

## АУДИОВИЗУАЛЬНЫЕ, ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ И СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВБЛИЗИ ИСТОЧНИКА ПРИ ПОДВОДНЫХ ВЗРЫВАХ В МЕРТВОМ МОРЕ

Е. Гитерман

Геофизический институт Израиля, 71100 Лод, Израиль, yefim@seis.mni.gov.il

Представлены результаты наблюдений гидроакустических, акустических и сейсмических эффектов от масштабных взрывов мощностью 0,5, 2 и 5 т. Опыты были проведены в ноябре 1999 г. в Мертвом море на глубине 70 м (485 м ниже уровня океана). Основная цель эксперимента — калибровка сейсмических станций Международной мониторинговой системы на Ближнем Востоке с использованием точных времен прибытия и феноменологических особенностей источника подводных взрывов. Взрыв максимальной интенсивности соответствовал сейсмической магнитуде около 4 и был зарегистрирован на расстоянии до 3500 км. Сейсмические и гидроакустические наблюдения, полученные в ближней зоне от источника взрыва, были использованы для оценки параметров проведенных взрывов. Путем подбора кривой, описывающей профили давления — время получена оценка энергии прямой ударной волны — 30,8 % от полной энергии взрывчатого вещества. Тротильный эквивалент заряда массой 5000 кг используемого взрывчатого вещества *Chenamom* был определен в 4010 кг, что соответствует оценке изготовителя для энергии *Chenamom*  $\approx 80$  % от ТНТ.

Ключевые слова: подводный взрыв, гидроакустика, сейсмические колебания, ударная волна.

### ВВЕДЕНИЕ

Уникальный сейсмический и гидроакустический эксперимент, включающий крупномасштабные химические взрывы, был проведен в Мертвом море 8–11 ноября 1999 г. Геофизическим институтом Израиля (ГИИ). Эксперимент был частью исследовательского проекта по обеспечению калибровочных сейсмических источников, отсутствующих в этом регионе, улучшению мониторинга и проверки на Ближнем Востоке выполнения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [1].

Цели эксперимента — калибровка региональных времен и путей распространения сейсмических волн через Ближний Восток и Восточное Средиземноморье для повышения точности локализации сейсмических событий; калибровка локальных и региональных сейсмических станций и станций Международной мониторинговой системы (ММС); получение данных, характеризующих подводные взрывные источники, — в целом, чтобы улучшить возможности ММС по обнаружению, локализации и распознаванию источников.

На основании результатов мелкомасштабных подводных взрывов, проведенных в 1993 г.

[2], была сделана оценка, что взрыв заряда массой 5 т будет соответствовать сейсмическому событию с магнитудой  $\approx 4$ . Ожидалось, что такое событие должно регистрироваться региональными сейсмическими станциями на больших расстояниях, до  $20^\circ$  от Мертвого моря.

Выбор места взрыва был обусловлен не только безжизненностью Мертвого моря, но и уникальными свойствами его сверхсоленой воды: плотность  $1.236 \text{ г/см}^3$  и акустическая скорость звука  $1770.6 \text{ м/с}$  [3], что значительно выше, чем в океане. Такие свойства воды могут еще более усилить хорошо известное многократное увеличение сейсмического эффекта подводного взрыва по сравнению с подводным взрывом заряда той же массы.

Хотя фауны в Мертвом море нет, оно уникально своими природными явлениями, как то: минеральные источники, пустынный оазис, природные заповедники и т. п. Точка взрыва была выбрана в нескольких километрах от местных курортов, поселений и важного инженерного сооружения — рабочей дамбы Мертвого моря. Условия безопасности для людей в море, для собственности и местной окружающей среды были оценены и проанализированы до начала испытаний. Однако, чтобы подтвердить предположения, на которых основывал-

Y. Gitterman.

The Geophysical Institute of Israel, Lod 71100, Israel.

ся анализ безопасности, эксперимент был начат со взрывов меньшей мощности — 0.5 и 2 т взрывчатого вещества (ВВ).

Эксперименты записывали на видео пленку любительской камерой, расположенной на плоту на расстоянии несколько сотен метров от места взрыва (рис. 1). Видео- и аудиозаписи обеспечили наблюдение и приближенные из-

мерения времен специфических физических явлений. При помощи двух пьезоэлектрических датчиков были выполнены специальные гидроакустические измерения параметров ударных волн в воде на близком расстоянии ( $\approx 700$  м) от места взрывов зарядов массой 2 и 5 т. Подобные измерения никогда ранее не проводились в сверхсоленой воде с такими уникальными свойствами, как в Мертвом море.

Сейсмические и гидроакустические наблюдения, полученные в ближней зоне от источника, были использованы для оценки параметров проведенных взрывов. Все измерения и результаты подробно представлены в [1].

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Детали устройства заряда и действий на море приведены в [4]. Использовалось промышленное водоустойчивое ВВ Chenamon, основой которого является аммиачная селитра с плотностью  $1.3 \div 1.4$  г/см<sup>3</sup> (немного большей, чем у Мертвого моря). Параметры взрывов приведены в табл. 1. Фактическая глубина заложения зарядов варьировала в пределах  $h = 70 \div 73$  м вследствие подводных течений. Точность измерения момента взрыва была меньше 5 мс. Координаты точки взрыва определялись с помощью точной дифференциальной GPS-системы, однако из-за сильно изменяющихся подводных течений и ветров фактическую точность положения места взрыва мы оценили примерно в  $20 \div 30$  м.

Детальная карта профиля дна Мертвого моря [5] показывает, что глубина моря в месте проведения эксперимента  $H \approx 260 \div 265$  м (рис. 2).

При первом взрыве заряда массой в 0.5 т измерительные системы для определения GPS-координат и момента взрыва, а также гидроакустические приборы были размещены на деревянном судне, находящемся на удалении  $r \approx 900$  м от точки взрыва. При двух более мощ-

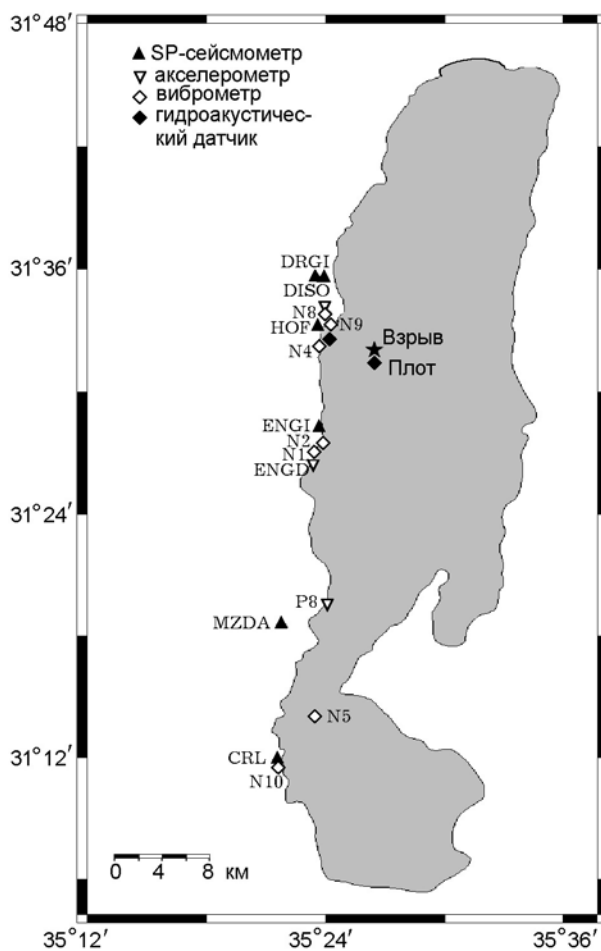


Рис. 1. Расположение места проведения эксперимента и ближайших регистрирующих станций

Таблица 1

Параметры калибровочных подводных взрывов в Мертвом море

Номер опыта	Дата	Полная масса ВВ, кг	Время взрыва, GMT	Координаты места взрыва
1	08.11.99	500	13:00:00.33	31.5330° с. ш. 35.4406° в. д.
2	10.11.99	2060	13:59:58.21	31.5338° с. ш. 35.4400° в. д.
3	11.11.99	5000	15:00:00.80	31.5336° с. ш. 35.4413° в. д.

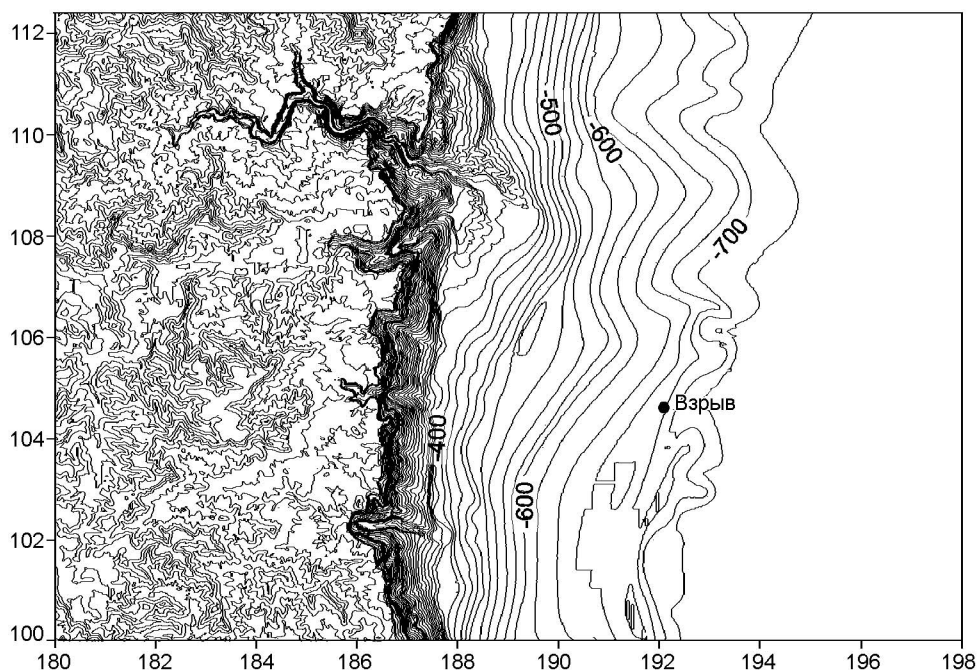


Рис. 2. Профиль дна Мертвого моря вблизи точки взрыва:  
уровень поверхности воды  $-415$  м относительно поверхности Мирового океана (на ноябрь 1999 г.),  
по осям — локальные координаты, км

ных взрывах измерительные системы устанавливались на металлическом плоту на понтонах, устойчивом к действию ударной волны, а расстояние до точки взрыва было сокращено до  $\approx 600$  м. Этот же плот, отбуксированный судном к месту взрыва, доставил взрывчатку и кран для погружения зарядов в воду.

#### АУДИОВИЗУАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Видео- и звуковые записи обеспечили наблюдения и приближенные измерения времен интересных физических явлений, таких как кавитационный эффект, моменты прибытия ударных волн и пульсации пузыря вблизи плота. Кроме того, они позволяли оценить время распространения ударной волны до поверхности моря и до плота и проверить величину заглубления заряда и расстояние от плота до места взрыва. Специфическое поверхностное явление — белое круглое пятно — наблюдалось в эпицентре первого взрыва (рис. 3).

При скорости видеозаписи 25 кадр/с точность временных измерений равнялась интервалу между двумя последовательными кадрами, который составлял 40 мс. Фотографии взрыва 2-тонного заряда приведены на рис. 4. Видны следующие явления:



Рис. 3. Пятно в эпицентре, появившееся через несколько секунд после первого взрыва (снимок с борта самолета Картографической службы Израиля)

а) образование кавитационного эффекта при выходе прямой ударной волны на свободную поверхность воды, наблюдавшееся примерно при  $t \approx 40$  мс, что соответствует оценке времени распространения  $t_c = (70 \text{ м}) / (1770 \text{ м/с}) = 39.5$  мс. Кадры при  $t = 80, 120$  и  $200$  мс показывают развитие кавитационного процесса;

б) нарушение фокусировки камеры при  $t \approx 440$  мс, обусловленное прибытием к плоту ударной волны по воде. Это время соответ-

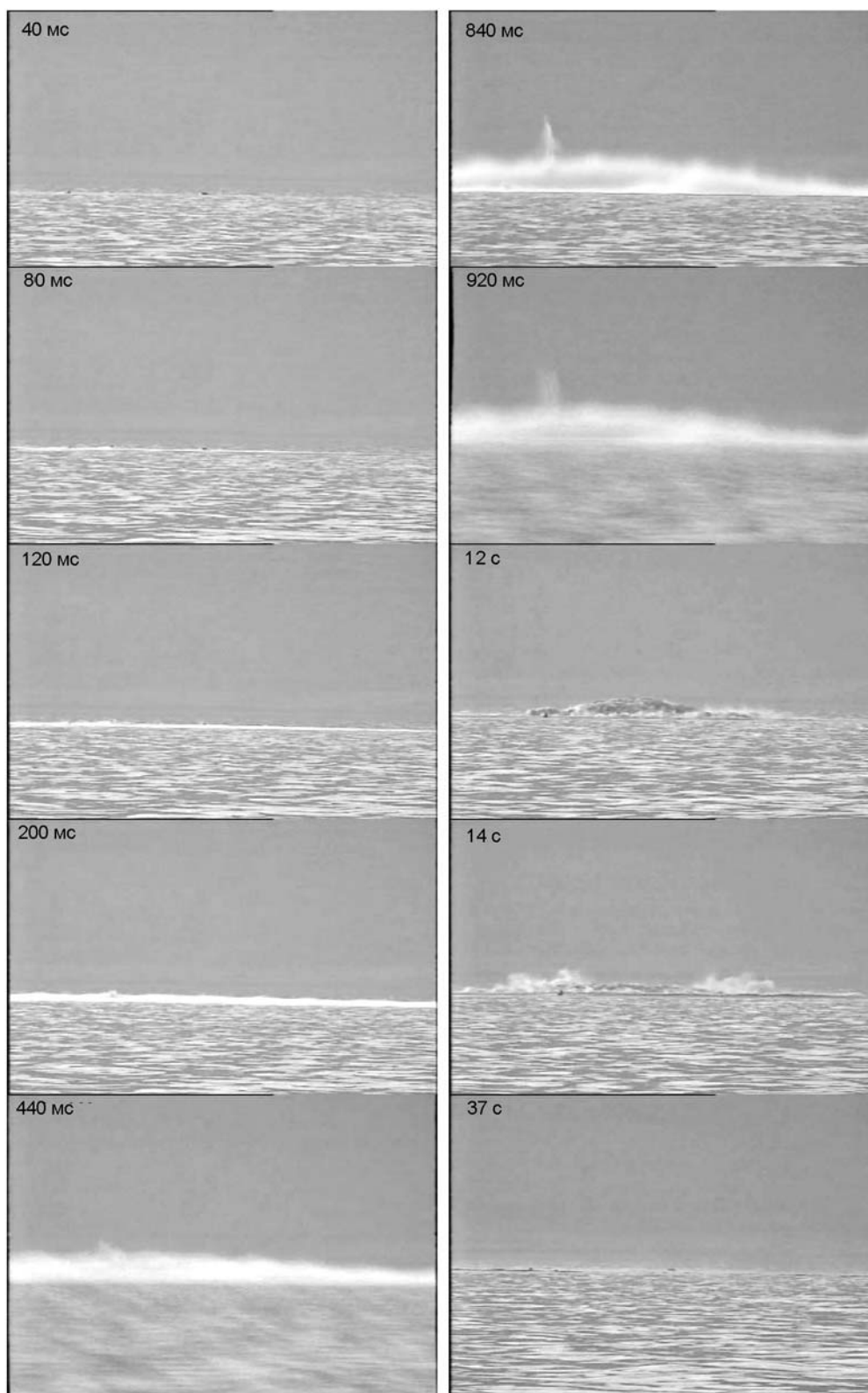


Рис. 4. Видеокадры 2-тонного взрыва, полученные с пловца на расстоянии 770 м (опыт № 2): горизонтальная полоска на поверхности воды в момент времени  $t = 80 \div 200$  мс — кавитационный эффект, в момент времени  $t = 440$  мс — возмущения фокусировки камеры, обусловленные приходом ударной волной

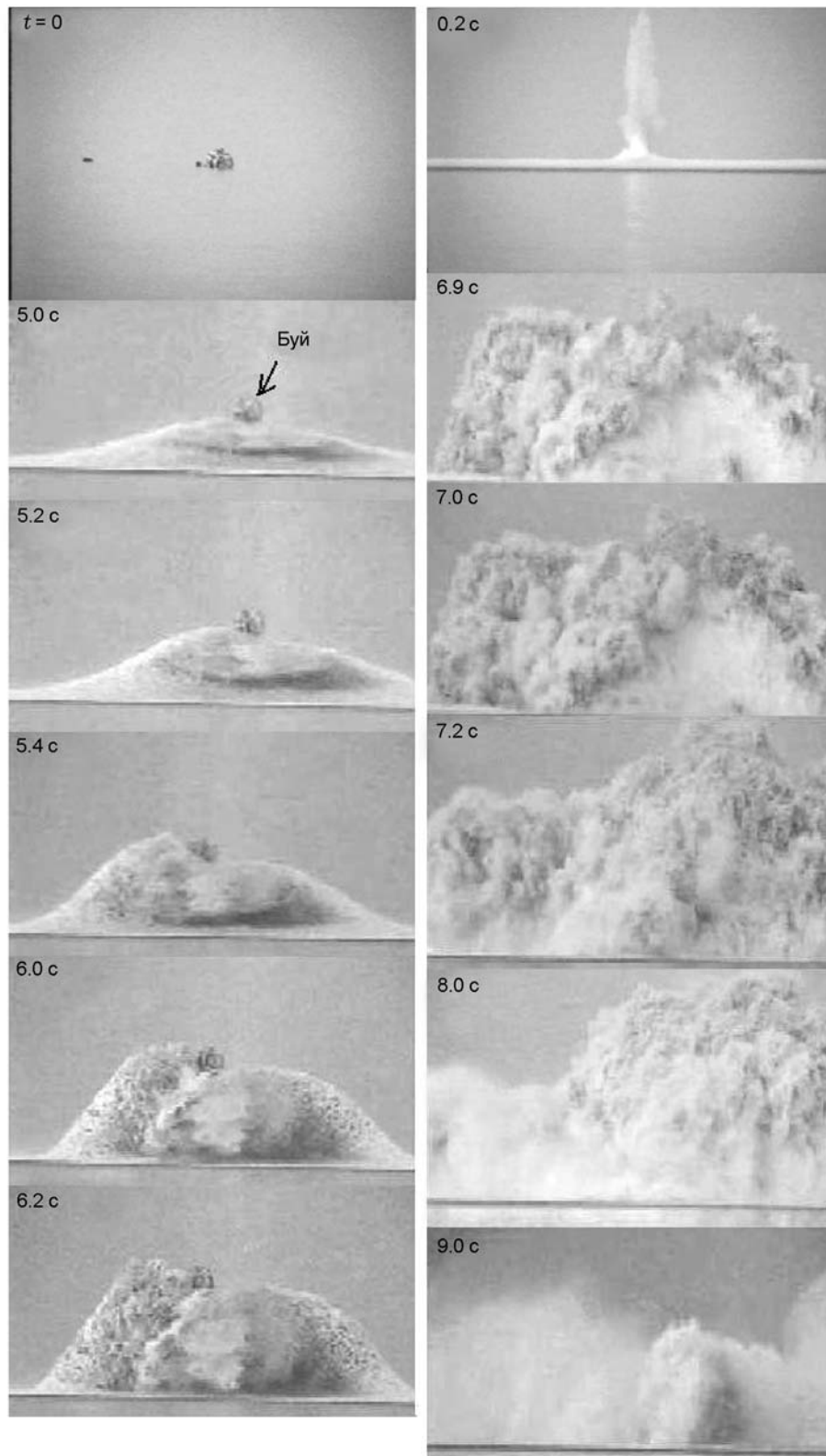


Рис. 5. Видеокдры 5-тонного взрыва, полученные с плота на расстоянии 620 м (опыт № 3): горизонтальная полоска на поверхности воды в момент времени  $t = 0.2$  — кавитационный эффект, пятно вверху на подъеме воды — стальной буй (показанный в момент времени  $t = 0$ ) высотой 2.2 м и длиной 2.4 м, используемый для фиксации заряда на глубине 70 м

ствует расстоянию до плота  $r \approx 775$  м, что хорошо согласуется с оценкой, полученной из гидроакустических записей;

в) нарушение фокусировки, повторившееся через  $\approx 500$  мс (на снимке соответствует  $t = 920$  мс), которое было вызвано пульсацией газового пузыря продуктов детонации. Это время близко к предсказанному значению и к измеренному из сейсмического спектра периодов пульсаций пузыря;

г) подъем воды всплывающими газами на  $9 \div 14$ -й секундах;

д) появление желтых газов — продуктов детонации — на  $35 \div 40$ -й секундах в области, расположенной справа от эпицентра взрыва. Снос вправо продуктов взрыва свидетельствует о сильных подводных течениях в Мертвом море, не позволяющих определить с точностью лучше 30 м местоположение заряда, находящегося на глубине  $h = 70$  м.

Видеозапись самого мощного взрыва (рис. 5) включала впечатляющую фонограмму (частота оцифровки звука 8 192 кГц) с тремя последовательными вытнтыми сигналами, обусловленными пульсацией газового пузыря. Спектральный анализ фонограммы указывает на повторяющийся интервал в записи сигналов длительностью  $\delta t \approx 0.8$  с (рис. 6), соответствующий оценке периода пульсаций пузыря  $T_b = 0.78$  с из сейсмических записей (табл. 2).

### ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Уникальные наблюдения ударной волны в

воде были выполнены для взрывов мощностью 2 и 5 т. Подобные измерения в сверхсоленой воде Мертвого моря ранее никогда не выполнялись.

### Регистрирующая система, оценка времени прибытия и скорости ударной волны

Давление в воде измеряли пьезоэлектрическими датчиками 138A01 (производства РСВ Piezotronics). Два датчика были расположены вблизи плота, на расстоянии  $600 \div 800$  м от взрыва на глубине  $25 \div 30$  м. Профиль сигнала

Таблица 2

Параметры опытов и период пульсаций пузыря, оцененные по времени прибытия ударных волн

Номер опыта	$m$ , кг	$h$ , м	$H$ , м	$r$ , м	$t_b$ , с	Примечание
1	500	—	—	900	0.390	Нет точных пьезоэлектрических измерений
2	2 060	70	—	770, 795	0.578	Указаны значения $r$ для двух датчиков при расстоянии между ними 25 м
3	5 000	73.5	265 (212)	618	0.782	Оценка $H$ зависит от интерпретации фаз

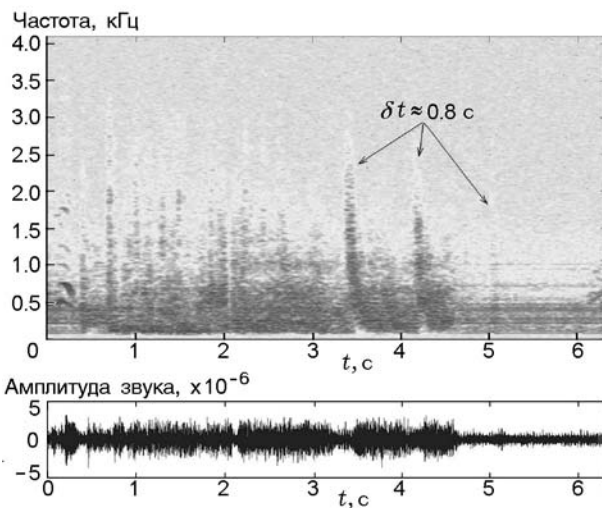


Рис. 6. Спектр звуковой дорожки, записанный при взрыве мощностью 5 т

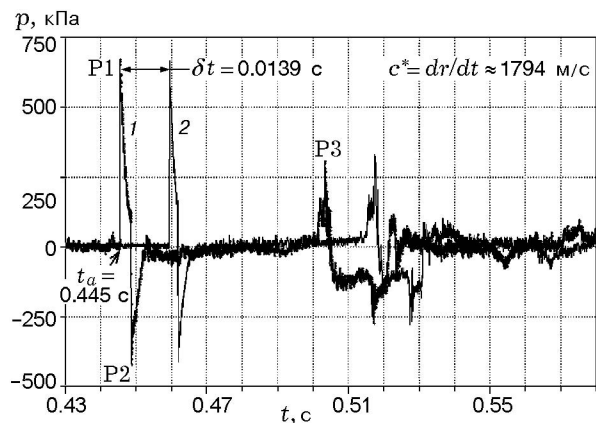


Рис. 7. Профиль давление — время ударной волны в воде при взрыве заряда массой 2 060 кг (10.11.1999) на расстоянии  $\approx 800$  м от места наблюдения (расстояние между датчиками 1 и 2  $\Delta r \approx 25$  м)

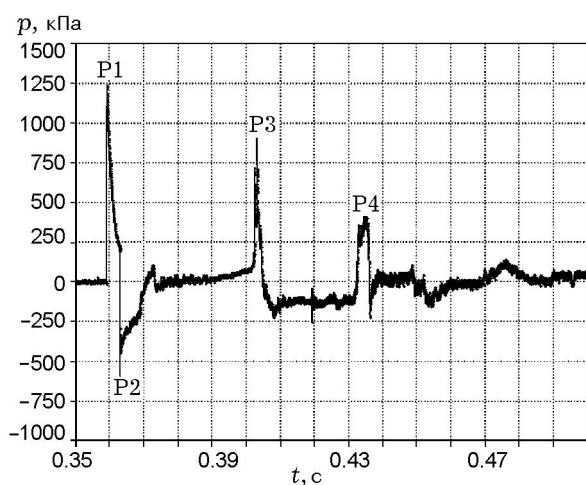


Рис. 8. Профиль давление — время ударной волны в воде при взрыве заряда массой 5 000 кг (11.11.1999) на расстоянии 620 м от места наблюдения

давление — время длительностью 0.7 с был записан при помощи системы сбора данных с разрешением 250 кГц по каждому используемому каналу; для наиболее мощного взрыва запись получена только с одного датчика (рис. 7, 8).

Точный нулевой отсчет времени для запуска записей обеспечивался электрическим предохранителем, включенным в сеть детонатора. Таким образом достигалось точное определение времени распространения ударной волны между зарядом и сенсорами, необходимое для оценки высокой скорости волн. На рис. 7 показан профиль давления для 2-тонного взрыва, записанный двумя датчиками, разнесенными на расстояние  $\Delta r = 25$  м, из которых следует оценка скорости ударной волны  $c^* = 1794$  м/с.

Превышение на 23 м/с (на 1.4 %) акустической скорости  $c = 1770.6$  м/с связано с ошибкой измерения расстояния между датчиками и с чрезвычайно высокими давлениями в ударной волне на коротких дистанциях. Добавка в скорость переднего фронта ударной волны определяется по формуле

$$\Delta c = \frac{\Delta p}{\rho c}. \quad (1)$$

При измеренном пиковом давлении  $p_{\max} \approx 700$  кПа на расстоянии  $r \approx 800$  м (см. рис. 7), при плотности  $\rho = 1.236$  кг/м<sup>3</sup> и акустической скорости  $c = 1770.6$  м/с расчет по уравнению (1) дает значение  $\Delta c = 3.2$  м/с. Однако на расстоянии  $r = 100$  м, где давление оценивается

как 5.2 МПа (см. ниже уравнение (4)), увеличение скорости может достигать 24 м/с.

Дополнительная гидроакустическая система, основанная на гидрофонах Geospace (MP-24L3, собственная частота 10 Гц), была использована для определения абсолютных (GPS) времен прибытия ударных волн, что обеспечивало верификацию начального отсчета времени. Для 2-тонного взрыва время прибытия ударной волны составило  $t_a = 0.445$  с (см. рис. 7), а время взрыва детонационного шнура примерно 10 мс, поэтому начальный отсчет времени был оценен как  $13 : 59 : 58.645 - (0.445 - 0.010) = 13 : 59 : 58.21$  GMT (см. рис. 9, а, табл. 1).

Совместные записи гидрофона и сейсмометра, расположенных вблизи причала в нескольких метрах от берега, вполне определенно доказывают генерацию высокочастотных сейсмических волн с высокой амплитудой (рис. 9, б), образующихся при взаимодействии ударных волн с морским шельфом.

#### Типы ударных волн в воде

На записях пьезоэлектрических датчиков для 2-тонного взрыва (см. рис. 7) наблюдались три импульса давления — P1, P2 и P3 (ниже используется термин «фазы»). Дополнительная фаза P4 была найдена для 5-тонного взрыва (см. рис. 8). Фазы P1 и P2 легко интерпретировать соответственно как падающую волну и отраженную от поверхности волну. Но интерпретация волн P3 и P4 неопределенна, они могут быть обусловлены как отражением от дна водоема, преломлением в донных отложениях, так и отражениями между дном и поверхностью водоема.

Кепстральное моделирование и инверсионный алгоритм для анализа региональных сейсмических записей для подводных взрывов, развитые в [6], позволяют выделить полосовую модуляцию для поверхностного отражения. Данные сейсмических станций EIL и MRNI (широкополосные, с частотой дискретизации 20 Гц) для взрывов в Мертвом море дают отрицательный кепстральный пик с периодом  $\approx 0.15$  с. Программа поиска оптимальных инверсий дает очень низкие значения наилучшим образом согласованного коэффициента отражения, иногда порядка  $-(0.3 \div 0.4)$  [6].

С учетом высокой акустической скорости в Мертвом море ( $c = 1770.6$  м/с) можно считать, что наблюдаемый 0.15-секундный кеп-

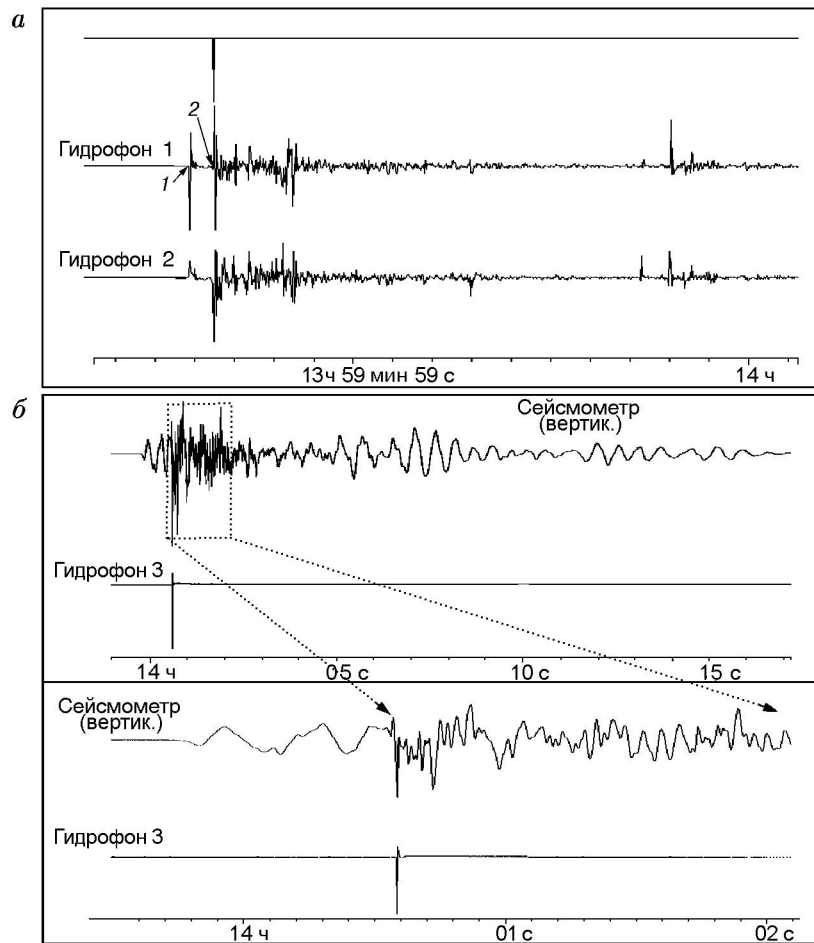


Рис. 9. Измерения начального времени и времени прибытия ударной волны от взрыва заряда массой 2060 кг:

1 — время прибытия сигнала от взрыва детонирующего шнура, 2 — время прибытия сигнала от взрыва основного заряда; а — измерения вблизи плота, б — измерения со станции НОФ (см. рис. 1) на расстоянии 4.3 км от места взрыва

стральный пик обусловлен отражением падающей волны от поверхности водоема. В этом случае основная частота оценивается как  $f_r = c/4h = 6.32$  Гц, а соответствующий период  $t_r = 0.158$  с, что очень хорошо согласуется с наблюдаемым кепстральным пиком (гораздо лучше, чем для акустической скорости в океане  $c_0 \approx 1500$  м/с).

Отчетливая спектральная модуляция, обусловленная эффектом пульсаций пузыря и независимая от азимута и расстояния до взрыва, наблюдалась на всех сейсмограммах, записанных Сейсмической сетью Израиля (ISN), особенно для 5-тонного взрыва (рис. 10). Эти спектральные данные дали оценку частоты пузыря  $f_b \approx 1.28$  Гц (период  $t_b = 0.78$  с, см. также табл. 2). Предположительно в ISN-спектрах

максимум отражения от поверхности при частоте  $f_r$  примерно совпадает с 5-й гармоникой основной частоты пузыря  $f_{b5} = f_b \times 5 = 1.28 \times 5 = 6.4$  Гц, что и выражается в усилении максимума на частоте 6.46 Гц (см. рис. 10).

Измерения давления в воде (см. рис. 7, 8) показывают, что амплитуда отраженной от поверхности волны составляет около половины амплитуды первичной ударной волны. Это наблюдение согласуется в некотором роде с коэффициентом слабого отражения, оцененным в [6] по инверсионному алгоритму.

#### Проверка расстояний и глубин

На основе параметров эксперимента и времен распространения различных фаз, измеренных по записям ударных волн, мы попытались



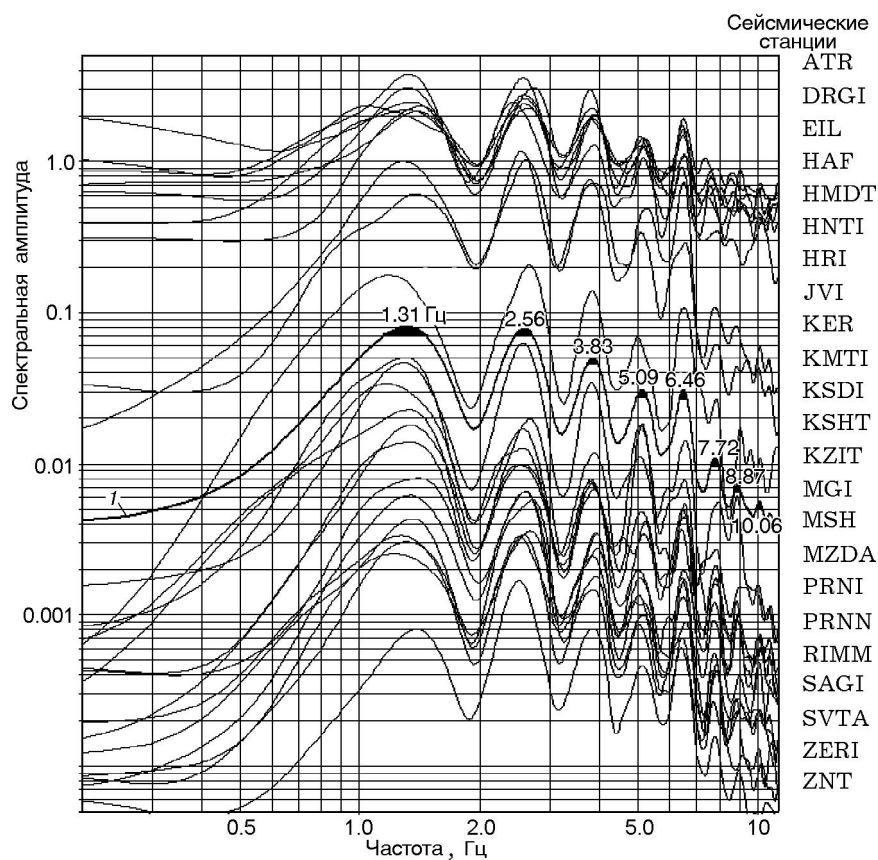


Рис. 10. Спектральный анализ сейсмических колебаний при взрыве заряда массой 5 000 кг (11.11.1999), зарегистрированных станциями Сейсмической сети Израиля (ISN) (1 — осредненная кривая)

Таблица 3

Измеренные времена прибытия (распространения) различных ударных волн в воде

Номер опыта	Тип датчика	Заглубление датчика, м	Время прибытия волны от момента инициирования, с					
			P1, падающая волна ( $t_d$ )	P2, отраженная от поверхности ( $t_s$ )	P3 ( $t_3$ )	P4 ( $t_4$ )	1-я пульсация пузыря	2-я пульсация пузыря
1	Гидрофон	2	0.510	—	—	—	0.931	1.289
2	Гидрофон	2	—	—	—	—	1.095	1.602
	Пьезоэлектрик	30	0.44546	0.44854	0.5035	—	—	—
25		0.45933	0.46180	0.5170	—	—	—	
3	Гидрофон	2	0.349*	—	—	—	1.147	1.922
	Пьезоэлектрик	30	0.35915	0.36304	0.40248	0.432	—	—

Примечание. \*Время от момента детонации.

подтвердить оценки расстояния  $r$ , заглубления заряда  $h$  и глубины моря  $H$  в области точки взрыва. Времена распространения различных фаз, измеренных по записям пьезоэлектри-

ческих датчиков и гидрофонов, приведены в табл. 3.

Необходимые параметры оценены из системы простых кинематических уравнений в

предположении, что скорость ударной волны постоянна вдоль всего пути распространения:

$$r_i/c = t_i - \Delta t, \quad (2)$$

где индекс  $i$  соответствует разным волнам,  $r_i$  — путь распространения волны, зависящий от  $h$  и  $H$ ,  $t_i$  — время прибытия (относительно момента инициирования),  $\Delta t$  — задержка взрыва, обусловленная детонационным шнуром неизвестной длины, который соединяет точку инициирования на поверхности воды и заряд на глубине, скорость его детонации более 6 500 м/с. Детальная карта профиля дна Мертвого моря [5] показывает, что глубина моря в области эксперимента составляет  $H = 260 \div 265$  м (см. рис. 3). Анализ фаз и результаты интерпретации можно сформулировать следующим образом:

1) для обоих взрывов задержка  $\Delta t$  оценена как 0.01 с, ей соответствуют длина детонационного шнура  $\approx 70 \div 75$  м и скорость детонации  $7000 \div 7500$  м/с. Эта оценка подтверждается наблюдаемой разницей во временах прибытия прямой волны к гидрофонам и к пьезоэлектрическим датчикам в опыте 3 (см. табл. 3);

2) интерпретация фазы Р3 (рис. 11) как волны, преломленной в донных отложениях, и фазы Р4 как волны, отраженной от дна моря, дает оценку глубины моря  $H = 265$  м, что хорошо соответствует оценке по батиметрической карте. Однако очень высокие амплитуды и короткая длительность фазы Р3 противоречат теоретическому описанию этой волны как волны с медленно возрастающей, но малой амплитудой и значительно лучше соответствует волне, отраженной от дна (см., например,

[7]). Таким образом, данное объяснение основано только на кинематических особенностях наблюдаемых фаз;

3) интерпретация фазы Р3 как волны, отраженной от дна, и фазы Р4 как волны отражения поверхность — дно моря дает существенно иную оценку глубины моря:  $H = 212$  м, и эта разница не может быть связана с ошибками измерения. Эта интерпретация основана как на кинематических, так и на динамических особенностях наблюдаемых волн, но значительно противоречит данным по батиметрической карте. Другое противоречие заключается в следующем: фаза волны отражения поверхность — дно моря должна быть отрицательной в силу отражения от свободной поверхности воды, но наблюдается положительная фаза Р4 (см. рис. 8);

4) несколько большая оценка заглубления заряда  $h = 73.5$  м для 5-тонного взрыва кажется вполне приемлемой, что может быть обусловлено растяжением длинного каната подвески заряда и смещением центра заряда.

Полученные оценки параметров конфигурации опыта и периода колебаний пузыря (как среднего для моментов прибытия 1-й и 2-й пульсаций пузыря) представлены в табл. 2.

В работе [8] был выполнен анализ наблюдаемых фаз ударной волны для наиболее мощного взрыва. Использовался код REFMS для моделирования отражений от поверхности, а также отражений и преломлений от дна моря в условиях градиента акустической скорости. Рассматривался эквивалентный заряд ТНТ массой 4 000 кг. В соответствии с этим анализом фаза Р4 является, очевидно, отражением от дна, тогда как фаза Р3 есть «прибытие предвестника» (согласно терминологии кода REFMS). Последнее понятие используется для любого ударного луча, который является перед волной, удовлетворяющей закону отражения Снелла (в сейсмологии называется «головная», или предвестник, или «преломленная волна», распространяющаяся вдоль поверхности раздела вода — дно моря). Акустическая скорость в донных отложениях моря  $v_b$ , которая наилучшим образом приближает длительность фазы Р3, равна 3 500 м/с (если  $v_b < 3 200$  м/с, то Р3 становится слишком широкой; если  $v_b > 3 600$  м/с, то Р3 исчезает).

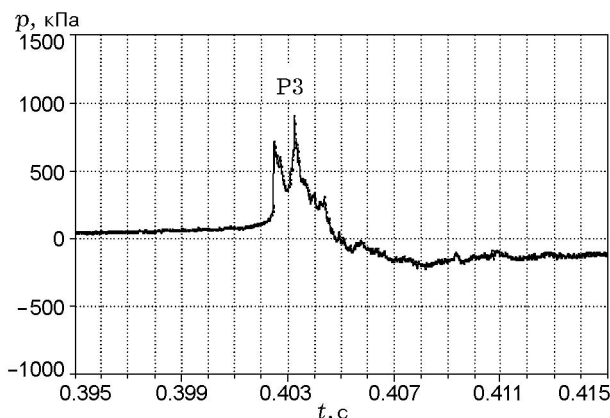


Рис. 11. Форма фазы Р3 для взрыва заряда массой 5 т

#### Повышенные пиковые давления

Заряд массой 5 000 кг содержал примерно

Таблица 4

Оцененные и измеренные пиковые давления в ударных волнах

Номер опыта	Тропиловый эквивалент, кг	$r$ , м	Глубина размещения сенсора, м	$p_{\max}$ , кПа		
				оценка по соотношению (4)	измерение	отношение измерение/оценка
2	1 660	770	30	474	672	1.41
		795	25	458	654	1.43
3	4 010	618	30	847	1 230	1.45

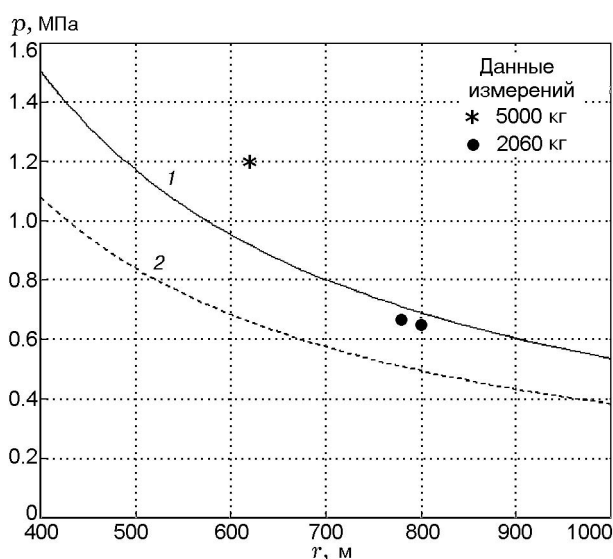


Рис. 12. Оцененное пиковое давление в воде в зависимости от расстояния для подводных взрывов в океанской воде зарядов ТНТ массой 5 000 (1) и 2 060 кг (2) и данные измерений (точки) при взрывах в Мертвом море

97 % взрывного компонента Серамон (от полной массы заряда ВВ). Согласно спецификации изготовителя энергия этого ВВ — около 80 % от ТНТ. И тем не менее, измеренные пиковые давления значительно превышали ожидаемые значения от взрыва равного количества ТНТ в океанской воде (табл. 4, рис. 12).

В работах [7, 9] в форме, аналогичной предложенной в [10], даны эмпирические соотношения для оценки параметров ударной волны в океанской воде:

$$p(t) = p_{\max} \exp[-(t - t_a)/Q], \quad (3)$$

$$p_{\max} = 53.1 R_s^{-1.13}, \quad (4)$$

$$t_a = r/c_w, \quad (5)$$

$$Q_s = 9.2 \cdot 10^{-5} W^{1/3} R_s^{0.18}, \quad (6)$$

$$R_s = r/W^{1/3}, \quad (7)$$

где  $p_{\max}$  — пиковое давление, МПа;  $t_a$  — время прибытия волны;  $Q$  — временная константа;  $W$  — тротиловый эквивалент, детонирующий в океанской/озерной воде, кг;  $r$  — расстояние от точки взрыва, м;  $R_s$  — приведенное расстояние, м/кг<sup>1/3</sup>;  $c_w$  — акустическая скорость звука в воде, м/с.

Кривые пикового давления на рис. 12 рассчитаны по уравнению (4). Давления, измеренные при взрывах в Мертвом море, существенно превышают расчетные значения, что может быть обусловлено высоким значением акустического импеданса  $Z = \rho c$  сверхсоленой воды Мертвого моря, который на 38 % больше, чем в океане (см. ниже). Следствием этого являются существенно более сильные ударные волны.

#### Оценка энергии ударной волны от 5-тонного взрыва

Плотность потока энергии в ударной волне рассчитывается по формуле [10]

$$E_{DS} = Z_{DS}^{-1} \int p^2(t) dt, \quad (8)$$

где  $Z_{DS}$  — акустический импеданс воды Мертвого моря,  $Z_{DS} = \rho_{DS} c_{DS} = 1236 \text{ кг/м}^3 \times 1770 \text{ м/с} = 2.1877 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ,  $p(t)$  — кривая, аппроксимирующая экспериментальный профиль давление — время (рис. 13) с временной константой  $Q_{DS} = 0.0018458 \text{ с}$ :

$$p_{DS}(t) = 1.23 \cdot \exp\left(-\frac{t - 0.3592}{Q_{DS}}\right) \text{ [МПа]}. \quad (9)$$

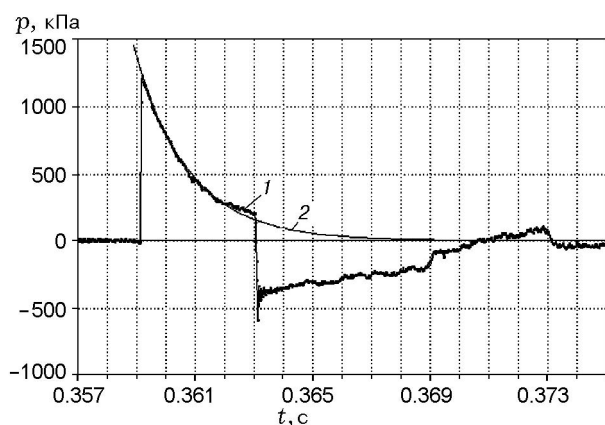


Рис. 13. Профиль давление — время в падающей и отраженной от поверхности ударных волнах (1); 2 — аппроксимация профиля давления в падающей волне уравнением (9); масса заряда 5 000 кг

Интегрирование в уравнении (8) проводится в пределах от  $t_a = 0.3592$  с до  $t = t_a + 6.7Q$  [10]:

$$E_{DS} = \frac{1}{Z_{DS}} \times \int_{t_a}^{t_a + 6.7Q} \left[ 1.23 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{t - 0.3592}{Q}\right) \right]^2 dt = 1219 \text{ Дж/м}^2.$$

Полная энергия в ударной волне (при  $r = 618$  м) рассчитывается по формуле

$$E_s = E_{DS} 4\pi r^2 = 0.585 \cdot 10^{17} \text{ эрг.}$$

Удельная энергия взрывчатого вещества Chenamon, согласно спецификации изготовителя,  $900 \text{ кал/г} = 3.8 \cdot 10^{13} \text{ эрг/кг}$ , полная энергия ВВ составляет  $E_e = 1.9 \cdot 10^{17} \text{ эрг}$ . Тогда доля энергии ударной волны в воде, генерируемой при взрыве, оценивается как

$$E_s/E_e = 30.8 \text{ \%}.$$

Это значение кажется вполне допустимым, хотя несколько превышает имеющиеся оценки:  $23 \div 24 \text{ \%}$  для открытой воды, полученную при исследовании в мелком резервуаре [8], и  $25 \text{ \%}$ , полученную при взрыве на расстояниях более 15 радиусов заряда [11].

### Оценка тротилового эквивалента

Предполагается, что поток энергии  $E_{DS}$  в первичной ударной волне для наиболее мощного взрыва ( $W = 5$  т Chenamon) в Мертвом море равен потоку энергии ударной волны  $E_{OC}$  для «эквивалентного» заряда ТНТ ( $W_T$ ), взрываемого в океанской воде:

$$E_{DS} = E_{OC}. \tag{10}$$

Значение  $E_{OC}$  рассчитывалось по уравнениям (4), (6), (8):

$$E_{OC} = Z_{OC}^{-1} \int \left[ 53.1 R_s^{-1.13} \exp\left(-\frac{t}{Q_{OC}}\right) \right]^2 dt, \tag{11}$$

где импеданс для океанской воды составляет  $Z_{OC} = \rho_{OC} \times c_{OC} = 1030 \text{ кг/м}^3 \times 1536 \text{ м/с} = 1.582 \cdot 10^6 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$  и  $Q_{OC}$  зависит от  $W_T$  в соответствии с уравнением (6). Значение  $E_{DS}$  рассчитывалось по уравнениям (7), (8):

$$E_{DS} = Z_{DS}^{-1} \int \left[ 1.23 \cdot \exp\left(-\frac{t}{Q_{DS}}\right) \right]^2 dt. \tag{12}$$

Окончательно тротильный эквивалент для заряда Chenamon массой 5 000 кг, взрываемого в Мертвом море, определялся по уравнениям (10)–(12) и равен  $W_T = 4010$  кг, что соответствует оценке изготовителя для энергии ВВ Chenamon, составляющей  $\approx 80 \text{ \%}$  от энергии тротила.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате калибровочных экспериментов в Мертвом море с применением подводных взрывов получено множество уникальных данных. При помощи видео- и аудиозаписи зарегистрированы такие интересные явления, как кавитационный эффект, моменты прибытия ударных волн, воздействие пульсаций газового пузыря на плот и подъем воды у точки взрыва. Видеоклипы позволили получить грубую оценку времен распространения ударной волны до поверхности воды и до плота и оказались полезными при проверке величин заглубления заряда и расстояния от точки взрыва до плота.

Измеренные пиковые давления существенно превысили ожидаемые значения от взрыва эквивалентного заряда ТНТ в воде океана, что

обусловлено повышенным акустическим импедансом сверхсоленой воды Мертвого моря. Анализ записей различных фаз и времен прибытия волн облегчил идентификацию отражений от поверхности и дна моря и внес вклад в проверку конфигурации эксперимента. С использованием уравнения плотности потока энергии в волне, зарегистрированных профилей давления и специфических свойств воды Мертвого моря рассчитана энергия ударной волны в воде. Получена оценка доли энергии ударной волны относительно полной энергии ВВ, и оценен тротиловый эквивалент взрывов.

Высокие магнитуды при относительно малых массах используемых зарядов свидетельствуют о высокой сейсмической эффективности подводных взрывов в Мертвом море, значительно превосходящей верхнюю предельную кривую для всех известных химических и ядерных взрывов в твердой породе. Наблюдаемые магнитуды и амплитуды сейсмических волн подтвердили, что во всех случаях заряды взорвались полностью.

Калибровочный эксперимент в Мертвом море выполнен при поддержке Министерства обороны США (контракт DSWA01-97-C-0151). Ш. Коби (ELITA Security Ltd.) и Е. Хаосиреп (Explosives Manufacturing Industries Ltd.) разработали конструкцию зарядов, произвели их сборку и детонацию. М. Гонен (Gonen Marine Works Ltd.) предоставил судно и плот для проведения всех операций на море. Л. Садвин (Sadwin Engineering Consultancy, Israel) выполнил измерения ударных волн при помощи пьезоэлектрических датчиков, предоставленных Министерством национальных инфраструктур Израиля. Автор выражает благодарность М. Еневой (Maxwell Technologies) и Д. Баумгардту (ENSCO Inc.), которые получили значимые результаты путем сложного анализа и интерпретации полученных данных. Руководство и персонал Геофизического института Израиля обеспечивали техническую поддержку в течение всего эксперимента. Эксперимент в целом не мог быть реализован без усилий и поддержки д-ра А. Шапира.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Gitterman Y., Pinsky V., Shapira A.** Improvements in Monitoring the CTBT in the Middle East by the Israel Seismic Network // Final Report, DTRA-TR-01-35, September 1997 — March 2001, sponsored/monitored by the U. S. Defense Threat Reduction Agency, 2003.
2. **Gitterman Y., Ben-Avraham Z., Ginzburg A.** Spectral analysis of underwater explosions in the Dead Sea // *Geophys. J. Intern.* — 1998. — V. 134. — P. 460–472.
3. **Anati D. A.** The hydrography of a hypersaline lake // *The Dead Sea: the lake and its setting* (Oxford monographs on geology and geophysics No. 36) / T. M. Niemi, Z. Ben-Avraham, J. R. Gat (Eds). — New York; Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. — P. 89–103.
4. **Gitterman Y., Shapira A.** The Dead Sea gives life to a unique seismic calibration experiment // *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union.* — 2001. — V. 82, N 6.
5. **Hall J. K.** The GSI digital terrain model (DTM) completed // *GSI Current Research* / R. Bogoch, Y. Eshet (Eds). V., Jerusalem, 1993. — P. 47–50.
6. **Baumgardt D., Freeman A.** Characterization of underwater explosions by cepstral analysis, modeling and inversion // *J. Acoust. Soc. Amer.* — 2001. — V. 109, Issue 5. — P. 2496.
7. **Underwater blast monitoring** // *Engineer Techn. Lett.* N 1110-8-11 (FR). U. S. Army, Corps of Engineers (USACE). — Washington, D. C., 1991.
8. **Eneva M., Stevens J. L., Murphy J., Khristoforov B. D.** Effect of charge depth in Russian hydroacoustic data from nuclear and HE explosions // *Proc. of the 22nd Annu. DoD/DoE Seismic Research Symp.: Planning for Verification and Compliance with the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT)*, September 12–15, 2000. — New Orleans, LA, 2000.
9. **Joachim C. E., Welch C. R.** Underwater shocks from blasting // *Proc. of the 23rd Annu. Conf. on Explosive and Blasting Technique*, Las Vegas, Nevada, Intern. Soc. of Explosive Engineers. — Cleveland, OH, 1997. — P. 526–536.
10. **Cole R. H.** Underwater explosions. — Princeton Univ. Press, 1948.
11. **Pritchett J. W.** An evaluation of various theoretical models for underwater explosion bubble pulsation // *Rep. IRA-TR-2-71.* — Information Research Associates Inc., Berkeley, Calif., 1971.

*Поступила в редакцию 20/III 2008 г.*