

## СЕЙСМИЧЕСКОЕ, ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ И АКУСТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВОВ

А. В. Адушкин, В. Н. Бурчик, А. И. Гончаров, В. И. Куликов,  
Б. Д. Христофоров, В. И. Цыкановский

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, kulikov@idg4.chph.ras.ru

Приведены результаты натурных исследований гидроакустического, сейсмического и акустического эффектов подводного взрыва зарядов химического взрывчатого вещества. Исследования носили комплексный характер и включали видеосъемку поверхностных явлений в эпицентре взрыва, регистрацию гидроакустических волн в воде, сейсмических волн на суше и акустических волн в воздухе на расстояниях  $0,08 \div 30$  км от эпицентра взрыва. Получены параметры этих волн, характер их затухания с расстоянием, проанализированы их спектры. Показано, что главная особенность волновых форм гидроакустических, сейсмических и акустических сигналов обусловлена пульсациями полости с продуктами детонации, что может быть использовано для идентификации подводных взрывов.

Ключевые слова: подводный взрыв, гидроакустические, сейсмические и акустические волны.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию подводного взрыва посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ [1]. Особенность настоящей работы — натурные исследования и комплексный подход (одновременно проводилась регистрация гидроакустических волн в воде, сейсмических волн на суше и акустических волн в воздухе в широком диапазоне эпицентральных расстояний). Эксперименты проводились в акватории Ладожского озера. Использовались заряды тротила массой 0,225, 15 и 52 кг. Заряды опускались на тросах на глубину 15 м, глубина озера в эпицентре взрыва 30 м.

Развитие поверхностных явлений при взрыве регистрировалось видеокамерой. При взрыве зарядов массой 15 и 52 кг на поверхности воды наблюдались типичные для подводного взрыва явления: образование кавитационного пятна, связанного с выходом гидроакустической волны на поверхность озера, последующее формирование «султана», его подъем и разрушение при прорыве продуктов детонации в атмосферу. Однако для зарядов массой 225 г противодействие толщине воды оказалось значительным и поверхностные явления не наблюдались.

### ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эти исследования включали регистрацию прямой волны от детонации заряда (Т-фазы),

волн, возбуждаемых пульсациями газового пузыря, и донных волн, распространяющихся в скальном массиве озера. Применялись гидрофоны, изготовленные и протарированные в ЦНИИ ГИДРОПРИБОР. Регистрация проводилась на эпицентральных расстояниях 58, 78, 1 290 и 2 720 м. На расстояниях 58 и 78 м гидрофоны опускались в воду на глубину около 4,5 м. На расстоянии 1 290 м гидрофон опускался в воду с борта катера на глубину 10 м. На расстоянии 2 720 м гидрофоны опускались на глубину 8 м при глубине дна 12 м. Использовались два гидрофона чувствительностью 0,1 (гидрофон «П») и 5 мВ/Па (гидрофон «У»). Регистратором служили два магнитофона типа 7005 фирмы Брюль и Кьер. Регистрация проводилась в полосе частот  $0 \div 12,5$  кГц и  $0,04 \div 60$  кГц. Зарегистрированные сигналы при воспроизведении оцифровывались с частотой 10 и 30 кГц и записывались в память компьютера.

Характерные записи гидрофонов при взрыве заряда массой 225 г на эпицентральной дистанции 78 м приведены на рис. 1. На записи сигнала гидрофона «П» (рис. 1,а) видна прямая гидроакустическая волна от взрыва и волны от последующих двух пульсаций газового пузыря. Донные волны на этой регистрограмме практически неразличимы, их амплитуда невелика. Однако они хорошо видны на другой регистрограмме (рис. 1,б), полученной при использовании более чувствительного гидрофона «У».

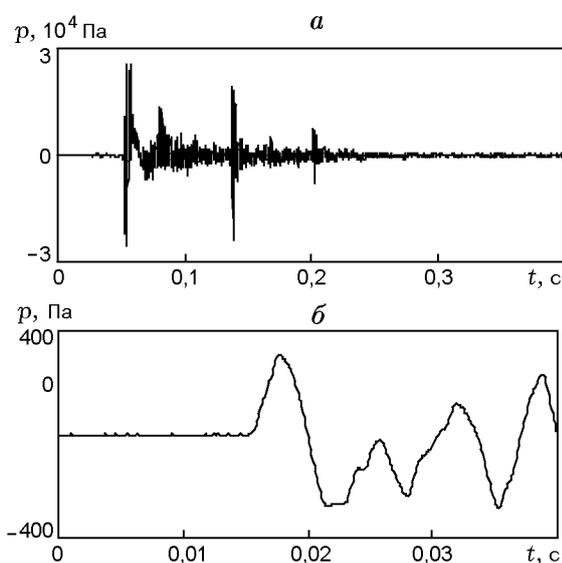


Рис. 1. Регистрограммы гидрофонов «П» (а) и «У» (б) при взрыве заряда массой 225 г на расстоянии 78 м

Отметим, что амплитуда прямой гидроакустической волны существенно ниже расчетной для случая безграничной жидкости [1]. Период пульсаций газового пузыря для взрыва заряда массой 225 г оказался близок к 85 мс, что хорошо согласуется с расчетами периода в приближении несжимаемой жидкости [1]. Амплитуды волн от пульсаций пузыря также ниже расчетных.

Из рис. 1 видно, что амплитуда преломленных в воду донных волн на эпицентральной расстоянии 78 м в 100 раз ниже амплитуды прямой гидроакустической волны. С увеличением расстояния эта разница сокращается и на расстоянии 2720 м составляет один порядок. В пределах разброса данных максимальные давления донных волн в опытах согласуются с данными, полученными при взрывах глубинных бомб [2] при пересчете масс зарядов и расстояний по принципу энергетического подобия.

Отметим, что на расстоянии 78 м разделения Р- и S-фаз донной волны еще не произошло. На больших эпицентральных расстояниях фазы донных волн разделяются, что позволило по времени вступления этих фаз определить скорости Р- и S-волн в скальном основании — 5,44 и 3,16 км/с соответственно. Как и следовало ожидать, амплитуда от S-фазы донной волны больше, чем от Р-фазы.

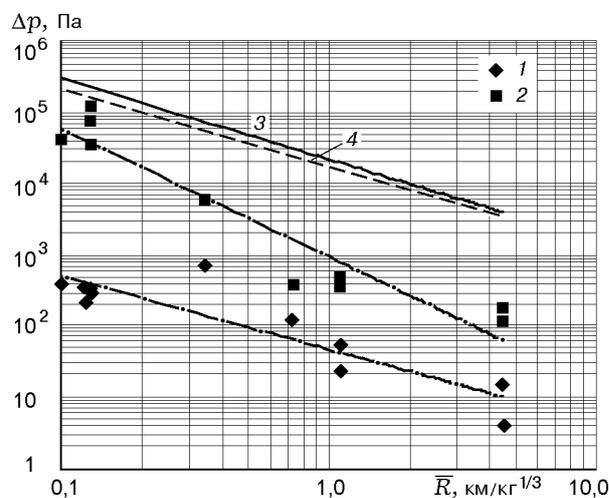


Рис. 2. Затухание амплитуды гидроакустических волн:

1 — донные волны, 2 — Т-фаза, 3 — расчет для безграничной жидкости, 4 — расчет с фильтрацией в полосе частот до 5 кГц

Были рассчитаны спектры для всего сигнала в целом и отдельно для донных и прямой гидроакустической волн. Со стороны верхних частот спектры ограничены частотой оцифровки. В сторону низких частот амплитуды спектров водных волн убывают, что, по-видимому, вызвано приходом волны разрежения, отраженной от свободной поверхности воды.

По результатам экспериментов на рис. 2 построены зависимости затухания амплитуд донной и прямой гидроакустической волн от приведенного эпицентрального расстояния. Из рис. 2 следует, что в экспериментах наблюдалось аномально высокое затухание амплитуды прямой гидроакустической волны. На близких эпицентральных расстояниях взрыв можно рассматривать как взрыв в безграничной воде, а для больших эпицентральных расстояний это взрывы в мелком слое воды. Приведенные расстояния  $\bar{R} = 0,1 \div 1 \text{ км/кг}^{1/3}$  являются переходной зоной.

Для объяснения сильного затухания выполнены дополнительные расчеты. Проверялось влияние свободной поверхности воды и связанные с этим нелинейные эффекты на параметры волны, распространяющейся в воде. При взрыве вблизи свободной поверхности расчетная длительность ударной волны  $\tau_0 = 2hH/cR$  уменьшается с эпицентральной расстоянием  $R$  и растет с глубиной ( $h$  и  $H$  — глубина погружения датчика и заряда соответ-

ственно,  $c$  — скорость звука в воде). Принимая реальные значения  $R = 75; 1\,290; 2\,720$  м,  $h = 4,5; 10; 8$  м,  $H = 15$  м, соответственно получаем  $\tau_0 = 1,24; 0,16; 0,06$  мс. Результаты расчетов показывают, что частотные характеристики сигналов не выходят за рамки полосы пропускания канала регистрации. В численных экспериментах было проверено, что выбранная частота оцифровки сигналов не влияет на результаты определения амплитуды волн. Кроме того, при малых углах падения волны на поверхность воды, когда фронт почти нормален к поверхности, волна разгрузки обгоняет фронт и давление может сильно уменьшаться с увеличением расстояния. Нелинейные эффекты, связанные с зависимостью скорости звука и скорости фронта волны от давления, могут приводить к сильному дополнительному затуханию ударной волны в мелких водоемах [3]. Однако оценки показали, что в условиях этих экспериментов нелинейные эффекты не могли привести к заметному уменьшению максимального давления.

Таким образом, наблюдаемое в экспериментах на больших расстояниях сильное (по сравнению с расчетом) затухание амплитуды прямой гидроакустической волны (Т-фазы) не может быть вызвано выбором принятой частоты оцифровки, нелинейными эффектами при отражении волн от границ водоема и поглощением энергии волн в воде. По-видимому, это связано с экранировкой звука в воде мелями, которые встречаются на пути гидроакустических сигналов, согласно картам глубин озера.

### СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследований — определение сейсмической эффективности подводного взрыва, типов излучаемых волн, их параметров, характера затухания и особенностей спектрального состава. Регистрация сейсмических волн проводилась на ближайшем к эпицентру острове и на материковом берегу озера на эпицентральных расстояниях 0,12, 1,01, 4,5 и 30,3 км. Привязка всех пунктов регистрации и эпицентра взрыва осуществлялась с помощью прибора GPS, точность привязки около  $4 \div 6$  м.

В каждом сейсмическом пункте регистрировались три компоненты колебательно-го движения грунта: вертикальная и две горизонтальные в направлениях север — юг и восток — запад. Выходы сейсмоприемников (СМЗ-КВ) подключались на вход аналого-

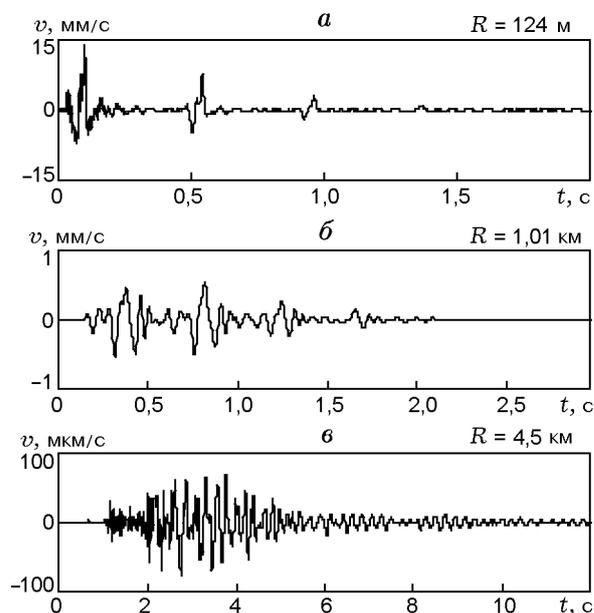


Рис. 3. Велосигramмы вертикальных колебаний грунта от взрыва заряда массой 52 кг на различных эпицентральных расстояниях

цифрового преобразователя и записывались на жесткий диск Notebook. В ближайшем от эпицентра пункте регистрации амплитуда сейсмических колебаний была столь велика, что их записывали без усиления, на расстояниях более 1 км сигнал сейсмоприемника усиливался в 140 раз в полосе частот  $0,5 \div 40$  Гц.

Радиосигналы станции «Маяк», транслируемые в начале каждого часа, записывались на жесткий диск компьютера в каждом пункте регистрации и при дальнейшей обработке использовались как единая метка точного времени.

В качестве примеров, иллюстрирующих особенности сейсмических колебаний грунта при подводном взрыве, на рис. 3 представлены записи вертикальных колебаний в трех пунктах регистрации на различных расстояниях от эпицентра при подводном взрыве заряда массой 52 кг.

На рис. 3,а показана велосигramма, полученная в ближайшем от эпицентра сеймопункте, на расстоянии  $R = 124$  м от эпицентра, где амплитуда колебаний около 15 мм/с. Видны повторяющиеся импульсы, связанные с пульсацией газового пузыря взрыва в воде. Интервалы времени между этими импульсами совпадают с периодом пульсации газового пузыря,

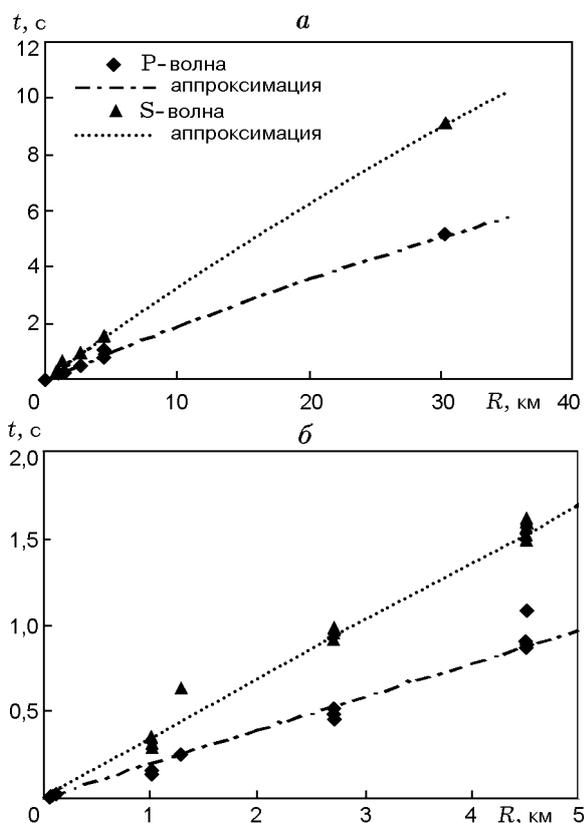


Рис. 4. Годографы сейсмозрывных волн на расстояниях до 30 км (а) и 5 км (б)

определенного по регистрограммам гидроакустической волны. Интервалы времени или период пульсаций тем больше, чем больше масса заряда.

На рис. 3,б приведена сейсмограмма, полученная на эпицентральной расстоянии 1,01 км. На этом расстоянии можно заметить разделение фаз Р и S волн. Видны также повторяющиеся волновые формы, интервалы следования которых совпадают с периодом пульсации газового пузыря.

Сейсмограмма, зарегистрированная на расстоянии 4,5 км от эпицентра, показана на рис. 3,в. Амплитуда колебаний составляет сотни микрометров в секунду. Из-за дисперсии и поглощения в среде высокочастотных составляющих колебаний увеличивается видимый период колебаний и их длительность. Вследствие этих эффектов пульсации пузыря на сейсмограммах на таком расстоянии визуально не видны.

Благодаря единой метке времени были определены времена вступления Р- и S-фаз сей-

смических волн на различных расстояниях и построен их годограф на расстояниях до 30 и 5 км (рис. 4). Аппроксимация годографа представлена функцией вида  $t = kR - \alpha R^2$ , где  $R$  — расстояние от эпицентра взрыва, коэффициент  $k$  — величина, обратная скорости распространения фронта фазы вблизи эпицентра взрыва. Скорость распространения Р-фазы вблизи эпицентра оказалась равной 4,9 км/с, дистанцию 4,5 км Р-фаза проходила со средней скоростью 5,13 км/с, дистанцию 30 км — со средней скоростью 5,88 км/с. Средняя скорость распространения S-фазы вблизи эпицентра составляла 2,9 км/с, на дистанции 4,5 км — около 2,96 км/с и на дистанции 30 км — около 3,33 км/с. По скорости распространения сейсмозрывной волны дно Ладожского озера можно характеризовать как достаточно цельный скальный массив без значительных осадочных отложений.

Характеристика дна озера как гранитно-скального массива подтверждается характером затухания. На рис. 5 представлены зависимости амплитуд скоростей колебаний в S-фазе и Р-фазе сейсмозрывных волн от приведенного (по корню кубическому из массы заряда) эпицентрального расстояния. По экспериментальным точкам методом наименьших квадратов получены аналитические зависимости скорости колебаний в сейсмозрывных волнах для Р- и S-фаз:  $v_P = 2050/\bar{R}^{1,5}$  и  $v_S = 725/\bar{R}^{1,5}$  соответственно, где  $[v] = \text{мм/с}$ ,  $[\bar{R}] = \text{м/кг}^{1/3}$ . На ближайшем эпицентральной расстоянии 124 м Р- и S-фазы не разделяются, поэтому зарегистрированная амплитуда скорости колебаний рассматривается как амплитуда и Р-фазы, и S-фазы сейсмозрывной волны, и соответственно на рис. 5,а и 5,б нанесены одинаковые значения амплитуд. На рис. 5 приведена также известная [4] зависимость затухания амплитуды сейсмозрывной волны в граните, полученная при взрывах сосредоточенных зарядов химических ВВ на карьерах:  $v = 2500/\bar{R}^{1,5}$ , где  $[v] = \text{мм/с}$ ,  $[\bar{R}] = \text{м/кг}^{1/3}$ . Заметим, что авторы [4] не выделяют амплитуды Р- и S-волн. По-видимому, с этой зависимостью следует сопоставлять зарегистрированные нами амплитуды S-волн (как наибольшие). Тогда из рис. 5,а следует, что сейсмическая эффективность подводного взрыва на Ладожском озере такая же, как и при химических взрывах в граните.

Однако взрывы, проведенные ранее в

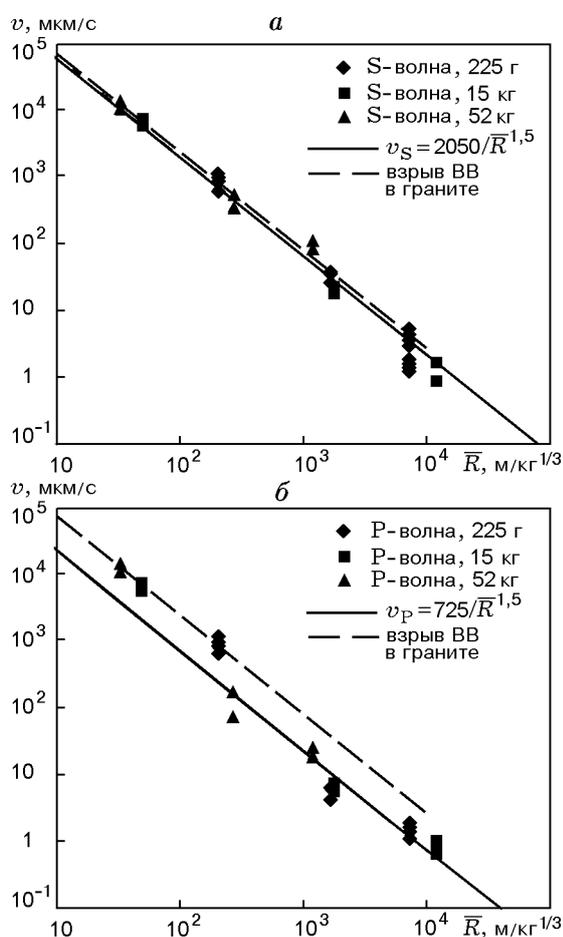


Рис. 5. Затухание сейсмозврывных волн в S-фазе (а) и P-фазе (б) с приведенным расстоянием

Мертвом море, показали, что сейсмическая эффективность подводных взрывов [5] существенно превышает сейсмическую эффективность подземных взрывов [6]. Низкая сейсмическая эффективность подводных взрывов в Ладожском озере, по-видимому, связана с тем, что акустический импеданс воды Ладожского озера на 45 % меньше, чем Мертвого моря.

Как уже отмечалось, характерной особенностью подводного взрыва являются пульсации газового пузыря, которые визуально наблюдаются в сейсмических сигналах при взрыве заряда массой 52 кг на эпицентральных расстояниях 0,12 и 1,01 км (см. рис. 3). На больших расстояниях проявление пульсации газового пузыря в сейсмосигнале визуально не наблюдается.

Известно, что спектры периодически повторяющихся сигналов характеризуются по-

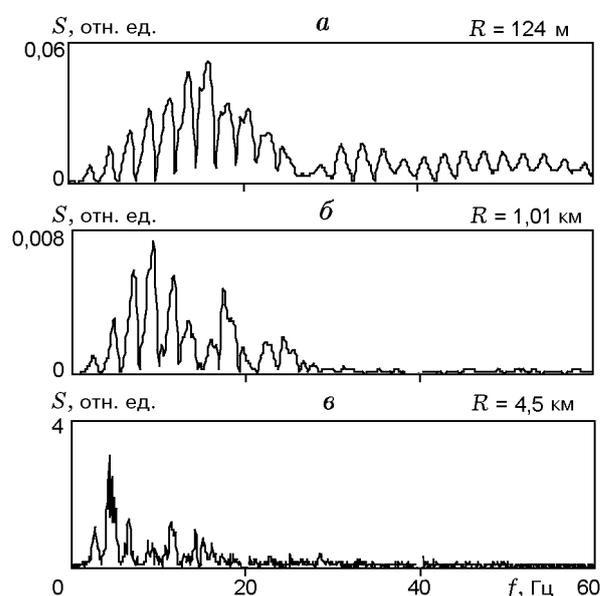


Рис. 6. Спектры велосиграммы вертикальных колебаний при взрыве заряда массой 52 кг

лосчатой структурой. Были проведены расчеты амплитудных спектров Фурье зарегистрированных велосиграммы. Для иллюстрации на рис. 6 показаны рассчитанные спектры сейсмических сигналов, приведенных на рис. 3. Спектр сигнала на ближайшем эпицентральной расстоянии 124 м (рис. 6,а) имеет ярко выраженную полосчатую структуру с шириной полосы 2,27 Гц, что соответствует интервалу следования импульсов в сейсмическом сигнале, равному 0,44 с. Непосредственно определенные по велосиграмме интервалы времени между импульсами составили 0,45; 0,42 и 0,4 с, что подтверждает связь полосчатой структуры спектра с пульсациями пузыря. Отметим, что при спектральном анализе получается оценка среднего периода пульсации полости. В действительности период пульсации полости, как показывают расчеты, уменьшается с увеличением порядкового номера пульсации, что и отражено на велосиграмме.

Полосчатый спектр получен и для велосиграммы, зарегистрированной на эпицентральной расстоянии 1,01 км (рис. 6,б). Даже в спектре сигнала, зарегистрированного на эпицентральной расстоянии 4,5 км, наблюдается полосчатая структура, хотя визуально на велосиграмме (рис. 6,в) не видны особенности колебаний, связанные с пульсацией газового пузыря. Следовательно, спектральный анализ сейсмических сигналов является более предпочти-

тельным инструментом для выявления пульсаций пузыря и идентификации подводных взрывов от подземных взрывов и землетрясений.

### АКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Воздушные волны при подводном взрыве инициируются движением поверхности воды в эпицентре взрыва. Амплитуды этих волн достаточно малы, поэтому их свойства хорошо описываются в акустическом приближении. Основные положения этого приближения — дисперсия отсутствует, изменение амплитуды давления в волне обратно пропорционально расстоянию от источника.

Отметим, что в предыдущие годы нами проводились исследования акустических волн при взрывах в грунтах. Накопленный экспериментальный материал по регистрации воздушных волн при подземных взрывах как небольших [7], так и крупных зарядов [8] показал, что в волне имеется четыре фазы: головная волна как результат преломления взрывной волны сжатия из грунта в воздух; прорыв газов в атмосферу возбуждает две относительно короткие по времени фазы положительной полярности; схлопывание котловой полости возбуждает относительно длительную фазу в виде отрицательной полусинусоиды и вторичное расширение полости дает также относительно длительную фазу в виде положительной полусинусоиды. Первая фаза уменьшается обратно пропорционально глубине заложения заряда, остальные фазы уменьшаются с глубиной значительно быстрее. При камуфлетном взрыве, когда на поверхности грунта не образуется воронки, все фазы, кроме первой, незначительны. По параметрам заложения заряда обсуждаемые здесь подводные взрывы заряда массой 225 г аналогичны камуфлетному взрыву. По развитию поверхностных явлений, как показала видеосъемка, подводные взрывы зарядов массой 15 и 52 кг аналогичны взрывам на выброс. Поэтому при подводных взрывах ожидалась генерация акустических волн, подобных акустическим волнам при взрывах в грунтах, и вследствие этого использовались каналы регистрации акустических волн, применявшиеся при взрывах в грунтах.

Акустические волны подводного взрыва регистрировались измерительным микрофоном фирмы Брюль и Кьер типа 4147. Это микрофон конденсаторного типа, поэтому его подключали к электронному блоку, который

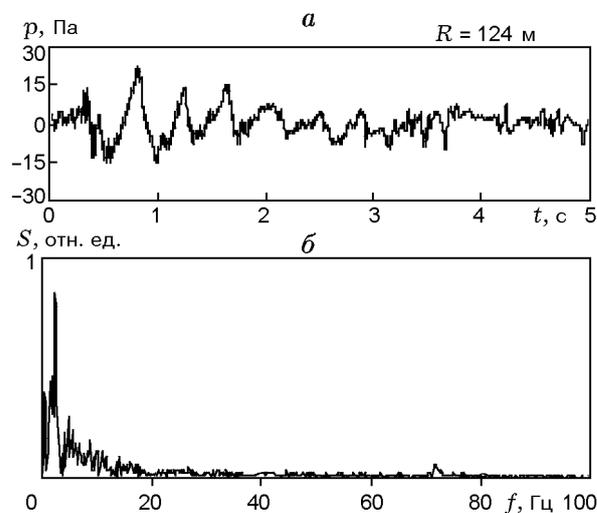


Рис. 7. Акустический сигнал (а) и его спектр (б) при взрыве заряда массой 52 кг

формирует поляризационное напряжение для микрофона и усиливает его выходной сигнал, пропорциональный давлению в воздушной акустической волне. С помощью платы аналого-цифрового преобразователя акустический сигнал преобразовывался в цифровой код и поступал в Notebook, где записывался на жесткий диск. Регистрация акустических сигналов проводилась только на эпицентральной расстоянии 120 м, в месте размещения ближайшего сейсмического пункта. На большем удалении от эпицентра взрыва регистрация не проводилась, так как амплитуда акустического сигнала была сопоставима с амплитудой акустического фона.

На рис. 7 представлены акустический сигнал подводного взрыва заряда массой 52 кг и его спектр. В акустическом сигнале этого взрыва имеется первая положительная фаза, отличающаяся плавным нарастанием переднего фронта и относительно резким спадом заднего фронта, где давление в волне меняет знак. Такой характер изменения сигнала обусловлен кавитационными явлениями при выходе ударной волны от подводного взрыва на поверхность воды, визуально наблюдаемыми как «белый круг». Давление в акустической волне еще какое-то время колеблется, оставаясь отрицательным, так как ударная волна от взрыва продолжает преломляться в воздух, проходя через кавитационную зону. Следующее затем нарастание давления в волне до максимума связано с пульсацией газового пузыря. В акусти-

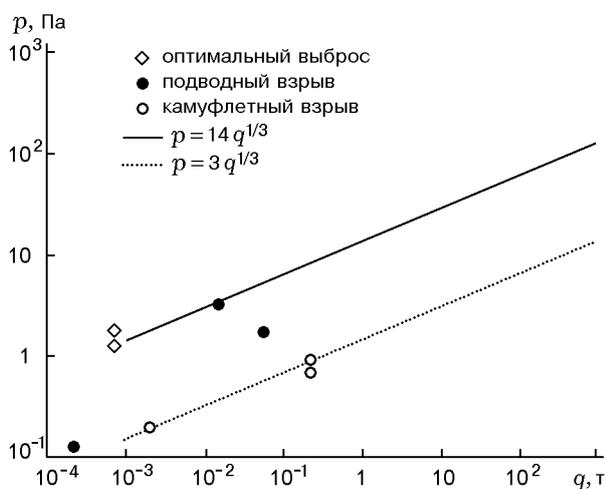


Рис. 8. Зависимость амплитуды акустических волн, приведенной к расстоянию 1 км, от массы заряда

ческом сигнале наблюдается три всплеска с «острыми» максимумами, следующими за первой фазой. Интервалы времени между первой фазой и всплеском от пульсации газового пузыря и далее между всплесками от дальнейших пульсаций равны соответствующим интервалам пульсации газового пузыря, полученным по записям гидроакустической волны (см. рис. 1) и сейсмической волны (см. рис. 3). Отметим, что на акустическом сигнале видны еще три последующие пульсации газового пузыря, но с менее выраженными максимумами, которые на сейсмограмме не выявляются.

В спектре акустического сигнала взрыва заряда массой 52 кг преобладают низкие частоты. Максимум спектральной плотности достигается на частоте 2,4 Гц. Эта частота соответствует видимому на акустической записи периоду пульсаций полости.

В принятом акустическом приближении амплитуда давления в воздушной волне затухает обратно пропорционально эпицентральному расстоянию. Поскольку дисперсия в акустических волнах отсутствует, амплитуды акустических волн можно привести к эпицентральному расстоянию 1 км. Приведенная амплитуда волны будет зависеть только от массы взрываемого заряда  $ВВ$  и от заглубления заряда.

На рис. 8 представлена зависимость амплитуды акустических воздушных волн подземных взрывов от массы взрываемого за-

ряда, полученная нами при взрывах зарядов массой от сотен грамм до нескольких сотен тонн. Сплошная линия аппроксимирует зависимость параметров акустических волн на эпицентральному расстоянию 1 км при взрывах на выброс и аналитически выражается формулой  $p = 14q^{1/3}$  [Па], где  $[q] = \text{т}$ . Экспериментальные точки этой зависимости получены как при модельных взрывах в суглинках, так и при взрывах на карьерах Курской магнитной аномалии [7]. Пунктирная линия аппроксимирует зависимость параметров акустических волн на эпицентральному расстоянию 1 км при камуфлетных взрывах:  $p = 3q^{1/3}$  [7]. Темными кружками на рисунке нанесены амплитуды акустических волн при подводных взрывах на Ладожском озере, приведенные к эпицентральному расстоянию 1 км. Из рис. 8 видно, что амплитуды акустических волн при подводных взрывах лежат между зависимостями, полученными при камуфлетном взрыве и взрыве на выброс. Это указывает на общность механизма формирования акустических волн при подводных взрывах и взрывах в грунтах, а акустический эквивалент подводного взрыва практически такой же, как у взрывов на выброс.

## ВЫВОДЫ

1. Зарегистрированы гидроакустические, сейсмические и акустические волны при подводных взрывах на Ладожском озере. Получены параметры этих волн, их спектры и характер затухания с эпицентральному расстоянием.
2. Показано, что наиболее характерная черта подводного взрыва — пульсации газового пузыря, отражающиеся на волновых формах гидроакустических, сейсмических и акустических волн и их спектров.
3. Расчеты периодов пульсаций для случая безграничной жидкости согласуются с данными натуральных взрывов.
4. Зарегистрированные амплитуды Т-фазы гидроакустической волны существенно меньше расчетных.
5. Сейсмический эквивалент подводных взрывов на Ладожском озере близок к сейсмическому эквиваленту подземных взрывов в грунтах.
6. Акустический эквивалент подводных взрывов близок к акустическому эквиваленту взрывов в грунтах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. лит., 1950.
2. Непрочнов О. П. Сейсмические исследования в океане. М.: Наука, 1976.
3. Коробейников В. П., Христофоров Б. Д. Подводный взрыв // Итоги науки и техники. Гидромеханика. М.: Наука, 1976. Т. 9. С. 54–119.
4. Цейтлин Я. И., Смолин Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981.
5. Gitterman Y. Magnitude-yield correlation and amplitude attenuation of chemical explosions in the Middle East // Proc. of the 20th Annual Seismic Research Symp. on Monitoring a Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty. 1998. P. 302–311.
6. Костюченко В. Н., Родионов В. Н., Султанов Д. Д. Сейсмические волны при подземных ядерных взрывах // Peaceful Nuclear Explosions, III. Vienne: Intern. Atomic Energy Agency, 1974. P. 447–461.
7. Гончаров А. И. Воздушная волна при взрыве заглубленного заряда ВВ // Физические процессы в геосферах при сильных возмущениях (геофизика сильных возмущений). М.: ИДГ РАН, 1996. С. 284–285.
8. Гончаров А. И., Куликов В. И., Мартинсон Н. М. О сейсмическом действии массовых взрывов на карьерах КМА // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 1. М.: МГГУ, 2002. С. 162–165.

*Поступила в редакцию 11/VI 2004 г.*

---