

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПРИБРЕЖНОГО НАЗЕМНОГО 1000-ТОННОГО ВЗРЫВА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В. В. Адушкин, Б. Д. Христофоров

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

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия на окружающую среду прибрежного наземного взрыва тротилового заряда массой 1 000 т. Использовались имеющиеся базы данных, которые применяются для прогнозирования экологических последствий различных катастроф взрывного типа, разработки новых методов контроля и идентификации рассматриваемых явлений, их экспериментального и математического моделирования, а также тестирования используемых моделей.

Ключевые слова: взрыв, продукты взрыва, взрывное облако, воронка взрыва, ударная волна, базы данных, экология.

ВВЕДЕНИЕ

В 2004 г. исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося геофизика и специалиста в области физики взрыва академика М. А. Садовского. Он был научным руководителем многих программ, связанных с применением крупномасштабных взрывов в геофизических исследованиях, в том числе для глубинного сейсмического зондирования Земли, поиска полезных ископаемых, определения предвестников землетрясений, изучения внутреннего строения Земли, испытаний военной техники и т. д. [1]. Результаты проведенных исследований и разработок весьма актуальны и в настоящее время. По результатам этих работ создаются базы данных по динамическим процессам взрывного типа в геофизике, которые в связи с участвовавшими природными и техногенными катастрофами находят применение для прогнозирования экологических последствий различных катастроф взрывного типа, разработки новых методов контроля и идентификации рассматриваемых явлений, их экспериментального и математического моделирования, а также тестирования используемых моделей [2–4]. Полезно иметь и простые оценки эффективности действия различных источников взрыва в ближней зоне, где разрушения максимальны. В связи с этим ниже приведены некоторые результаты экспериментальных исследований воздействия на окружающую среду прибрежного наземного

взрыва заряда тротила массой 1 000 тонн, хранящиеся в базе данных.

ПОСТАНОВКА ОПЫТА

Взрыв был осуществлен 25.08.1987 в 18.00.00 московского времени примерно в 100 м от береговой линии. Проведены киносъемка взрыва и регистрация волн в воздухе, воде и грунте. Ударные волны (УВ) в воздухе регистрировались на берегу приборами СД-725, ДД-10 и др., а также методом годографа. Волны давления в воде, преломленные от дна и из воздуха, измерялись со специально оборудованного судна, установленного бортом к взрыву на расстоянии 590 м. На рис. 1 приведена схема опытного поля (разрез в плоскости «место под-

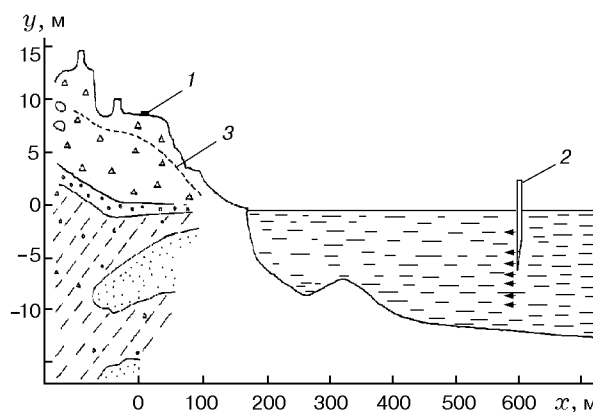


Рис. 1. Схема опытной площадки, дна и акватории:

1 — место взрыва, 2 — корабль, 3 — граница оттаивающего слоя

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

рыва — корабль»). Расстояние от центра взрыва до берега в направлении на корабль 157 м. Пьезоэлектрические датчики давления опускались в воду на глубины $2 \div 9$ м с носовой и кормовой частей судна при глубине дна свыше 10 м.

Подрыв проводился в центральной нижней точке заряда, расположенного на небольшом, относительно ровном участке береговой полосы шириной $300 \div 400$ м с уклоном с юга на север к берегу акватории $3 \div 12^\circ$ в зоне вечной мерзлоты. Глубина залегания мерзлых пород до 300 м. Летом верхние слои грунта, содержащие гальку и гравий, оттаивают на $3,6 \div 4,8$ м. До глубины ≈ 20 м размещаются чередующиеся слои песка и супеси с галькой и гравием. Характерная плотность грунта на глубинах до уровня моря $1620 \div 1750$ кг/м³, скорость продольных волн ≈ 3 км/с. С глубиной скорость звука и плотность грунта возрастают. Под слоем осадочных пород есть скальное основание, где скорость продольных волн $\approx 5,3$ км/с.

Заряд из 24 000 мешков чешуированного тротила массой 974 т располагался на настиле из досок, имел форму цилиндра диаметром 17,8 м и высотой 4,6 м с вершиной в виде усеченного конуса высотой 1,6 м и диаметром верхнего основания 3,8 м. Высота настила со стороны корабля была $\approx 1,2$ м (≈ 9 м над уровнем воды). В центральной части на всю высоту заряда размещался боевик из 880 ящиков с литым тротилом массой 22 т. В верхней части заряда было уложено 165 ящиков с литым тротилом массой 4 т. Средняя плотность ВВ в заряде 780 кг/м³. Дополнительная масса из 26 т упаковочного материала и 12 т воды в мокрых мешках составила 38 т.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВОРОНКИ И ОБЛАКА ВЗРЫВА

Фотографии развития взрыва показаны на рис. 2. Измеренные скорости детонации в мешках с чешуированным тротилом составили 5,2 км/с, а в боевике из литого тротила — 5,6 км/с. За время регистрации облако поднялось на высоту $H > 3,5$ км. Осредненные значения радиуса воронки по свободной поверхности и навалу равны 26,7 и 34 м соответственно. Отклонения от среднего значения составляют ≈ 10 %. Высота навала $\approx 3,5$ м. Глубина воронки по свободной поверхности 16,5 м. Дно и борта образованы кусками мерзлого грунта, борта более крутые со стороны склона и

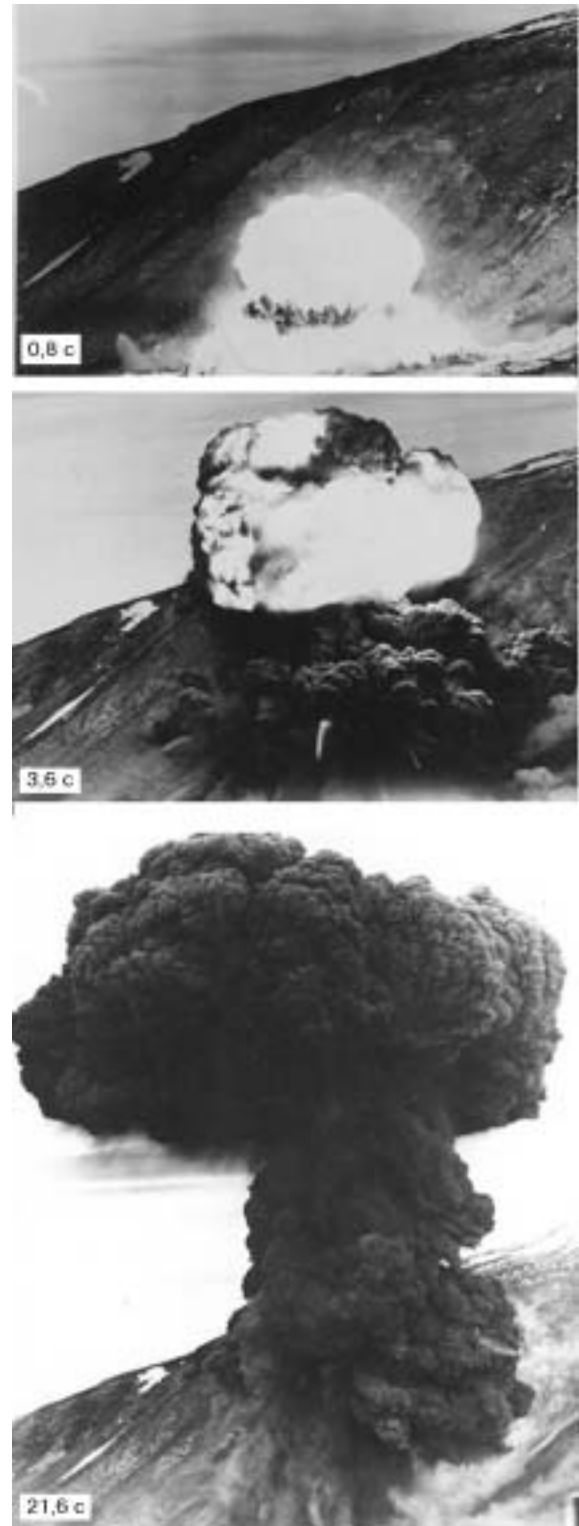


Рис. 2. Фотографии 1 000-тонного прибрежного наземного взрыва в моменты времени 0,8; 3,6; 21,6 с

Таблица 1

Размеры воронок и высоты подъема облака
крупных наземных взрывов (номера взрывов из базы данных)

Номер взрыва	Дата	Масса ВВ, т	R , м	h , м	V , м ³	H , км
1	27.02.1991	901	35	12	11 600	4,5
3	25.08.1987	1 000	26,7	16,5	—	3,5
6	20.11.1965	1 152	34,2	12	23 500	—
7	12.10.1960	1 013	34,4	14	25 900	—

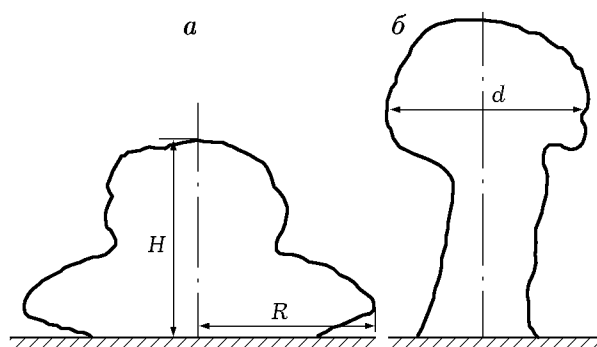


Рис. 3. Формы облака в начальной и поздней стадиях развития взрыва в моменты времени 0,4 (а) и 40 с (б)

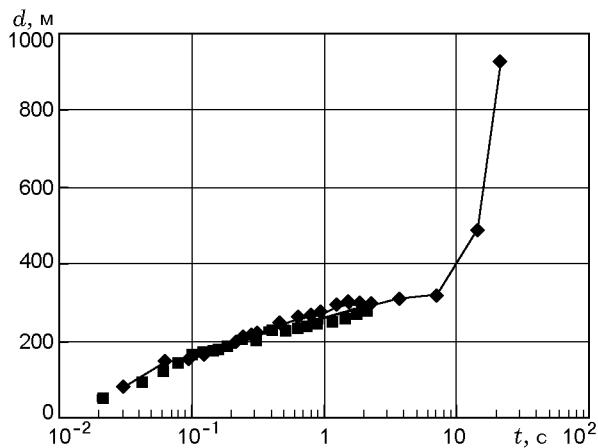


Рис. 4. Зависимость диаметра верхней части взрывного облака от времени

покатые со стороны береговой линии. Размеры кусков внутри воронки и за ее пределами до $1,5 \div 2$ м. Радиус сплошного навала грунта ≈ 80 м. Далее наблюдались системы трещин глубиной $6 \div 7$ м и шириной $50 \div 60$ мм, отстоящие друг от друга на $4 \div 5$ м, а также выпадение отдельных кусков и мелкодисперсных фракций. Максимальная дальность разлета от-

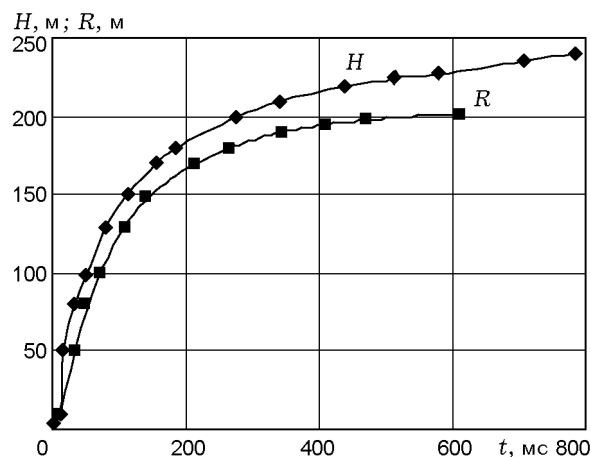


Рис. 5. Зависимости от времени высоты подъема взрывного облака и радиуса его основания на ранней стадии развития взрыва

дельных кусков $1\,200 \div 1\,300$ м.

В табл. 1 приведены размеры воронки, отсчитанные от свободной поверхности, и высоты облака 1000-тонного взрыва, а также данные по другим взрывам близкой массы, проведенным на ровных площадках с мягким грунтом. Наименьший радиус воронки 1000-тонного взрыва $R = 26,7$ м, наибольшая ее глубина $h = 16,5$ м. Уменьшение радиуса воронки и увеличение ее глубины по сравнению с аналогичными данными для других взрывов, возможно, связаны с влиянием склона.

На рис. 3 представлены характерные профили взрывного облака в моменты времени 0,4 и 40 с. На рис. 4 приведена зависимость диаметра верхней части взрывного облака от времени, на рис. 5 — зависимости от времени высоты подъема облака и радиуса его основания на ранней стадии развития взрывного облака, на рис. 6 — зависимости от времени объема облака и высоты его подъема в поздней стадии развития взрыва. Вначале облако имеет максимальный радиус у поверхности земли, а

Таблица 2

Параметры воздушной ударной волны

R , м	Δp_{\max} , бар	t_+ , мс	I_+ , бар·с	e_+ , кДж/м ²	E_+ , 10 ⁶ МДж	t , мс	e , кДж/м ²	E , 10 ⁶ МДж	E_+/E_0 , %
60,5	23,9	46,5	0,257	—	—	—	—	—	—
70	20,2	43,5	0,305	99 000	3,05	71	99 544	3,07	72,8
125	8,9	107	0,166	—	—	—	—	—	—
216	2,6	164	0,105	—	—	—	—	—	—
320	1,12	229	0,081	—	—	—	—	—	—
405	0,71	307	0,064	521	0,537	908	602,48	0,621	12,8
472	0,56	296	0,051	337	0,471	876	385,58	0,539	11,28
554	0,45	330	0,049	255	0,491	976	347,48	0,671	11,28
593	0,37	388	—	—	—	—	—	—	—
680	0,38	381	0,042	174	0,504	1 127	211,84	0,615	12,1
771	0,37	420	0,038	143	0,54	1 243	177,68	0,672	12,9
956	0,21	507	0,031	71,1	0,41	1 560	86,60	0,498	9,76
996	0,13	782	0,035	56,8	0,355	1 789	57,49	0,359	8,49
1208	0,112	446	0,021	30,7	0,28	1 910	40,72	0,37	6,74
1262	0,126	528	0,023	39,9	0,40	1 562	50,50	0,505	9,7
1593	0,102	598	0,022	30,8	0,491	1 794	38,39	0,612	11,8
2030	0,063	612	0,014	12,5	0,324	1 870	15,52	0,422	7,75
2446	0,049	774	0,014	9,3	0,348	2 360	11,42	0,429	8,3
2833	0,039	775	0,013	7,8	0,288	2 267	8,09	0,374	6,9
3010	0,042	811	0,0098	4,57	0,26	2 500	5,93	0,337	6,22
3443	0,038	844	0,0086	3,54	0,264	2 600	4,63	0,345	6,31
4184	0,026	850	0,0075	2,44	0,268	2 210	3,02	0,332	6,41

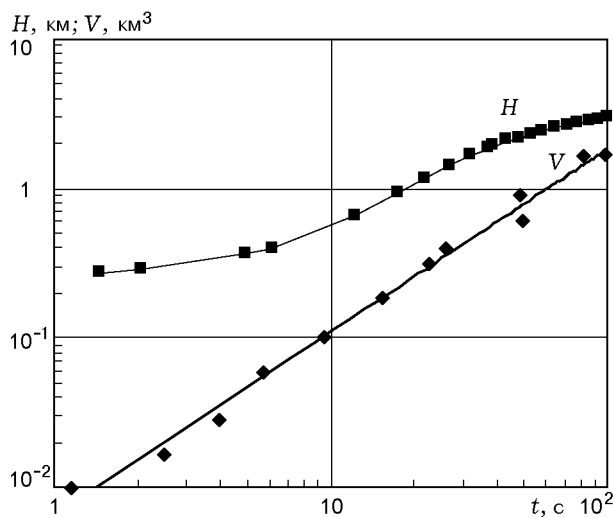


Рис. 6. Зависимости от времени высоты подъема и объема облака в поздней стадии развития взрыва

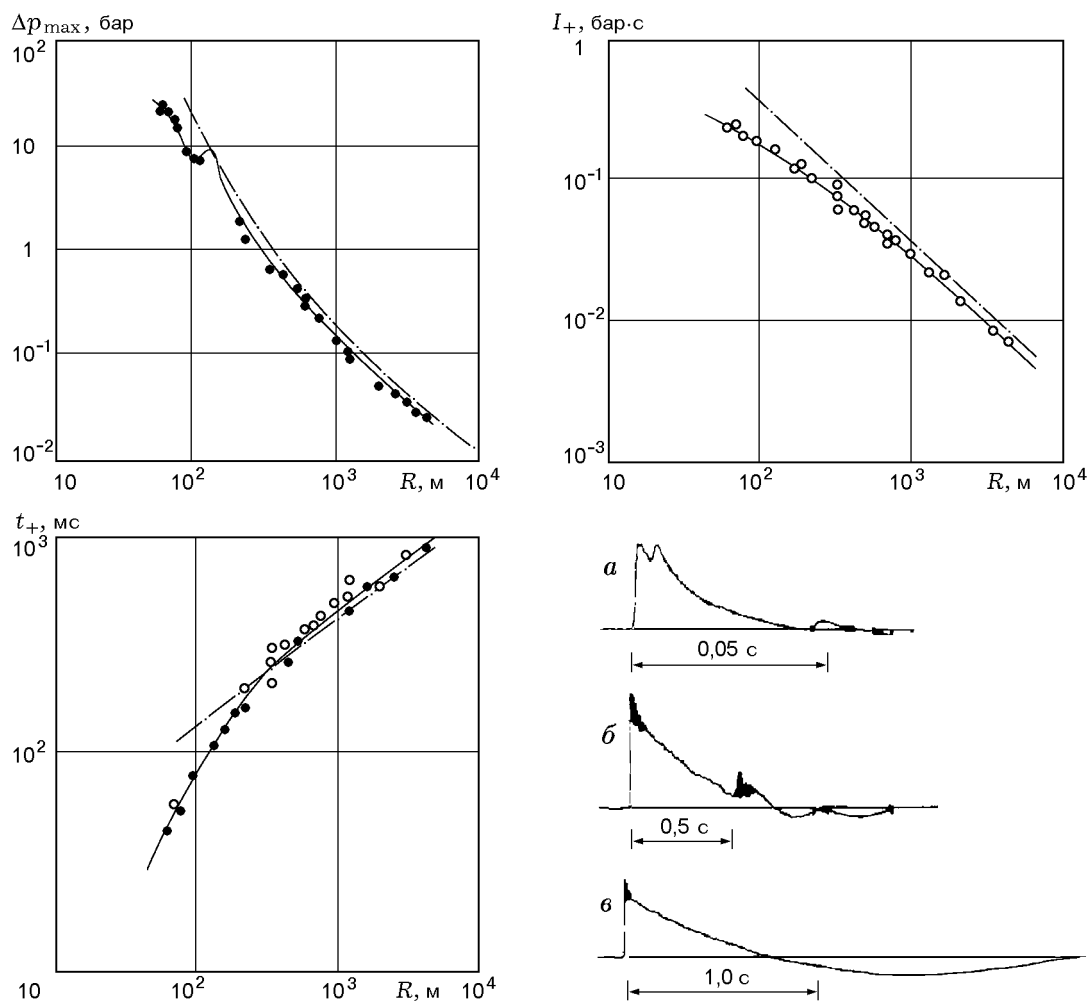


Рис. 7. Зависимости максимального избыточного давления, длительности и удельного импульса фазы сжатия воздушной ударной волны от расстояния на берегу:

сплошные линии — аппроксимация экспериментальных данных; штрихпунктирные — расчет по формулам М. А. Садовского; а-в — регистрация профиля воздушной УВ на расстоянии 70 (а), 997 (б) и 4184 м (в), $\Delta p_{\max} = 20,2; 0,13$ и $0,026$ бар соответственно

на заключительной стадии принимает грибовидную форму, поднимается на высоту свыше 3 км и рассеивается. В конце начальной стадии развития светящегося облака длительностью ≈ 1 с, когда его высота ≈ 250 м, заканчиваются химические реакции в продуктах взрыва. В дальнейшем облако поднимается и расширяется за счет интенсивного перемешивания продуктов с воздухом и засасывания грунта и пыли.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УВ В ВОЗДУХЕ

Результаты обработки оцифрованных осциллограмм воздушной УВ приведены в

табл. 2, где R — расстояние; Δp_{\max} — максимальное давление; t, t_+ — длительность УВ и ее положительной фазы; I_+ — удельный импульс положительной фазы УВ; e, E и e_+, E_+ — удельное и полное значения энергии УВ и ее положительной фазы; E_0 — энергия взрыва. Копии экспериментальных осциллограмм, а также зависимости избыточного максимального давления, длительности и импульса положительной фазы воздушной УВ от расстояния у поверхности земли показаны на рис. 7. Штрихпунктирные кривые — расчет по формулам

$$\Delta p_{\max} = 0,95/(R/M^{1/3}) + 3,9/(R/M^{1/3})^2 + 13,0/(R/M^{1/3})^3, \\ t_+ = 1,35M^{1/6}R^{1/2}, \quad (1)$$

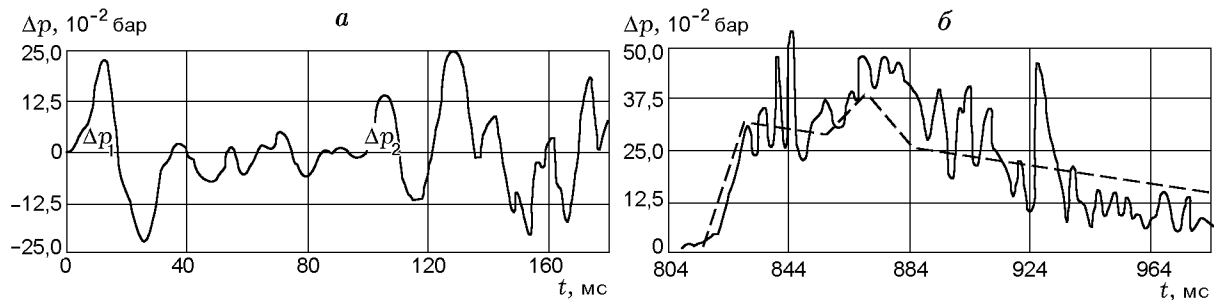


Рис. 8. Эпюры волны давления в воде, измеренная в точке б (см. табл. 3) на глубине $h = 2$ м с носа судна:

штриховая линия — расчет преломленной из воздуха в воду волны в акустическом приближении

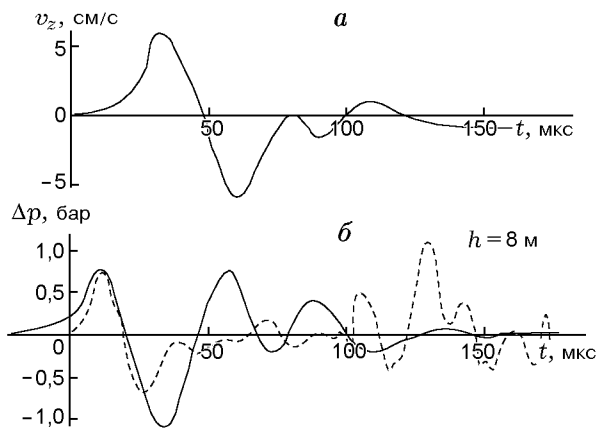


Рис. 9. Сопоставление записей вертикальной массовой скорости на берегу (а) и давления подводной волны на глубине 8 м (б) на одинаковом расстоянии 590 м от эпицентра взрыва:

штриховая линия — результаты измерения, сплошная линия — расчет давления в воде

$$I_+ = 0,0035M^{2/3}/R,$$

предложенным М. А. Садовским для определения параметров наземных взрывов зарядов тротила массой $M > 100$ кг в диапазоне $1 < R/M^{1/3} < 10$ м/кг^{1/3} [1].

Заметное занижение параметров УВ в ближней зоне по сравнению с зависимостями (1) вызвано влиянием процесса образования воронки и относительно низкой плотности ВВ в заряде.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УВ В ВОДЕ

Характерные эпюры давления в воде приведены на рис. 8, а, б и 9, б. Первыми к датчикам приходят преломленные от грунта продольные

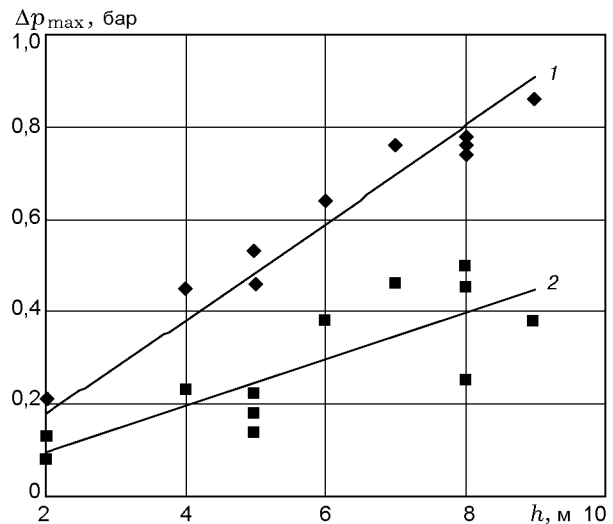


Рис. 10. Зависимость приращения максимального давления в воде в первой (1) и второй (2) группах волн (преломленные от дна продольные и поперечные волны) от глубины погружения датчика h

(Δp_1) и поперечные (Δp_2) волны. Время их регистрации ≈ 180 мс. После этого с задержкой ≈ 800 мс после первого вступления приходит преломленная из воздуха волна (см. рис. 8, б). Время ее регистрации также ≈ 180 мс. Штриховой линией показана эпюра давления, рассчитанная в акустическом приближении для преломленной из воздуха в воду волны с учетом отражения от борта судна. Для выявления водяной волны (Т-фазы), идущей от берега со скоростью 1,43 км/с, нужна длительность записей (см. рис. 8, а) до 250 мс, которых нет в базе данных.

На рис. 9, а приведена эпюра вертикальной скорости v_z грунта, зарегистрированная береговым датчиком на расстоянии 590 м от эпи-

Таблица 3
Амплитудно-временные характеристики преломленных
от дна продольных и поперечных волн давления в воде

Номер точки	h , м	Δp_1 , бар	t_{+1} , мс	Δp_2 , бар	t_{+2} , мс
1	8	0,78	19	0,5	10
2	7	0,76	20	0,46	11,5
3	5	0,53	18	0,18	10
4	6	0,64	19,5	0,38	10,5
5	4	0,45	18	0,23	10
6	2	0,21	18	0,13	11
7	9	0,86	19	0,38	11
8	8	0,76	19	0,45	12
9	5	0,46	18	0,14	9
10	8	0,74	19	0,25	10
11	5	0,46	18	0,22	8,5
12	2	0,14	18	0,08	12



Рис. 11. Вид воронки 1000-тонного прибрежного наземного взрыва через год

центра взрыва, на рис. 9,б — измеренная и рассчитанная зависимости давления от времени в воде на глубине $h = 8$ м на носу корабля. Наблюдается удовлетворительное количественное согласие расчетных и опытных данных в начале осциллограмм.

Некоторые результаты измерения в воде характеристик преломленных от дна продольных и поперечных волн давления приведены в табл. 3, где Δp_1 , t_{+1} и Δp_2 , t_{+2} — максимальные амплитуды избыточного давления и времена положительных фаз в первой и второй группах волн на рис. 8,а.

Таблица 4
Распределение фракций
выброшенного из воронки грунта

Расстояние, м	Толщина слоя, мм	Размеры частиц, мм
80 ÷ 100	50 ÷ 150	5 ÷ 10
100 ÷ 200	20 ÷ 30	1 ÷ 5
800	1,5	0,5 ÷ 1
1200	0,5 ÷ 1,0	< 0,1

На рис. 10 показаны зависимости параметров Δp_1 и Δp_2 от глубины погружения датчика h . Максимальное давление уменьшается с приближением датчика к свободной поверхности из-за наложения отраженной от нее волны разрежения.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Распределение фракций выпавшего грунта по расстоянию приведено в табл. 4. Проникновения воды в воронку в течение длительного времени не отмечалось, по-видимому, из-за наличия вечной мерзлоты. На рис. 11 показан вид воронки, заполненной водой, на следующий год после взрыва. Высота навала сильно уменьши-

лась из-за сползания грунта в воронку и разрушения крупных кусков мерзлого грунта.

В рабочем поселке на расстоянии ≈ 4 км, где измеренное избыточное давление в УВ составило 0,035 бар, на всех зданиях были разрушены покрытия из шифера. Наблюдалось повреждение рам и дверей, трещины в потолках и стенах. В окнах, расположенных навстречу взрыву, остекление разрушено полностью, а в окнах, расположенных вдоль направления распространения УВ, — лишь частично. Всего было разрушено около 30 % площади остекления, которая составляла ≈ 1800 м². На окраине поселка со стороны взрыва на расстоянии 3600 м, где измеренное значение $\Delta p_{\max} = 0,045$ бар, находились деревянный одноэтажный дом и ангар из ребристой жести высотой ≈ 4 м и шириной 25 м по фронту воздействия. В обеих постройках были выдавлены двери, расположенные вдоль направления распространения УВ. В доме были выбиты рамы, а в ангаре сильно смяты стенки по фронту и сбоку. Получены также данные по воздействию воздушной УВ на различные виды техники.

Распределение удельной энергии взрыва e в воздухе, грунте и воде определялось обработкой осциллограмм из справедливого в акустическом приближении выражения

$$e = \int \Delta p^2 dt / \rho c \text{ [кДж/м}^2\text{]},$$

где ρ — плотность, c — скорость звука.

На основе анализа данных о временах прибытия волн приняты следующие значения плотности и волновой скорости в грунте: $\rho = 2000$ кг/м³ и $c = 4,9$ км/с. Скорость звука в воде принята равной $c = 1,43$ км/с. В воздухе (см. табл. 2) полная энергия УВ в диапазоне расстояний $70 \div 4180$ м уменьшалась от 70 до 6 % энергии взрыва. Соответственно полная энергия, переданная в грунт в ближней зоне, составила ≈ 30 %. На расстоянии ≈ 590 м в воздухе, грунте и воде на глубине 5 м получено $e \approx 320, 0,75$ и $0,13$ кДж/м² соответственно, или $\approx 17, 0,04$ и $0,01$ % энергии взрыва. Эти результаты согласуются с данными, полученными при взрывах полупогруженных в воду сферических зарядов тротила массой 100 кг [5], где на соответствующих приведенных расстояниях доля энергии воздушной УВ составила ≈ 8 % от энергии взрыва.

В базе данных [2] имеется информация по параметрам взрывных УВ в разных средах в

формате Excel, которые могут быть использованы для тестирования моделей динамических процессов в геофизике.

ВЫВОДЫ

1. Приведены некоторые результаты экспериментального исследования 1000-тонного прибрежного взрыва, проведенного на склоне в сторону водоема в условиях вечной мерзлоты.

2. По результатам обработки данных скоростной фотосъемки установлены временные зависимости формы, размеров и объема облака взрыва. Максимальная высота облака составила $\approx 3,5$ км. К моменту времени 40 с высота облака и диаметры его нижней и верхней частей достигли $\approx 2, 0,75$ и $1,2$ км соответственно, а объем — около $0,8$ км³.

3. Проведено сравнение размеров воронок и высоты подъема облака с данными других 1000-тонных взрывов на мягких грунтах из разработанной базы данных. Максимальные высоты подъема облака у всех взрывов близки. Для прибрежного взрыва глубина воронки на ≈ 30 % больше, а радиус соответственно меньше, что можно связать с влиянием склона.

4. По результатам обработки осциллограмм УВ в воздухе в диапазоне расстояний $70 \div 4200$ м определены значения максимального давления, длительности, удельного импульса и энергии положительной фазы, а также полной длительности и энергии УВ, включая отрицательную фазу. Проведено сравнение с расчетами по эмпирическим формулам М. А. Садовского [1]. За пределами ближней зоны, где применимы формулы, отмечается их удовлетворительное согласие с данными опытов.

5. Получены данные пьезоэлектрических измерений давления УВ в воде на расстоянии 590 м от взрыва на глубинах $2 \div 9$ м за время около 1 с. Зарегистрирован приход продольных и поперечных волн, преломленных от дна, и волн, преломленных из воздуха. С уменьшением глубины давление преломленных продольных и поперечных волн уменьшается из-за их взаимодействия со свободной поверхностью воды.

6. Получены оценки распределения энергии взрыва в различных средах. Так, на расстоянии около 590 м доля энергии, переданной в воздух, грунт и воду, составляет $\approx 17, 0,04$ и $0,01$ %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Садовский М. А.** Геофизика и физика взрыва / Под ред. В. В. Адушкина. М.: Наука, 1999.
2. **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.
3. **Eneva M., Stevens J. L., Khrstoforov B. D., et al.** Analysis of hydroacoustic data for CTBT monitoring // Pure Appl. Geophys. 2001. V. 158. P. 605–626.
4. **Адушкин В. В., Гарнов В. В., Христофоров Б. Д.** Оценка параметров аварийного взрыва путем сравнения с опытными взрывами // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 4. С. 28–32.
5. **Коробейников В. П., Христофоров Б. Д.** Подводный взрыв // Итоги науки и техники. Гидромеханика. Т. 9. М.: ВИНТИ, 1976. С. 54–114.

Поступила в редакцию 2/Х 2003 г.
