21

Институт теоретической и
экспериментальной физики

MAR 2 2 2001
LIBRARY

25-00

ITEP-25-00

В.И.Албул, В.Б.Бычков, К.Е.Гусев, В.С.Демидов,
Е.В.Демидова, Д.Н.Заборов, С.Л.Коновалов,
А.Ф.Курчанов, В.Е.Лукьяшин, В.И.Ляшук,
Е.Г.Новиков, А.А.Ростовцев, А.Ю.Соколов,
У.Ф.Фейзханов, Н.А.Халдеева.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩЕГО ТОРМОЖЕНИЕ В ВОДЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 125 И 200 МэВ ДО ОСТАНОВКИ

Fermilab Library
0 1160 0089659 1

Москва 2000

УДК 539.1 М-16

Измерение параметров акустического излучения, сопровождающего торможение в воде пучка протонов с энергией 125 и 200 МэВ до остановки: Препринт ИТЭФ 25-00 /

В.И.Албул, В.Б.Бычков, К.Е.Гусев, В.С.Демидов, Е.В.Демидова, Д.Н.Заборов, С.Л.Коновалов, А.Ф.Курчанов, В.Е.Лукьяшин, В.И.Ляшук, Е.Г.Новиков, А.А.Ростовцев, А.Ю.Соколов, У.Ф.Фейзханов, Н.А.Халдеева.

В.И.Албул - М., 2000 -19с.

На пучке протонов ускорителя ИТЭФ с помощью пьезоэлектрических гидрофонов зарегистрировано акустическое излучение, сопровождающее торможение протонов с энергией 125 и 200 МэВ в воде до остановки. Излучение имеет вид затухающих гармонических колебаний, начальный период которых отражает свойства излучающей системы. Измерены параметры акустического сигнала при различной интенсивности пучка протонов и при изменении диаметра пучка.

Measurement of parameters of acoustic radiation resulting from proton beam with energy 125 and 200 MeV braking in water.

V.I.Albul, V.B.Bichkov, K.E.Gusev, V.S.Demidov, E.V.Demidova, D.N.Zaborov, S.L.Konovalov, A.F.Kurchanov, V.E.Lukiashin, V.I.Lyashuk, E.G.Novikov, A.A.Rostovtsev, A.Yu.Sokolov, U.F.Feishanov, N.A.Haldeeva.

The acoustic radiation from proton beam has been registered at the ITEP accelerator by means of piezoelectric hydrophones. The energy of protons braking in water up to stop was E=125 and 200 MeV. The radiation wave looks like damped harmonic oscillation, with initial period reflecting the properties of the radiating system. Parameters of an acoustic signal have been measured at different proton beam intensities and for several beam diameters.

Рис. - 13, список лит. - 9 наим.

© Институт теоретической и экспериментальной физики, 2000

Содержание

1	Введение	1
2	Схема эксперимента	2
3	Регистрирующая аппаратура	3
3.1	Гидрофоны	3
3.2	Осциллограф	5
3.3	Аналогово-цифровой преобразователь(АЦП)	5
4	Анализ данных	8
4.1	Анализ осциллограмм	8
4.2	Анализ спектра акустического излучения	10
5	Заключение	11

1 Введение.

Эффекты излучения акустических сигналов при прохождении заряженных частиц исследуются более 40 лет в связи, главным образом, с возможной регистрацией адронно-электромагнитных ливней, вызванных космическими частицами ультра- и сверхвысоких энергий [1], [2]. Особенно перспективно применение акустического метода в сочетании с оптическим в схеме совпадения событий для регистрации космических частиц сверхвысоких энергий. Идея реализации такого подхода прорабатывается в крупномасштабном нейтринном телескопе ANTARES ([3]), монтируемом в настоящее время на глубине 2400 м на дне Средиземного моря. Кроме регистрации космических ливней, акустические сигналы могут применяться в других областях, например, для мониторирования пучков на ускорителях заряженных частиц [1],[4],[5]. В одной из ранних работ, выполненных на ускорителе ИТЭФ [6], была продемонстрирована возможность применения акустических методов в физических измерениях и была измерена кривая потерь энергии протонами при остановке (пик Брэгга). В настоящей работе приведены результаты эксперимента по измерению основных параметров акустического сигнала, сопровождающего процесс торможения в воде пучка протонов с энергией 125 и 200 МэВ, выполненного на ускорителе ИТЭФ в июне 2000г.

2 Схема эксперимента

Схема эксперимента показана на рис. 1

В качестве мишени, в которой происходило торможение пучка протонов, служила вода, заполнявшая цилиндрический сосуд из полиэтилена диаметром 31 см, высотой 64 см и толщиной стенки 2 мм. Схематически он изображен в виде заштрихованного прямоугольника. На расстоянии h_b=24 см от дна сосуда перпендикулярно образующей цилиндра направлялся пучок протонов. На некотором расстоянии от пучка R_{bh}, которое изменялось в течение эксперимента, располагались 2 гидрофона (A1 и K2).

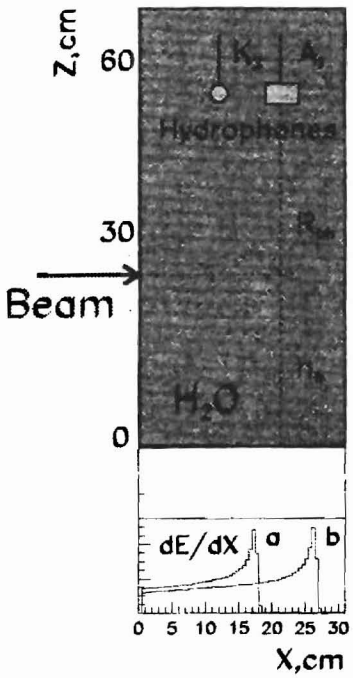

Рис. 1: Схема эксперимента.

Пучок протонов имел следующие параметры:

- Энергия частиц - 200 и 125 МэВ;
- Период повторения импульсов пучка -- 4.2 сек;
- Интенсивность -5.10^7 - 6.10^{10} частиц на сброс ускорителя;
- Длительность - 70 нсек;

- Диаметр пучка - 1 и 4.5 см.

В нижней части рисунка 1 показаны результаты моделирования с помощью программы GEANT потерь энергии в воде протонами для двух энергий - 125 и 200 МэВ. Протоны с энергией 125 Мэв имеют средний пробег 16.5 см и останавливаются между гидрофонами, протоны с энергией 200 МэВ останавливаются за гидрофонами, проходя расстояние 25.2 см. Кривая "a" соответствует энергии протонов 125 МэВ, кривая "b" - энергии 200 МэВ. При торможении пучка протонов в воде происходит расширение его диаметра за счет многократного рассеяния. Этот эффект заметен на рис. 2, где представлены траектории всех частиц (включая фотоны), образованных при торможении в мишени 100 протонов с энергией 200 МэВ, смоделированные по программе GEANT. Траектории протонов отмечены непрерывными линиями, гамма-квантам соответствуют пунктирные линии, траектории нейтронов обозначены штрих-пунктирными линиями. Пучок, имеющий на входе в мишень диаметр, равный нулю, при остановке имеет заметную дисперсию.

Результаты измерений акустических сигналов сгруппированы в экспозиции, отличающиеся друг от друга, по крайней мере, одним из четырех параметров - интенсивностью пучка, его диаметром, энергией и расстоянием от центра пучка до гидрофонов. Было выполнено 19 экспозиций мишени на пучке при различных условиях, описанных ниже и 2 экспозиции (с номерами 9 и 10) без пучка для анализа фона. Энергия протонов, выводимых из ускорителя, была равна 200 МэВ (p=644 МэВ/c) и оставалась постоянной. Начиная с экспозиции 14 энергия протонов, падающих на мишень, была уменьшена до 125 МэВ (500 МэВ/c) с помощью фильтра из плексигласса, помещенного на пути пучка.

3 Регистрирующая аппаратура

3.1 Гидрофоны.

Преобразование акустического излучения в электрический сигнал производилось с помощью двух гидрофонов, изготовленных в ВНИИФТРИ: Г6520Ц-2 (A1 на рис. 1) и ГГ-26 816ж (K2 на том же рисунке). Чувствительным элементом в обоих гидрофонах является пьезоэлектрическая керамика с тангенциальной поляризацией. Основные технические характеристики гидрофонов приведены в таблице 1.

Частотные характеристики гидрофонов представлены на рис. 3 и 4. Гидрофоны были закреплены на дуралюминиевой раме, положение которой оставалось неизменным в течение всего эксперимента, а изменение расстояния между пучком и гидрофонами производилось с помощью подъемного устройства, на котором располагалась мишень во время эксперимента.

Наблюдение электрического сигнала и его запись для дальнейшей обработки производились двумя способами: осциллографическим и с помощью аналогово-цифрового преобразователя.

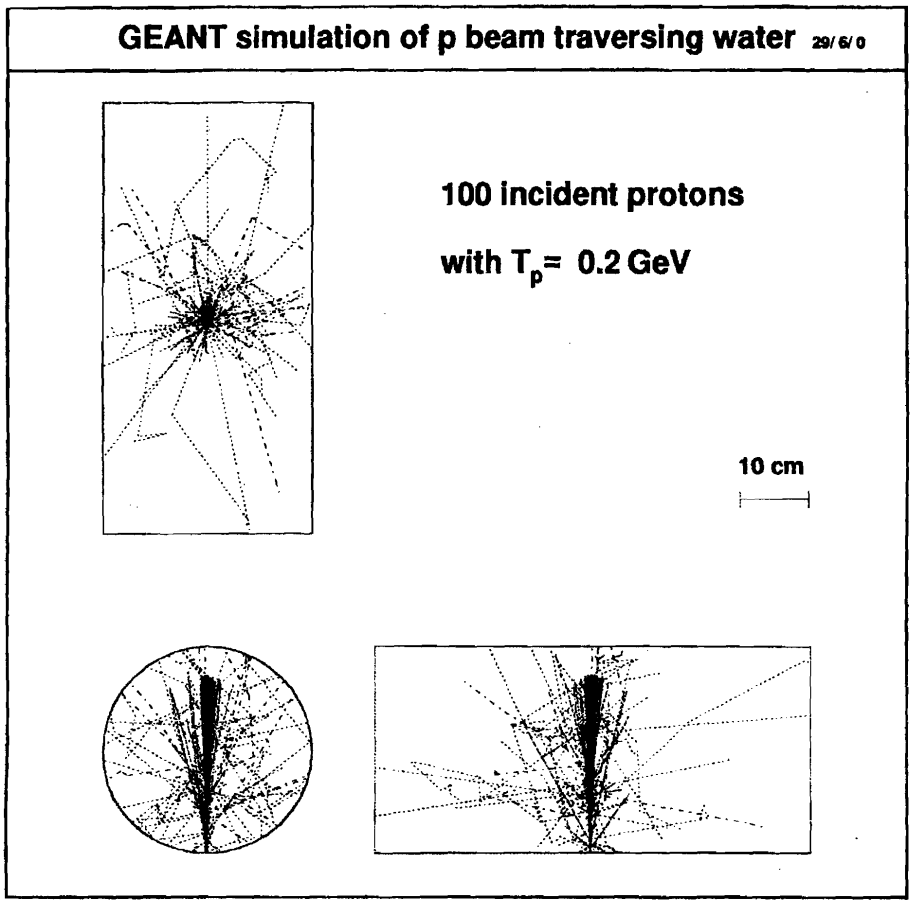

Рис. 2: Результаты моделирования процесса торможения протонов с энергией 200 МэВ в воде.

Таблица 1. Технические характеристики гидрофонов

	A1	K2
Максимальное рабочее статическое давление,МПа	65	
Диапазон частот, кГц	16-60	1.6-100
Неравномерность АЧХ в диапазоне частот, дБ, не более	±4	±2
Средняя чувствительность пьезоэлемента, мкВ/Па	1500	
Диаметр пьезоэлемента, мм	20	-
Высота пьезоэлемента, мм	30	-
Коэффициент усиления встроенного предусилителя	200	
Шумы предусилителя, нВ/$\sqrt{Гц}$	2	
Уровень сигнала (максимальный), В	2	
Напряжение питания, В	12	12
Потребляемый ток, мА	5	
Габариты гидрофона, мм	⌀ 36x150	⌀ 20x40
Масса гидрофона, г, не более	250	

3.2 Осциллограф.

Для анализа формы акустических сигналов в течение относительно короткого времени (до 0.02 сек) использовался 4-х лучевой цифровой осциллограф фирмы TEKNRONIX - TDS3014.

На 1-й канал подавался положительный синхроимпульс с амплитудой 25 В и длительностью 4 нсек (FWHW). Он формировался одновременно с приходом сигнала на импульсный магнит, выводящий один банч ускорителя в направлении пучкового тракта и совпадал с моментом входа пучка частиц в мишень с точностью 20 нсек. Времена всех процессов, описываемых ниже, отсчитываются от момента прихода синхроимпульса. На второй и третий каналы подавались сигналы с 2-х описанных выше гидрофонов.

4-й канал осциллографа служил для измерения интенсивности пучка протонов на входе в мишень. На него выводился импульс от индукционного датчика. Время прихода этого импульса - 8 мксек, длительность положительной части сигнала, амплитуда которой пропорциональна интенсивности, составляла 4 мксек. Точность измерения интенсивности была равна $\pm(5-10)\%$ и зависела от ее величины.

3.3 Аналогово-цифровой преобразователь(АЦП).

Для измерения частотной характеристики акустического излучения и изменения ее во времени аналоговый сигнал преобразовывался в цифровой вид и записывался на дисковую память ЭВМ. Оцифровка производилась с помощью одноканальной 12-ти разрядной платы АЦП, разработанной и изготовленной в институте им. Менделеева, действующей в непрерывном режиме без синхронизации.

Во всех экспозициях записывались сигналы с каждого гидрофона. При этом время записи было равно 35 сек ($\approx$ 8 циклов ускорителя), частота оцифровки - 400 кГц, объем одной записи - 15 Мбайт.

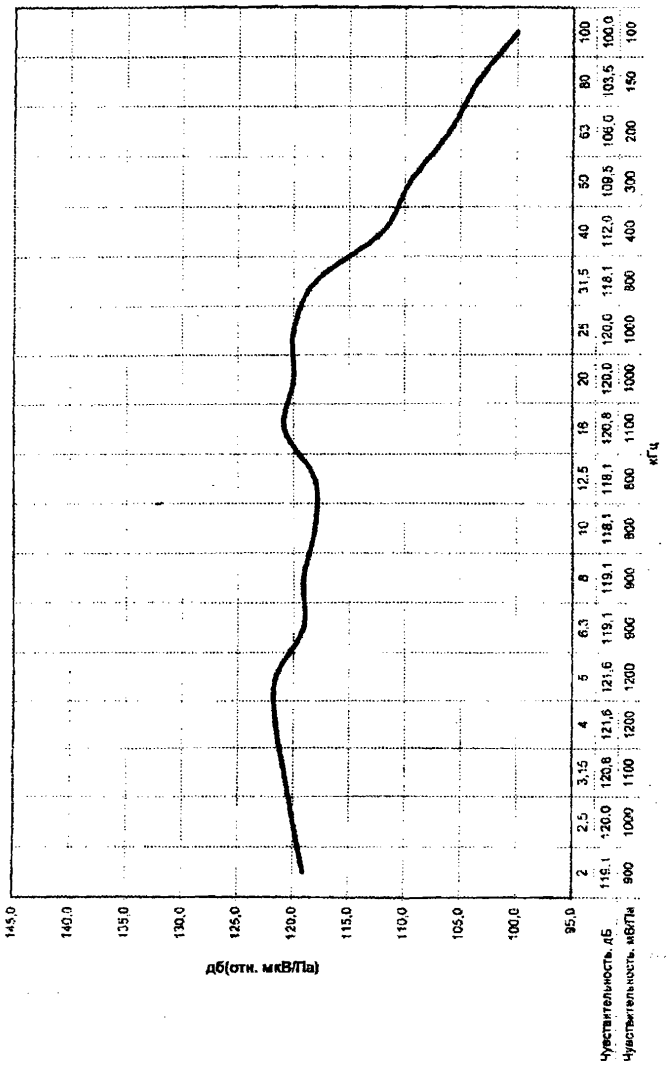

Рис. 3: Амплитудно-частотная характеристика гидрофона К2.

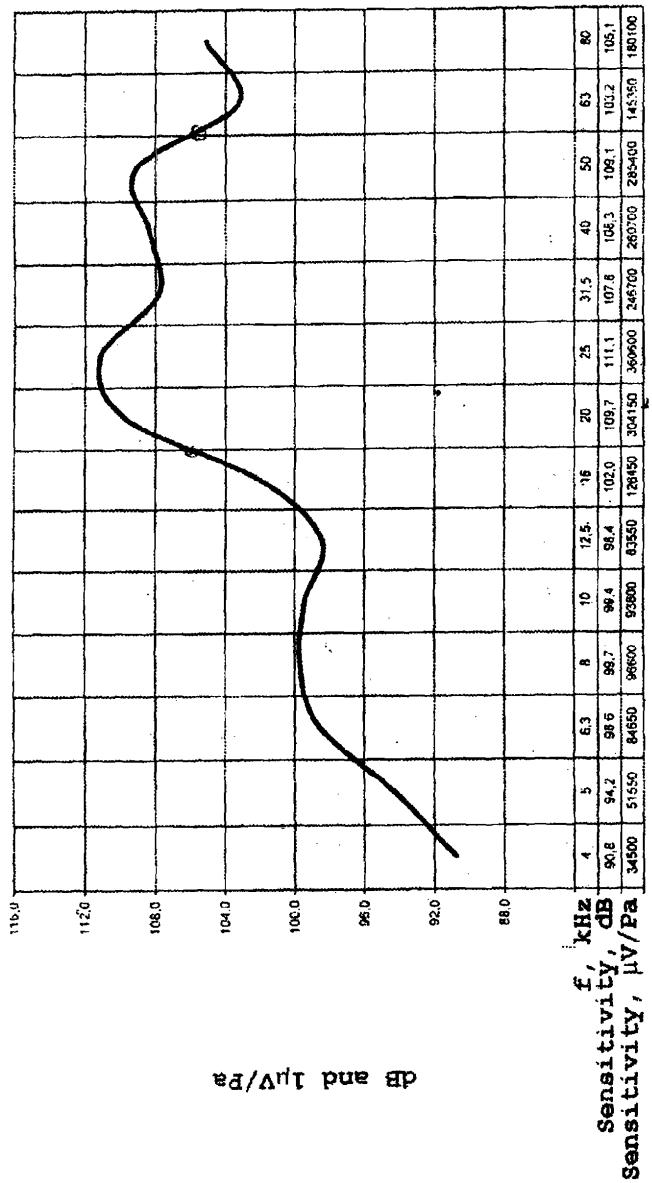

Рис. 4: Амплитудно-частотная характеристика гидрофона A1.

4 Анализ данных.

4.1 Анализ осциллограмм.

На рис. 5 продемонстрирован пример типичной осциллограммы акустических сигналов, полученных в экспозиции 2. Для простоты на рисунке не показано изображение 1-го луча, связанного с синхроимпульсом. На 2-й и 3-й луч (номер луча указан слева на вертикальной линейке) подавались сигналы от гидрофонов A1 и K2, соответственно. Положительный полупериод сигнала, регистрируемого 4-м лучом, служил для измерения интенсивности пучка. Энергия частиц равна 200 МэВ, интенсивность - $0.96 \cdot 10^9$, что соответствует полному энерговыделению в мишени $1.85 \cdot 10^{17}$ эВ. Диаметр пучка - 45 мм, развертка осциллографа - 40 мксек на деление. Масштаб по вертикальной шкале - 0.1, 0.2 и 2 В на деление для лучей 2, 3 и 4, соответственно. Момент прихода синхроимпульса обозначен стрелкой, направленной сверху вниз и буквой "T" на осциллограмме. Короткий сигнал, зарегистрированный в этот момент, имеет вид затухающих колебаний и представляет собой электромагнитную наводку, источник которой пока не установлен.

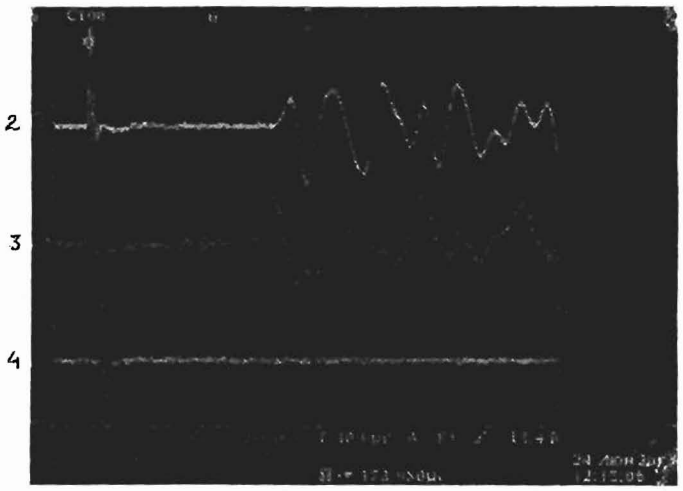

Рис. 5: Пример акустического сигнала, полученного в экспозиции 2. На второй и третьей кривой (номер кривой указан слева на вертикальной линейке) приведены сигналы от гидрофонов A1 и K2, соответственно. На четвертая кривая соответствует сигналу, служившему для измерения интенсивности пучка.

В моменты времени $t_K = 132$ мксек и $t_A = 148$ мксек до гидрофонов K2 и A1 доходит акустический сигнал , распространяющийся в воде со скоростью 1500 м/сек от ближайшей точки на пучке. Как видно из рисунка, зарегистрированное акустическое излучение имеет сложную гармоническую структуру.

При регистрации сигналов на более медленной развертке наблюдаются сотни периодов затухающих колебаний в течение 10-15 мсек. В формировании регистрируе-

мого излучения кроме исследуемых свойств излучателя, участвуют, по крайней мере, три фактора: инерционность приемника излучений, его частотные свойства и явление сложения звуковых волн, отраженных от стенок, ограничивающих мишень.

Как показал анализ сигналов от двух гидрофонов, первый период колебаний характеризует свойства излучателя и слабо зависит от указанных выше факторов, кроме, возможно, инерционности. Большинство зарегистрированных сигналов начинаются с полуволны сжатия (положительный сигнал на осциллограмме). Амплитуды положительной и, возможно, отрицательной полуволн и их длительность зависят от условий эксперимента.

Результаты измерений приведены в таблице 2. В первой колонке - номер экспозиции, в последующих: E_b,МэВ - энергия протонов, попадающих в мишень, D_m,мм - диаметр пучка, $(U_i \pm \Delta U_i)$,В - результаты измерений амплитуды положительного сигнала в 4-м канале осциллографа, α - отношение площадей коллиматоров в пучковом тракте, K - коэффициент ослабления сигнала в схеме измерения амплитуды U_i. По E_b и трем последним величинам вычислялась энергия, выделенная в мишени протонами E_{depos} (эВ). Далее для обоих гидрофонов (А1 и К2) приведены результаты измерений параметров первого положительного сигнала. По времени запаздывания сигнала относительно синхроимпульса $t_s \pm \Delta t_s$ (мксек) вычислялось расстояние $R_{bh} \pm \Delta R_{bh}$, мм до ближайшей точки, излучающей звук. Скорость звука в воде принималась равной 1500 м/сек (температура воды была близка к 25°C). Измерялись также амплитуда сигнала $U_1 \pm \Delta U_1$ мВ и его длительность в мксек - $T_{1/2} \pm \Delta T_{1/2}$. Приведены также максимальные амплитуды сигналов $U_m \pm \Delta U_m$, мВ.

Т.к. параметры гидрофона А1 и его предусилителя известны более точно, чем гидрофона К2, для него были определены акустические давления $P \pm \Delta P$,Па. При расчетах принималась во внимание его частотная характеристика (рис. 4).

Подчеркнем еще одну особенность акустического излучения, которая наблюдается в сигналах А1. В экспозициях с энергией 125 МэВ сигнал начинается не со сжатия (положительная полярность), а с разрежения. Возможное объяснение заключается в том, что в этих экспозициях протоны останавливались до гидрофона и ближайшая точка, от которой доходит акустический сигнал находится не на образующей излучающего цилиндра, а на его основании, где динамика образования сигнала может быть иной. В таблице 2 в колонках U_-, T_- приведены результаты измерения амплитуды этой части сигнала в мВ и ее длительности в мксек для экспозиций 19-21, где эта особенность наиболее заметна.

По данным в таблице можно проследить, как исходные параметры влияют на акустический сигнал.

На рис. 6 показана зависимость акустического давления от энерговыделения в мишени в интервале от $1.08 \cdot 10^{16}$эВ до $1.4 \cdot 10^{18}$эВ. Зависимость аппроксимирована степенной функцией $P(Па) = (0.23 \pm 0.05(стат) \pm 0.05(сист)) \cdot 10^{-14}$, которая с учетом погрешностей удовлетворительно описывает экспериментальные точки. Результаты наших измерений близки к полученным ранее в работе [4]. По данным этой работы при энерговыделении $10^{16} эВ$ для диаметра пучка 1 см на расстоянии 8 см амплитуда акустического сигнала составляет 0.071 ± 0.01 Па. Эти условия близки к условиям экспозиции 13, в которой амплитуда сигнала, зарегистрированного на расстоянии 32.8 см, составила 0.02 ± 0.003 Па.

Важным параметром акустического сигнала является его длительность. Согласно тепловой модели формирования акустического сигнала[1], длительность импульса определяется временем распространения звука по диаметру излучающего цилиндра

$T_{1/2} = D/c_s$, где c_s - скорость звука в воде. В нашем случае это 30 и 7.5 мксек для D=45 и 10.6 мм, соответственно. При диаметре D=45 мм (до экспозиции N 3, включительно) средняя длительность составляет 20 мксек. При уменьшении диаметра до 10.6 мм длительность падает до $\approx$ 10 мксек. что качественно согласуется с предсказаниями тепловой модели.

На рис.7 представлены данные, полученные в экспозициях 5-19 (D=10.6 мм) в переменных энерговыделение в мишени (абсцисса) - длительность импульса. Явной зависимости длительности от E_{depos} не наблюдается.

Однако, следует отметить одну заметную корреляцию между длительностью импульса и энергией протонов. Между 14-й и 15-й экспозициями энергия пучковых частиц была уменьшена. На рис. 7 эта корреляция отражается таким образом, что точки, соответствующие энергии частиц 200 МэВ, расположены систематически ниже точек при E=125 МэВ. Такую корреляцию можно объяснить тем, что при меньшей энергии ближайшей к гидрофонам излучающей частью цилиндра, ограниченного пучком, становится основание цилиндра, где энерговыделение максимально и где, возможно, динамика формирования акустического сигнала может отличаться от динамики на образующей цилиндра.

При планировании экспериментов по регистрации космических частиц высокой энергии важно знать, как зависит максимальная амплитуда акустического сигнала от энерговыделения. Такая зависимость показана на рис.8 для обоих гидрофонов. Часто максимальный сигнал приходит гораздо позже t_s, что при небольшом объеме мишени в нашем эксперименте может привести к его искажению за счет отражения от стенок сосуда. Тем не менее из рисунка видно, что между амплитудой и энерговыделением существует прямая зависимость, которую следует уточнить в экспериментах с мишенью большего объема.

4.2 Анализ спектра акустического излучения.

На рис.9 представлены две фонограммы, полученные при работе ускорителя: верхняя (фоновая) зарегистрирована без вывода пучка, нижняя - с пучком. Шкала абсцисс соответствует интервалу времени 1.1 сек. На обеих фонограммах между отметками по оси абсцисс 52.25 и 53.6 наблюдается шум от системы питания магнитов ускорителя. Акустическое излучение, вызванное пучком протонов, можно видеть на нижней фонограмме на отметке 51.9. Это затухающий периодический сигнал с амплитудой около 35 мВ и длительностью $\approx$ 15 мсек. Фонограмма соответствует следующим параметрам эксперимента: $E_{depos} = 1.8\ 10^{17}$ эВ, $D = 45$ мм, $R_{bh} = 22$ см.

Подобные фонограммы удобны для измерения спектральных характеристик АС. На рис.10 показана оценка частотного спектра сигнала, снятого при указанных выше условиях без поправки на частотную характеристику гидрофона. Спектры получены при спектральной обработке по программе SPECTRLAB [7] по алгоритму Хамминга с числом независимых частот 256. Кривая 1 - спектр первых 15-ти периодов АС, кривая 2 - спектр сигнала при t_s=10 мсек, кривая 3 - спектр шума. Как подчеркивалось выше, более адекватно спектр акустического излучения описывается кривой 1, спектр сигнала при бо́льших временах искажается за счет отражений сигнала от стенок сосуда.

Интересные особенности для анализа спектра акустического сигнала предоставляет 1/3-октавный анализ. На рис. 11 и 12 приведен 1/3-октавный спектр в обла-

сти фона и в области акустического сигнала в интервале $\approx$ 5 мсек, записанного в экспозиции 2. Видно, что в сигнале преобладают частоты от 10 до 50 кГц. На рис.13 дана сонограмма сигнала - развитие во времени акустического сигнала. По оси абсцисс отложена частота в кГц. По оси ординат отложено время. Разная интенсивность цвета соответствует разной интенсивности сигнала. Можно выделить несколько характерных областей. Временная область "а" соответствует фоновому сигналу. Характерный спектр для этой области приведен на рис. 11. Область "б" соответствует прохождению пучка. Спектр для этой области приведен на рис. 12. Для нее характерно возрастание сигнала особенно заметное в области 10-50 кГц. В сигнале присутствуют и высокие частоты - до 130 кГц. Далее расположена область "с", которая характеризуется шумами от системы питания магнитов ускорителя. Для нее характерно большое возрастание низких частот (до 5 кГц).

В ранних работах, выполненных на пучках протонов и электронов, отмечалось, что максимум спектра акустического излучения находится при частоте 23.5 кГц (см., например,[8]). Наблюдение в нашем эксперименте более широкого спектра АС, возможно, объясняется различием в параметрах гидрофонов.

5 Заключение.

Произведен анализ звукового сигнала, генерируемого пучком протонов в процессе его торможения в воде до остановки. Измерены параметры первого полупериода сигнала, наиболее адекватно отражающего свойства излучателя. Оценен спектр сигнала на более длительном временном промежутке.

Показано, что с помощью гидрофона А1 можно надежно регистрировать акустические сигналы, производящие максимальное давление от 0.02 Па и выше. Если иметь в виду расстояния от ливня до регистрирующей системы $\approx$ 100 м., то, согласно [1] (fig.15) в предположении линейной зависимости сигнала от выделенной энергии, получим, что порог регистрации ливней составляет $E_{мин} \approx 0.3 \cdot 10^{17}$ эВ. Учитывая, что величина 0.02 Па обусловлена уровнем шумов в условиях эксперимента, эту границу можно будет понизить, приняв меры по уменьшению акустических и электрических шумов. Таким образом, в упомянутых выше подводных экспериментах, по-видимому, возможна регистрация адронно-электромагнитных ливней с полным энерговыделением начиная со значений $\approx 10^{16}$ эВ.[1] Эту величину следует рассматривать как грубую оценку, т.к. принятое допущение о том, что результаты ускорительных экспериментов можно переносить на адронно-электромагнитные ливни при сверхвысоких энергиях представляется малообоснованным, хотя других способов экспериментального моделирования в данной области не существует.

В заключение следует отметить возможный неадекватный электрический отклик акустических преобразователей на быстрые изменения давления и подчеркнуть необходимость исследования не только частотных характеристик гидрофонов, но и их инерционных свойств.

[1]Приблизительная частота появления на уровне моря космических частиц с такой энергией составляет 10^8 частиц на км^2 в год ([9]).

Литература

[1] G.A. Askariyan et al. Acoustic detection of high energy particles showers in water. // Nuclear Instruments and Methods, 1979, V.164, P. 267-278.

[2] Proc. 1975 DUMAND Summer workshop, Bellingham, Wash. (1976)

[3] A Deep See Telescope for High Energy Neutrinos. Сотрудничество АНТАРЕС // http://antares.in2p3.fr/docs.html

[4] L. Sulak et al. Experimental studies of the acoustic signature of proton beam traversing fluid media. // Nuclear Instruments and Methods, 1979, V.161, P. 203-217

[5] И.А. Борщковский и др. Возбуждение ультразвуковых волн при прохождении быстрых электронов через металл.// Письма в ЖЭТФ, 1971, т.13, С.546

[6] I.A. Borshkoysky et al. On proton acoustic effect in condensed media.// Let.al Nuovo Cim.,1975, V.12, P.638-640.

[7] Sound Tecnology Inc., SpectralLab, FFT Spectral Analysis program, V4.32, 1998, http://www.soundtechnology.com

[8] И.А.Данильченко и др. Исследование характеристик акустического сигнала в ближней зоне пучка протонов в воде.// Акустический журнал, 1985, т.31, вып.5, С.706.

[9] P.Bhattacharjee, G.Sigl. Origin and propagation of extremely high-energy cosmic rays. // Phys.Reports, 2000, V.327

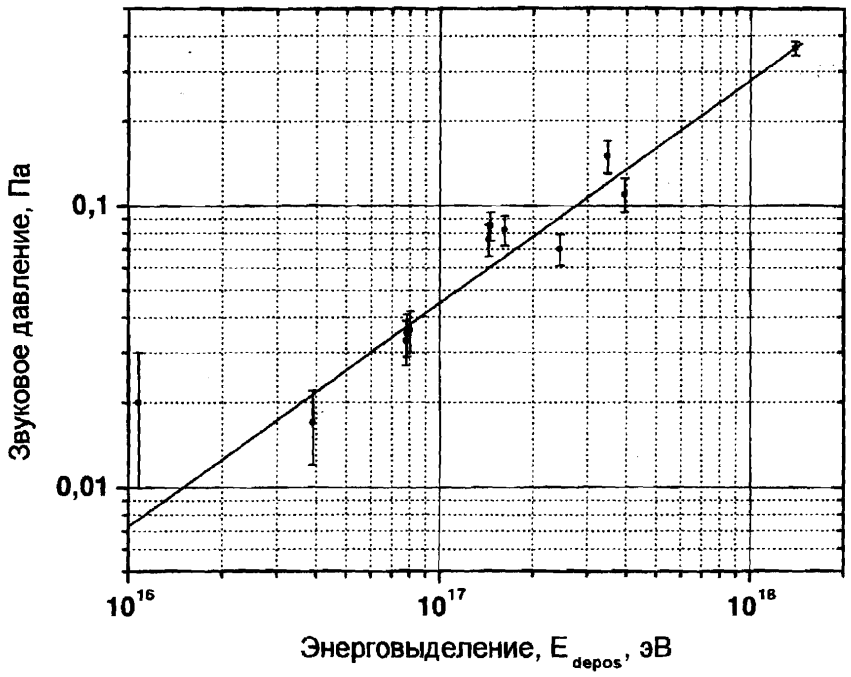

Рис. 6: Зависимость звукового давления от энерговыделения.

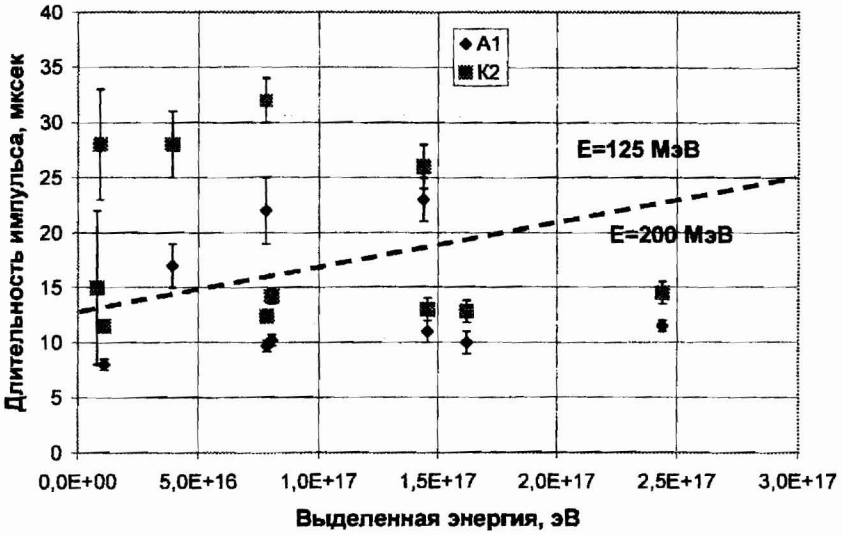

Рис. 7: Зависимость длительности импульса от энерговыделения

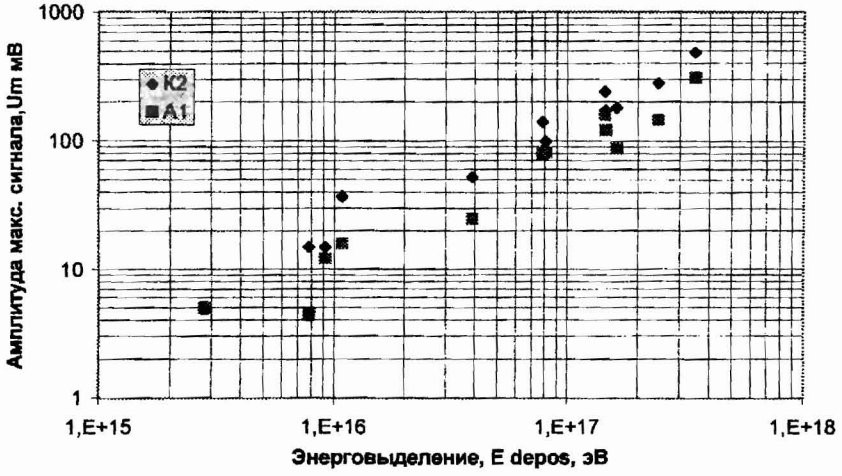

Рис. 8: Зависимость максимальной амплитуды сигнала от энерговыделения

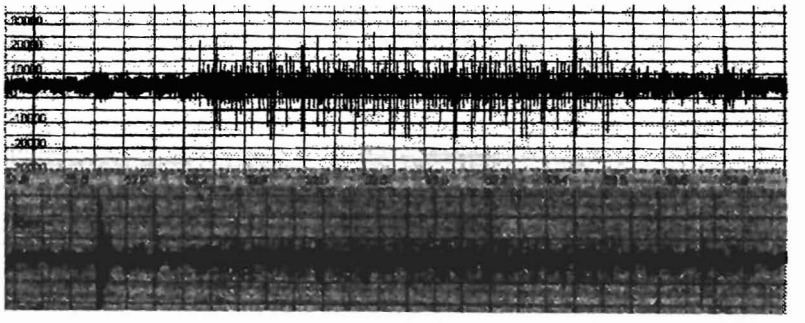

Рис. 9: Фонограммы звукового излучения, зарегистрированные без пучка протонов (фон) и с пучком (верхний и нижний рисунки, соответственно).

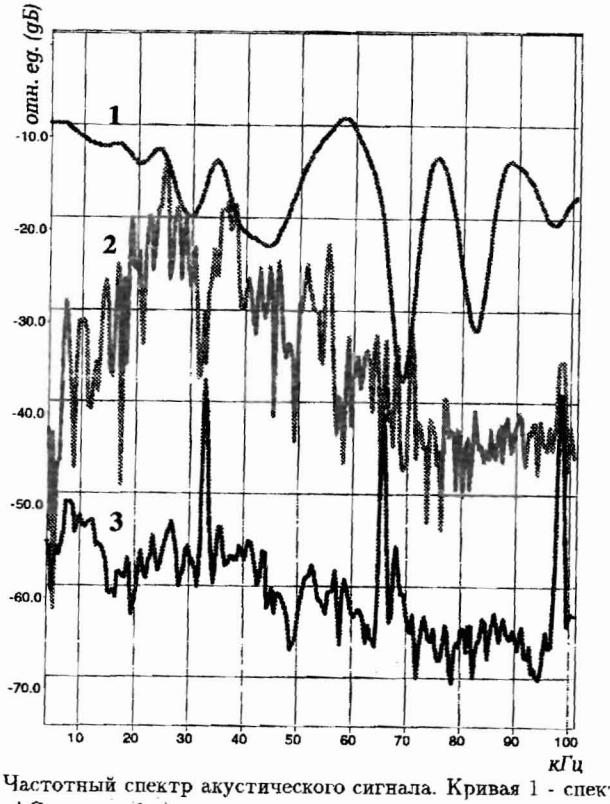

Рис. 10: Частотный спектр акустического сигнала. Кривая 1 - спектр первых 15-ти периодов АС, кривая 2 - спектр сигнала при t_s=10 мсек, кривая 3 - спектр шума.

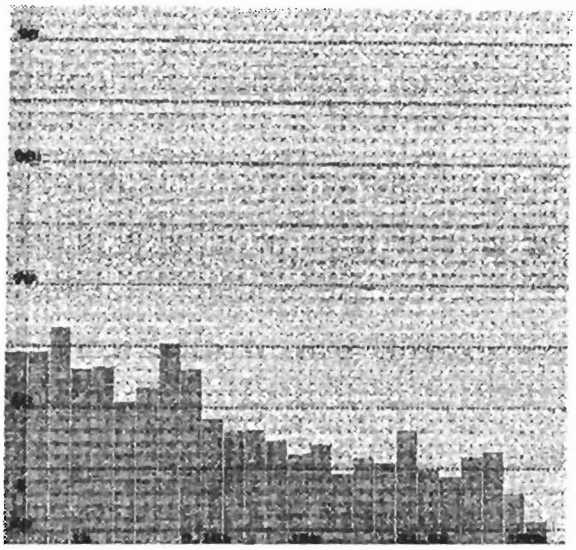

Рис. 11: Фоновый 1/3 октавный спектр. По оси абцисс приведена частота в кГц. По оси ординат дана интенсивность в дБ.

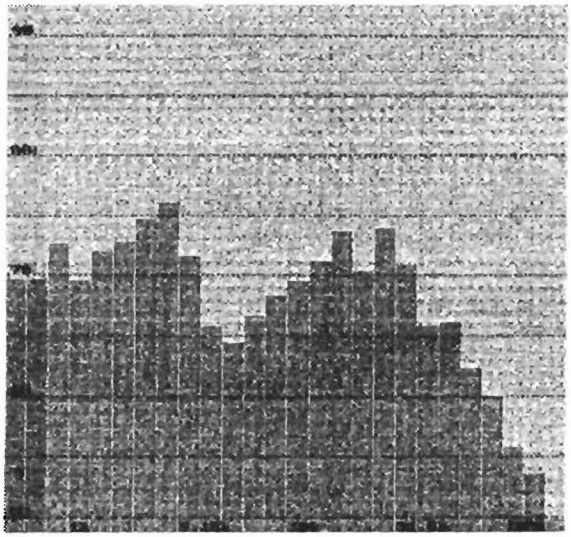

Рис. 12: 1/3 октавный спектр, измеренный во время пучка. По оси абцисс отложена частота в кГц. По оси ординат дана интенсивность в дБ.

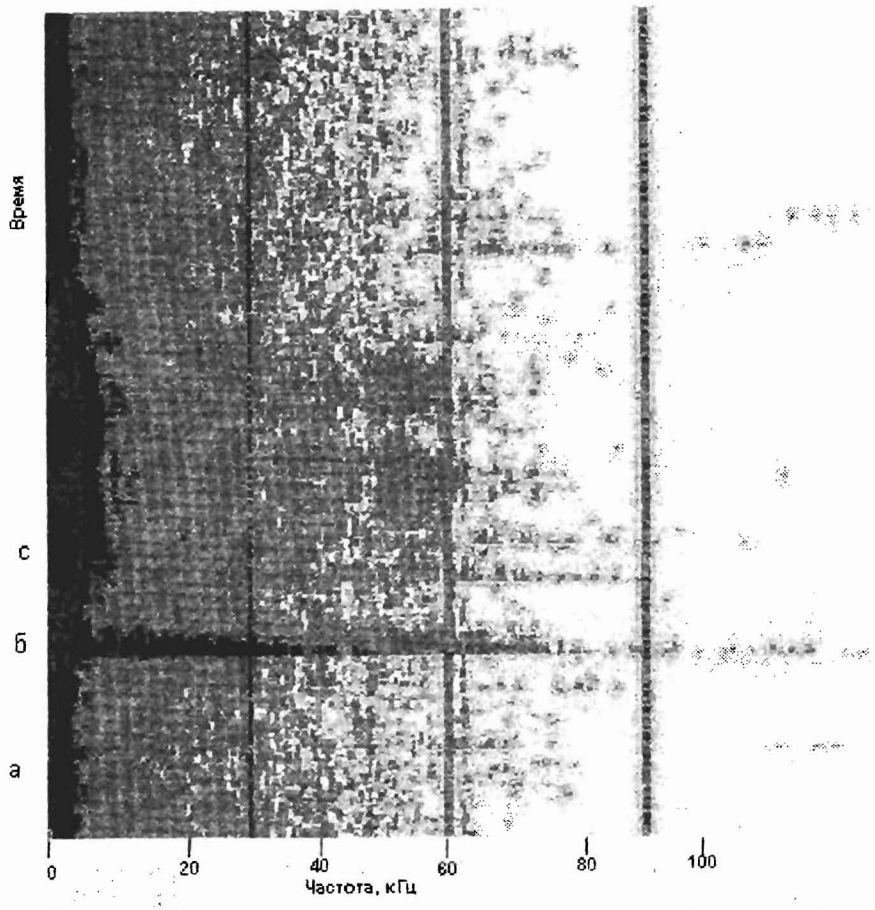

Рис. 13: Сонограмма акустического сигнала. По оси абцисс отложена частота в кГц. По оси ординат отложено время. Разная интенсивность цвета соответствует разной интенсивности сигнала. Временная область "а" соответствует фоновому сигналу. Область "б" соответствует прохождению пучка. После нее расположена область "с", которая характеризуется шумами от системы питания магнитов ускорителя

Таблица 2. Экспериментальные данные

				A1																K2									
Exp	E b	D, mm	E,depos eV	Rbh mm	ΔRbh mm	ts, mks	Δ ts mks	U1, mV	ΔU1 mV	T1/2 mks	ΔT1/2 mks	P, Pa	Δ P Pa	Um, mV	ΔUm mV	U-	T-	Rbh mm	ΔRbh mm	ts, mks	Δ ts mks	U1, mV	ΔU1, mV	T1/2 mks	ΔT1/2 mks	Um, mV	ΔUm mV
1	200	45.0	1.120E+19	219.0	3.0	146.0	2.0	2400	50	25.0	1.0			2400	100			190.5	3.0	127	2.0	4000	200.0	28.0	1.0	4000	200
2	200	45.0	1.848E+17	223.5	0.8	149.0	0.5	53.0	2.0	17.0	2.0	0.210	0.040	85.0	5.0			199.5	3.0	133	2.0	186.0	5.0	23.0	2.0	183	5
3	200	45.0	3.240E+17	324.0	3.0	216.0	2.0	67.0	3.0	17.0	1.5	0.268	0.040	125.0	3.0			301.5	2.3	201	1.5	254.0	5.0	21.0	1.5	272	5
4	200	45.0	1.000E+17	0.0	0.0													0.0	0.0								
5	200	10.6	1.456E+17	303.0	3.0	202.0	2.0	23.0	2.0	11.0	1.0	0.085	0.010	121.0	3.0			307.5	3.0	205	2.0	170.0	5.0	13.0	1.0	172	5
6	200	10.6	7.840E+16	310.5	1.5	207.0	1.0	10.8	0.5	9.7	0.5	0.035	0.006	82.0	3.0			309.0	3.0	206	2.0	85.0	4.0	12.4	0.5	85	3
7	200	10.6	8.040E+16	307.5	3.0	205.0	2.0	10.7	0.5	10.2	0.5	0.036	0.006	81.5	3.0			309.0	3.0	206	2.0	99.0	4.0	14.2	0.7	99	4
8	200	10.6	1.820E+17	306.0	1.5	204.0	1.0	23.0	2.0	10.0	1.0	0.082	0.010	88.0	3.0			309.0	3.0	206	2.0	180.6	5.0	12.8	1.0	181	5
11	200	10.6	2.440E+17	307.5	1.5	205.0	1.0	19.0	1.0	11.5	0.5	0.070	0.009	146.6	5.0			307.5	1.5	205	1.0	237.0	5.0	14.5	1.0	280	5
12	200	10.6	2.808E+15	0.0	0.0									5.0	0.5			0.0	0.0								
13	200	10.6	1.080E+16	328.5	3.0	219.0	2.0	3.0	0.5	8.0	0.5	0.020	0.003	16.0	0.5			310.5	3.0	207	2.0	37.0	1.5	11.5	0.5	37	2
14	125	10.6	7.800E+15	0.0	0.0									4.5	0.5			300.0	15.0	200	10.0	10.0	2.0	15.0	7.0	15	5
15	125	10.6	3.900E+16	351.0	4.5	234.0	3.0	4.8	0.5	17.0	2.0	0.017	0.003	25.0	0.5			285.0	4.5	190	3.0	23.0	3.0	28.0	3.0	52	5
16	125	10.6	9.150E+15	0.0	0.0									12.2	1.0			280.5	15.0	187	10.0	12.0	5.0	28.0	5.0	15	5
17	125	10.6	7.800E+16	348.0	4.5	232.0	3.0	11.0	0.5	22.0	3.0	0.033	0.006	79.0	1.0			280.5	3.0	187	2.0	67.0	2.0	32.0	2.0	140	5
18	125	10.6	1.440E+17	345.0	3.0	230.0	2.0	26.0	3.0	23.0	2.0	0.076	0.010	160.0	3.0			286.5	3.0	191	2.0	120.0	3.0	28.0	2.0	240	5
19	125	10.6	3.480E+17	348.5	7.5	231.0	5.0	47.0	3.0	25.0	3.0	0.150	0.020	310.0	5.0	40	21	282.0	3.0	188	2.0	250.0	4.0	32.0	2.0	484	6
20	125	20.0	3.960E+17	346.5	7.5	231.0	5.0	35.0	2.0	24.0	2.0	0.110	0.015	238.0	6.0	10	21	283.5	3.0	189	2.0	190.0	5.0	30.0	2.0	423	10
21	125	20.0	1.392E+18	345.0	3.0	230.0	2.0	110.0	5.0	25.0	2.0	0.360	0.020	700.0	10.0	45	18	268.5	4.5	179	3.0	600.0	10.0	40.0	3.0	1500	20