

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

О подавлении волны цунами подводными барьерами

А.М. Фридман, Л.С. Альперович, Л. Шемер, Л. Пустильник,
Д. Штивельман, Ан. Г. Марчук, Д. Либерзон

Результаты экспериментов, проведённых в специализированном бассейне Тель-Авивского университета, позволяют сделать вывод о возможности существенного подавления разрушительных последствий волны цунами с помощью одиночных и двойных затопленных барьеров.

PACS numbers: 89.60.Gg, 91.30.Nw, 92.05.Bc, 92.05.Hj, 92.10.hl, 92.10.Hm

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201008d.0843

Содержание

1. Введение (843).
 2. Экспериментальное исследование влияния подводных барьеров на распространение волн (845).
 3. Выводы (849).
 4. Приложение (849).
- Список литературы (850).

1. Введение

Волны цунами, что в переводе с японского означает "большие волны в бухте", являются одним из наиболее опасных стихийных бедствий, которым подвержено побережье Мирового океана. Чаще всего цунами возникают в акватории Тихого океана, поскольку там сейсмическая активность гораздо выше, чем в других океанах. Это объясняется тем, что в подавляющем большинстве случаев цунами были вызваны сильными подводными землетрясениями. Среди других причин возникновения этих волн можно отметить извержения подводных вулканов, подводные оползни и падение крупных небесных тел в океан.

Кроме Тихого океана, цунами наблюдаются в Атлантическом и в Индийском океанах. Есть данные о цунами в Средиземном море [1] и даже в Чёрном и Каспийском морях [2]. Если оценивать ущерб, причиняемый сильными цунами, то он иногда значительно превосходит ущерб от собственно цунамигенного землетрясения. Наиболее частой причиной возникновения цунами является резкое вертикальное смещение обширных участков в эпицентральной области (или рядом с ней) во время сильных подводных землетрясений. Не исключена генерация цунами крупными подводными оползнями и падением больших масс грунта с крутых склонов.

На Земле ежегодно происходит в среднем около трёх тысяч подводных землетрясений [3]. Часть энергии сейсмического источника трансформируется в энергию волнового движения, поэтому сильные подводные землетрясения могут провоцировать громадные разрушительные цунами [4]. Только за один 2004 г. в результате крупномасштабного цунами в Азиатско-Тихоокеанском регионе погибло более 230 тыс. человек в 11 странах.

Одним из свойств волн цунами является их способность распространяться на огромные расстояния, сохраняя разрушительную силу. Во время Чилийского цунами волны за 22 ч пересекли весь Тихий океан и обрушились на побережье Японии, причинив значительный ущерб. Скорость распространения цунами в открытом океане хорошо определяется формулой $c = \sqrt{gH}$, где H — глубина воды, g — ускорение силы тяжести. Эта формула определяет океан по сравнению с длиной волны цунами как "мелкую" воду. В Тихом океане, средняя глубина которого порядка 4 км, скорость цунами составляет около 700 км ч⁻¹. Заметить цунами в открытом океане без приборов практически невозможно, так как при высоте до 1–2 м волны имеют длину от нескольких десятков до нескольких сотен километров. Начальное возвышение свободной поверхности в зоне очага цунами не превышает нескольких метров, а периоды волн лежат в диапазоне от 2 до 200 мин. По мере удаления от источника их амплитуда убывает вследствие цилиндрического расхождения, за исключением тех случаев, когда волна цунами распространяется вдоль подводных хребтов, играющих роль волноводов. В последнем случае амплитуда волн цунами практически не меняется.

А.М. Фридман. Институт астрономии РАН,
ул. Пятницкая 48, 119017 Москва, Российская Федерация
Российский научный центр "Курчатовский институт",
пл. Академика Курчатова 1, 123182 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 951-79-93. E-mail: fxela11@yahoo.com
Department of Geophysics and Planetary Sciences,
Tel Aviv University, Israel

Л.С. Альперович, Л. Пустильник, Д. Штивельман. Department
of Geophysics and Planetary Sciences, Tel-Aviv University, Israel
E-mail: lalperovich@gmail.com, levpust@post.tau.ac.il

Л. Шемер, Д. Либерзон. School of Mechanical Engineering,
Tel-Aviv University, Israel
E-mail: shemer@eng.tau.ac.il

Ан. Г. Марчук. Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН,
просп. Академика Лаврентьева 6, 6030090 Новосибирск,
Российская Федерация
E-mail: mikh@sscc.ru

Статья поступила 29 декабря 2009 г., после доработки 2 апреля 2010 г.



Рис. 1. Волнолом в устье бухты Офунато на северо-западе Японии, построенный для защиты от цунами.

Относительно слабое затухание по мере удаления от очага плюс фокусирование энергии волн, возникающее вследствие неровности дна и сферичности Земли, делают опасными цунами, порождённые даже весьма удалёнными источниками. Рефракция волны над неровным дном изменяет направление движения волнового фронта и может привести к крайней неравномерности распределения амплитуды волны вдоль побережья.

При входе волн цунами в зону мелководья их скорость резко уменьшается. При этом возрастает амплитуда, которая (если гребень волны не обрушится) достигает максимальных значений вблизи линии уреза. Ограничение свободного пространства по бокам, например при входе цунами в узкие заливы или устья рек, приводит к ещё большему возрастанию высоты волн.

Теоретические подходы к решению проблемы генерации, распространения, трансформации и диссипации цунами развивались в работах Пелиновского [5, 6], Куркина, Пелиновского и Слюняева [7]. Теоретические предсказания, как правило, подтверждаются и численными экспериментами. Книга [8] даёт всесторонний обзор основных достижений работ более 50 зарубежных авторов по численному моделированию нелинейных волн в океане, таких как волны, генерируемые оползнями, уединённые волны, цунами, а также по моделированию их взаимодействия с берегом и т.д. Численные модели, развитые Пелиновским [9], Ан. Марчуком и др. [10], Шокиным и др. [11], легли в основу схемы цунами-районирования Тихоокеанского побережья России, включающего в себя как оценку вероятности возникновения цунами в данном районе, так и определение зон возможного затопления в зависимости от параметров волны цунами.

Несмотря на несомненную важность численного моделирования процессов генерации и распространения цунами, совершенно очевидно, что при расчёте даже сравнительно простых моделей морского дна типа подводных хребтов, часто играющих роль либо волноводов, либо препятствий, могут быть потеряны эффекты, меняющие даже качественную картину явления.

Причина этого может быть связана с тем, что при распространении волны цунами над таким дном возникают волновые возмущения размером от нескольких сотен километров до масштабов локальной турбулентности. Однако при продольном набеге волны, например, на подводный хребет или риф возможен волноводный захват волны. В этом случае появляется новый масштаб — поперечный размер препятствия. Напротив, при поперечном накате на такое двумерное препятствие

возможно появление мелкомасштабных возмущений, обрушивающихся непосредственно за подводной преградой. Такие возмущения могут привести к дополнительной диссипации исходной крупномасштабной волны за счёт появления дополнительной "турбулентной" вязкости. Подводные острова могут, наоборот, сфокусировать волну цунами в локальной области, что может привести к значительному росту волны за островом и, в свою очередь, к заметному подавлению волны вдали от него [12].

Поскольку тензор плотности потока импульса пропорционален квадрату скорости жидкости [13], естественно попытаться уменьшить силу удара и уровень разрушений, вызываемых такими ударами, снизив скорость потока, например, выставив на его пути препятствие. Результаты лабораторного моделирования в начале 1960-х годов показали, что препятствие на пути сильной волны цунами уменьшает не только глубину затопления побережья, но и скорость течения массы воды на берег. Одним из технических средств защиты населения и построек от цунами являются разного рода защитные стены, отделяющие территории портов от основной территории посёлков и городов. Высота этих стен достигает более 5 м. На рисунке 1 показана фотография защитного мола в заливе Офунато (Япония) (общая длина мола 740 м при оставшейся ширине входа в залив около 200 м), способного противостоять волнам цунами до 6 м (незатопленные барьеры). Построенные в 1967 г. барьеры продемонстрировали свою эффективность через год, во время цунами 16 мая 1968 г., снизив высоту цунами в два раза.

Эти барьеры в принципе способны защитить портовые сооружения от цунами средней силы, но при сильном цунами даже крепкие бетонные стены, возвышающиеся над водой, не выдерживают напора водной массы при атаке цунами и опрокидываются. Во время мощного цунами 1983 года происходил перелив воды через шестиметровые стены в порту г. Носиро, при этом несколько блоков весом в 5000 т было опрокинуто.

Следовательно, с этой точки зрения целесообразнее использовать один или несколько подводных барьеров, не гасящих полностью цунами, но значительно ослабляющих их разрушительное воздействие на побережье. Косвенным свидетельством в пользу такого подхода являются опубликованные недавно данные о значительном ослаблении разрушительных последствий цунами в зонах побережья, прикрытых развитыми коралловыми рифами. И наоборот, в тех местах, где рифы были повреждены или уничтожены в результате пиратского

промысла, разрушения, вызванные цунами, были особенно опустошительными. На основании многочисленных данных International Maritime Organization [14] (2009 г.) указала на важную роль подводных коралловых рифов в защите от разрушительных ударов цунами.

Теоретические и численные модели отклика, инициированного вертикальным незатопленным барьером, на движение бегущей монохроматической волны цунами, изучаются начиная с 1960-х годов (см., например, [15–22]).

2. Экспериментальное исследование влияния подводных барьеров на распространение волн

Мы экспериментально исследовали влияние подводных одиночных и двойных барьеров на распространение уединённого волнового пакета, характерный горизонтальный масштаб которого в 10–30 раз больше глубины водного слоя. В настоящей статье обсуждаются результаты наших экспериментов по симуляции волны цунами и возможности её разрушения в одном из специализированных бассейнов, расположенном в корпусе инженерного факультета Тель-Авивского университета. На факультете имеется два экспериментальных канала: 20- и 5-метровый. На рисунке 2а показан 20-метровый канал, на рис. 2б — 5-метровый, который мы использовали для своих экспериментов. Схема нашей установки приведена

на рис. 3. В левой части рисунка изображён генератор волны цунами — изогнутая алюминиевая пластина, которую кулачок прижимает ко дну, натягивая пружину. Затем кулачок соскакивает с пластины, которая под действием пружины переходит в прежнее состояние, выбрасывая массу воды направо, в сторону "пляжа" и "побережья". На "пляже" и "побережье" натянуты сантиметровые сетки: положительная на "побережье", отрицательная на "пляже". По этим лекалам мы определяем величину заплескивания волны цунами. Длина волны 3 м, её амплитуда 3 см, глубина канала 10,5 см. Длину волны цунами и её высоту определяем с помощью волновых высотомеров, в каждом из которых имеются две окисленные танталовые нити (рис. 4), работающие как конденсатор с переменной ёмкостью, которая определяется высотой жидкости. На рисунке 5 изображена временная зависимость волны цунами, измеренная одним из высотомеров. На рисунке 6 показано действие волнового генератора: кулачок надавливает на изогнутый металлический лист (рис. 6а, б), который затем выталкивает воду к берегу (рис. 6в).

На расстоянии 102 см от волнового генератора, на дне канала, перпендикулярно его оси ставился первый барьер, полностью перегородивший канал до определённой высоты. За ним на некотором расстоянии устанавливался точно такой же барьер. Барьеры представляли собой алюминиевые пластины толщиной 3 мм и шири-

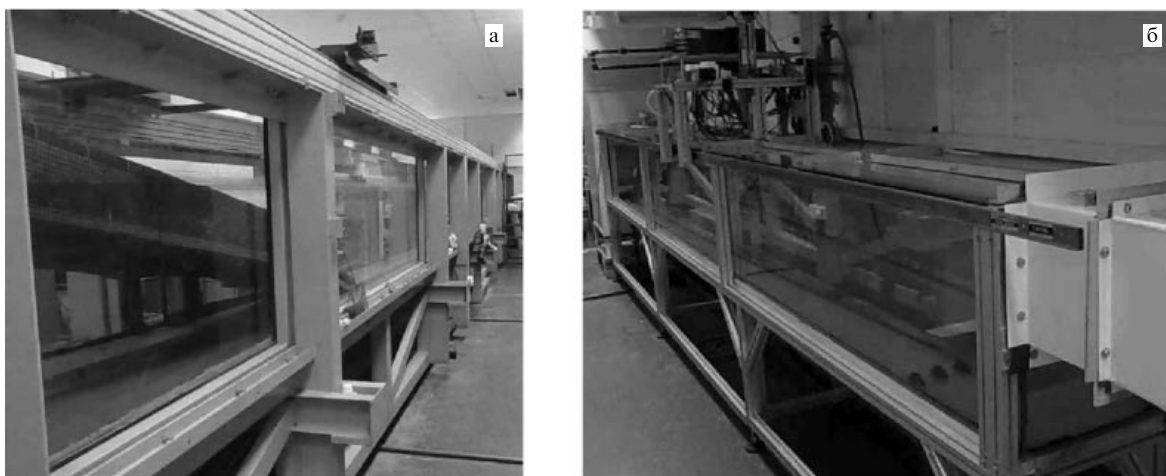


Рис. 2. Два экспериментальных канала, используемые для лабораторной симуляции мелко- и крупномасштабных волновых гидродинамических явлений. Длина левого канала 20 м (а), длина правого, на котором проводились эксперименты с волнами цунами, — 5 м (б).

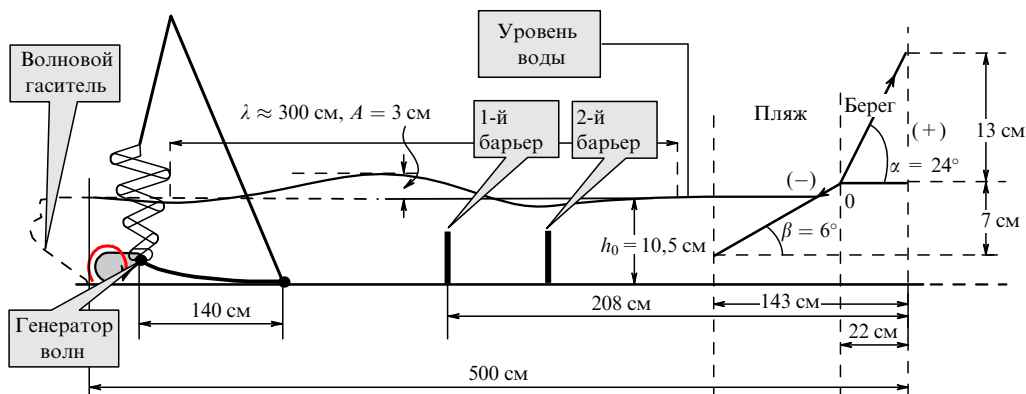


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

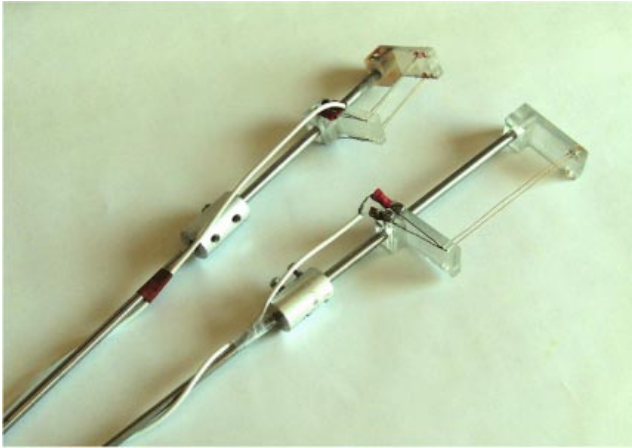


Рис. 4. Датчики, использованные при измерении высоты.

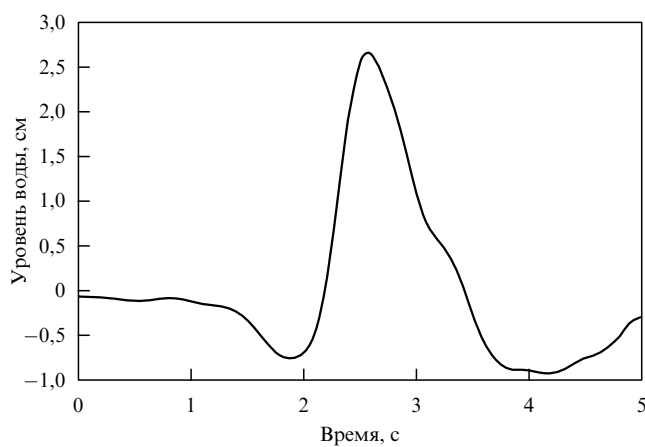


Рис. 5. Временная зависимость волны цунами, измеренная одним из датчиков.

ной 50 см (ширина канала). Нас интересовало влияние высоты придонных барьеров и расстояний между ними на величину заплеска волны, достигшей берега. Для этой цели мы меняли во время экспериментов как высоту двойных барьеров, так и расстояние между первым и вторым барьером, фиксируя при этом положение первого барьера относительно волнового генератора (102 см). Отношение высоты барьеров к глубине варьировалось от 0,3 до 1,2.

Временной фурье-анализ (рис. 7) показал, что в возбуждённой волне преобладает трёхсекундная мода. Поскольку расстояние между высотомерами известно, то известна и скорость распространения волны цунами: 1 м с^{-1} . Преобладание трёхсекундной моды однозначно определяет длину волны цунами — 3 м. Поскольку длина волны λ намного превосходит глубину жидкости h , то волновой пакет может рассматриваться как волна цунами, движущаяся со скоростью $c = \sqrt{gh}$.

Рисунок 8 демонстрирует эволюцию заплеска волны на "пляж" и "побережье" по мере подхода волны к берегу от плавного укручения (рис. 8а) и вертикального фронта (рис. 8б) к опрокидыванию и S-волне (рис. 8в) [24] и, наконец, к разрушению волны на берегу (рис. 8г). Здесь и далее мы использовали скоростную фотокамеру, позволяющую вести съёмку со скоростью до 1200 кадров в секунду. Однако в наших экспериментах мы ограничились скоростью 300 кадров в секунду.



Рис. 6. Кинокадры, показывающие действие нажимного устройства волнового генератора: (а) нажимной кулачок, приводимый в действие мотором, приподнят над металлической пластиной; (б) момент нажатия кулачка, пружина растянута; (в) кулачок соскакивает с края пластины, пружина выдёргивает изогнутую пластину, весь объём воды выбрасывается вправо, к "берегу".

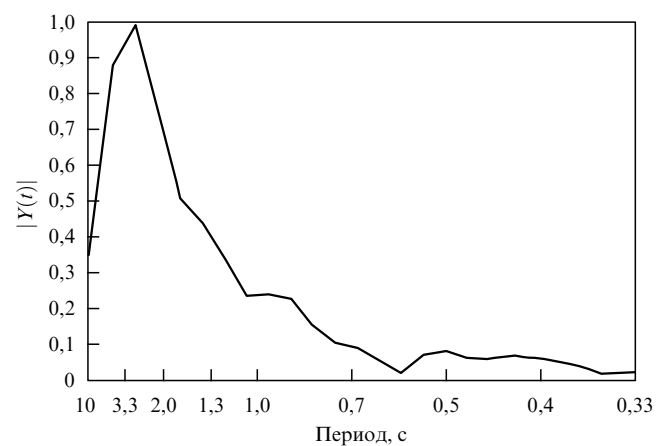


Рис. 7. Амплитудный фурье-спектр $|Y(t)|$ волнового пакета (см. рис. 5), создаваемого волновым генератором.

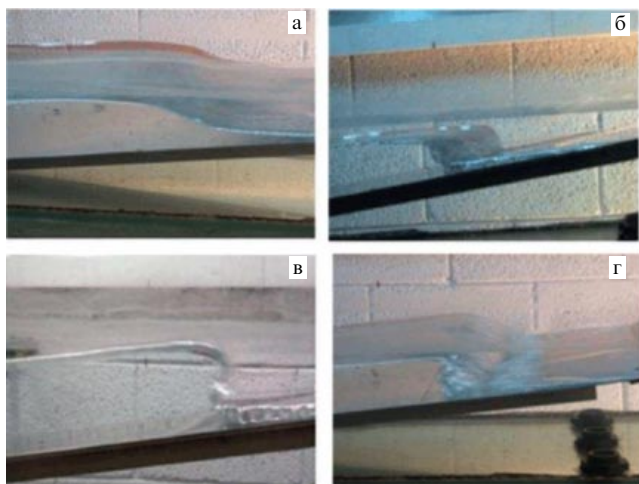


Рис. 8. Фотокадры эволюции волнового пакета по мере подхода к берегу.

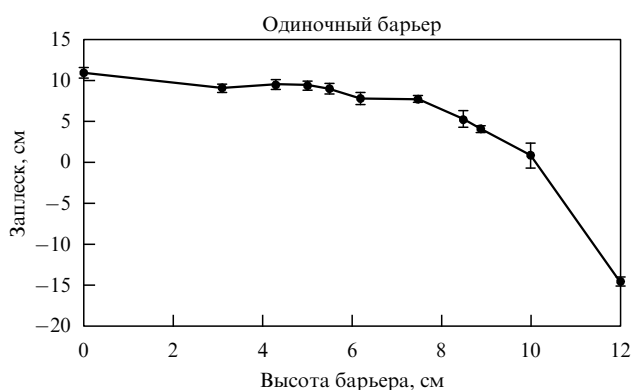


Рис. 9. Зависимость длины заплеска от высоты одиночного барьера.

Рисунок 9 показывает зависимость величины заплеска волны цунами от высоты одиночного барьера. Без барьера заплеск составляет 10 см. При высоте барьера, сравнимой с глубиной канала (10 см), величина заплеска равна нулю, т.е. находится на границе "пляжа" и "побережья". Барьер высотой 12 см, т.е. поднимающийся на 1,5 см над поверхностью воды, уменьшает высоту заплеска до -15 см ("пляж").

На рисунке 10 показана зависимость коэффициента отражения от высоты одиночного барьера. Очевидно, что максимальной высоте барьера (12 см) соответствует максимальный коэффициент отражения (0,4).

Заплеск волны на берег фиксировался скоростной камерой. Возбуждаемая волна практически не зависит от поперечной координаты и распространяется вдоль канала в виде волнового вала. Однако при подходе к "берегу" начинают сказываться такие локальные особенности наклонной алюминиевой пластины, моделирующей прибрежную зону, как шероховатости, микротрещины, жировые пятна, что в конечном итоге разрушает исходную двумерную волновую структуру набегающей волны. В заплеске появляются языки и лакуны, искажающие основной фронт. Поэтому в наших экспериментах количественным параметром, характеризующим дальность заплеска, мы считали расстояние до самой дальней точки, до которой дошла волна.

Величина заплеска каждый раз оценивалась как среднее по нескольким (обычно 7–10) пускам. Значение

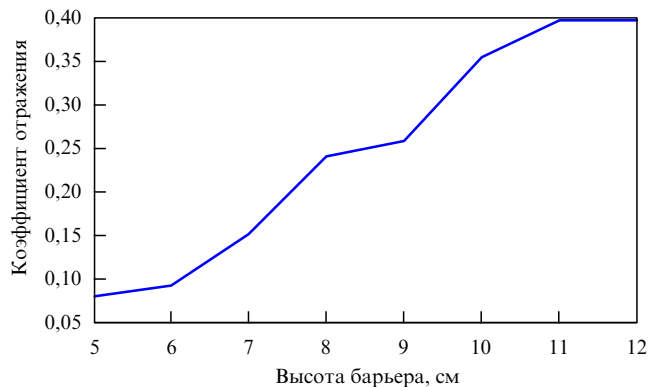


Рис. 10. Коэффициент отражения волны цунами как функция высоты барьера. Глубина спокойной жидкости составляет 10,5 см, поэтому барьеры высотой 11 и 12 см возвышаются над водной поверхностью.

заплеска при первом пуске всегда резко отличалась от его значения при последующих пусках. Причина этого очевидна — свойства сухой и смоченной поверхности сильно различаются, поэтому при проведении экспериментов результаты первого пуска игнорировались и учитывались при расчёте среднего заплеска лишь последующие пуски для фиксированной высоты барьеров и расстояния между ними.

На рисунке 11 изображены зависимости заплеска от расстояния между двумя одинаковыми по высоте барьерами. Чем больше высота барьеров, тем яснее виден минимум заплеска при определённом расстоянии между барьерами. Для того чтобы убедиться в достоверности обнаруженного минимума заплеска волны цунами, мы провели дополнительные испытания, изменив свойства поверхности "пляжа" и "берега". Для этого эксперименты проводились на поверхностях, накрытых гигроскопической бумагой. Смоченная поверхность становится прозрачной, поэтому сантиметровая сетка — подложка — позволяет точно определить заплеск волны и в этом случае. Такой тонкий гигроскопический слой не только заметно маскирует локальные неоднородности, пятна, неровности обработки металлической поверхности, выравнивая и делая более однородным слой поверхности "пляжа", но и вносит дополнительное трение, влияя на величину заплеска волны. Рисунок 12 показывает, так же как и рис. 11, зависимости величин заплеска для двойных барьеров различной высоты от расстояния между ними. Однако в этой серии экспериментов мы изменили свойства "пляжа" и "берега", накрыв их шероховатой гигроскопической бумагой. Сравнивая рис. 11 и 12, можно видеть, что минимум, заметный на "чистом берегу", без покрытия, и уверенно распознаваемый лишь при барьерах высотой 7,5 см и большей, в случае "шероховатого берега" чётко виден даже при малых барьерах.

Из выявленных особенностей заплеска, его чувствительности не только к подводным препятствиям, но и к расстоянию между ними, несомненно, следует возможность контроля с помощью таких барьеров и силы удара волны цунами, достигшей берега. Поэтому в последней серии экспериментов мы исследовали силу удара волны цунами по препятствиям, поставленным на берегу. В качестве таких препятствий мы использовали не придонные барьеры, полностью перегораживавшие канал по ширине, а небольшие бетонные плитки (шириной 7 см,

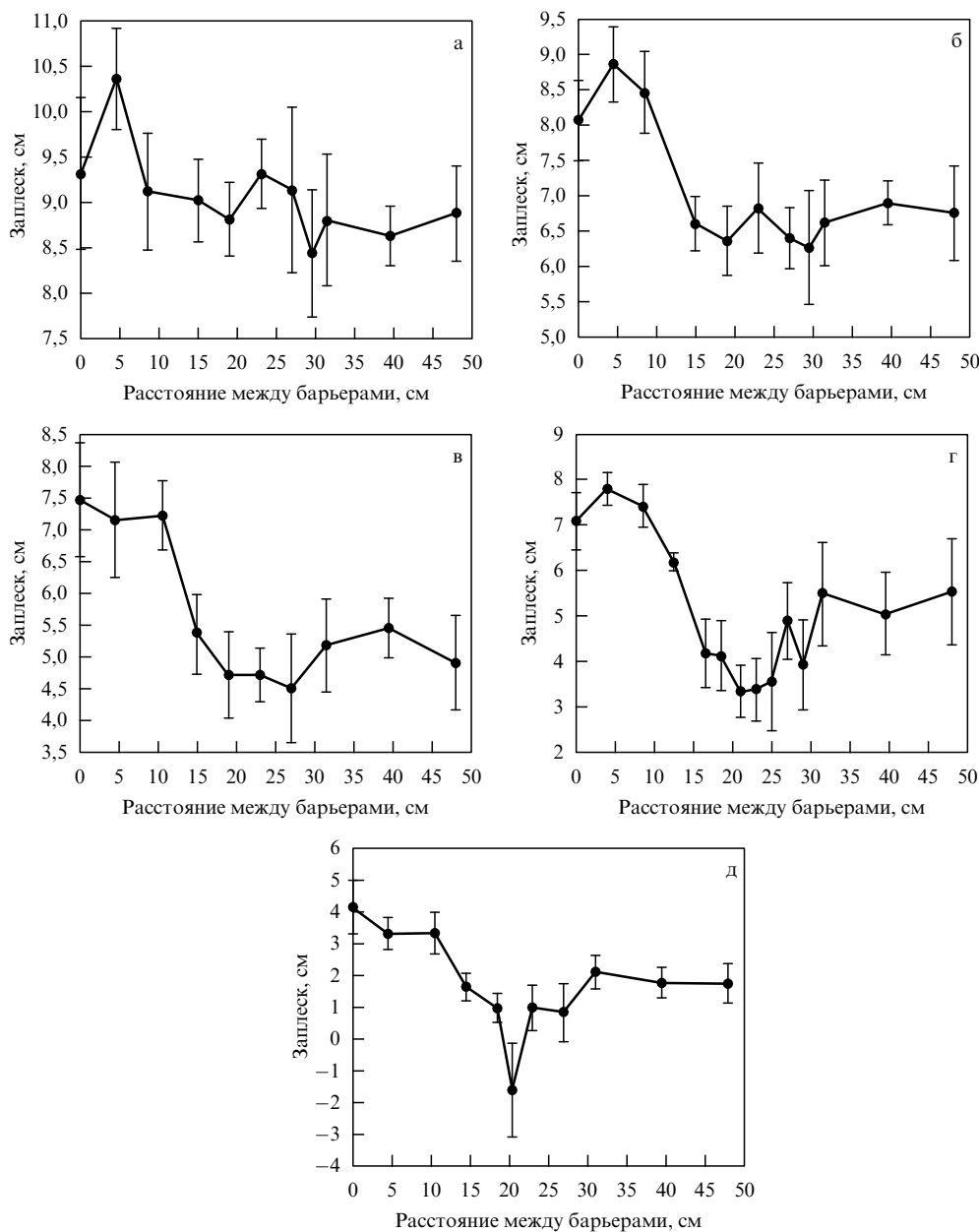


Рис. 11. Графики зависимости длины заплеска от расстояния между двоянными придонными барьерами одинаковой высоты. Высота двойных барьеров 3,1 см (а), 5,5 см (б), 6,2 см (в), 7,5 см (г) и 8,5 см (д).

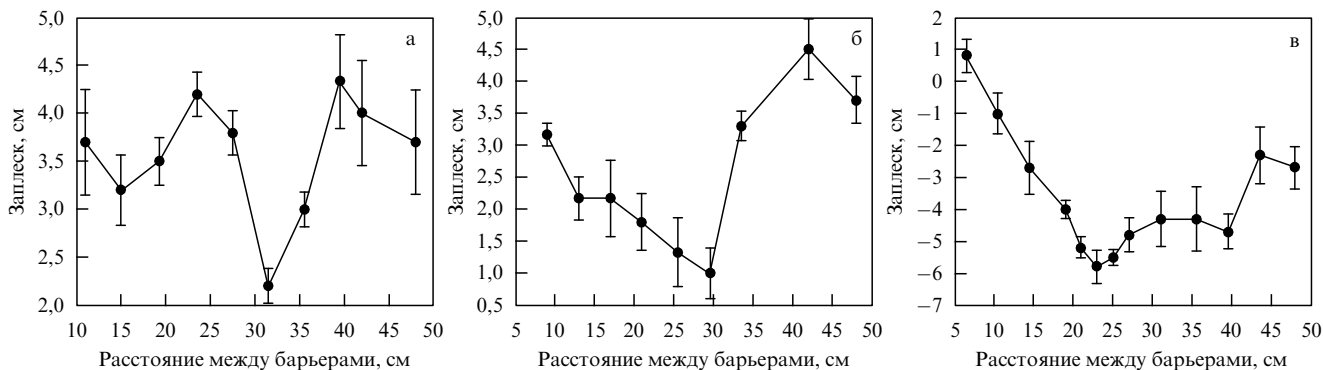


Рис. 12. Та же зависимость, что и на рис. 11, но полученная для шероховатой поверхности, покрывающей "пляж" и "берег". Высота двойных барьеров 3,0 см (а), 5,5 см (б) и 7,5 см (в).

высотой 7 см и толщиной 0,8 см). Плитки падали, когда на дне устанавливались два 8-сантиметровых барьера и

расстояние между ними было максимальным (48 см). Плитка, однако, выдерживала удар и не теряла устой-

чивости даже при двух более низких барьерах (7,5 см), когда расстояние между ними составляло 25 см, что соответствовало минимуму заплеска для таких барьеров (рис. 12г).

Проведённые эксперименты с различными свойствами берега, несмотря на количественное различие в величинах, позволяют сделать вывод о возможности существенного подавления разрушительных последствий цунами с помощью одиночных и двойных затопленных барьеров.

Попробуем теперь перенести результаты наших экспериментов на реальные условия. Оценим характерный размер донных преград и расстояний между ними, которые могли бы заметно повлиять на набег волны цунами на берег. В приложении показано, что рассматриваемая лабораторная модель допускает масштабное преобразование, при котором характерные длины увеличиваются, скажем, в n раз и время — в \sqrt{n} раз. В наших экспериментах глубина воды составляла около 0,1 м. Предположим, что волна подходит к берегу, глубина около которого составляет 10 м. Это означает, что масштабный коэффициент $n = 10^2$. Тогда волна длиной $\lambda = 3$ м и длительностью 3 с трансформируется в 300-метровую волну длительностью 30 с. Поскольку длина океанических волн редко превышает 100 м, то волну длиной 300 м можно считать короткой волной цунами. Лабораторные эксперименты продемонстрировали, что даже малые придонные препятствия, поставленные на пути цунами, при специальном подборе расстояния между ними могут заметно подавить эту волну на берегу. Например, 3-метровые барьеры, поставленные на 10-метровой глубине на расстоянии 30 м друг от друга, могут уменьшить заплеск волны цунами в два раза (рис. 12а).

3. Выводы

Эксперименты были проведены в 5-метровом бассейне глубиной 10,5 см. Длина возбуждённой волны составляла около 3 м, поэтому о такой волне можно говорить как о волне цунами. Мы использовали два типа барьеров: одиночные и двойные с изменяющимся расстоянием между двумя барьерами.

I. В экспериментах с одиночными барьерами:

1) подтверждены результаты ранних экспериментов [15], показавшие, что одиночные барьеры уменьшают величины заплеска на берег волны цунами;

2) установлено, что заплеск близок к нулю только в случае незатопленных барьеров.

II. Впервые проведены эксперименты с двойными затопленными барьерами, которые продемонстрировали следующее:

1) двойные барьеры более эффективно, чем одиночные того же размера, уменьшают величину заплеска волны цунами;

2) найдено, что существует минимум величины заплеска при определённых расстояниях между двойными затопленными барьерами;

3) с увеличением высоты барьеров относительная величина заплеска в минимуме уменьшается. При затопленных барьерах величина заплеска может быть практически сведена к нулю;

4) используя групповой метод дифференциальных уравнений, развитый Овсянниковым [6], мы перенесли

параметры экспериментов в бассейне на натурные условия.

4. Приложение

О группе преобразования растяжения, допускаемой системой уравнений Эйлера

Трёхмерное движение (в том числе, волновое) идеальной несжимаемой жидкости в слое $\eta(x, y, t) \geq z \geq h(x, y)$, где x, y — горизонтальные координаты, при наличии силы тяжести и отсутствии других внешних сил (силы донного трения, силы Кориолиса и т.д.) и вихря описывается системой дифференциальных уравнений Эйлера, которая в векторной форме имеет вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \mathbf{r}} - \mathbf{g},$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{v} = 0,$$

или при записи по компонентам:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g, \\ \operatorname{rot}_x \mathbf{v} = \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} &= 0, \quad \text{т.е.} \quad \frac{\partial v_y}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial y}, \\ \operatorname{rot}_y \mathbf{v} = \frac{\partial v_z}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial z} &= 0, \quad \text{т.е.} \quad \frac{\partial v_z}{\partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial z}, \\ \operatorname{rot}_z \mathbf{v} = \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} &= 0, \quad \text{т.е.} \quad \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{\partial v_y}{\partial x}, \end{aligned} \quad (1)$$

На свободной поверхности и на дне выполняются следующие граничные условия:

$$v_z = \frac{d\eta(x, y, t)}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} v_x + \frac{\partial \eta}{\partial y} v_y, \quad p = 0 \quad \text{при} \quad z = \eta, \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dt} = \left(\frac{\partial z}{\partial t} = 0 \right) + \frac{\partial z}{\partial x} v_x + \frac{\partial z}{\partial y} v_y = \frac{\partial z}{\partial x} v_x + \frac{\partial z}{\partial y} v_y, \quad z = h.$$

В (1), (2) использованы следующие обозначения: v_x, v_y, v_z — компоненты скорости частиц жидкости вдоль осей x, y, z соответственно, ρ — плотность, p — давление, \mathbf{g} — ускорение силы тяжести, η — смещение свободной поверхности относительно невозмущённого уровня, h — глубина жидкости.

Рассмотрим, что произойдёт, если все линейные размеры увеличить в n раз, т.е. преобразовать все зависимые и независимые переменные следующим образом:

$$x^* = nx, \quad y^* = ny, \quad z^* = nz, \quad \eta^* = n\eta, \quad h^* = nh. \quad (3)$$

Требуется найти такое преобразование растяжения координат и переменных для системы уравнений (1), (2), которое не нарушало бы равенства правых и левых частей уравнений, если они выполняются для какого-

либо решения (набора переменных). Для такого анализа удобно переписать рассматриваемую систему уравнений в терминах перемещений за время δt в направлениях осей координат ∂n_x , ∂n_y , ∂n_z . В частности, компонента v_x скорости \mathbf{v} вдоль оси x запишется как

$$v_x = \frac{\partial n_x}{\partial t}.$$

После соответствующих замен уравнения (1), (2) примут следующий вид:

$$\frac{\partial^2 n_x}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 n_y}{\partial y \partial t} + \frac{\partial^2 n_z}{\partial z \partial t} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 n_x}{\partial t \partial t} + \frac{\partial n_x}{\partial t} \frac{\partial^2 n_x}{\partial x \partial t} + \frac{\partial n_y}{\partial t} \frac{\partial^2 n_x}{\partial y \partial t} + \frac{\partial n_z}{\partial t} \frac{\partial^2 n_x}{\partial z \partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 n_y}{\partial t \partial t} + \frac{\partial n_x}{\partial t} \frac{\partial^2 n_y}{\partial x \partial t} + \frac{\partial n_y}{\partial t} \frac{\partial^2 n_y}{\partial y \partial t} + \frac{\partial n_z}{\partial t} \frac{\partial^2 n_y}{\partial z \partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 n_z}{\partial t \partial t} + \frac{\partial n_x}{\partial t} \frac{\partial^2 n_z}{\partial x \partial t} + \frac{\partial n_y}{\partial t} \frac{\partial^2 n_z}{\partial y \partial t} + \frac{\partial n_z}{\partial t} \frac{\partial^2 n_z}{\partial z \partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 n_z}{\partial t \partial y} = \frac{\partial^2 n_y}{\partial t \partial z}, \quad \frac{\partial^2 n_x}{\partial t \partial z} = \frac{\partial^2 n_z}{\partial t \partial x}, \quad \frac{\partial^2 n_y}{\partial t \partial x} = \frac{\partial^2 n_x}{\partial t \partial y}. \quad (8)$$

При невысоких скоростях течения давление в толще воды мало отличается от гидростатического

$$p = \rho g(\eta(x, y, t) - z).$$

После этой подстановки правая часть уравнения (7) обращается в нуль, а в правых частях (5) и (6) будут стоять соответственно величины

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{и} \quad g \frac{\partial \eta}{\partial y}. \quad (9)$$

Легко видеть, что при подстановке новых переменных величины всех слагаемых увеличатся в n раз, если не менять t . Для того чтобы сохранилось равенство обеих частей уравнений, надо преобразовать t , а именно изменить его в \sqrt{n} раз. Таким образом, преобразование переменных (3) плюс преобразование времени

$$t^* = \sqrt{nt} \quad (10)$$

является допустимой группой преобразований [24] для системы уравнений Эйлера (1) и (2). Иными словами, если найдено решение задачи (1), (2), то такое же решение, преобразованное в соответствии с (3), (10), будет являть-

ся решением задачи, в которой все линейные размеры увеличены в n раз, а время — в \sqrt{n} раз.

Список литературы

1. Соловьев С Л и др. *Цунами в Средиземном море, 2000 г. до н.э. — 1991 г.* (М.: Научный мир, 1997)
2. Stephenson F et al. "Catalogue of tsunamis. British Columbia, Canada: 1700–2007", Препринт (М.: Янус-К., 2007)
3. Левин Б В, Носов М А *Физика цунами и родственных явлений в океане* (М.: Янус-К, 2005)
4. Gutenberg B "Tsunamis and earthquakes" *Bull. Seismolog. Soc. Am.* **29** 517 (1939)
5. Пелиновский Е Н *Нелинейная динамика волн цунами* (Горький: ИПФ АН СССР, 1982)
6. Пелиновский Е Н *Гидродинамика волн цунами* (Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996)
7. Куркин А А, Пелиновский Е Н, Слоняев А В, в сб. *Нелинейные волны 2004* (Под ред. А В Гапонова-Грехова) (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005)
8. Ma Q (Ed.) *Advances in Numerical Simulation of Nonlinear Water Waves* (Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 11) (Singapore: World Scientific, 2010)
9. Пелиновский Е Н *Вулканоология и сейсмология* (5) 79 (1988)
10. Марчук Ан Г, Чубаров Л Б, Шокин Ю И *Численное моделирование волн цунами* (Новосибирск: Наука, 1983)
11. Шокин Ю И и др. *Вычислительный эксперимент в проблеме цунами* (Отв. ред. В М Фомин) (Новосибирск: Наука, 1989)
12. Berry M V *Proc. R. Soc. Lond. A* **463** 3055 (2007)
13. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Гидродинамика* (М.: Наука, 1986) [Landau L D, Lifshitz E M *Fluid Mechanics* (Oxford: Pergamon Press, 1987)]
14. International Maritime Organization, Maritime knowledge centre. Information resource "On Tsunami Disaster in South Asia", Information Sheet No. 4, May, 2009
15. Wiegel R J. *Waterways Harbors Div., ASCE* **86** 1 (1960)
16. Liu R L-F, Abbaspour M J. *Waterway, Port, Coastal Ocean Div., ASCE* **108** 479 (1982)
17. Blackmore P A, Hewson P J *Coastal Eng.* **8** 331 (1984)
18. Chan E S, Melville W K *Proc. R. Soc. Lond. A* **417** 95 (1988)
19. Ramsden J D "Tsunamis: Forces on a vertical wall caused by long waves, bores, and surges on a dry bed", Technical Report No. KH-R-54 (Pasadena, Calif.: California Institute of Technology, 1993)
20. Goda Y *Adv. Ocean Eng.* **15** 464 (2000)
21. Gao Xueping J. *Hydrodyn. B* **1** 28 (2001)
22. Sorensen R M *Basic Coastal Engineering* 3rd ed. (New York: Springer Sci., 2006)
23. Lighthill J *Waves in Fluids* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1978) [Лайтхилл Дж *Волны в жидкостях* (М.: Мир, 1981)]
24. Овсянников Л В *Групповые свойства дифференциальных уравнений* (Новосибирск: Изд-во СОАН СССР, 1962)

Tsunami wave suppression using submarine barriers

A.M. Fridman

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, ul. Pyatnitskaya 48, 119017 Moscow, Russian Federation
Russian Research Center "Kurchatov Institute", pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation
Department of Geophysics and Planetary Sciences, Tel Aviv University, Israel. Tel. (7-495) 951-79 93. E-mail: fxela11@yahoo.com.*

L.S. Alperovich, L. Pustil'nik, D. Shtivelman

*Department of Geophysics and Planetary Sciences, Tel-Aviv University, Israel
E-mail: lalperovich@gmail.com, levpust@post.tau.ac.il*

L. Shemer, D. Liberzon

School of Mechanical Engineering, Tel-Aviv University, Israel. E-mail: shemer@eng.tau.ac.il

An.G. Marchuk

*Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS
prosp. Akademika Lavrent'eva 6, 630090 Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: mikh@sccc.ru*

Submerged barriers, single or double, can be used to greatly reduce the devastating effect of a tsunami wave according to a research flume study conducted at Tel Aviv University.

PACS numbers: 89.60.Gg, 91.30.Nw, 92.05.Bc, 92.05.Hj, 92.10.hl, 92.10.Hm
Bibliography — 24 references
Uspekhi Fizicheskikh Nauk **180** (8) 843–850 (2010)

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201008d.0843
Received 29 December 2009, revised 2 April 2010
Physics – Uspekhi **53** (8) (2010)