

УДК 535.361

© Д. Г. Турлаев

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород  
dimkat@hotmail.ru

## НАХОЖДЕНИЕ ВЕКТОРА УКЛОНОВ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ЕЁ ИЗОБРАЖЕНИЮ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Статья поступила в редакцию 30.03.2018, после доработки 04.08.2018.

Представлены некоторые результаты апробации алгоритма восстановления вектора уклонов взволнованной водной поверхности по её изображению, полученному в условиях естественного освещения при ясном, безоблачном небе. Для эксперимента использовался надувной бассейн диаметром ~ 2 м. Для ослабления сигнала обратного рассеяния вода насыщалась нигрозином. Изображения фиксировались на цифровую фотокамеру. Волнение создавалось вручную. Кроме изображения взволнованной водной поверхности использовалась фотография «зеркального» участка небосвода, отражённого в воде в отсутствие волнения. Используется приближение, в рамках которого распределение яркости неба, отражённого в спокойной воде, в пределах кадра может считаться линейным. В указанных выше условиях, была найдена компонента вектора уклонов, коллинеарная градиенту яркости небосвода. Для её нахождения использовалось изображение взволнованной водной поверхности и фотография того же участка воды в отсутствие волнения. Вторая компонента определялась непосредственно по найденной, используя тот факт, что обе компоненты вектора уклонов являются производными одной скалярной функции — функции возвышений водной поверхности. Используемый алгоритм позволял с приемлемой точностью найти уклоны волн, бегущих в разных направлениях, кроме тех, что распространялись вблизи нормали к градиенту яркости неба.

**Ключевые слова:** наблюдение подводных объектов с воздуха, гидрооптика, взволнованная водная поверхность, изображение.

D. G. Turlaev

Institute of applied physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

## DETERMINING THE VECTOR OF SLOPES OF THE WATER SURFACE FROM ITS IMAGE UNDER NATURAL ILLUMINATION

Received 30.03.2018, in final form 04.08.2018.

Some results of restoration of a vector of slopes of the wavy water surface on its image received under the conditions of a natural lighting at a clear sky are presented. For the experiment an inflatable pool with a diameter of ~ 2 m was used. For the attenuation of the backscattered signal the water is saturated with nigrosine. Images were recorded on a digital photcamera. The waves were created by hand. Except the image of the wavy water surface the photo of the area of the sky, reflected in calm water participates. Distribution of brightness of the sky reflected in quiet water within a photoshot is considered to be a linear. Under the above conditions, a component of the slope vector, collinear to the brightness gradient of the sky, was found. For its finding it was used the image of the wavy water surface and a photo of the same site of water in the absence of waves. The second component was determined directly from the found one, using the fact that both components of the slope vector are derivatives of one scalar function — the function of the water surface elevations. The algorithm used made it possible to find the slopes of waves running in different directions with acceptable accuracy, except for those that propagated near the normal to the sky brightness gradient.

**Key words:** observation of underwater objects from air, hydro optics, wavy sea surface, imaging.

Ссылка для цитирования: Турлаев Д. Г. Нахождение вектора уклонов взволнованной водной поверхности по ее изображению в условиях естественного освещения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 3. С. 91—96.

For citation: Turlaev D. G. Determining the vector of slopes of the water surface from its image under natural illumination. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 3, 91—96.

doi: 10.7868/S20736673180300115

Как было показано в работах [1—6] искажения изображения морского дна или подводного объекта, возникающие в результате преломления света на взволнованной поверхности моря (рефракционные искажения), могут быть частично или полностью устранены путем соответствующей обработки этого изображения с использованием информации о рельефе водной поверхности. В работах [1, 3] были предложены алгоритмы восстановления правильного изображения объекта по одной реализации его искаженного изображения. В работе [7] был предложен метод нахождения вектора уклонов водной поверхности по одиночной её фотографии с использованием информации о распределении яркости неба на «зеркальном» участке небосвода. В данной работе предпринята попытка реализовать данный метод на практике в условиях естественного освещения.

Информацию об уклонах участка водной поверхности предполагается получать с помощью фотокамеры, регистрирующей отраженный поверхностью свет неба, т. е. извлекать ее из изображения поверхностных волн вне зоны солнечных бликов. Решение этой задачи требует знания распределения яркости на «зеркальном» участке небосвода.

Если Солнце находится вблизи «зеркального» участка неба, то в поле зрения будут попадать солнечные блики. Если вблизи «зеркального» участка неба расположена соляная точка, то связь между уклонами поверхности и ее яркостью будет неоднозначной. Следовательно, при наблюдении в направлении вблизи надир оптимальные условия для восстановления профиля поверхности реализуются при умеренных угловых высотах Солнца и безоблачном «зеркальном» участке небосвода. Кроме того, фотосъемка под углами близкими к надиру при относительно слабом волнении позволяет пользоваться приближением, в рамках которого можно не учитывать зависимость френелевского коэффициента отражения от уклонов поверхности и от направления визирования.

Для того, чтобы отделить изображение водной поверхности от изображения дна, а также от сигнала обратного рассеяния, создаваемого толщей воды, предполагается осуществлять фотосъемку дна и водной поверхности в разных спектральных диапазонах. Однако для того, чтобы продемонстрировать принципиальную возможность определения уклонов по изображению поверхности в рассеянном свете неба достаточно существенно уменьшить вклад других компонент в формирование изображения. Одним из наиболее простых решений в лабораторных условиях является насыщение воды нигрозином — веществом, обладающим сильным поглощением в оптическом диапазоне.

**Эксперимент.** Для проведения эксперимента использовался открытый бассейн диаметром ~ 220 см, заполненный ~ 500 литрами воды, содержащей значительное количество нигрозина (рис. 1). Необходимо было найти условия, при которых, с одной стороны, волнение было бы явно различимым и фиксируемым при помощи фотоаппарата, а с другой — уклоны волн не были бы настолько велики, чтобы отражать посторонние объекты (рис. 2). Типичное изображение взволнованной водной поверхности показано на рис. 3. На всех рисунках вдоль осей отложены условные единицы (пиксели).

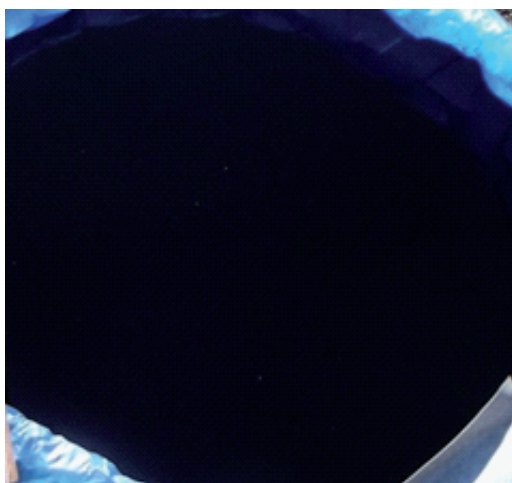


Рис. 1. Вид сверху вниз на надувной бассейн. Чернота воды в бассейне — следствие содержания значительного количества нигрозина.

Fig. 1. Top down view on the inflatable pool. The black colour of the water in the pool — is due to the significant amount of nigrosine.

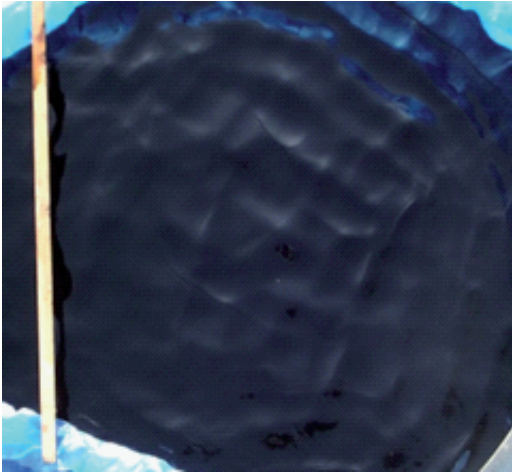


Рис. 2 Волнение хорошо различимо, но при этом содержит отражение посторонних объектов. Палка указывает направление на Солнце.

Fig. 2. Waves are visible clearly, but it contains a reflection of foreign objects. The ruler (bright glare) indicates the direction of the Sun.

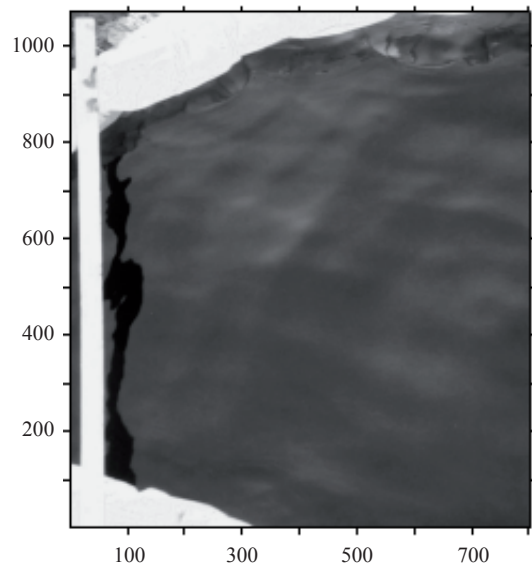


Рис. 3 Типичное изображение взволнованной водной поверхности непосредственно перед операцией восстановления уклонов. Линейный размер изображения ~ 1м\*1м.

Fig. 3. A typical image of the wavy water surface just before the slope recovery operation. The linear size of the image is ~ 1m\*1m.

При фотографировании водной поверхности в указанных выше условиях, помехи вносят значительный вклад в формирование изображения. При наблюдении в направлении около надирa водная поверхность отражает ~ 2 % яркости «зеркального» участка неба. В сочетании с тем, что яркость неба весьма медленно меняется в пределах кадра, контрастность изображения плоской водной поверхности оказывается небольшой (рис. 4 и рис. 5). На рис. 4 — изображение плоской водной поверхности. На рис. 5 — распределение яркости вдоль направления, указанного стрелкой на рис. 4 (тонкая ломаная линия). На рис. 5 хорошо различимы и мелкомасштабные помехи (вызваны, в основном, фотокамерой), и более крупномасштабные (вызваны следами плёнки на поверхности воды, устранить которые в условиях натурального эксперимента не представляется возможным).

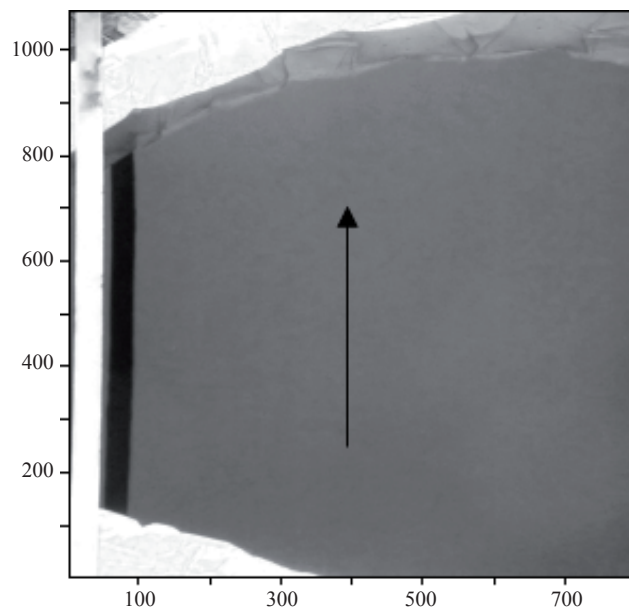


Рис. 4. Изображение плоской водной поверхности. Стрелка указывает направление на Солнце.

Fig. 4. Image of a flat water surface. The arrow indicates the direction of the Sun.

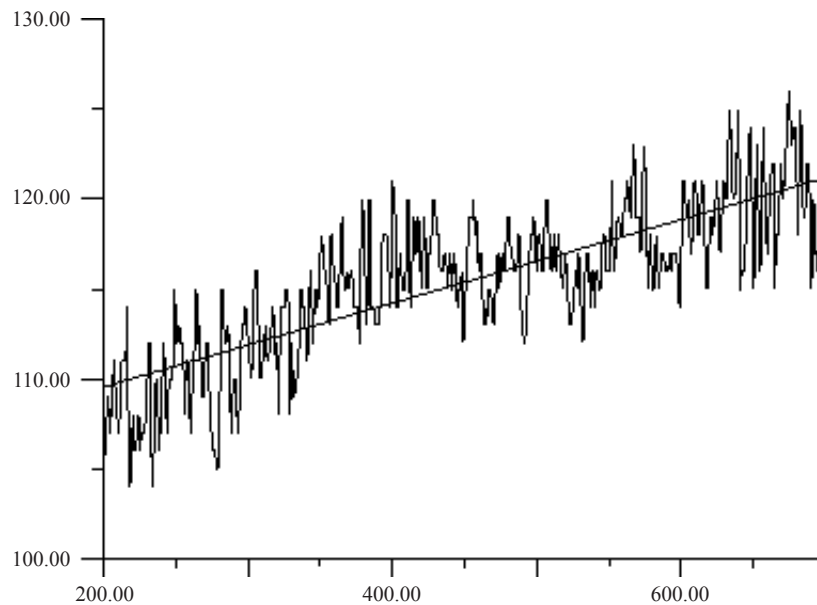


Рис. 5. Распределение яркости вдоль направления, указанного стрелкой на рис. 4 (тонкая ломаная линия). Более жирная прямая линия — результат усреднения методом наименьших квадратов.

Fig. 5. The brightness distribution along the direction indicated by the arrow in fig. 4 (thin broken line). A fatter straight line is the result of least-squares averaging.

В работе [7] описаны 2 подхода к восстановлению вектора уклонов — один использует приближение, в рамках которого распределение яркости неба в пределах кадра может считаться линейным; в другом распределение яркости неба в пределах кадра обладает аксиальной симметрией с осью, направленной на Солнце. Из рис. 5 видно, что изменение отражённой яркости неба в пределах кадра сопоставимо с величиной помех. В данных условиях второй подход не реализует своих преимуществ перед первым. С точки зрения объёма вычислений первый подход значительно проще, далее используем его.

Направим ось  $x$  декартовой системы координат в направлении на Солнце. Обозначим вектор уклонов взволнованной водной поверхности через  $\boldsymbol{\eta}(x, y)$ . Тогда, согласно [7], компонента уклонов  $\eta_x(x, y)$  находится по формуле:

$$\eta_x(x, y) = \frac{I_B^R(x, y) - I_B^R(x, y)}{2H \frac{I_B^R(x, y)}{dx}} \quad (1)$$

Здесь  $I_B^R(x, y)$  — изображение водной поверхности в отсутствие волнения (рис. 4),  $I_B^R(x, y)$  — изображение водной поверхности при наличии волнения (рис. 3).  $H$  — высота фотоаппарата над средним уровнем воды в бассейне. Для нахождения производной в знаменателе выражения (1) проведём линейное сглаживание  $I_B^R(x, y)$  методом наименьших квадратов вдоль каждой цепочки пикселей в направлении  $x$  (в качестве примера см. рис. 5). Вычитание в числителе выполняется без применения сглаживания.

После нахождения компоненты уклонов  $\eta_x(x, y)$  встаёт вопрос о нахождении второй компоненты вектора уклона —  $\eta_y(x, y)$ . С математической точки зрения данная операция — не что иное, как задача нахождения градиента гладкой функции двух переменных по одной из его компонент. Решение основывается на том, что обе компоненты вектора уклонов выражаются через одну скалярную функцию — функцию возвышений поверхности. Соответствующий алгоритм подробно описан в [7]. Укажем лишь, что для его применения необходимо произвести сглаживание  $\eta_x(x, y)$ , найденной по формуле (1). Сглаживание проводится при помощи двумерной сплайн-интерполяции, которую в разной литературе называют либо бета-сплайном, либо B-сплайном, а по сути — упрощённый вариант NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline), используемый в программах компьютерной графики. Принципы построения и свойства данного сплайна описываются, например, в [8]. Следует отметить, что используе-



мый алгоритм не может восстановить уклоны волн, бегущих строго вдоль оси  $y$ , т.е. перпендикулярно градиенту яркости неба.

**Результаты.** Приведём несколько результатов (рис. 6). В колонке  $a$  — фрагменты фотографий взволнованной водной поверхности — исходное изображение для операции восстановления уклонов. В колонке  $b$  — найденное (по изображению в левом столбце), согласно (1) распределение уклонов  $\eta_x(x, y)$  (уклоны в вертикальном направлении). В колонке  $c$  — распределение уклонов  $\eta_y(x, y)$  (уклоны в горизонтальном направлении), полученное методом спектральной фильтрации [7], применённым к изображению в среднем столбце. Также, приведены максимальные и минимальные значения  $\eta_x(x, y)$  и  $\eta_y(x, y)$  в пределах соответствующего кадра. Если волнение не настолько сильное, чтобы фотография водной поверхности содержала отражение посторонних объектов, то значения уклонов укладываются в отрезок  $[-0.3, 0.3]$ . Обратный случай показан на нижней серии изображений.

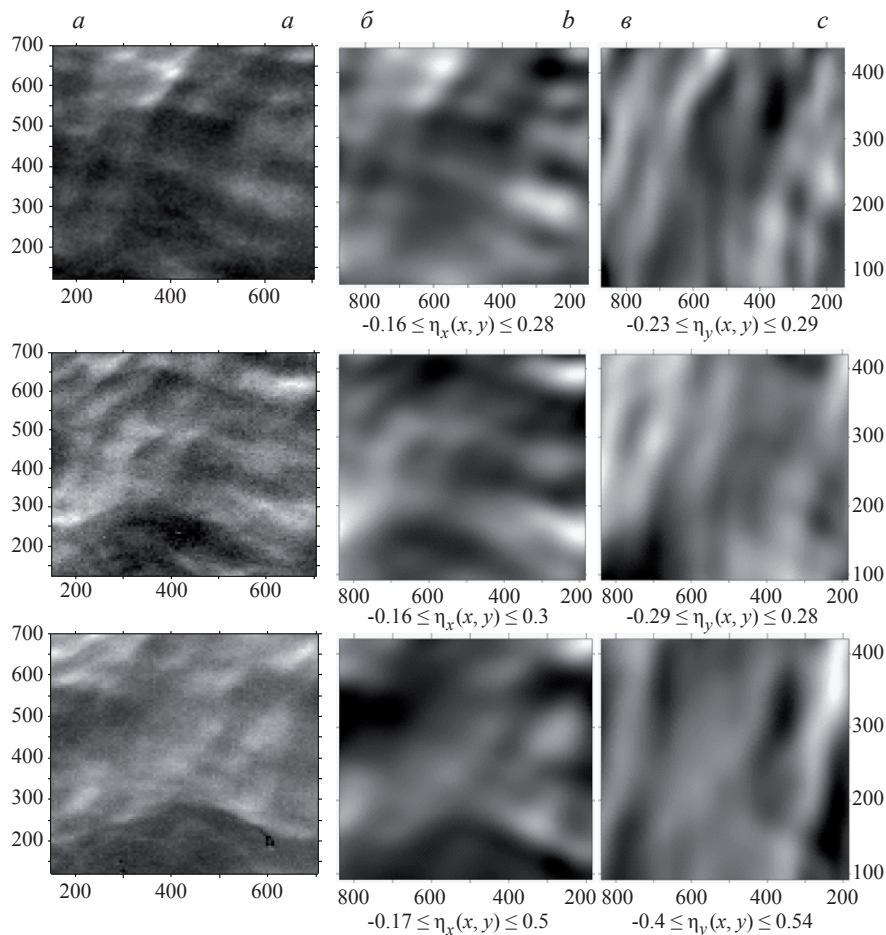


Рис. 6. Результаты.

$a$  — исходное изображения взволнованной водной поверхности  $I_B^R(x, y)$ ;  $b$  — уклоны в направлении градиента яркости неба  $\eta_x(x, y)$ ;  $c$  — уклоны в направлении, перпендикулярном градиенту яркости неба  $\eta_y(x, y)$ .

Fig. 6. Some results.

$a$  — original image of the wavy water surface  $I_B^R(x, y)$ ;  $b$  — the slopes in the direction of the brightness gradient of the sky  $\eta_x(x, y)$ ;  $c$  — the slopes in the direction perpendicular to the brightness gradient of the sky  $\eta_y(x, y)$ .

\*\*\*

Из сравнения рисунков в крайнем левом и крайнем правом столбцах видно, что едва намеченные на фотоснимке волны, бегущие в горизонтальном направлении, становятся хорошо заметны, после соответствующей обработки. В целом, обработка изображений обеспечивает хорошее визуальное соответствие между исходной фотографией и найденными компонентами вектора уклонов.

Для получения количественных оценок можно предложить использовать вектор уклонов, найденный по описанной методике, для коррекции изображений подводных объектов, искажённых поверхностным волнением. Соответствующий эксперимент, проведённый в лабораторных условиях, описан в [4].

*Работа выполнена при финансовой поддержке НИР ИПФ РАН «0035-2014-0022 Разработка радиофизических методов исследования океана. (12.13)».*

### Литература

1. Долин Л. С., Лучинин А. Г., Турлаев Д. Г. Алгоритм восстановления изображений подводных объектов, искажённых поверхностным волнением // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 6. С. 856—864.
2. Лучинин А. Г., Долин Л. С., Турлаев Д. Г. О коррекции изображений подводных объектов при неполной информации о поверхностном волнении // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 2. С. 272—277.
3. Dolin L. S., Luchinin A. G., Titov V. I., Turlaev D. G. Correcting images of underwater objects distorted by sea surface roughness // Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. Proc. SPIE. 2007. V. 6615, 66150K. 12 p.
4. Турлаев Д. Г., Долин Л. С. О наблюдении подводных объектов через взволнованную водную поверхность: новый алгоритм коррекции изображений и лабораторный эксперимент // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 370—376.
5. Кацев И. Л., Зега Э. П., Привач А. С. Характеристики качества изображения при наблюдении объекта через случайную «живую» фазовую поверхность // Весці НАНБ. Сер. Фіз.-мат. Навук. 2000. № 3. С. 84—89.
6. Вебер В. Л. Наблюдение подводных объектов через бликовые участки морской поверхности // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 1. С. 38—52.
7. Турлаев Д. Г. Нахождение вектора уклонов взволнованной водной поверхности по её изображению при квазинадирном наблюдении // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8, № 1. С. 48—58.
8. Шикин Е. В., Плис А. И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. 240 с.