

УДК 551.463.5

© Р. Г. Гардашов^{1*}, Е. Р. Гардашов², Т. Г. Гардашова³

¹Институт географии Национальной АН Азербайджана, AZ1143, ул. Г. Джавида, д. 31, г. Баку, Азербайджан

²Страсбургский университет, г. Страсбург, Франция (Université de Strasbourg, 4 Rue Blaise Pascal, 67081, Strasbourg, France)

³Азербайджанский архитектурно-строительный университет, AZ-1073, ул. А. Султанова, д. 11, г. Баку, Азербайджан

*e-mail: rauf_gardahov@yahoo.co.uk

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ, ИСКАЖЕННЫХ НЕРОВНОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Статья поступила в редакцию 03.02.2020, после доработки 29.03.2020

Предлагается метод аппроксимации мгновенной формы взволнованной поверхности как суперпозиции гармонических волн с неизвестными амплитудами, волновыми векторами и фазами. Эти неизвестные параметры определяются с использованием характеристик бликов, таких как их координаты и площади. Показывается, что при определённом соотношении числа гармоник и бликов эти неизвестные могут быть определены как решение выведенной системы нелинейных уравнений. Далее решена задача восстановления мгновенного изображения подводного объекта, искажённого поверхностным волнением. Разработан алгоритм восстановления искажённого волнением исходного изображения, основанный на аппроксимации мгновенной формы взволнованной поверхности. Проведён натурный эксперимент, результаты которого показали работоспособность метода. Отмечаются причины, затрудняющие достаточно хорошее восстановление, и пути устранения этих затруднений. Показывается, что при априори известной форме объекта глубину его нахождения можно определить по критерию: «как глубина наилучшего восстановления формы объекта». Добавление к разработанному алгоритму модулей, учитывающих рассеяние и поглощение света в атмосфере и в морской воде, позволит применить его для коррекций изображений подводных объектов, снятых с летательных аппаратов.

Ключевые слова: солнечные блики, подводный объект, восстановление изображения, морская поверхность.

© R. H. Gardashov^{1*}, E. R. Gardashov², T. H. Gardashova³

¹Institute of Geography Azerbaijan National Academy of Sciences, AZ 1143, Javid Str., 31, Baku, Azerbaijan

²University of Strasbourg (Université de Strasbourg), 4 Rue Blaise Pascal, 67081, Strasbourg, France

³Azerbaijan University of Architecture and Construction, A. Sultanova 11, AZ-1073, Baku, Azerbaijan

*e-mail: rauf_gardahov@yahoo.co.uk

RECOVERING THE IMAGES OF UNDERWATER OBJECTS DISTORTED BY ROUGH SEA SURFACE

Received 03.02.2020, in final form 29.03.2020

A method for approximation of the instantaneous shape of a waved sea surface as a superposition of harmonic waves with unknown amplitudes, wave vectors, and phases is proposed. These unknown parameters are determined using glint characteristics, such as their coordinates and areas. It is shown that for a certain ratio of the number of harmonics and glint, these unknowns can be defined as a solution to the derived system of nonlinear equations. Next, the task of restoring an instant image of an underwater object distorted by surface waves is solved. An algorithm has been developed for reconstructing the original image distorted by the waves, based on the approximation of the instantaneous shape of the waved surface. A full-scale experiment was conducted, the results of which showed the efficiency of the method. The reasons that impede a fairly good recovery, and ways to eliminate these difficulties are noted. It is shown that with an a priori known shape of the object, the depth of its location can be determined by the criterion: “as the depth of the best restoration of the shape of the object”. Adding modules to the developed algorithm that take into account the scattering and absorption of light in the atmosphere and in sea water will make it possible to use it for image corrections of underwater objects taken from aircraft.

Key words: Sun glints, underwater object, image recovering, sea surface.

Ссылка для цитирования: Гардашов Р.Г., Гардашов Е.Р., Гардашова Т.Г. Восстановление изображений подводных объектов, искаженных неровной морской поверхностью // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 2. С. 76–81. doi: 10.7868/S2073667320020094

For citation: Gardashov R.H., Gardashov E.R., Gardashova T.H. Recovering the images of underwater objects distorted by rough sea surface. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 2, 76–81. doi: 10.7868/S2073667320020094

1. Введение

Восстановление мгновенного рельефа взволнованной водной поверхности по местоположению и характерным размерам бликов важно для развития методов наблюдения морского дна и подводных объектов с воздушных носителей — методов, позволяющих устранить «рефракционные» искажения изображения, которые возникают в результате преломления света на случайно — неровной границе раздела вода-воздух [1–5].

В пионерской работе И.М. Левина с соавторами [1], измерением передаточной функции мутных сред и волнистой поверхности показана возможность коррекции искажённого изображения. Перспективность использования информации о положении бликовых точек для устранения рефракционных искажений подтверждается результатами численного моделирования процедуры коррекции одномерного изображения подводного объекта, приведёнными в [5]. В работе [6] разработан метод определения мгновенной формы морской поверхности, принципиальное отличие которой заключается в следующем:

1) в число информативных параметров солнечной дорожки наряду с координатами бликов включены их размеры;

2) предлагается способ восстановления двумерного рельефа водной поверхности, который может быть приспособлен для коррекции реальных изображений морского дна и подводных объектов.

В настоящей работе на основе разработанного ранее метода [6] решается задача восстановления мгновенного изображения подводного объекта, искажённого поверхностным волнением. Эта задача решается в двух этапах. В первом этапе находится аппроксимация мгновенной формы морской поверхности, с использованием координат бликов и их размер. Во втором этапе устраняется «рефракционные» искажения и восстанавливается «истинное изображение», т. е. изображение, которое формировалось бы при гладкой поверхности. Работоспособность разработанного алгоритма решения задачи тестируется экспериментально.

2. Аппроксимация мгновенного состояния морской поверхности

В каждый момент времени морскую поверхность $z = \zeta(x, y)$ можно представить как суперпозицию гармонических волн с амплитудами c_i , волновыми векторами $\vec{k}_i = (k_{ix}, k_{iy})$ и фазами φ_i :

$$\zeta(x, y) = \sum_{i=1}^n c_i \cos(k_{ix}x + k_{iy}y + \varphi_i). \quad (1)$$

Как видно из (1), для определения мгновенной формы поверхности $\zeta(x, y)$ необходимо знать $c_i, k_{ix}, k_{iy}, \varphi_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), всего $4n$ неизвестных. Для нахождения этих неизвестных можно получить $4n$ нелинейных уравнений, которые определяются параметрами, выводимыми из изображения бликов Солнца (или другого источника света малого углового размера). Этими (известными) параметрами являются: координаты зеркальных точек $(x_j, y_j), j = 1, 2, \dots, m$; наклоны $z_x(x_j, y_j), z_y(x_j, y_j)$; и величины (обратные модулям гауссовых кривизны

$\omega_j = \frac{\zeta_{xx}(x_j, y_j)\zeta_{yy}(x_j, y_j) - \zeta_{xy}^2(x_j, y_j)}{(1 + \zeta_x^2 + \zeta_y^2)^2}$ и пропорциональные размерам бликов) в зеркальных точках:

$$\rho_j = \rho(x_j, y_j) = \frac{1}{|\omega_j|}. \quad (2)$$

Если изображение поверхности получено с достаточно большого расстояния, то зеркальные точки (x_j, y_j) удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{cases} \zeta_x(x, y) = \gamma_x = \text{const} \\ \zeta_y(x, y) = \gamma_y = \text{const} \end{cases}. \quad (3)$$

В частном случае, когда зондирование поверхности производится в вертикальном направлении, то $\gamma_x = 0$ и $\gamma_y = 0$. Для простоты дальнейших выкладок обозначим:

$$\alpha_i = k_{ix}x + k_{iy}y + \varphi_i. \quad (4)$$

Тогда из (1) имеем:

$$\begin{cases} \zeta_x(x, y) = -\sum_{i=1}^n c_i k_{ix} \sin \alpha_i \\ \zeta_y(x, y) = -\sum_{i=1}^n c_i k_{iy} \sin \alpha_i \\ \zeta_{xx}(x, y) = -\sum_{i=1}^n c_i k_{ix}^2 \cos \alpha_i \\ \zeta_{yy}(x, y) = -\sum_{i=1}^n c_i k_{iy}^2 \cos \alpha_i \\ \zeta_{xy}(x, y) = -\sum_{i=1}^n c_i k_{ix} k_{iy} \cos \alpha_i. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, учитывая, что в зеркальных точках имеет место (2) и (3) получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n c_i k_{ix} \sin \alpha_{ij} = -\gamma_x, & j = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^n c_i k_{iy} \sin \alpha_{ij} = -\gamma_y, & j = 1, 2, \dots, m \\ \left| \sum_{i=1}^n c_i k_{ix}^2 \cos \alpha_{ij} \cdot \sum_{i=1}^n c_i k_{iy}^2 \cos \alpha_{ij} - \left(\sum_{i=1}^n c_i k_{ix} k_{iy} \cos \alpha_{ij} \right)^2 \right| = \frac{(1 + \gamma_x^2 + \gamma_y^2)^2}{\rho_j}, \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\alpha_{ij} = k_{ix} x_j + k_{iy} y_j + \varphi_i \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m). \quad (7)$$

Число уравнений в системе (6) равно $3m$; а число неизвестных $4n$. При условии $3m = 4n$ число неизвестных равно числу уравнений и из решения систему (6) находятся неизвестные величины $c_i, k_{ix}, k_{iy}, \varphi_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) и следовательно по (1) определяем мгновенное положение морской поверхности.

3. Взаимосвязь между истинным и искажённым изображениями и алгоритм восстановления

Схема наблюдения подводного объекта (D) показана на рис. 1 (см. вклейку). Приняты следующие допущения: координатная плоскость xOy совпадает с невозмущённой (гладкой) поверхностью моря; ось Oz направлена вертикально вверх и совпадает с оптической осью приёмника (фотоаппарата), которая расположена на высоте $z = H$; наблюдаемый объект (D) находится на горизонтальной плоскости на глубине $z = -h$; объект (D) является Ламбертовой поверхностью, т. е. её яркость зависит только от точки $(x, y, -h)$; луч света в воде распространяется без рассеяния и поглощения; изображение объекта (D) формируется путём регистрации яркостей $B(-\vec{s})$ лучей идеальным приёмником (т. е. бесконечно большой разрешающей способностью).

При гладкой поверхности в направлении $-\vec{s}$ в точке K фотоприёмника регистрируется яркость точки $\bar{N}(\bar{X}, \bar{Y}, -h)$ объекта вдоль луча $\bar{N}\bar{M}QK$, а при неровной поверхности $z = \zeta(x, y)$ яркость точки $N(X, Y, -h)$ объекта вдоль луча $NMQK$. Как видно, имеется взаимно-однозначное соответствие между точками $K(\xi, \eta, H + f)$, $\bar{M}(\bar{x}, \bar{y}, 0)$, $\bar{N}(\bar{X}, \bar{Y}, -h)$ и направлением $\vec{s}$. Соответствие между точкой $\bar{M}(\bar{x}, \bar{y}, 0)$ и направлением $\vec{s}$ выражается формулой:

$$\vec{s} = \frac{\bar{x} \cdot \vec{i} + \bar{y} \cdot \vec{j} - H \cdot \vec{k}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + H^2}}, \quad (8)$$

где, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — орты по осям.

Для неровной поверхности точка $M(x, y, \zeta(x, y))$ находится как точка первого пересечения луча вдоль направлении $-\vec{s}$ с поверхностью $z = \zeta(x, y)$. Единичный нормаль $\vec{n}$ к поверхности в точке M определяется по формуле

$$\vec{n} = \frac{-\zeta_x(x, y) \cdot \vec{i} - \zeta_y(x, y) \cdot \vec{j} + \vec{k}}{\sqrt{1 + \zeta_x^2(x, y) + \zeta_y^2(x, y)}}. \quad (9)$$

При этом единичный вектор $\vec{s}_1$ преломлённого луча находится как

$$\vec{s}_1 = \frac{1}{m} \vec{s} + \left(\frac{1}{m} \cos \chi - \cos \chi_1 \right) \cdot \vec{n}, \quad (10)$$

где, χ и χ_1 — локальные углы падения и преломления в точке M , m — показатель преломления воды ($m \approx 1.34$). Формулу (10) можно представить в виде, удобного для расчётов:

$$\vec{s}_1 = \frac{1}{m} \vec{s} + \left[\frac{\vec{s} \cdot \vec{n}}{m} \left(\sqrt{\frac{m^2 - 1}{(\vec{s} \cdot \vec{n})^2} + 1} - 1 \right) \right] \cdot \vec{n}. \quad (11)$$

При этом координаты (X, Y) точки N , проецируемой в направлении $-\vec{s}$, определяются как:

$$\begin{cases} X = x - \frac{s_{1x}}{s_{1z}}(h + \zeta(x, y)) \\ Y = y - \frac{s_{1y}}{s_{1z}}(h + \zeta(x, y)) \end{cases}. \quad (12)$$

Следовательно, формулы (8)—(12) определяют переход от $-\vec{s}$ к точке N по цепочке:

$$-\vec{s} \leftrightarrow (\bar{x}, \bar{y}) \rightarrow (x, y) \rightarrow (X, Y). \quad (13)$$

Если в этой процедуре предположить $\zeta(x, y) \equiv 0$, т. е., считать поверхность гладкой, то формулы (8)—(12) определяют переход от $-\vec{s}$ к точке $\bar{N}(\bar{X}, \bar{Y}, -h)$. Далее, находим направление $-\vec{s}_0$ по которой проецируется точка $N(X, Y, -h)$ для гладкой поверхности. При этом наблюдаемая яркость объекта $B(-\vec{s})$ в направлении $-\vec{s}$ соответствует яркости $\bar{B}(-\vec{s}_0)$ в направлении $-\vec{s}_0$ истинного изображения. Таким образом, изложенный алгоритм восстанавливает истинное изображение объекта. Однако следует отметить следующие важные моменты, касающихся точности восстановления по этому алгоритму.

1. В общем, обратное к (13) преобразование

$$(X, Y) \rightarrow -\vec{s} \quad (14)$$

не является однозначным из-за фокусирующей действия неровной поверхности. При этом многолучевой приём приводит к потере информации и для улучшения восстановления изображения можно применить, например, критерий выбора яркости луча, предлагаемый в работе [2].

2. Наблюдаемая яркость объекта $B(-\vec{s})$ и истинная яркость $\bar{B}(-\vec{s}_0)$, строго говоря, будут отличаться: (а) благодаря зависимости коэффициента отражения Френеля от локального угла падения χ_1 ; (б) из-за изменения освещённости наблюдаемого объекта, обусловленной неровностью поверхности. Эффект (а) будет мал, если угол визирования не превышает $\approx 40^\circ$. Эффект (б) может быть существенным в некоторых точках, линиях объекта («подводные радуги» — яркие полосы). Отметим, что знание мгновенного состояния поверхности в принципе позволяет учесть эти эффекты.

3. Если яркость подводного объекта резко отличается от яркости фона и имеет ярко выраженную границу, то алгоритм будет достаточно хорошо восстанавливать истинную форму объекта.

4. Алгоритм восстановления будет работать тем точнее, чем прозрачнее вода и высока разрешающая способность регистрирующей оптической системы.

4. Восстановление истинного изображения подводного объекта по натурному эксперименту

Работоспособность изложенного выше метода была проверена экспериментально. На бассейне длиной 8 м, шириной 4 м и глубиной 1 м, которая была заполнена чистой водой, было создано механическим

способом волнение (ветер практически отсутствовал). Шахматная доска размером 30×30 см была размещена на дне бассейна. Небо было чистое, высота Солнца $\approx 70^\circ$. Изображение шахматной доски было снято фотоаппаратом с высоким пространственно-временным разрешением. Фотоаппарат был расположен на высоте $H = 1.70$ и оптическая ось фотоаппарата была направлена вертикально вниз.

Наблюдаемый объект — шахматная доска — находился на глубине $z = -0.9$ м. Мгновенное изображение шахматной доски с указанием нумерации бликов (по возрастанию их x координат) показано на рис. 2 (см. вклейку). В таблице приведены снятые со снимка координаты x_i, y_i , радиусы r_i и вычисленные радиусы кривизны γ_i и площади $\sigma_i = \pi r_i^2$ бликов.

Поверхность $z = \zeta(x, y)$ аппроксимировалась по (1) как сумма 4-х гармоник ($n = 4$). Применяя процедуру нахождения неизвестных $c_i, k_{ix}, k_{iy}, \varphi_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), изложенную выше, получаем аппроксимацию $\zeta(x, y)$:

$$\zeta(x, y) = 0.04\cos(7.872x + 2.865y + 3.142) + 0.04\cos(4.443x + 4.443y + 1.571) + 0.07\cos(12.460x + 1.640y) + 0.10\cos(6.259x - 0.5476y + 3.142). \quad (15)$$

Далее преобразуем искажённое изображение (рис. 2) в бинарное и применяем алгоритм восстановления истинного изображения, приведённый в пункте 2. Восстановленное истинное бинарное изображение приведено на рис. 3 (см. вклейку).

Качественный анализ рис. 3 и рис. 2 показывает некоторые улучшения искажённого изображения, и тем самым указывает на перспективность метода. Имеются несколько причин, затрудняющих достаточно хорошее восстановление. Основные из них следующие:

1. Численное решение системы уравнений (6) даже при $n = 4$ связано трудностями, связанными разработкой оптимальных алгоритмов, требующих разумное время счета. Найденная нами аппроксимация (15) воспроизводит только блики с номерами $j = 2, 3, 4$ и требует время счета около 4 ч. Каждый последующий блик, включённый в расчёт, непомерно увеличивает время счета. По-видимому, с появлением ещё больше быстродействующих компьютеров и разработкой более оптимальных алгоритмов эта трудность со временем может быть устранена.

2. Время счета по алгоритму восстановления сильно зависит от размера изображения. Например, при размере 261×196 оно менее 1 мин, а при 2048×1533 — около 3 ч. Здесь возможна разработка более оптимальных алгоритмов, существенно сокращающих время счета.

3. При регистрации изображения с фотоаппаратом в естественном освещении блики экранируют некоторых частей изображения. Разработкой более сложных оптических систем регистрации изображения подводного объекта можно разрешить эту проблему.

Отметим, что разработанный алгоритм в принципе позволяет найти и глубину расположения подводного объекта, если априори известна его форма. Допустив, что глубина расположения шахматной доски неизвестна (не измерялась), мы применили алгоритм восстановления для разных глубин. На рис. 4 (см. вклейку) приведены результаты для глубин $h = 0.2, 0.5, 1.2, 2.0$. Как видно, наиболее точное восстановление соответствует глубине $h = 0.9$ (рис. 3), что является реальной глубиной нахождения объекта-шахматной доски. Таким образом, при априори известной форме объекта глубину его нахождения можно определить по критерию: «как глубина наилучшего восстановления формы объекта».

5. Заключение

Предложенный здесь алгоритм восстановления истинного изображения подводного объекта есть комбинация двух независимых методов. Первый, это аппроксимация мгновенной формы неровной морской

Таблица

Характеристики бликов

Characteristics of glints

№ блика, j	1	2	3	4	5	6	7
$x_j(\text{м})$	-0.2527	-0.1814	-0.0324	-0.0194	0.0745	0.0875	0.4212
$y_j(\text{м})$	0.0810	0.2430	0.0778	-0.0130	0.3143	0.3078	-0.1458
$r_j(\text{м})$	0.0032	0.0065	0.0065	0.0113	0.0113	0.0113	0.0081
$\rho_j(\text{м}^{-2})$	0.9601	3.840371	3.840371	11.76114	11.76114	11.76114	6.000579
$\sigma_j(\text{м}^2)$	0.000033	0.000132	0.000132	0.000404	0.000404	0.000404	0.000206

поверхности как суперпозиция гармонических волн. При этом неизвестные параметры гармоник находятся с использованием характеристик бликов. Второй, это коррекция изображения, искажённого неровной поверхностью. Применение разработанного алгоритма в реальном эксперименте показывает удовлетворительный результат. Дальнейшая доработка алгоритма на основе усовершенствования обоих методов может существенно улучшить качество восстанавливаемого изображения. Добавление к разработанному алгоритму модулей, учитывающих рассеяние и поглощение света в атмосфере и в морской воде, позволит применить его для коррекций изображений подводных объектов, снятых с летательных аппаратов.

Литература

1. Levin I.M., Savchenko V.V. and Osadchy V.Ju. Correction of an image distorted by a wavy water surface: laboratory experiment // *Applied Optics*. 2008. V. 47, Iss. 35. P. 6650–6655. <https://doi.org/10.1364/AO.47.006650>
2. Долин Л.С., Лучинин А.Г., Турлаев Д.Г. Алгоритм восстановления изображений подводных объектов, искаженных поверхностным волнением // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 40, № 6. С. 842–850.
3. Лучинин А.Г., Долин Л.С., Турлаев Д.Г. О коррекции изображений подводных объектов при неполной информации о поверхностном волнении // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41, № 2. С. 272–277.
4. Мольков А.А., Долин Л.С. Определение характеристик ветрового волнения по подводному изображению морской поверхности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48, № 5. С. 617–630.
5. Турлаев Д.Г. Одномерная задача о восстановлении изображения подводного объекта на основе неполной информации о реализации поверхностного волнения // *Труды VIII Международной конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. Санкт-Петербург, 2015. С. 81–86.
6. Гардашов Р.Г. Определение мгновенной формы неровной морской поверхности по характеристикам бликов // *Труды IX Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. Санкт-Петербург, 2017. С. 11–15.

References

1. Levin I.M., Savchenko V.V. and Osadchy V.Ju. Correction of an image distorted by a wavy water surface: laboratory experiment. *Applied Optics*. 2008, 47, 35, 6650–6655. <https://doi.org/10.1364/AO.47.006650>
2. Dolin L.S., Luchinin A.G., Turlaev D.G. Algorithms of retrieval of underwater object images distorted by surface roughness. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Atmos. Okeana (Izv. Atmos. Ocean. Phys.)*. 2004, 40, 856–864.
3. Luchinin A.G., Dolin L.S., Turlaev D.G. Correction of images of submerged objects on the basis of incomplete information about surface roughness. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2005, 41, 2, 247–252.
4. Molkov A.A., Dolin L.S. Determination of wind roughness characteristics based on an underwater image of the sea surface. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 48, 552–564 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0001433812050088>
5. Turlaev D.G. On restoration of underwater object images distorted by surface waves on the base of incomplete information about water surface (one-dimensional case). *Proceedings VIII International Conference “Current problems in optics of natural waters (ONW’2015)”*. St. Petersburg, 2015, 81–86 (in Russian).
6. Gardashov R.H. Determination of the instant form of a wavy sea surface by the characteristics of the glints. *Proceedings of IX All-Russia Conference «Current problems in optics of natural waters» (ONW’2017)*. St. Petersburg, 2017, 11–15 (in Russian).

К статье *Гардашов Р.Г., Гардашов Е.Р., Гардашова Т.Г.* Восстановление изображений подводных объектов, искаженных неровной морской поверхностью
Gardashov R.H., Gardashov E.R., Gardashova T.H. Recovering the images of underwater objects distorted by rough sea surface

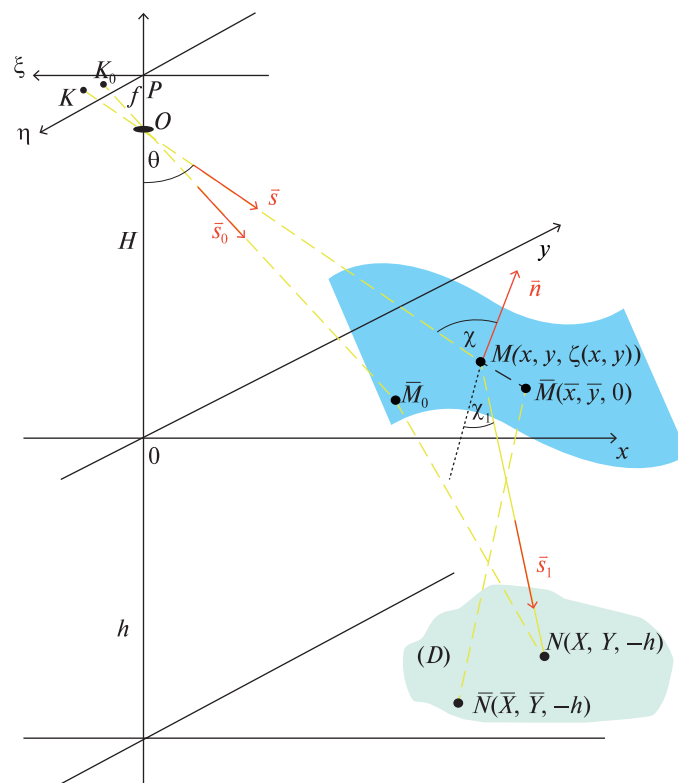


Рис. 1. Геометрия формирования изображения подводного объекта.

Fig. 1. The geometry of the imaging of the underwater object.

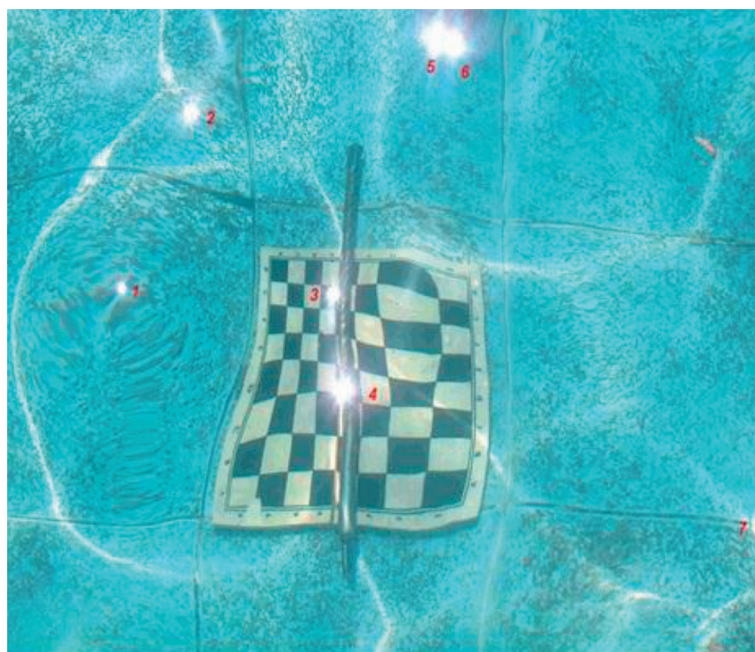


Рис. 2. Мгновенное исходное изображение шахматной доски.

Fig. 2. Instant initial image of a chessboard.

К статье *Гардашов Р.Г., Гардашов Е.Р., Гардашова Т.Г.* Восстановление изображений подводных объектов, искаженных неровной морской поверхностью
Gardashov R.H., Gardashov E.R., Gardashova T.H. Recovering the images of underwater objects distorted by rough sea surface

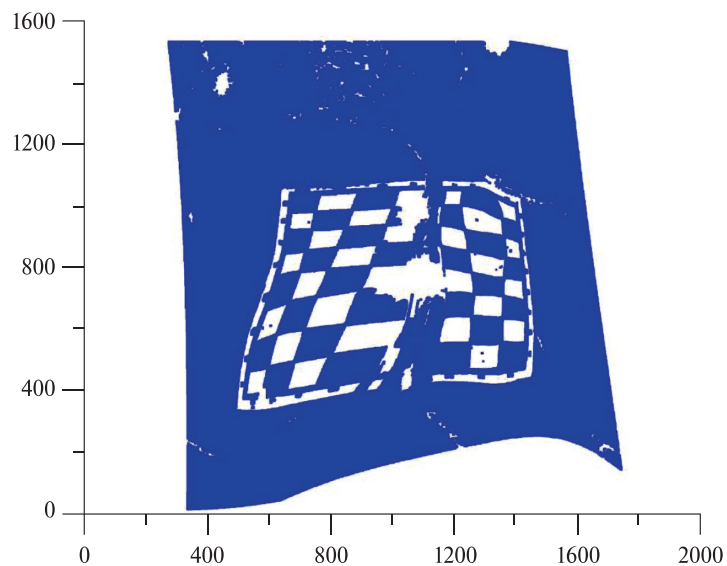


Рис. 3. Восстановленное изображение шахматной доски.

Fig. 3. The restored image of a chessboard.

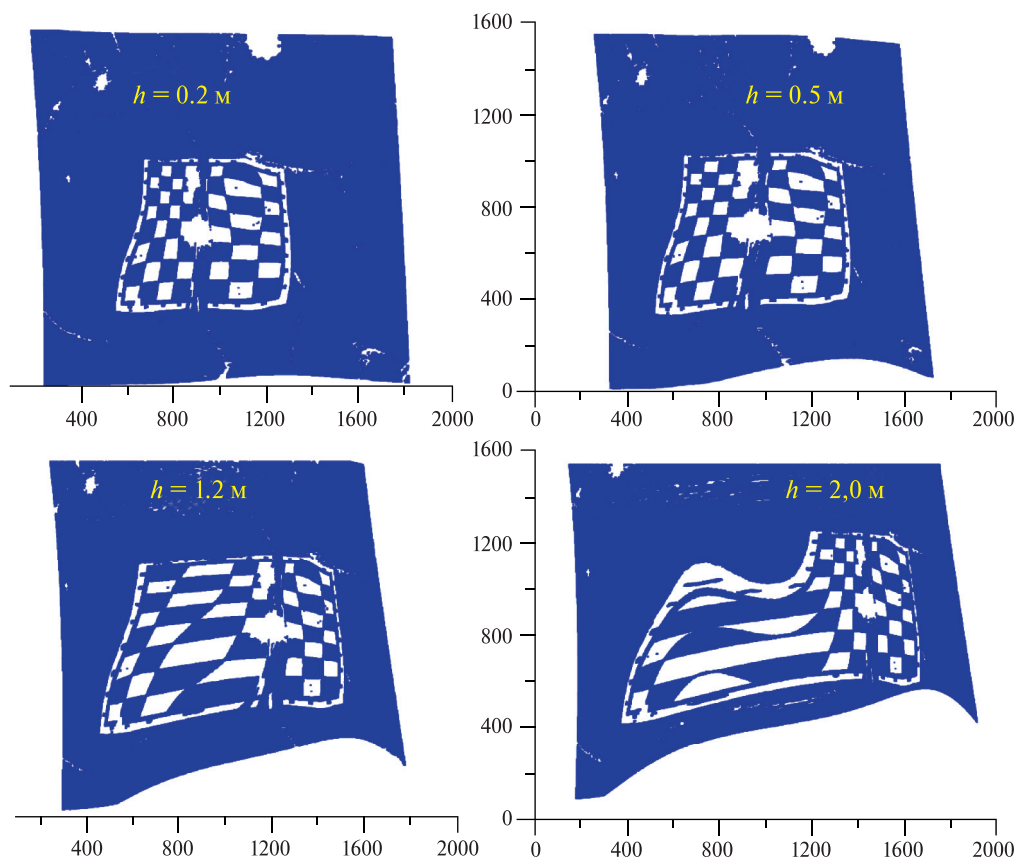


Рис. 4. Восстановленные изображения шахматной доски для разных глубин.

Fig. 4. Restored chessboard images for different depths.