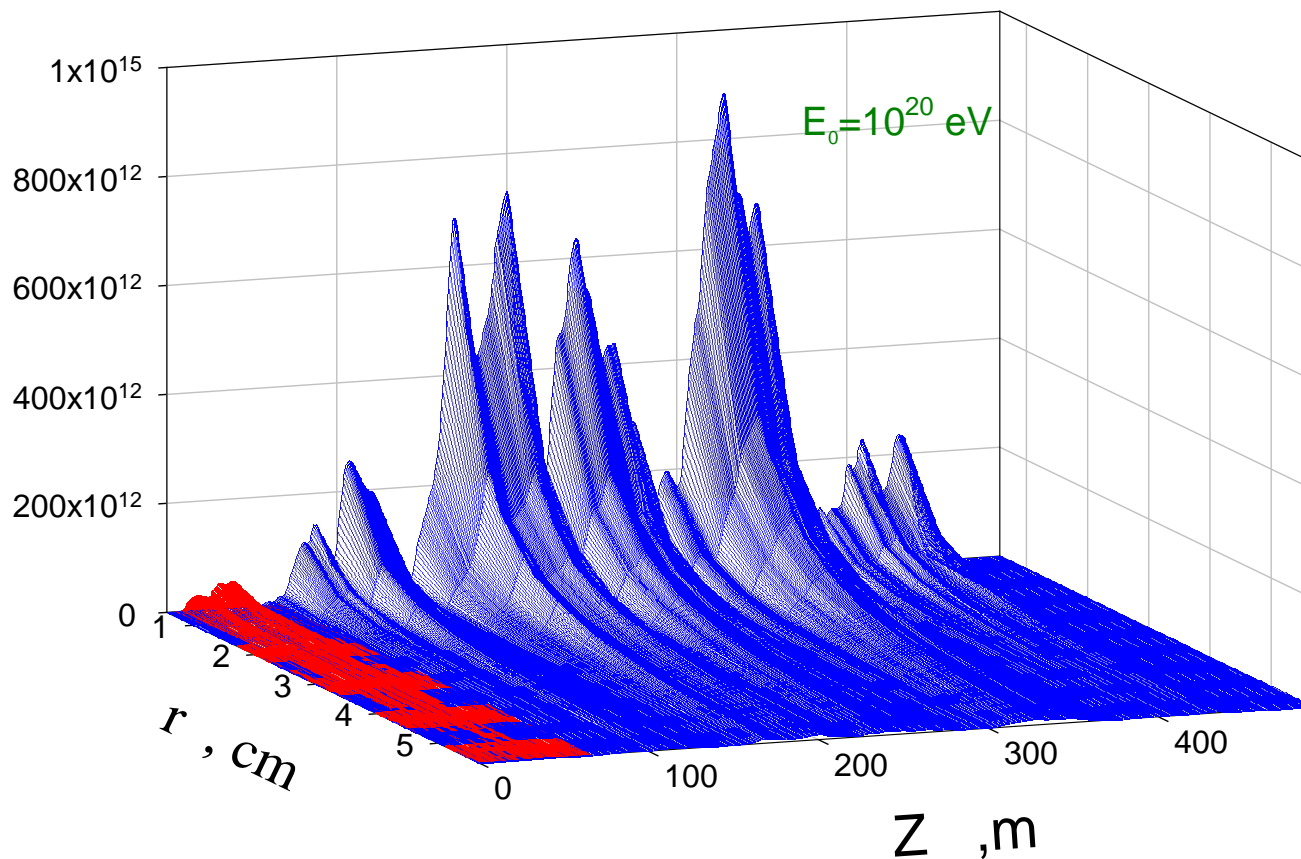
Функция источника для каскада с LPM эффектом (NKG, $E_0=10^{19}$ эВ)



В сравнении с $E_0=10^{18}$ (красные линии)

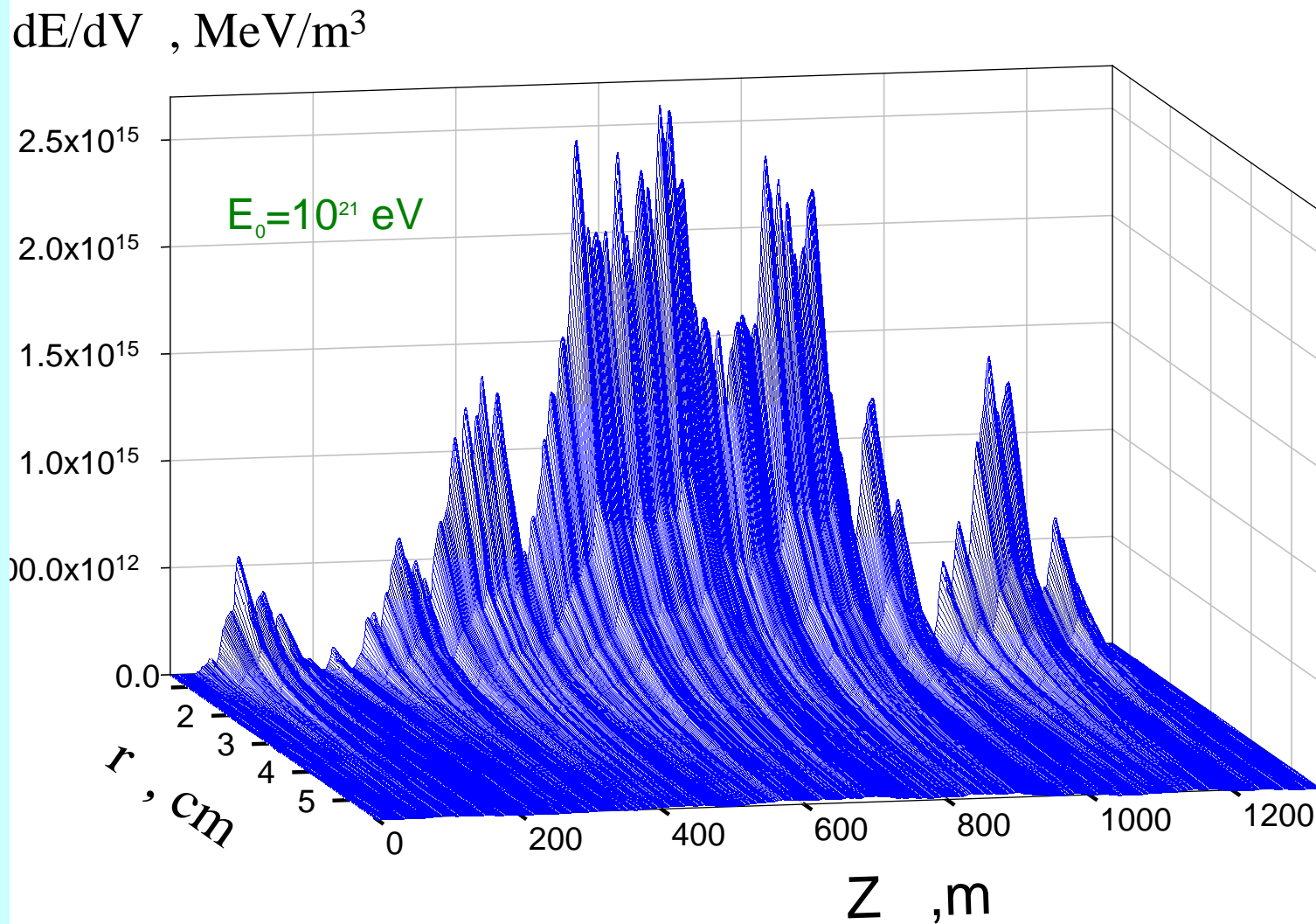
Функция источника для каскада с LPM эффектом (NKG, $E_0=10^{20}$ эВ)

dE/dV , MeV/m³

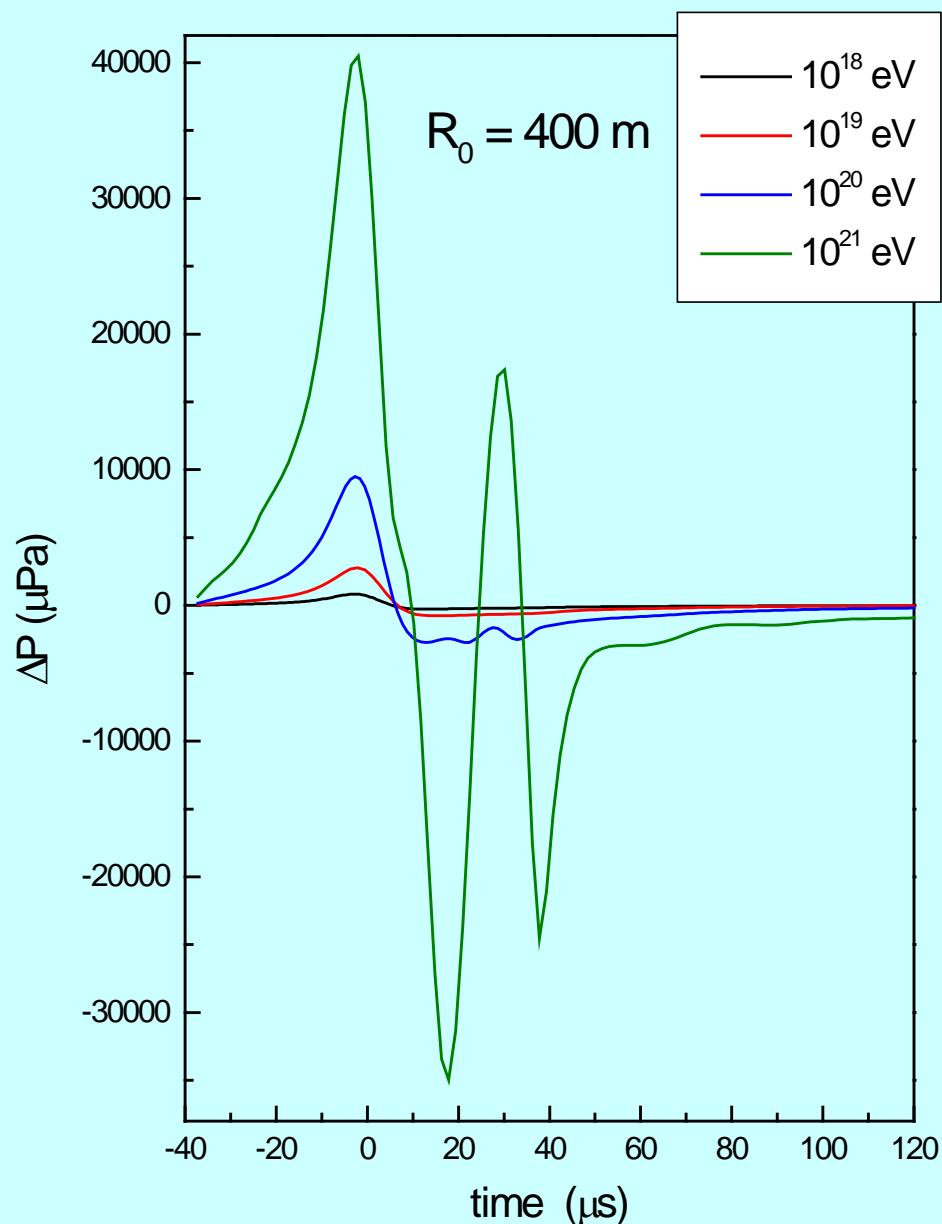


В сравнении с $E_0=10^{18}$ (красные линии)

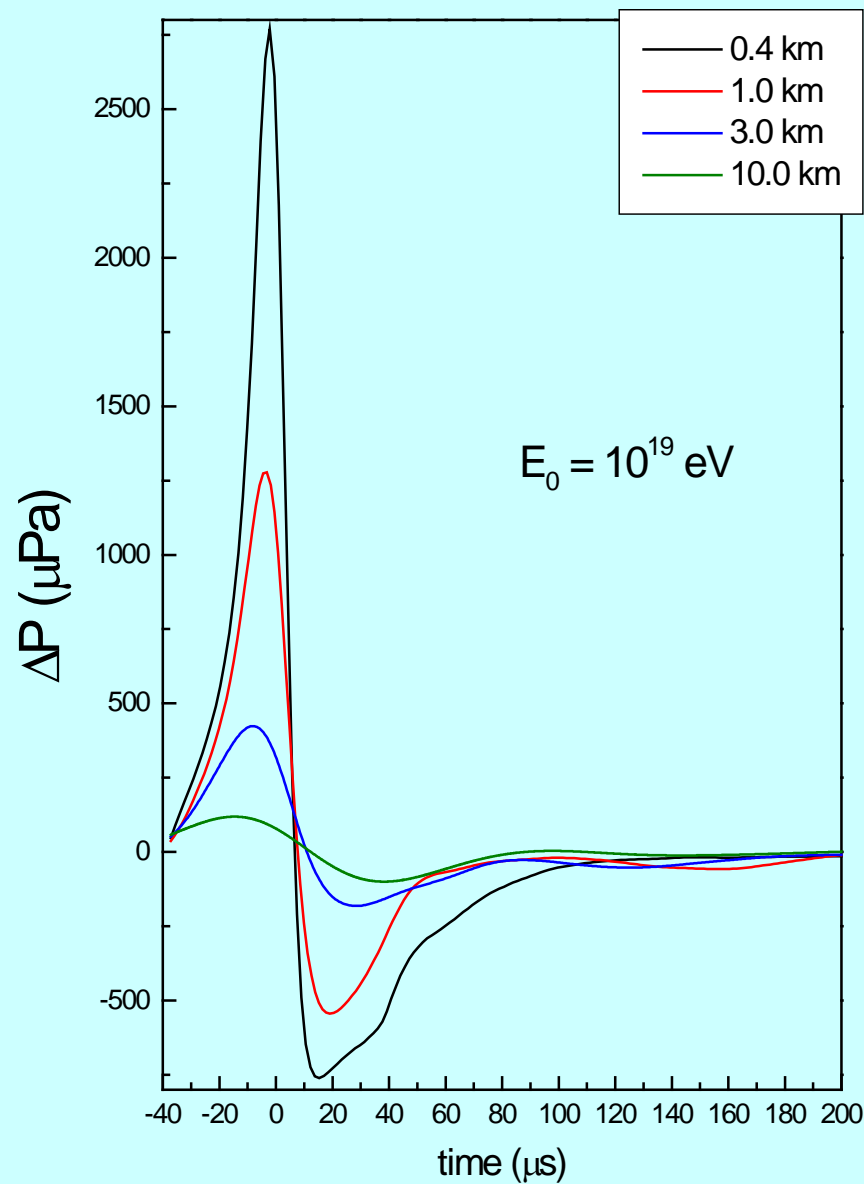
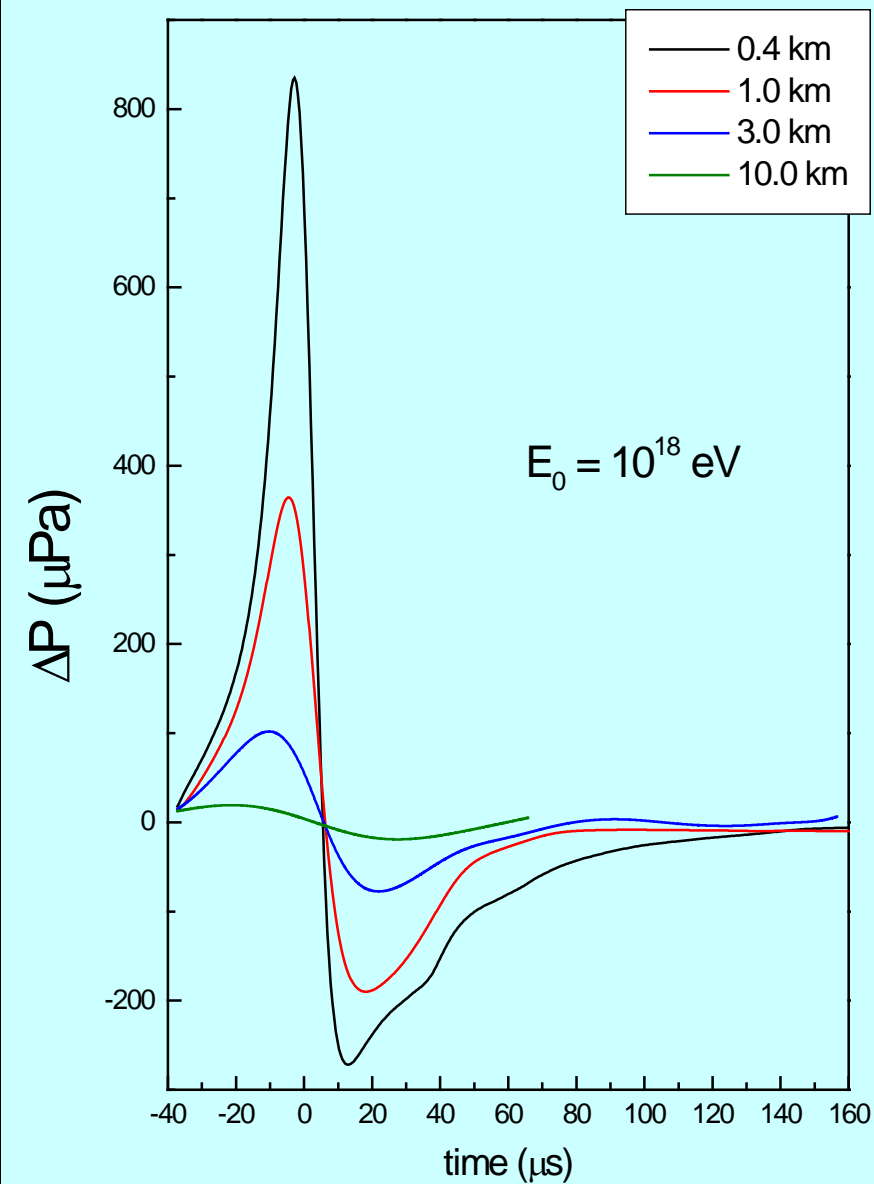
Функция источника для каскада с LPM эффектом (NKG, $E_0=10^{21}$ эВ)



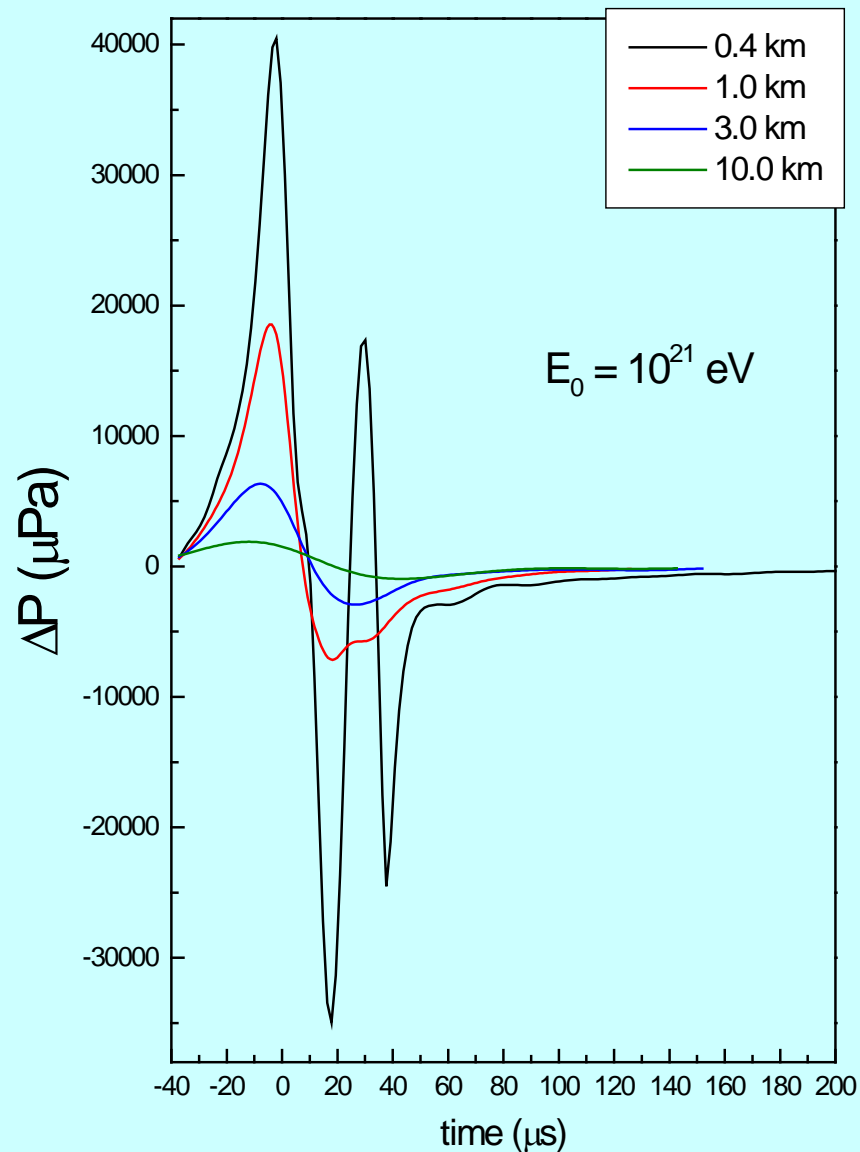
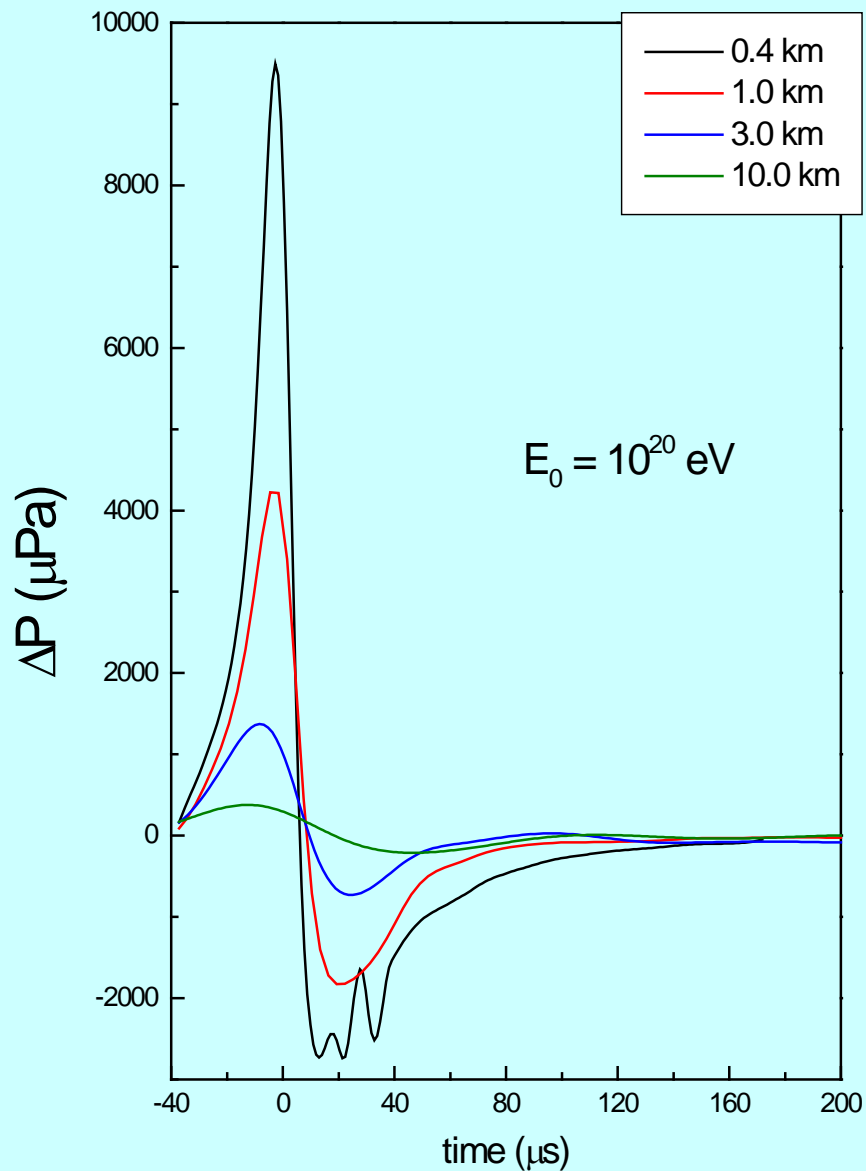
Акустические импульсы в морской воде от каскадов с учётом LPM (NKG, $R_0=400\text{м}$)



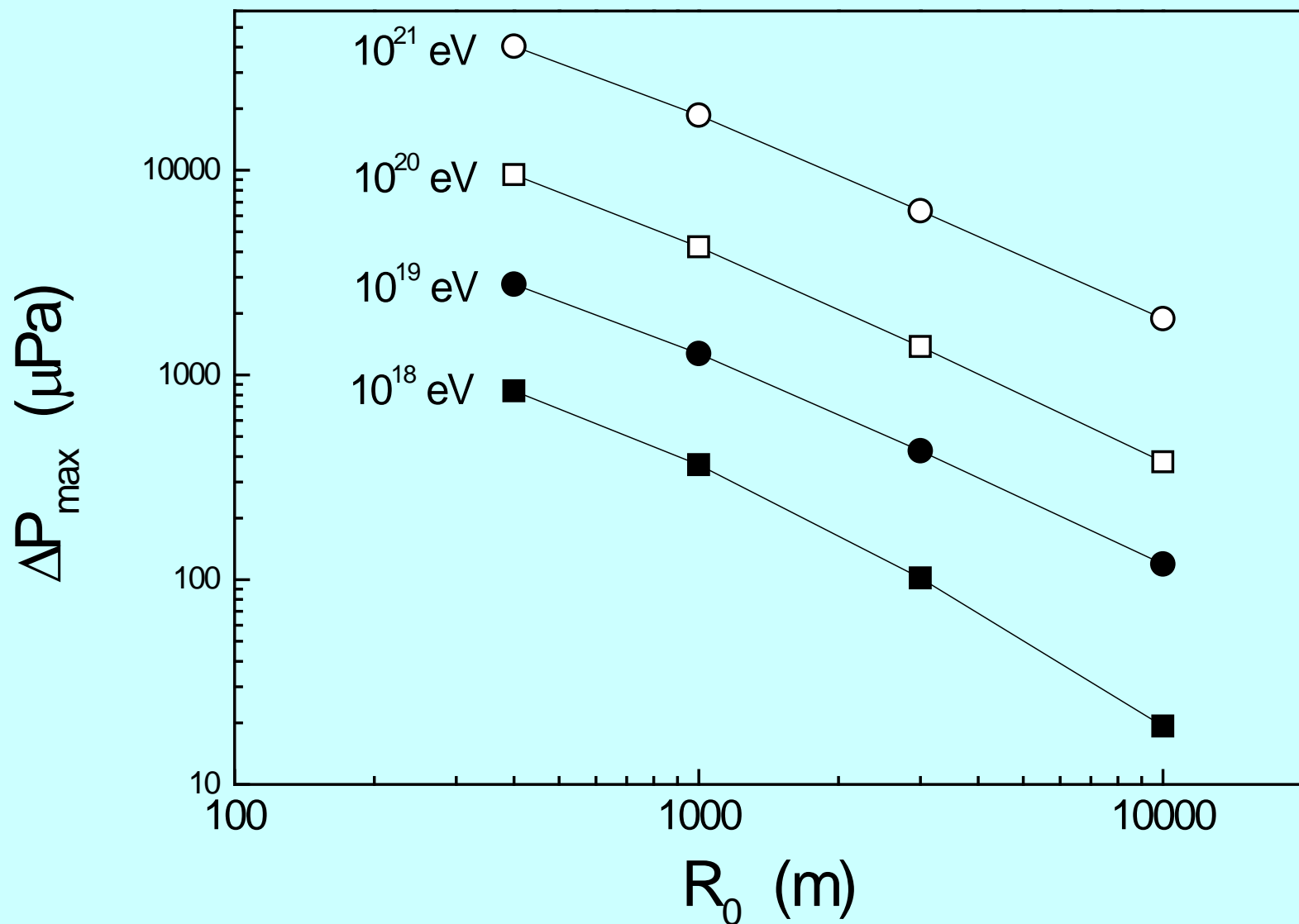
Эволюция акустических импульсов с расстоянием до каскада (NKG, 10^{18} и 10^{19} эВ)



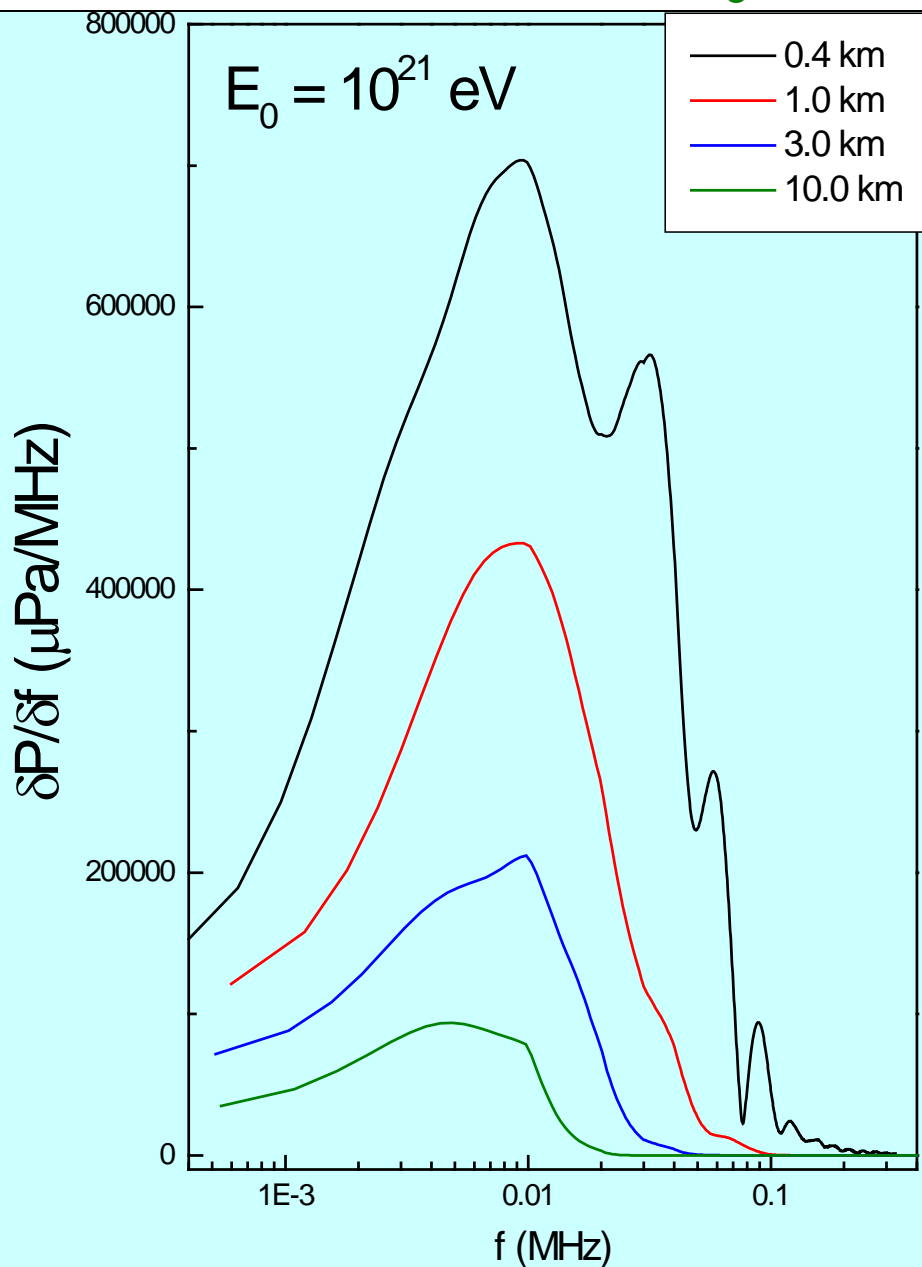
Эволюция акустических импульсов с расстоянием до каскада (NKG, 10^{20} и 10^{21} эВ)



Амплитуда акустического импульса в морской воде от расстояния до оси LPM каскада (NKG)



Эволюция спектра акустического сигнала с расстоянием (NKG, $E_0=10^{21}$ эВ)



Характерные параметры LPM каскада для разных начальных энергий первичного нейтрино (NKG)

Энергия первичного нейтрино E_0 [эВ]	Диаметр (фиксирован при расчётах акуст. сигнала) d [см]	Длина каскада L [м]	Среднее энерговыделение на единицу длины (dE/dx) [эВ/см]
10^{18}	12	~66	$1.51 \cdot 10^{14}$
10^{19}	12	~176	$5.68 \cdot 10^{14}$
10^{20}	12	~468	$21.36 \cdot 10^{14}$
10^{21}	12	~1320	$(75.57 \pm 17) \cdot 10^{14}$

Основные результаты работы

- 1) Акустический сигнал, инициируемый каскадом супервысоких энергий, имеет частотный спектр с максимумом около нескольких десятков килогерц и излучается главным образом в направлении, перпендикулярном к его оси. Спектр сигнала при больших углах и на больших расстояниях сдвигается в область более низких частот.
- 2) Если бы можно было обнаружить сигнал с частотой несколько кГц на расстоянии 10-50 км от каскада, то эффективный объем нейтринного телескопа составил бы несколько десятков - сто кубических километров.
- 3) В данной работе проведены результаты расчетов акустических сигналов от адронных и электронно-фотонных каскадов при энергиях 10^{20} - 10^{21} эВ. Из-за эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала продольные размеры электронно-фотонных каскадов в десятки раз больше продольных размеров адронных каскадов. Тем не менее величины параметров акустического сигнала от адронного каскада при энергии нейтрино 10^{20} эВ и акустического сигнала от электронно-фотонного каскада при энергии нейтрино 10^{21} эВ позволяют надеяться на успех в деле обнаружения нейтрино сверхвысоких и супервысоких энергий с помощью акустических методов.
- 4) Создан пакет программ для расчета эволюции во времени и пространстве акустических импульсов, который может быть использован при создании и оптимизации параметров нейтринных телескопов на основе детектирования акустических импульсов от каскадов генерируемых в воде нейтрино сверхвысоких энергий.

Основные публикации по теме

- [1]. Л.Г. Деденко, С.Г. Коломацкий, А.А. Миронович, “Характеристики углового и пространственного распределения заряженных частиц в электронно-фотонных каскадах”, Матер. Всесоюзной конф. по космич. лучам, Алма-Ата, Изд-во Каз. ГУ, ч.2, стр. 3-4(1989).
- [2]. Л.Г. Деденко, И.В. Денисов, И.М. Железных, С.Х. Караевский, А.А. Миронович, А.В. Тренихин, “Акустический сигнал от нейтрино сверхвысоких энергий и фоновые условия для акустического нейтринного телескопа в Ионическом море”, Известия РАН, сер. Физич., т. 58, н. 12, стр.146-148(1994).
- [3]. L.G. Dedenko, S.Kh. Karaevsky, A.A. Mironovich and I.M. Zheleznykh, "Acoustic Signal Produced by Ultrahigh Neutrinos in Water", XXIV ICRC, Rome 1995, Contributed papers 1, 797-799(1995).
- [4]. A.V. Butkevich, L.G. Dedenko, S.Kh. Karaevsky, A.A. Mironovich, A.L. Provorov, and I.M. Zheleznykh, “High energy neutrino interactions and the prospects for radiowave and acoustic detection of cosmic neutrinos (cross-sections, signals, thresholds)". in Proceedings of the International Europhysics Conference on High Energy Physics, HEP-95, Brussels, Belgium. Edited by: Lemonne, J.; Vander Velde, C.; Verbeure, F. Singapore: World Scientific, 1996. p. 538-9.
- [5]. A.V. Butkevich, L.G. Dedenko, S.Kh. Karaevsky, A.A. Mironovich, and I.M. Zheleznykh, "SADCO - sea acoustic detection of cosmic objects: status and prospects", Proc. Int. School Particles and Cosmolog, BAKSAN-95, World Scientific, p. 306 (1996).
- [6]. Dedenko, L.G.; Karaevsky, S.Kh.; Mironovich, A.A.; Provorov, A.L.; and others. "Prospects for cubic kilometer-scale (KM³) radio wave and acoustic neutrino telescopes.", in ICHEP '96. Proceedings of the 28th International Conference on High Energy Physics. Edited by: Ajduk, Z.; Wroblewski, A.K. Singapore: World Scientific, 1997. p. 1573-6 vol.2
- [7]. Л.Г. Деденко, И.М. Железных, С.Х. Караевский, А.А. Миронович, В.Д. Свет, А.Ф. Фурдуев, “Перспективы для глубоководного акустического детектирования нейтрино”, Известия РАН, сер. Физич., т. 61, н. 3, стр.593-596(1997).
- [8]. L.G. Dedenko, A.V. Furduyev, Ya. S. Karlik, J.G. Learned, A. A. Mironovich, V.D. Svet, and I.M. Zheleznykh, "SADKO: hydroacoustic detection of super-high energy cosmic neutrinos", XXV ICRC, Durban 1997.

Основные публикации по теме

- [9]. Butkevich A.V., Dedenko L.G., Karaevsky S.K., Mironovich A.A., and others, "Prospects for radio-wave and acoustic detection of ultra- and superhigh-energy cosmic neutrinos (cross sections, signals, thresholds)", *Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra*, May-June 1998, vol.29, (no.3):659-74. 41 references. Translation: *Physics of Particles and Nuclei*, May-June 1998, vol.29, (no.3):266-272.
- [10]. Anassontzis EG, Barone M, Fahrur E, Foudas C, Gialas G, Grammatikakis G, Katsanevas S, Kourkoumelis C, Manousakis-Katsikakis A, Odian A, Resvanis LK, Siotis I, Sotiriou SA, Voulgaris G, Ball AE, Cartacci AM, Dell'Agnello L, Monteleoni B, Naumov VA, Perrone L, Martini A, Nicoletti G, Trasatti L, Valente V, Keusen U, Koske P, Rathlev J, Voigt G, Curti F, DeMarchis G, Piccari L, Ameli F, Bonori M, Bosio C, Bottai S, Capone A, Desiati P, Massa F, Rikalina V, Valente E, Bezrukov LB, Butkevich AV, Dedenko LG, Karaevsky SK, Mironovich A, Zakharov LM, Zheleznykh IM, Zhukov VA, Demidova TA, Deyneko A, Ereemeev AP, Paka VT, Permyakov AA, Platonov MN, Rucol VK, Surin NM, Sheremet NA, Albul VI, Ledenev VV, "Status of NESTOR, a deep sea neutrino telescope in the Mediterranean", *NUCLEAR PHYSICS B-PROCEEDINGS SUPPLEMENTS* 66: 247-251 JUL 1998.
- [11]. Л.Г. Деденко, И.В. Денисов, И.М. Железных, А.А. Миронович, "Акустические импульсы от каскадов, производимых в воде нейтрино сверхвысоких энергий", *Известия РАН, сер. Физическая*, т. 63, н. 3, стр. 589-592 (1999).
- [12]. Leonid G. Dedenko, Ivan V. Denisov, Anna A. Mironovich and Igor M. Zheleznykh "ACOUSTIC SIGNALS EMITTED BY NEUTRINO INDUCED CASCADES IN SEA WATER", *PACON 99 Proceedings*, 1999. at PACON99 Symposium on Humanity and the World Ocean, June 23-25, 1999. WKSP-4 Neutrino Astronomy from the Deep Ocean.
- [13]. A. CAPONE, L.G. DEDENKO, A.V. FURDUEV, S.Kh. KARAEVSKY, Ya.S. KARLIK, P. KOSKE, J.G. LEARNED, V.A. MATVEEV, A.A. MIRONOVICH, E.G. SMIRNOV, V.D. SVET, V.P. TEBYAKIN, I.M. ZHELEZNYKH, "A DEEP UNDERWATER ACOUSTIC DETECTION NEAR KAMCHATKA FOR SUPER-HIGH ENERGY NEUTRINO ASTROPHYSICS". *XIth RENCONTRES DE BLOIS FRONTIERS OF MATTER* Blois, Loire Valley, France June 27-July 3, 1999.
- [14]. V. A. Zhukov, .., L.G. Dedenko, ..., A.A. Mironovich, et al, "NESTOR Experiment in 2003", *Physics of atomic Nuclei* 67(11), 2054-2057 (2004).

Основные публикации по теме

- [15]. I. M. Zheleznykh, ..., A.A. Mironovich, .., “SADCO (Sea Acoustic Detector of Cosmic Objects): status of a pilot experiment in the Caspian Sea”, High Energy Neutrino Astronomy Workshop, College de France, Paris, 16-17 June, 2003, Proceedings (2004).
- [16]. L.G. Dedenko,..., A.A. Mironovich, .., “The Hybrid Scheme of Simulations of the Electron- photon and Electron-hadron Cascades In a Dense Medium at Ultra-high Energies”, International ARENA Workshop May 17-19, 2005 DESY, Zeuthen, Proceedings (2006).

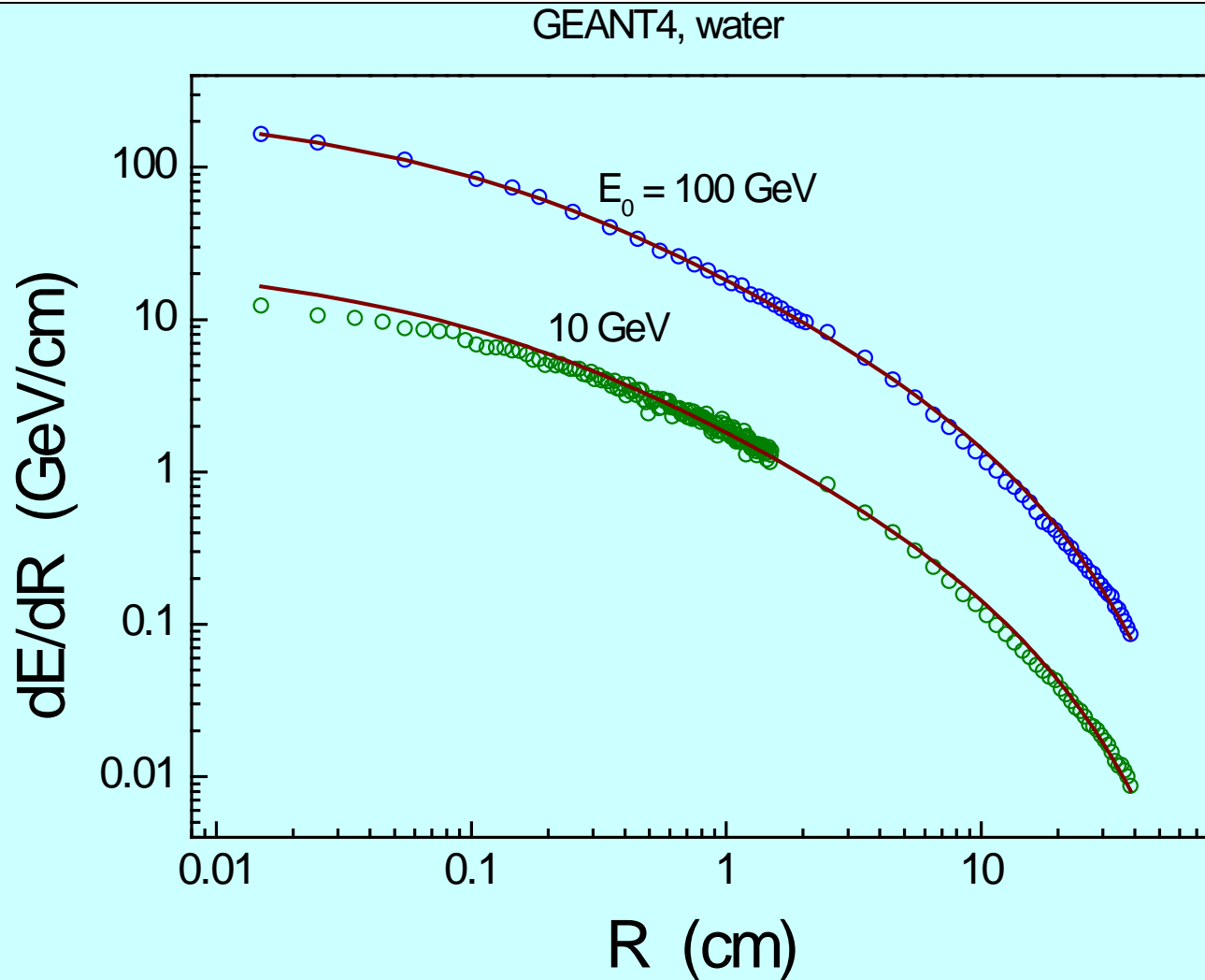
Гибридный метод на основе расчётов с помощью пакета GEANT4

Гибридный метод (LPM-GEANT4)

Разработка гибридного алгоритма с концевыми каскадами, рассчитанными по алгоритму GEANT4:

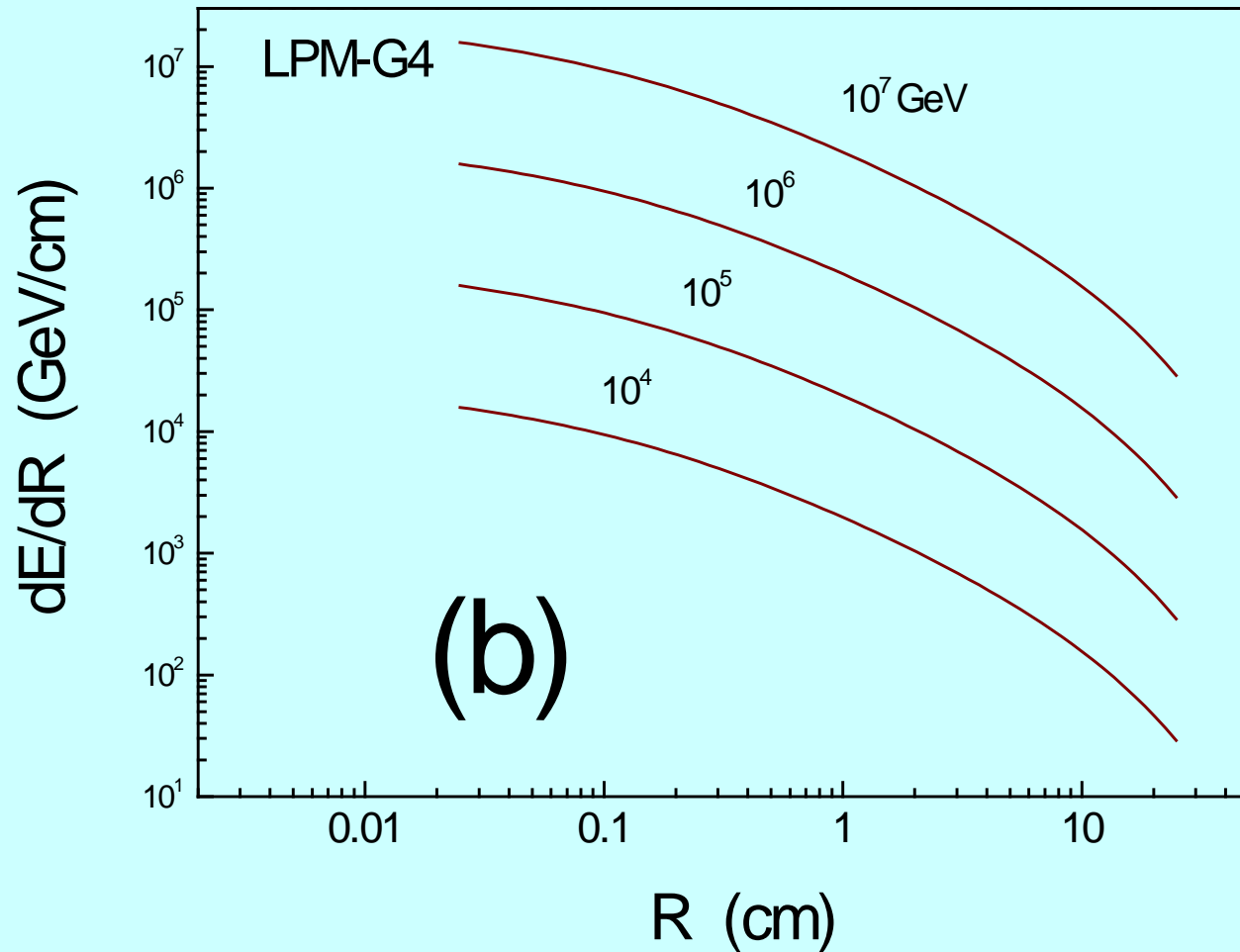
- 1) Расчет одномерного каскада сверхвысокой энергии с учетом ЛПМ-эффекта**
- 2) Расчет по алгоритму GEANT4 набора опорных каскадов в диапазоне 1-100 ГэВ**
- 3) Аппроксимация концевого каскада с произвольной энергией в диапазоне 1-100 ГэВ процедурой на основе рассчитанных заранее каскадов по алгоритму GEANT4**

Радиальное распределение



Функции выделения энергии dE/dR рассчитанные по алгоритму GEANT4 (символы) в сравнении с аналитическими подгоночными формулами (линии)

Расчёт для различных энергий



Тестовые расчёты по гибриднему LPM-G4 алгоритму (с аналитической аппроксимацией) радиального распределения выделения энергии в каскаде для различных E_0

Благодарю за внимание