

Научная статья

УДК 551.466.62

DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-3-20-31

Захват волновой энергии островами

Андрей Гурьевич Марчук

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск, Россия

Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

mag@omzg.sccc.ru

Аннотация

В работе исследуется процесс захвата волновой энергии островом, вокруг которого дно имеет коническую форму. Кинематика изначально прямолинейного волнового фронта около такого острова была исследована методом пошагового ортогонального продвижения. Получена оценка доли волновой энергии, которая из-за рефракции захватывается донным склоном, окружающим остров. Проведено также численное моделирование этой же задачи в рамках модели мелкой воды, которое подтвердило результаты, полученные кинематическим методом, в том числе и количественную оценку части волновой энергии, отраженной островом и захваченной его наклонным шельфом. Показано, что острова, окруженные донным склоном, хорошо экранируют акваторию, расположенную за таким островом.

Ключевые слова

волна цунами, кинематика волновых лучей и фронтов, численное моделирование цунами

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (0315-2019-0004).

Для цитирования

Марчук А. Г. Захват волновой энергии островами // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21, № 3. С. 20–31. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-3-20-31

Capture of Wave Energy by Islands

Andrey G. Marchuk

Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia

Novosibirsk state university,
Novosibirsk, Russia

mag@omzg.sccc.ru

Abstract

The process of capturing wave energy by an island around which the bottom has a conical shape is studied. The kinematics of the initially straight wave front near such an island was investigated by the method of step-by-step orthogonal advancement. An estimate of the part of wave energy that due to refraction is captured by the bottom slope surrounding

© Марчук А. Г., 2023

the island was obtained. Numerical modeling of this problem was also carried out within the framework of the shallow-water model, which confirmed the results obtained by the kinematic method, including a quantitative assessment of the part of the wave energy reflected by the island and captured by its inclined shelf. It is shown that the islands surrounded by the bottom slope well shield the water area located behind such an island.

Keywords

Tsunami wave, kinematics of wave rays and fronts, numerical modeling of tsunami

Acknowledgements

This work was carried out under state contract with ICMMG SB RAS (0315-2019-0004)

For citation

Marchuk A. G. Capture of wave energy by islands. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2023, vol. 21, no. 3, pp. 20–31. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-3-20-31

Введение

Волна цунами по своим характеристикам относится к категории длинных волн, длина которых на порядок превышает глубину, а ее высота при распространении в глубокой акватории на порядок или два меньше глубины. Динамика таких волн хорошо описывается системой уравнений мелкой воды [1].

Как показано в [2], склон океанического дна способен за счет рефракции захватывать волновую энергию цунами, направляя волны к береговой линии. Обычно глубина океана в непосредственной близости к острову значительно меньше, чем в открытом океане, хотя не исключены случаи очень резкого роста глубины сразу от линии уреза. Далее будем полагать, что рост глубины происходит достаточно постепенно и ширина этого склона дна существенно превышает длину волны цунами. Поэтому прямолинейный фронт волны цунами в процессе приближения к острову претерпевает значительные искривления, что влечет за собой атаку цунами на береговую линию острова практически со всех сторон (а не только с той, откуда двигалась волна цунами). При указанном соотношении ширины донного склона и длины волны применимо лучевое приближение для исследования процесса рефракции волны [3].

1. Постановка задачи

Такая задача рассматривалась многими исследователями, и имеется ряд публикаций на этот счет [4–6]. Процесс трансформации изначально плоской волны, приближающейся к осесимметричному (круглому) острову, с помощью различных методов исследован в [4], где для случая конического рельефа дна использованы приближенные аналитические формулы для амплитуды рефрагированных волн. Приведем некоторые результаты этой работы.

На рис. 1, взятом из [4], схематически изображен конический остров в области с постоянной глубиной, при этом в некоторой окрестности острова глубина линейно возрастает при удалении от береговой черты до максимального значения h_1 . Слева к острову приближается волна, профиль которой приведен здесь же на рисунке. Линия уреза представляет собой окружность радиусом r_0 , а склон дна заканчивается на расстоянии r_2 от центра острова. Угол θ выражает азимут так, как это изображено в верхней части рис. 1 ($\theta = 0$ исходное направление движения волны).

В статье с помощью приближенного решения для гармонических волн найдено состояние водной поверхности для различных длин волн и моментов времени. Вместе с этим на лабораторной установке (в бассейне) было проведено гидравлическое моделирование этой задачи. На рис. 2, также взятом из публикации [4], приводится сравнение амплитуд волн вдоль береговой линии острова для различных длин и периодов падающей волны. Здесь параметр β определяет относительную (по сравнению с радиусом острова) длину волны.

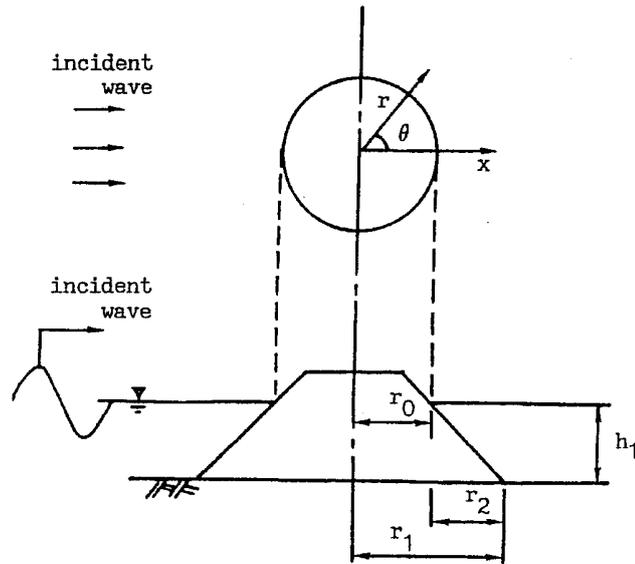


Рис. 1. Схема задачи о рефракции волны у конического острова [4].
Волна приближается к острову с левой стороны
Fig. 1. Diagram of the wave refraction problem near a conical island [4].
The wave is approaching the island on the left side

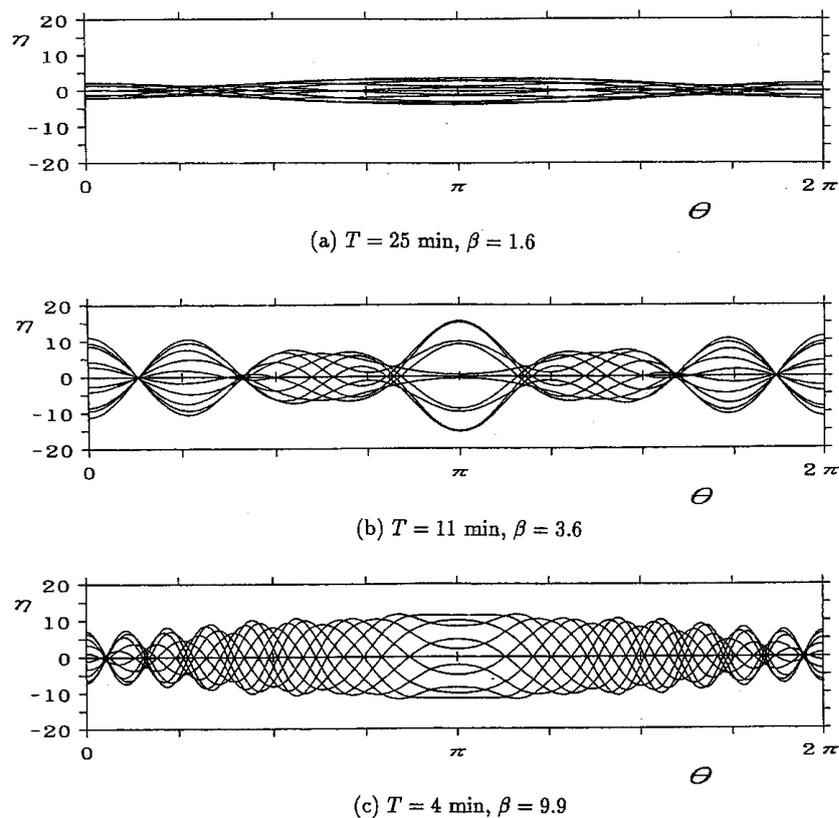


Рис. 2. Распределение высот волн по периметру острова для различных длин волн [4].
Угол π соответствует центру фронтальной части острова
Fig. 2. Distribution of wave heights along the island's perimeter for different wavelengths [4].
The angle value π corresponds to the center of the frontal part of the island

Локальные максимумы амплитуды во фронтальной части береговой линии ($\theta = \pi$) и в тыловой части ($\theta = 0$) объясняются столкновением рефрагированных волн сразу за островом (рис. 2, *a, b*). Направление движения волн можно проследить на рис. 3 по волновым лучам, построенным путем численного решения дифференциальных уравнений волнового луча [7]:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \nabla \ln \left(\frac{1}{c(\vec{x})} \right), \quad \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{p} \cdot c^2(\vec{x}), \quad (1)$$

где $\vec{x} = (x, y, t)$ – текущее положение точки на волновом луче, \vec{p} – вектор направления волнового луча, совпадающий с нормалью к волновому фронту, $c(x, y)$ – скорость распространения волн.

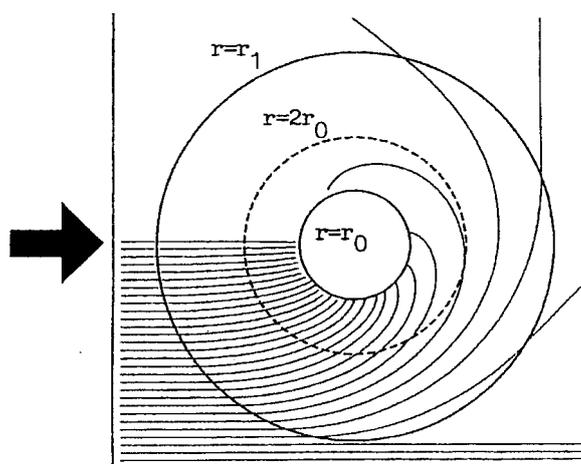


Рис 3. Картина рефракции волновых лучей над донным склоном около круглого острова [4].

Значения параметров r_0 и r_1 можно видеть на рис. 1

Fig. 3. Refraction of wave rays over the bottom slope near the round island [4].

The meaning of parameters r_0 and r_1 can be seen in Fig. 1

Изменение направления волновых лучей зависит от ширины склона дна около острова и предельной глубины, но, как правило, за тыльной частью острова происходит столкновение рефрагированных волн, обходящих остров с разных сторон. На рис. 3 изображены волновые лучи для волны, огибающей остров снизу (в соответствии с рисунком).

Рассмотрим кинематику волнового фронта изначально плоской волны цунами в той же постановке задачи, что и в работе [4]. Вокруг круглого острова с радиусом r_0 глубина линейно возрастает от нуля до некоторого максимального значения (на удалении r_1 от центра острова). Такой рельеф схематически изображен на рис.1. Эта задача численно решалась с помощью метода пошагового ортогонального продвижения волнового фронта, описанного в [8].

2. Расчет кинематики цунами методом ортогонального продвижения волнового фронта

В работе [7] исследуются свойства уравнения эйконала, описывающего поведение волнового фронта в неоднородной среде, и показывается, что при любом распределении скорости в среде точки фронта волны всегда двигаются в ортогональном к линии фронта направлении со скоростью, соответствующей проводимости среды в данной точке. В случае цунами эта скорость зависит только от глубины D и определяется формулой Лагранжа [1]:

$$c = \sqrt{gD}, \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести. Там же вводится понятие волновых лучей, о которых шла речь выше и которые представляют собой кривые, всё время ортогональные к волновому фронту. Именно на этих свойствах волновых фронтов и лучей базируется численный метод пошагового ортогонального продвижения точек волнового фронта, к краткому описанию которого мы переходим.

Рассмотрим прямоугольную расчетную область, где в каждой точке известна скорость распространения волны $c(x, y)$, $0 < x < X_{\max}$, $0 < y < Y_{\max}$. В случае волны цунами скорость ее распространения может быть вычислена по формуле Лагранжа (2), если известно распределение глубин. Рассмотрим кривую начального положения волнового фронта. Как правило, в качестве таковых будут братья либо прямые, либо замкнутые выпуклые кривые линии. Например, окружность или эллипс. Их гладкость не требуется, потому что в численном методе начальный фронт представляет собой конечное число точек, расположенных вдоль такой кривой. Будем считать, что область, ограниченная этой кривой, вся целиком является источником возмущений, т. е. является очагом цунами. Поэтому волна будет распространяться в направлении внешней нормали к этой кривой. Перед началом численного расчета требуется выбрать шаг по времени, определяющий разницу во времени между каждым последующим положением волнового фронта. Очевидно, что чем меньше этот шаг, тем точнее результат численного моделирования, но при этом увеличивается время расчета.

Итак, имеется конечное множество точек P_i с координатами (x_i, y_i) $i = 1, \dots, N$, расположенных вдоль замкнутой кривой начального волнового фронта. При этом точка с индексом N является соседней по отношению к точке с индексом, равным 1. Величину шага по времени Δt рекомендуется выбирать обратно пропорционально максимуму градиента скорости распространения волн в рассматриваемой области. Требуется определить положение, которое займут точки исходного волнового фронта через время Δt . Сначала надо найти направление перемещения каждой из N расчетных точек. Как уже замечено, они будут перемещаться в ортогональном к линии текущего волнового фронта направлении. Так как вместо непрерывного гладкого фронта мы имеем ломаную, проходящую через расчетные точки P_i , то искомое ортогональное направление в точке с индексом i можно строить разными способами. В программной реализации этого метода это направление строится как внешняя нормаль в точке P_i к окружности, проведенной через три точки P_{i-1} , P_i и P_{i+1} (рис. 4).

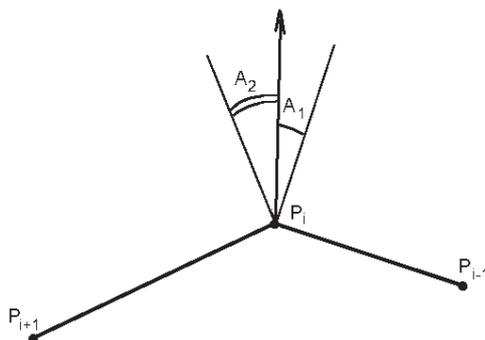


Рис. 4. Схема нахождения направления внешней нормали к окружности, проходящей через точки P_{i-1} , P_i и P_{i+1} . Стрелкой показано искомое направление

Fig. 4. The scheme of searching the direction of the external normal to the circle passing through the points P_{i-1} , P_i and P_{i+1} . The arrow shows the direction that is looking for

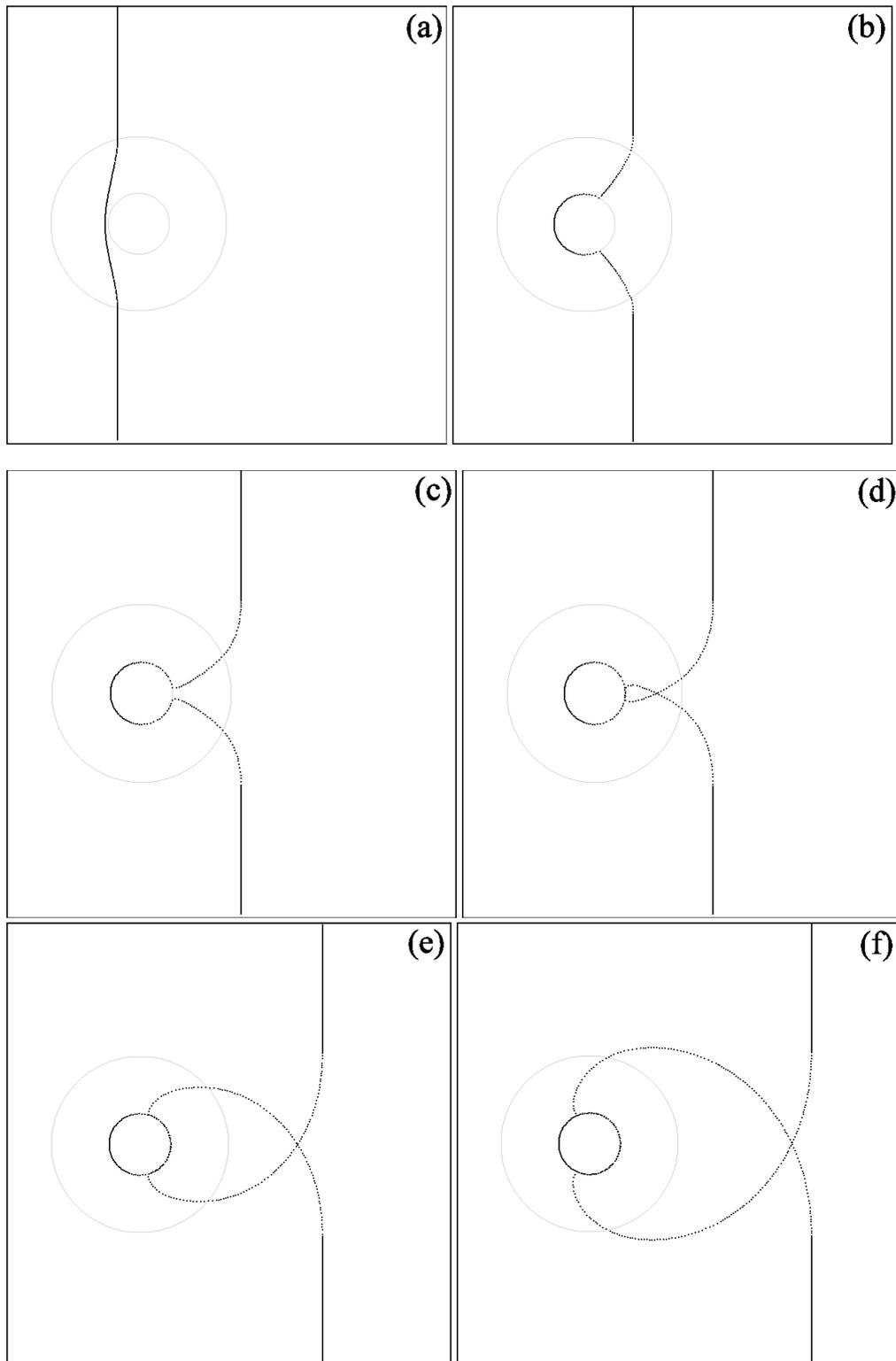


Рис. 5. Последовательное положение изначально прямолинейного волнового фронта при его движении около круглого острова, окруженного наклонным шельфом
Fig. 5. The sequential position of the initially straight wave front as it moves near the round island surrounded by an inclined shelf

Из геометрических построений следует, что отношение синусов углов A_1 и A_2 равно отношению длин отрезков (P_{i-1}, P_i) и (P_i, P_{i+1}) . Таким образом, очередное положение расчетной точки с индексом i строится перемещением точки P_i вдоль найденного направления на расстояние $c(x_i, y_i)\Delta t$, где скорость $c(x_i, y_i)$ определяется по формуле Лагранжа (2). В случае замкнутого начального фронта для точек с индексами 1 и N одной из соседних точек, используемых для построения окружности, будут точки P_N и P_1 соответственно. Переместив таким образом все точки исходного волнового фронта, мы получим положение фронта волны в момент времени Δt . Далее, повторяя эту процедуру столько, сколько требуется для достижения фронтом волны нужной точки или границы расчетной области, можно построить кинематическую картину распространения волны цунами в рассматриваемой области от заданного начального очага, граница которого и является начальным положением волнового фронта. Если рассчитываемый волновой фронт является незамкнутым, то направление перемещения крайних расчетных точек определяется либо как нормаль к отрезку, соединяющему эту точку с ближайшей соседней, либо как нормаль к окружности, проходящей через три крайние расчетные точки фронта. Здесь надо заметить, что по определению волнового луча [7] расчетные точки фронта будут перемещаться вдоль волновых лучей, что позволяет проводить грубую оценку амплитуды волны [8].

На рис. 5 показаны последовательные положения изначально прямолинейного волнового фронта в окрестности конического острова. Окружность меньшего радиуса представляет береговую линию, а окружность большего радиуса – границу, где заканчивается склон дна и глубина становится постоянной.

На рис. 5 видно, что часть волнового фронта захватывается донным склоном и начинает вращаться вокруг острова. Здесь следует иметь в виду, что используемый метод не моделирует отражение волнового фронта от береговой линии острова. Амплитуда волны при этом довольно быстро ослабевает из-за существенного растяжения линии фронта вблизи береговой линии вследствие дифракции. Полученная численным методом кинематическая картина показывает, что после прохождения острова лидирующей волной появляется вторая волна с существенно меньшей амплитудой. А в обратную сторону (откуда пришла волна) вслед за отраженной от острова волной будет распространяться как минимум одна слабая волна, порожденная рефракцией и дифракцией исходной волны над донным склоном вокруг острова.

Этим же численным методом были построены траектории волновых лучей при рефракции волны над донным склоном вокруг острова, схематично изображенного на рис. 1. Результаты приведены на рис. 6. Здесь серые окружности означают то же самое, что и на рис. 3, взятом из работы [4]. Нетрудно увидеть почти полную идентичность картин рефракции волновых лучей, представленных на этих рисунках. Это лишний раз доказывает работоспособность метода, кратко описанного в этом разделе, для решения кинематических задач такого рода.

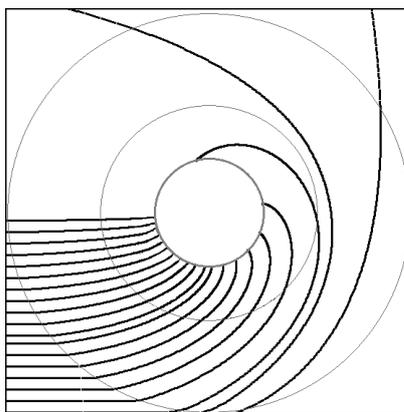


Рис. 6. Траектории волновых лучей вблизи конического острова, построенные методом пошагового ортогонального продвижения волнового фронта [8]
 Fig. 6. The wave rays near a conical island, constructed by the method of step-by-step orthogonal advance of the wave front [8]

3. Численное моделирование динамики волны около круглого острова

Для количественной оценки величины захваченной волновой энергии и параметров цунами около острова был проведен вычислительный эксперимент по моделированию поведения длинной волны около конического острова. Волна цунами с изначально прямолинейной линией фронта приближается к круглому острову, схематически представленному на рис. 1. В численном расчете исходная волна, имеющая только положительную фазу, генерировалась с помощью граничных условий на левой границе расчетной области:

$$\eta(1, j) = \frac{\eta_0}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{tp} \right) \right), \quad u(1, j) = \eta(1, j) \sqrt{\frac{g}{D(1, j)}}, \quad v(1, j) = 0, \quad j = 1, \dots, 1600, \quad 0 \leq t \leq tp, \quad (3)$$

где $\eta(i, j)$ – значения смещения водной поверхности в узле (i, j) расчетной сетки; $u(i, j)$, $v(i, j)$ – компоненты скорости водного течения; $D(i, j)$ – глубина; g – ускорение силы тяжести. Здесь высота гребня начальной волны η_0 была взята равной 100 см, а ее период tp равен 300 с. Радиус острова $r_0 = 100$ км, а радиус r_1 шельфа вокруг острова с коническим рельефом дна равен 400 км (см. рис. 1). Вне шельфа (на расстоянии более 400 км от центра острова) глубина становится постоянной и равной 1000 м. Размер расчетной сетки равен 1600×1600 узлов с шагом 1 км в обоих направлениях. Рис. 7–9 показывают водную поверхность через 8000, 12 000 и 14 000 секунд после начала движения волны от левой границы расчетной области. Здесь темная окружность меньшего радиуса обозначает береговую линию острова, а окружность большего радиуса (штриховая линия) – границу склона дна вокруг острова.

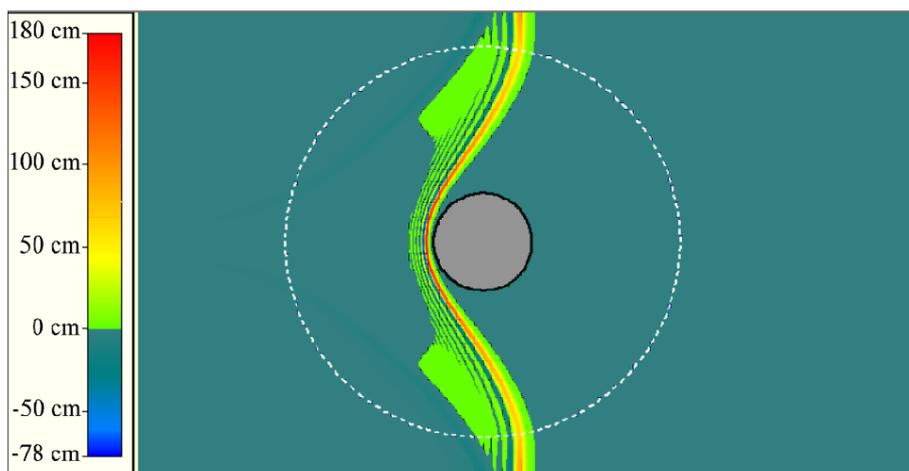


Рис. 7. Водная поверхность около круглого острова, окруженного коническим донным склоном, через 8000 с после начала движения плоской волны

Fig. 7. The water surface near a round island surrounded by a conical bottom slope, 8,000 seconds after the start of the flat wave propagation

Из рис. 7–9 видно, что в процессе распространения волны огибают остров с обеих сторон и сталкиваются позади него. При этом конфигурация волнового фронта качественно совпадает с положениями фронта волны на рис. 5, *a*, *c*, *d*, хотя в той кинематической задаче радиус r_1 был лишь в 3 раза больше, чем радиус острова r_0 . При этом волновая энергия перенаправляется в сторону верхней и нижней границ области, а также к береговой линии острова, от которой волна отражается. В направлении правой границы расчетной области продолжает двигаться только часть волнового фронта, которая не подверглась рефракции над донным склоном вокруг острова.

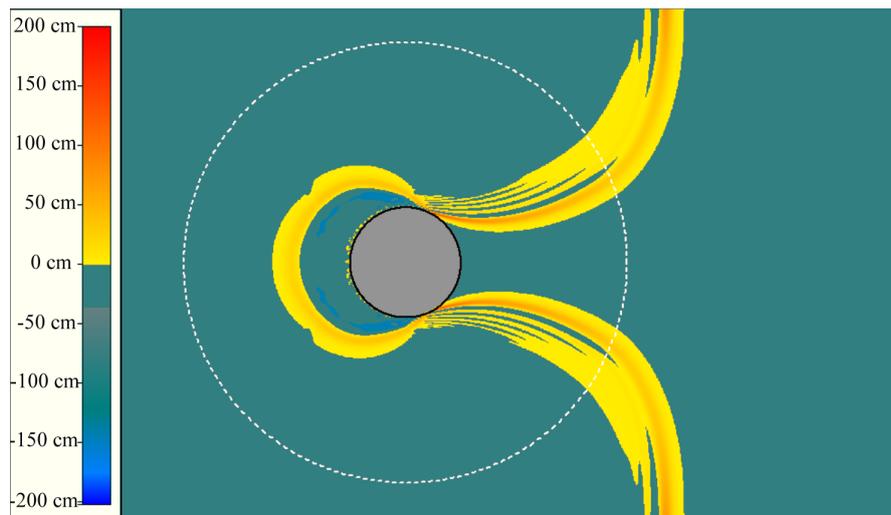


Рис. 8. Распределение смещения водной поверхности в окрестности острова через 12 000 с после начала генерации волны на левой границе

Fig. 8. Distribution of the water surface displacement in the vicinity of the island in 12,000 seconds after the start of wave movement from left boundary

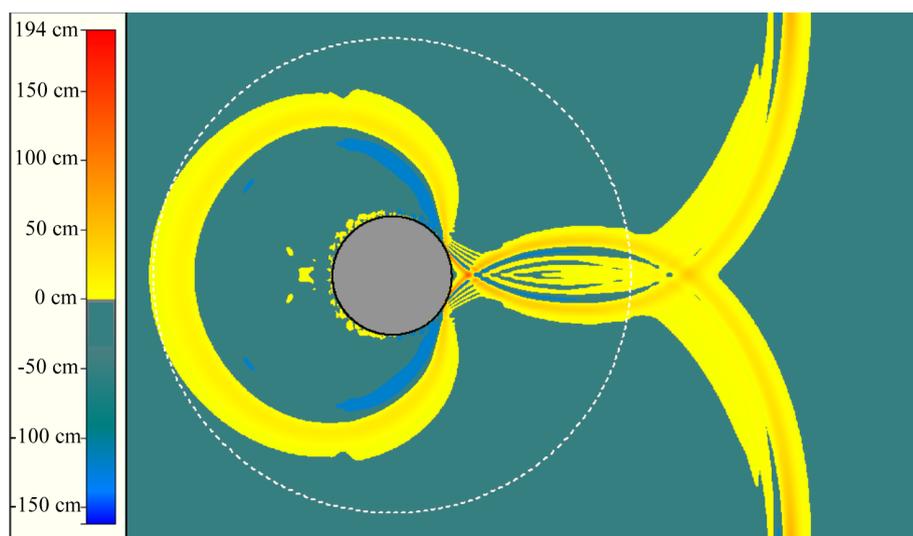


Рис. 9. Водная поверхность вокруг острова через 14 000 с после начала численного моделирования

Fig. 9. The water surface around the island 14,000 seconds after the start of numerical modeling

Для иллюстрации экранирующей способности конического острова (вместе с донным склоном) на рис. 10 приведено распределение максимумов высоты цунами за все время расчета. Серый круг обозначает остров, а белая штриховая окружность с радиусом 400 км ограничивает склон дна вокруг него. Отчетливо видна зона «тени» позади острова с максимальными высотами до 40 см, при этом ее ширина сравнима с диаметром шельфа вокруг острова с конической топографией дна. Вдоль центральной линии этой зоны наблюдается локальное повышение высоты цунами из-за столкновения встречных волн, хорошо наблюдаемых на рис. 7 и 10.

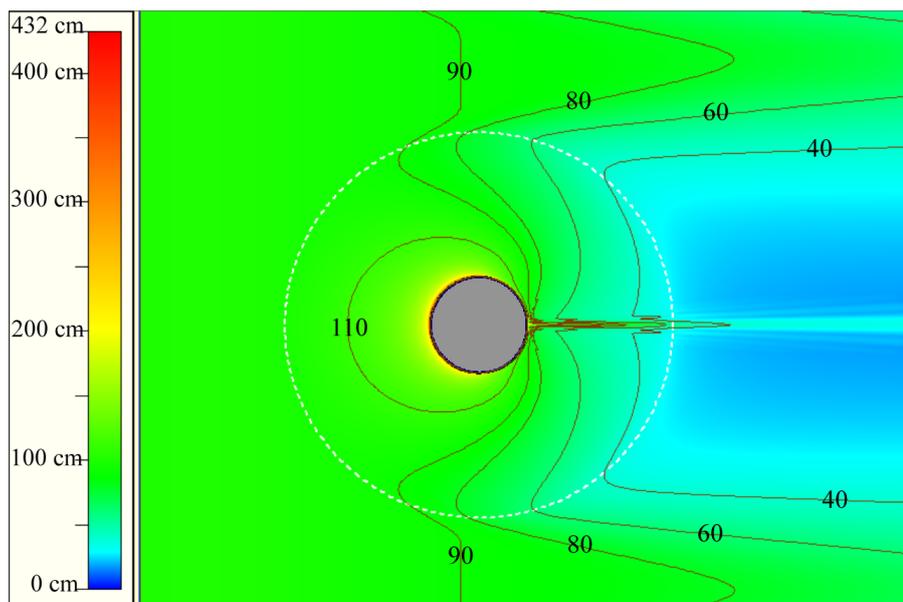


Рис. 10. Распределение максимумов рассчитанной высоты цунами перед островом и позади него при высоте исходной волны в 100 см
Fig. 10. Distribution of calculated tsunami height maxima in front and behind island when the initial wave height is equal to 100 cm

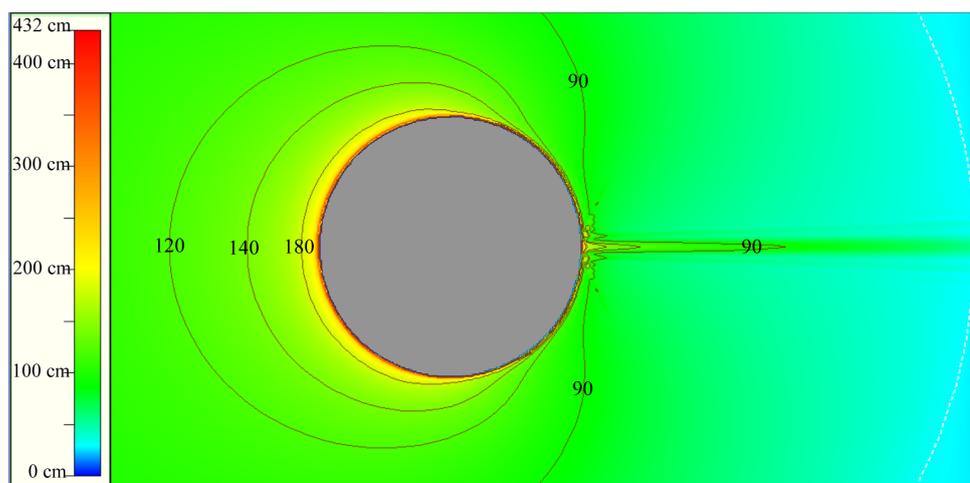


Рис. 11. Детальное распределение максимальных высот волны вблизи круглого острова, окруженного донным склоном, граница которого обозначена белой штриховой линией
Fig. 11. Detailed distribution of maximum wave heights near a circular island surrounded by a bottom slope, the limit of which is indicated by a white dashed line

Более детально распределение максимальных высот цунами у береговой линии острова можно видеть на рис. 11, на котором распределение, представленное на рис. 10, визуализировано с большей детальностью. Можно заметить, что распределение высот вдоль береговой линии качественно соответствует распределению, представленному на рис. 2, *a*.

Для количественного подсчета волновой энергии, захваченной или перенаправленной рассмотренным круглым островам, была использована простейшая формула для подсчета суммы

кинетической и потенциальной энергии волнового движения в какой-либо части S расчетной области:

$$E = \iint_S \left(\frac{\rho u^2}{2} (D + \eta) + \frac{\rho g \eta^2}{2} \right) ds. \quad (4)$$

Здесь ρ обозначает плотность, η – высота смещения водной поверхности в рассматриваемой точке, D – глубина, g – ускорение силы тяжести, u – скорость водного потока, одинаковая от поверхности до дна. Для сравнения вошедшей (E_1) и вышедшей через правую границу (E_2) волновой энергии «входящая» энергия E_1 суммировалась в полосе, шириной 300 шагов сетки около левой границы в момент времени, когда волна полностью вошла в расчетную область. «Выходящая» энергия E_2 суммировалась в полосе, шириной 400 шагов, примыкающей к правой границе расчетной области в момент, когда часть фронта волны, не подверженная рефракции, подошла к правой границе области. Сравнение энергий «входящей» и «выходящей» волн показало, что энергия выходящей (через правую границу) волны по сравнению с входящей уменьшилась примерно на энергию в сегменте исходной волны, имеющем ширину, равную примерно три с половиной диаметра круглого острова.

Заключение

Остров, окруженный шельфом с наклонным рельефом дна, существенно влияет на кинематику волны цунами, распространяющейся в области около этого острова. Из-за рефракции над наклонным шельфом сегмент волнового фронта сильно искривляется, вследствие чего волновая энергия перенаправляется в сторону береговой линии и ортогональным исходному направлению движения волны направлениям. Кроме этого, часть волновой энергии отражается от береговой линии острова. В результате позади острова возникает зона «тени», где высота цунами значительно ниже (более чем в 2 раза), по сравнению с остальной областью. Численное моделирование кинематики и динамики распространения волны с изначально прямолинейной линией фронта показали, что после ее прохождения острова, окруженного наклонным шельфом, потеря волновой энергии равна энергии сегмента волны шириной, равной примерно диаметру шельфовой зоны острова.

Список литературы

1. **Стокер Дж. Дж.** Волны на воде. М.: ИЛ, 1959. 617 с.
2. **Марчук Ан. Г.** Вычисление высоты цунами, распространяющейся над наклонным дном, в лучевом приближении // Сиб. журн. вычисл. математики. СО РАН. Новосибирск, 2015. Т. 18, № 4. С. 377–388.
3. **Иконникова Л. Н., Ярошня Р. А.** Расчет рефракции волн цунами для Тихоокеанского побережья СССР / В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования по проблеме цунами. М.: Наука, 1977. С. 120–127.
4. **Fujima K., Yuliadi D., Goto C., et al.** Characteristics of long waves trapped by conical island // Coastal Engineering in Japan, Vol. 38, No. 2, 1995. P. 111–132. <https://doi.org/10.1080/05785634.1995.11952810>
5. **Jonsson I. G., Skovgaard O., Brink-Kjaer O.** Diffraction and refraction calculations from waves incident on an island // Jour. Marine Res., Vol. 34, 1976, No. 3. P. 469–496.
6. **Lautenbacher C. C.** Gravity waves refraction by islands // Jour. Fluid Mech. 1970. Vol. 41. Part 3. P. 655–672. DOI: 10.1017/S0022112070000824
7. **Романов В. Г.** Обратные задачи для дифференциальных уравнений: Учеб пособие. Новосибирск: НГУ, 1983. 175 с.

8. **Marchuk An. G., Vasiliev G. S.** The fast method for a rough tsunami amplitude estimation // Bull. Novosibirsk Comp. Center. Ser. Math. Model. in Geoph. Novosibirsk, 2014. Iss. 17. P. 21–34.

Reference

1. **Stoker J. J.** Waves on the water. M.: IL, 1959. 617 p. (in Russ.) [Stoker J. J. Water waves. The mathematical theory with applications. New York, Interscience publishers, 1957]
2. **Marchuk An. G.** Calculation of the height of a tsunami propagating over an inclined bottom in the radial approximation // Sib. zhurn. calculation. mathematics / RAS. Sib. otd-nie.–Novosibirsk, 2015. Vol. 18, no. 4. Pp. 377–388.
3. **Marchuk, A. G.** Estimating tsunami wave height over a sloping bottom in the ray approximation. Numer. Analys. Appl. 8, 304–313 (2015). DOI 10.1134/S1995423915040047
4. **Ikonnikova L. N., Yaroshenya R. A.** Rascheot refraktsii voln tsunami dlya Tikhoookeanskogo poberezhya SSSR. In: Teoreticheskie I eksperimentalnye issledovaniya po probleme tsunami. M., Nauka, 1977, p. 120–127. (in Russ)
5. **Fujima K., Yuliadi D., Goto C., et al.** Characteristics of long waves trapped by conical island // Coastal Engineering in Japan. 1995. Vol. 38. No. 2. P. 111–132. DOI: 10.1080/05785634.1995.11952810
6. **Jonsson I. G., Skovgaard O., Brink-Kjaer O.** Diffraction and refraction calculations from waves incident on an island // Jour. Marine Res. 1976. Vol. 34, № 3. P. 469–496.
7. **Lautenbacher C. C.** Gravity waves refraction by islands // Jour. Fluid Mech. 1970 Vol. 41, Part 3. P. 655–672. DOI: 10.1017/S0022112070000824
8. **Romanov V. G.** Inverse problems for differential equations: Textbook. Novosibirsk: NSU, 1983, 175 p.
9. **Romanov V. G.** Obratnye zadachi dlya differentsialnykh uravnenij. Uchebnoe posobie. Novosibirsk: NSU, 1983, 175 p (in Russ).
10. **Marchuk An. G., Vasiliev G. S.** The fast method for a rough tsunami amplitude estimation // Bull. Novosibirsk Comp. Center. Ser. Math. Model. in Geoph. Novosibirsk, 2014, iss. 17, p. 21–34.

Информация об авторе

Андрей Гурьевич Марчук, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
SPIN 4054-6578
WoS Researcher ID S-9502-2017
Scopus Author ID 57023485400

Information about the author

Andrey Guryevich Marchuk, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
SPIN 4054-6578
WoS Researcher IDS-9502-2017
Scopus Author ID 57023485400

*Статья поступила в редакцию 21.07.2023;
одобрена после рецензирования 09.08.2023; принята к публикации 09.08.2023*

*The article was submitted 21.07.2023;
approved after reviewing 09.08.2023; accepted for publication 09.08.2023*