

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПРИ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВАХ

В. В. Адушкин, Б. Д. Христофоров

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, khrist@idg.chph.ras.ru

Описаны методики и некоторые результаты измерений при подводных, надводных и подземных ядерных взрывах на Северном полигоне. Приведены результаты исследования параметров гидроакустических сигналов при ядерном взрыве в губе Черная и при прибрежных подземных ядерных взрывах.

Ключевые слова: подводный взрыв, подземный взрыв, продукты взрыва, ударная волна.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2005 г. исполняется 50 лет начала работ по проведению ядерных взрывов на полигоне Новая Земля, в которых участвовали сотрудники Спецсектора Института химической физики (Института физики Земли) под руководством Н. Н. Семенова и М. А. Садовского. В настоящее время полученные данные и результаты их последующей обработки используются при совершенствовании методов контроля за ядерными взрывами, при моделировании разнообразных геофизических процессов, включая природные и техногенные катастрофы, при тестировании разработанных теоретических моделей процессов взрывного типа и т. д. [1–4].

Гидродинамические возмущения при ядерных взрывах (ЯВ) измерялись при трех подводных, надводном и наземном взрывах, произведенных в губе Черная, и при трех прибрежных подземных взрывах, произведенных в проливе Маточкин Шар. Характеристики этих взрывов приведены в табл. 1, 2. На акваториях располагались корабли, подводные лодки, гидросамолеты, плоты с установленной на них измерительной аппаратурой, на берегу были сооружены казематы с высокоскоростной фоторегистрирующей и иной аппаратурой. Программа научных исследований в губе Черная, в которых участвовали наши сотрудники и сотрудники Спецсектора ИХФ, включала измерения параметров акустических возмущений в воде, воздухе и грунте, развития «султана», базисной, гравитационной волн и других поверхностных явлений, выхода продуктов деления и радиационной обстановки в воде и окружающей местности. По этим данным определялись

основные характеристики взрыва, его тротиловый эквивалент и поражающее действие. При подготовке к испытаниям был разработан комплекс аппаратуры и методик для измерений действия ЯВ, выполнены модельные исследования при взрывах тротила.

На первом подводном ЯВ 21.09.1955 проводилась фоторегистрация поверхностных явлений с двух взаимно-перпендикулярных направлений камерами АФА-33, АКС-1, АКС-2 и др. Скоростные камеры СК-2, АКС и АФА-БАФ были установлены в бомболуке самолета ИЛ-28 и регистрировали картину взрыва сверху. Камера СК-2 была предназначена для регистрации огненного шара и его яркостной температуры. Для измерения поверхностных волн применялись резистивные датчики с регистрацией сигналов на тензостанциях. Самописцы давления СД измеряли параметры ударной волны в воздухе.

Таблица 1

## Взрывы в губе Черная

№ п/п	Дата, время	Энергия, кт	Глубина (высота), м
Подводные взрывы			
1	21.09.1955, 08:00:54	3,5	12
2	10.10.1957, 09:54:32,0	10	30
3	23.10.1961, 13:30:47	4,8	20
Надводные взрывы			
4	27.10.1961, 11:30:26,6	16	(1,1)
5	22.08.1962, 12:00:00	6	—
Наземный прибрежный взрыв			
6	07.09.1957, 11:00:01	32	На башне

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 02-05-64134).

Таблица 2  
Подземные взрывы  
на берегу пролива Маточкин Шар

№ п/п	Дата	Энергия, кт	Глубина, м/кт <sup>1/3</sup>
1	27.10.1966	800	90
2	12.09.1973	4000	95
3	29.08.1974	1500	120



Рис. 1. Фотография второго подводного взрыва в губе Черная 10.10.1957

Интенсивность радиоактивного излучения подводных взрывов проявлялась при подходе газового пузыря к поверхности, повышалась, достигая максимума по мере выхода продуктов в атмосферу, и после подъема облака снижалась до малых значений. В первом опыте султан не экранировал продукты деления, во втором опыте продукты не прорвали султан и интенсивность излучения из водяного столба была низкой. Базисная волна в первом и втором опытах содержала около 10 % осколков деления от полного их количества. Полные дозы гамма-излучения измерялись фотоиндикаторами и автоматическими гамма-рентгенометрами в различных точках опытного поля. Запуск и выключение приборов производились системой автоматического

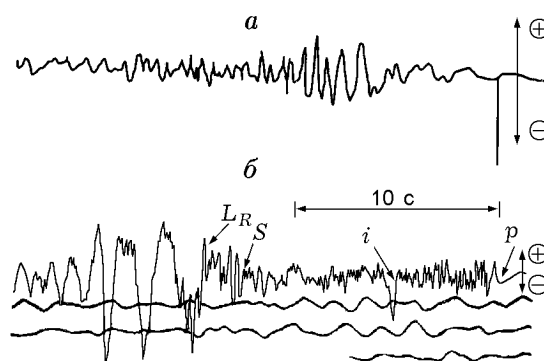


Рис. 2. Запись инфразвукового возмущения от прибрежного взрыва 07.09.1957 в губе Черная на расстоянии 4430 м (а) и сейсмограмма третьего подводного взрыва 23.10.1961 на расстоянии 120 км от эпицентра (б)

управления испытаниями, разработанной под руководством Г. Л. Шнирмана и П. В. Кевлишвили.

На рис. 1 показана фотография второго подводного ЯВ 10.10.1957 в губе Черная. На рис. 2,а приведен инфразвуковой сигнал от наземного прибрежного взрыва 07.09.1957, записанный микробарографом на расстоянии 4430 км, на рис. 2,б — сейсмограмма третьего подводного взрыва 23.10.1961 на расстоянии 120 км от эпицентра. По результатам проведенных исследований создаются базы данных, которые использованы в настоящей работе [5].

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ЯВ В ГУБЕ ЧЕРНАЯ

Параметры ударной волны в воде в ближней зоне измерялись механическими измерителями давления МИД-3, поршневыми импульсомерами ИМ-1, ИМ-2, ИМ-3 и пьезоэлектрическими датчиками с регистрацией сигналов двухканальными катодными осциллографами ПИД-9, разработанными и изготовленными в Спецсекторе и ОКБ Института химической физики. Применялись сотни таких устройств, которые спускались на лебедках с кораблей и понтоновых плотиков на различную глубину в широком диапазоне расстояний от предполагаемого эпицентра взрыва.

Максимальные приращения давления ударной волны  $\Delta p$ , рассчитанные по формуле Коула [4] для ближайшего эпицентрального расстояния  $R = 235$  м, достаточно хорошо совпадают с данными измерений первого подвод-

Таблица 3  
Средние значения максимальных приращений  
давления ударной волны в воде на разных глубинах

$h$ , м	10	15	20	25	30	40	50
$\Delta p$ , бар	310	316	303	301	299	257	306

ного ЯВ, приведенными в табл. 3. На каждой из выбранных глубин  $h$  устанавливалось несколько приборов. Среднее давление по результатам измерений  $\Delta p_1 = (299 \pm 12)$  бар. По этим данным и формулам  $R_0$  [м] =  $5,33q_s^{1/3}$  [кт],  $\Delta p = 14700/(R/R_0)^{1,13}$  [бар], взятым из [4], оценен эквивалентный радиус заряда:  $R_0 = (7,5 \pm 0,8)$  м, по ударной волне оценен тротильный эквивалент:  $q_s = (2,83 \pm 0,9)$  кт. Полный тротильный эквивалент определен из соотношения  $q_{s1} = q_s/0,65 = (4,35 \pm 1,38)$  кт.

Регистрация гидрофонами была проведена в третьем подводном (23.10.1961) и первом надводном (27.10.1961) ЯВ со стороны входа в губу на расстояниях  $18,8 \div 87,6$  миль. Частотные диапазоны измерений: инфразвуковой —  $5 \div 100$  Гц, звуковой —  $60 \div 10\,000$  Гц, ультразвуковой —  $8 \div 100$  кГц. Характерные частоты применявшихся фильтров —  $5,5 \div 7$ ;  $9 \div 12$ ;  $550 \div 700$  Гц и т. д.

Записи гидрофонов на расстоянии 18,8 миль, установленных в 1 м от скального дна с малым слоем ила толщиной 50 м, в третьем подводном ЯВ 23.10.1961 при глубине дна в эпицентре 47 м показаны на рис. 3, а, б. Времена первого вступления инфразвукового и гидроакустического сигналов 12 и 10 с соответствуют скоростям 2,9 и 3,48 км/с, характерным для поперечных волн в грунте. Амплитуды продольных волн ненамного превышали уровень помех (около 62 и 75 дБ). Время прихода к гидрофонам Т-фазы со скоростью 1,43 км/с в момент 24,4 с отмечается на осциллограммах в виде слабых возмущений на уровне поперечных волн.

Записи гидрофонов на расстоянии 56,6 миль в звуковом диапазоне частот при глубине дна 60 м приведены на рис. 3, в. Время вступления первого сигнала 13:36:18, время взрыва 13:30:47. Разность этих времен 331 с соответствует скорости 0,27 км/с, что близко к скорости воздушных волн, вызванных поршневым действием султана и рефрагированных в воздушном звуковом канале волн. Донные и водные волны не попали в развертку.

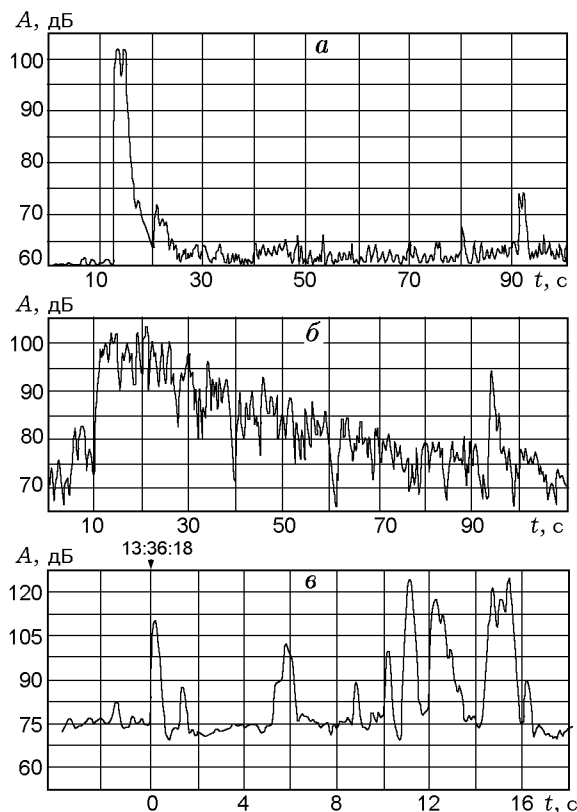


Рис. 3. Записи уровней звукового (а) и инфразвукового (б) гидроакустических сигналов на расстоянии 18,8 миль от эпицентра и уровня гидроакустического сигнала в звуковой полосе частот на расстоянии 56,6 миль (в) при третьем подводном ЯВ 23.10.1961

На рис. 4 представлены зависимости уровней гидроакустических сигналов от времени при надводном ЯВ 27.10.1961 на высоте 1,1 м при глубине дна в эпицентре 59 м. Записи сделаны на расстояниях 18,8 и 87,6 миль гидрофонами, установленными в 1 м от дна. На расстоянии 87,6 миль регистрация проходила при глубине песчаного дна 44 м в инфразвуковом диапазоне частот при уровне помех 86 дБ (см. рис. 4, а). В момент времени 11:30:52, отмеченный на регистрограмме через 25,4 с после взрыва, наблюдается вступление сигнала, распространявшегося со скоростью 6,32 км/с (по-видимому, отраженного от границы коры и верхней мантии). После этого время регистрации длилось еще 22 с (47,4 с от начала взрыва), что недостаточно для записи Т-фазы, которая должна приходиться к гидрофону на 112,2-й секунде при скорости 1,43 км/с.

На расстоянии 18,8 миль регистрация про-

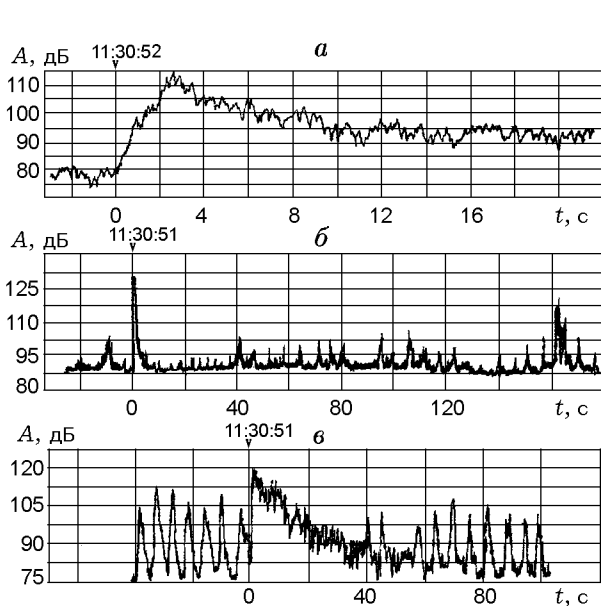


Рис. 4. Временные зависимости уровней гидроакустического сигнала при надводном атомном взрыве 27.10.1961, записанные гидрофонами, установленными на входе в бухту:

*a* — инфразвуковой диапазон частот на расстоянии 87,6 миль и глубине 44 м, *б, в* — соответственно звуковой и инфразвуковой диапазоны частот на расстоянии 18,8 миль и глубине 49 м

ведена в том же месте, что и при взрыве 23.10.1961, при глубине дна 49 м. Уровень шумов при регистрации составил около 87,8 и 70 дБ соответственно для каналов (*б*), (*в*). В момент времени 11:30:51, отмеченный на регистрограммах, на каналах (*б*) и (*в*) отчетливо наблюдается вступление Т-фазы со средней скоростью  $C = R/t = 1,43$  км/с. Время прохождения 24,4 с следует из разности времен взрыва 11:30:26,6 и прихода волны к гидрофону 11:30:51. Измеренное вблизи гидрофонов распределение температуры воды на глубинах 0 ÷ 50 м составило 3,5 ÷ 4,0 °С, что согласуется со скоростью звука 1,43 м/с.

### ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВАХ

Характеристики подземных ЯВ на берегу пролива Маточкин Шар, при которых проводились исследования волнового поля в воде, приведены в табл. 2 на основании сейсмических данных. В каждом опыте практически одновременно взрывалось несколько зарядов в близко расположенных штольнях.

Максимальное давление ударной волны

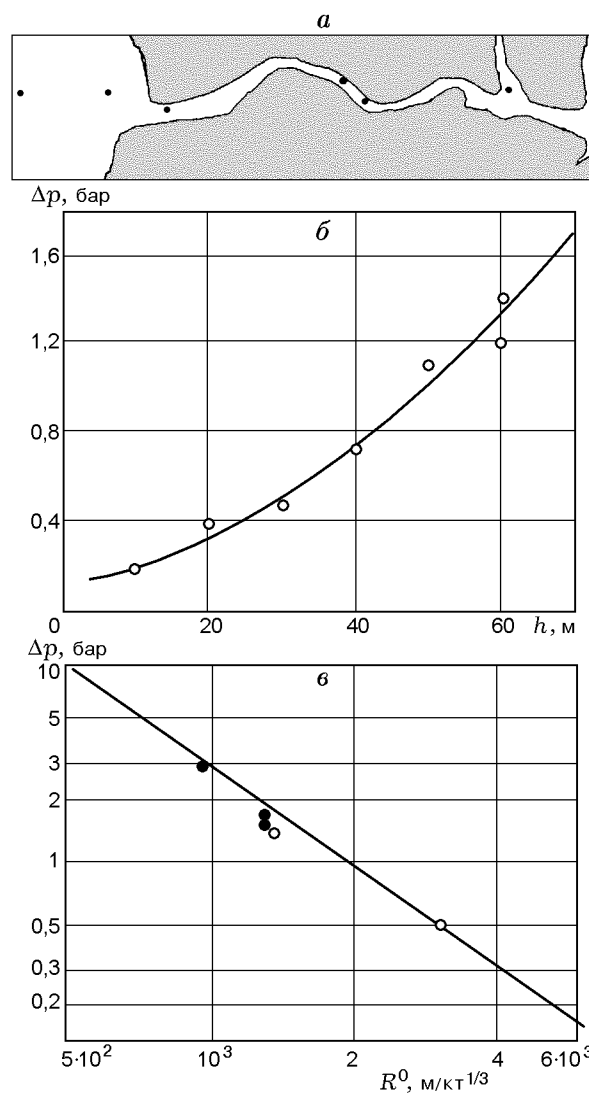


Рис. 5. Схема расположения измерительных пунктов (*a*). Зависимость приращения максимального давления ударной волны в воде от глубины погружения датчика при подземном ЯВ 29.08.1974 на расстоянии  $R^0 = 1350$  м/кТ<sup>1/3</sup> (*б*). Зависимость приращения максимального давления в воде от приведенного расстояния для подземных ЯВ (*в*)

измерялось на различных глубинах до 60 м мембранными измерителями давления МИД, установленными в шести измерительных пунктах в проливе и Баренцевом море на приведенных расстояниях  $R^0 = R/q^{1/3} = 1000 ÷ 3000$  м/кТ<sup>1/3</sup> (рис. 5, *a*). Регистрировались преломленные от дна в воду сейсмические волны под углами, близкими к скользящим (90°).

На рис. 5, *б* показана характерная зависимость приращения максимального давления  $\Delta p$  ударной волны в воде от глубины погру-

жения прибора  $h$  при взрыве 1974 г. с энергией 1500 кт на приведенном расстоянии  $R^0 = 1350 \text{ м/кт}^{1/3}$  при глубине водоема 70 м. Максимальное давление  $\Delta p$  возрастает от 0,18 до 1,3 бар при увеличении  $h$  от 10 до 60 м. Полученная зависимость характерна для волнового поля в воде, определяемого суперпозицией преломленной от дна сейсмической волны сжатия с нарастающим со временем давлением и отраженной от свободной поверхности воды волны разрежения. Поэтому данные механических измерений, кроме максимального давления и импульса, позволили оценить временные характеристики звукового импульса в воде и его энергию.

Параметры преломленной от дна в воду волны зависят от угла ее падения на дно водоема [4]. В случае скользящего падения, которое реализовывалось в опытах, для оценок использованы известные значения вертикальной компоненты массовой скорости сейсмической волны в ближней зоне полигона, где затухание слабо зависит от частоты, полученные из выражения

$$v_z = 12000/(R^0)^{1,6} \text{ [м/с]}. \quad (1)$$

Отсюда приращение максимального давления в преломленной в воду волне составляет

$$\Delta p = v_z \rho C = 180000/(R^0)^{1,6} \text{ [бар]}. \quad (2)$$

На рис. 5, в сплошной линией проведена зависимость (2) для преломленной в воду волны, которая в диапазоне  $R^0 = 1000 \div 3000 \text{ м/кт}^{1/3}$  согласуется с результатами измерений у дна водоема.

Проведенные исследования показывают, что гидроакустические методы регистрации могут быть полезны для мониторинга подземных ЯВ малых мощностей вблизи акваторий большого размера. В этом случае энергия преломленного в воду гидроакустического сигнала хотя и меньше сейсмической, но на больших расстояниях может ее превышать из-за увеличения высокочастотной компоненты с уменьшением энергии взрыва и из-за более слабого

затухания высоких частот в воде. В условиях звукового канала эти преимущества могут проявиться в большей мере.

## ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты исследования гидроакустических сигналов в широком диапазоне расстояний при подводном и надводном ядерных взрывах.

2. Приведены результаты измерения зависимостей максимального давления гидроакустических сигналов от расстояния и глубины погружения датчика в водоеме при прибрежных подземных ядерных взрывах. Наблюдается удовлетворительное согласие между опытными данными и результатами приближенных расчетов преломленной от дна в воду сейсмической волны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коробейников В. П., Христофоров В. Д. Подводный взрыв // Итоги науки и техники. Гидромеханика. Т. 9. М.: ВИНТИ, 1976. С. 54–119.
2. Адушкин В. В., Бурчик В. Н., Дивнов И. И. и др. Гидроакустические возмущения при ядерных и химических взрывах // Динамические процессы во внутренних и внешних оболочках земли (Геофизика сильных возмущений). М., 1995. С. 272–281.
3. Михайлов В. Н., Адушкин В. В., Христофоров Б. Д. и др. Ядерные испытания СССР. Т. 2. С. 320. (Министерство РФ по атомной энергии).
4. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950. С. 495.
5. Адушкин В. В., Христофоров Б. Д. База данных по ядерным и крупным химическим взрывам с выбросом в атмосферу. Регистр. свид-во № 2863 от 12.12.1997. Зарегистрирована за № 0229703124 в Государственном регистре; База данных «Природные и техногенные катастрофические явления взрывного типа с выбросом продуктов в атмосферу». Регистр. свид-во № 7568 от 29.12.2001. Зарегистрирована за № 0220108099 в Государственном регистре.

Поступила в редакцию 7/VI 2004 г.