



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-8)

EDN <https://elibrary.ru/rvoppl>

УДК 535.8, 551.466.8, 551.46.08

© В. И. Титов*, А. А. Антонов, В. В. Баханов, Д. Д. Разумов, 2026

Институт прикладной физики Российской академии наук, 603951, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

*e-mail: titov@ipfran.ru

Реконструкция профиля уклонов водной поверхности с помощью сканирующего гиперспектрометра: натурные эксперименты

Статья поступила в редакцию 09.02.2026, после доработки 18.06.2026, принята в печать 25.06.2026

Аннотация

Сканирующий гиперспектрометр — это прибор, который одновременно регистрирует излучение в сотнях узких спектральных каналов. При изучении поверхности воды он обычно применяется для определения концентраций примесей и обнаружения нефтяных пленок. В то же время для измерения характеристик морского волнения оптические методы, как правило, требуют контактной калибровки или работают только в зоне солнечного блика. В настоящей работе показано, что сканирующий гиперспектрометр может быть дополнительно использован для диагностики волнения при рассеянном освещении неба, причем спектральный канал прибора позволяет одновременно выявлять загрязнения поверхности, влияющие на волнение.

Обработка выполнена по данным натурных экспериментов в нескольких акваториях — на р. Ока и в Черном море. Уклоны поверхности восстанавливаются по относительным флуктуациям спектральной яркости, что обеспечивает получение их абсолютных значений без контактных измерений и компенсирует влияние спектральных провалов. Спектральный анализ позволил разделить ветровые волны и слики, а также оценить скорость течения. При анализе гистограмм уклонов на разных расстояниях от наблюдателя выявлен эффект затенения склонов волн. В работе предложены две модели восстановления уклонов, включая новую уточненную модель, учитывающую градиент яркости неба. Эта уточненная модель дает спектр волнения, согласующийся с данными контактного волнографа.

Методика перспективна для комплексного мониторинга акваторий, включая обнаружение пленок поверхностно-активных веществ.

Ключевые слова: сканирующий гиперспектрометр, пространственно-временные изображения водной поверхности, волны, уклоны волн, спектр волнения, натурные исследования

© V. I. Titov*, A. A. Antonov, V. V. Bakhanov, D. D. Razumov, 2026

Institute of Applied Physics RAS, 46, Ulyanova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russia

*titov@ipfran.ru

Reconstruction of the water surface slope profile using a scanning hyperspectrometer: field experiments

Received 09.02.2026, Revised 18.06.2026, Accepted 25.06.2026

Abstract

A scanning hyperspectrometer is an instrument that simultaneously records radiation in hundreds of narrow spectral channels. When studying the water surface, it is commonly used to determine impurity concentrations and detect oil films. At the same time, optical methods for measuring sea wave characteristics usually require contact calibration or operate only in the sun-glitter zone. This study demonstrates that a scanning hyperspectrometer can be additionally used for wave diagnostics under diffuse sky illumination, with its spectral channel enabling simultaneous detection of surface pollutants that affect wave dynamics.

Ссылка для цитирования: Титов В.И., Антонов А.А., Баханов В.В., Разумов Д.Д. Реконструкция профиля уклонов водной поверхности с помощью сканирующего гиперспектрометра: натурные эксперименты // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 2. С. 90–101. EDN RVOPPL. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-8)
For citation: Titov V.I., Antonov A.A., Bakhanov V.V., Razumov D.D. Reconstruction of the water surface slope profile using a scanning hyperspectrometer: field experiments. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2026;19(2);90–101. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19\(2\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-8)

Processing was performed on field data from the Oka River and the Black Sea. Surface slopes are retrieved from relative fluctuations of spectral radiance, which provides absolute slope values without contact measurements and compensates for spectral absorption features. Spectral analysis allowed separation of wind waves and slicks, as well as estimation of current velocity. Analysis of slope histograms at different distances from the observer revealed the wave-slope shadowing effect. Two slope retrieval models are proposed, including a new refined model that accounts for sky brightness gradients. This refined model yields a wave spectrum consistent with contact wave-gauge data.

The technique is promising for integrated monitoring of water areas, including the detection of surfactant films.

Keywords: push-broom hyperspectrometer, spatio-temporal images of the water surface, surface waves, wave slopes, wave spectrum, field measurements

1. Введение

Гиперспектральная съемка широко используется в задачах дистанционного зондирования океана и прибрежных акваторий — от оценки концентрации оптически активных компонентов воды до картирования донных структур и обнаружения загрязнений; примером специализированной аппаратуры такого рода служит космический гиперспектрометр HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean) [1]. Вместе с тем оптические методы традиционно применяются и для измерения характеристик морского волнения: восстановление статистики уклонов по изображениям солнечного блика восходит к классической работе Кокса и Манка [2]. Существуют методы дистанционного определения спектров поверхностного волнения по видеосъемке в естественном свете [3, 4], однако для перехода от относительных значений яркости к абсолютным характеристикам волнения в них требуется привлечение данных контактных измерений. В отличие от этих подходов, предлагаемый в настоящей работе метод позволяет получать абсолютные значения уклонов поверхности непосредственно из оптических данных, без дополнительной калибровки.

Гиперспектрометры применяются для исследования характеристик пленок нефти на водной поверхности, в частности, для определения толщины слоя нефти в нефтяных разливах на морской поверхности [5, 6]. Для выявления нефтяных slicks используются радиолокационные методы, когда slicks характеризуются уменьшением радиолокационного контраста из-за «выглаживания» волнения в зоне slicks. Однако аналогичные контрасты могут наблюдаться в зонах уменьшения ветра или апвеллинга, что затрудняет классификацию slicks. В этих случаях привлекают оптические гиперспектральные методы, позволяющие определять тип (неэмульгированная нефть, нефтяная эмульсия) и толщину слоя нефти. Оптические методы зависят от освещения поверхности моря: рассеянный свет неба или солнце. При наблюдении в солнечных бликах изображение разбивают на перекрывающиеся скользящие окна и для каждого подбирают свой алгоритм анализа [6, 7].

Следует отметить мультиспектральные поляризметрические методы реконструкции распределения уклонов морских поверхностных волн [8].

Традиционно гиперспектрометры используются для определения концентрации естественных примесей в водах водоемов путем выполнения натурных измерений коэффициента яркости водной толщи в определенном спектральном интервале [9].

В данной работе используется так называемый сканирующий (push-broom) гиперспектрометр, позволяющий получать информацию о спектре излучения и о пространственном распределении яркости поверхности моря. Таким образом, появляется возможность совмещения различных принципов дистанционного зондирования водной поверхности в одной и той же области водной поверхности в один и тот же момент времени: гиперспектральные методы и дистанционная регистрация статистических характеристик волнения. Такое совмещение повышает вероятность диагностики аномалий на водной поверхности.

Диагностика волнения выполняется вне зоны бликов, при рассеянном освещении неба, а спектральные возможности гиперспектрометра используются для разделения волновых и неволновых образований (slicks, пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) и для компенсации спектральных особенностей яркости (полос Фраунгофера и полосы поглощения воды).

Цель работы — показать возможность диагностики волнения водной поверхности с помощью сканирующего гиперспектрометра и сопоставить статистические характеристики волнения, полученные в различных спектральных диапазонах и в различных акваториях.

2. Оборудование и условия натурных экспериментов

Сканирующий гиперспектрометр имеет «ножевую» диаграмму направленности (рис. 1) и регистрирует изображения в координатах угол луча света в пределах диаграммы направленности — длина волны света (рис. 2). В таблице даны основные технические характеристики этого прибора.

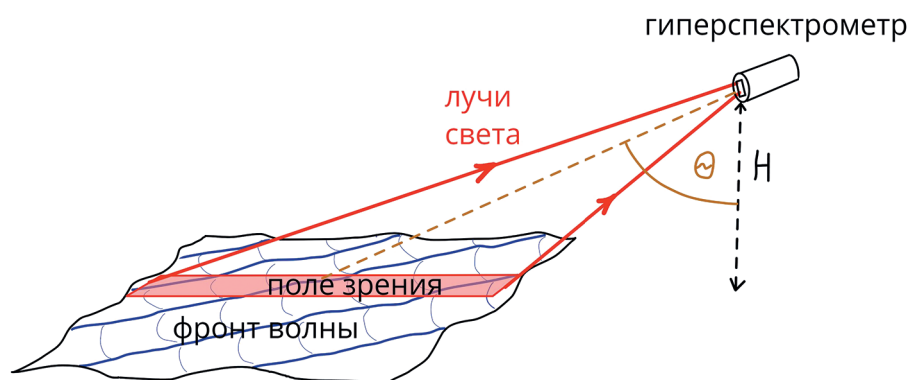


Рис. 1. Схема наблюдения водной поверхности

Fig. 1. Water surface observation scheme

Таблица

Table

Основные технические характеристики использованного гиперспектретра

Technical specifications of the hyperspectrometer

Параметр	Значение
Тип прибора	сканирующий (push-broom) гиперспектретр ATN1010 OPTOSKY PHOTONICS INC
Угловое поле зрения	15°
Частота кадров	до 120 кадр/с
Спектральный диапазон	380–1000 нм
Спектральное разрешение	1,3 нм
Разрешение детектора	1920 спектральных точек × 1200 пространственных точек
Вес	545 г

При наклонном наблюдении водной поверхности с берега, моста или океанографической платформы (рис. 1) поле зрения гиперспектретра на поверхности будет представлять собой узкую линию, ориентированную в направлении наблюдения.

Обработка данных гиперспектретра производилась с помощью пакета программ [15, 16], позволяющих получать спектральные пространственно-временные изображения (ПВИ) морской поверхности в координатах расстояние в поле зрения на поверхности — время в различных участках оптического спектра в диапазоне от 380 нм до 1000 нм с разрешением 1,3 нм (рис. 5). Такой гиперспектретр представляет собой спектральный аналог линейки фотоприемников и может использоваться для диагностики волнения водной поверхности на основе принципов, разработанных для линейки фотоприемников [11–14], в частности, для регистрации рельефа уклонов волн, статистических характеристик волнения, пространственно-временного спектра уклонов волн и спектра возвышений волн.

В настоящей работе использованы данные двух натурных экспериментов:

– р. Ока, г. Нижний Новгород. Регистрация выполнена с моста в августе; направление наблюдения — вдоль течения; зенитный угол визирования $\theta = 70^\circ$, высота прибора над водой $H = 32$ м.

– Черное море, п. Кацивели. Волнение регистрировалось с океанографической платформы; высота установки над уровнем моря $H = 13$ м [14]; зенитный угол визирования $\theta = 45^\circ$. В качестве дополнительного средства контроля использовался струнный волнограф.

3. Спектральные особенности регистрируемого излучения

В спектре излучения неба присутствуют так называемые полосы Фраунгофера — полосы поглощения излучения в спектре солнца. В кадре сканирующего гиперспектретра спектральные полосы Фраунгофера «превращаются» в вертикальные полосы (рис. 2). На рис. 2 приведен пример кадра гиперспектретра при наблюдении ясного неба, значения спектра — в условных единицах. Аналогичные полосы присутствуют в спектрах излучения водоемов.

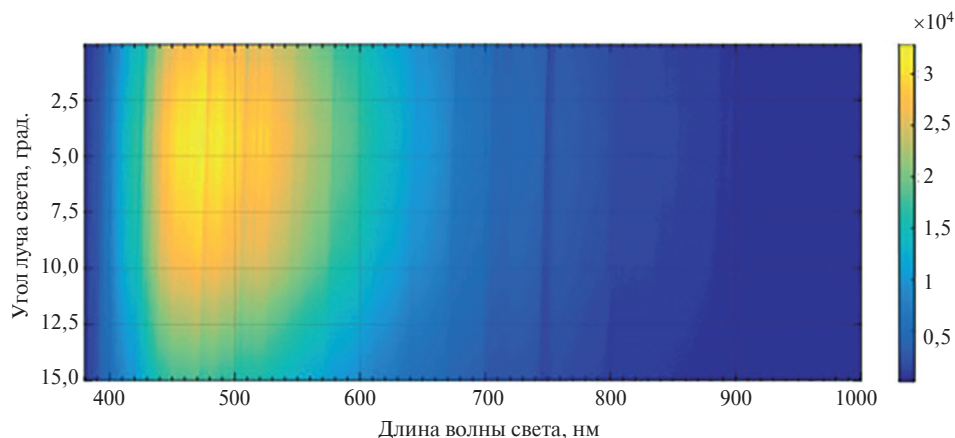


Рис. 2. Кадр гиперспектрометра, ясное небо. По вертикали — угол луча света в пределах поля зрения, по горизонтали — длина волны света, значения спектра — в условных единицах

Fig. 2. Hyper-spectrometer frame (top), clear sky. Vertically, the angle of the light beam within the field of view; horizontally, the wavelength of the light; the spectrum values are represented in conventional colors

На рис. 3 приведены спектры излучения неба при разных метеоусловиях, полученные при наблюдении неба с помощью гиперспектрометра. Частота кадров гиперспектрометра при записи составляла 10 Гц, спектры усреднялись по 10-ти кадрам. На спектрах при определенных значениях длины волны света видны полосы поглощения Фраунгофера и полоса поглощения водяного пара в районе 700 нм.

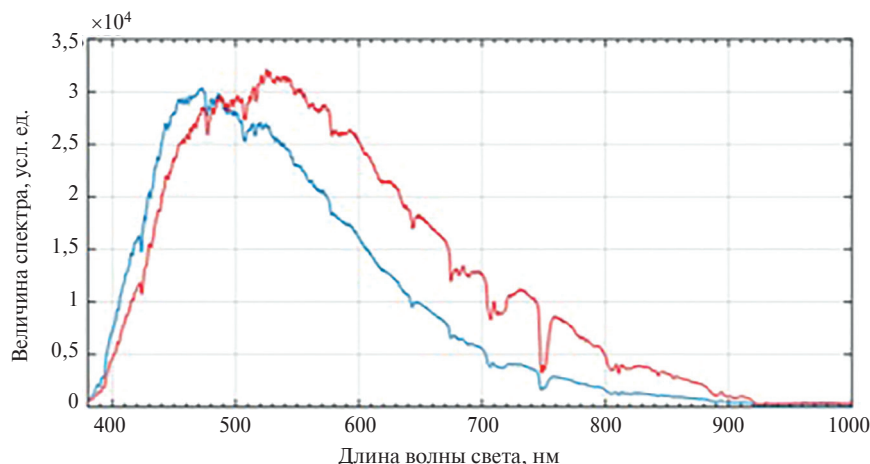


Рис. 3. Пример спектров излучения неба, полученных на Горьковском море при ясном небе (синяя линия) и в Нижнем Новгороде при сплошной облачности (красная линия)

Fig. 3. An example of sky emission spectra obtained at the Gorky Sea under clear skies (blue line) and in Nizhny Novgorod under continuous cloud cover (red line)

Для последующей обработки разработана программа для выделения малоcontrastных вертикальных полос Фраунгофера на кадрах гиперспектрометра (рис. 4). Внизу рис. 4 приведены кодовые обозначения некоторых основных полос Фраунгофера.

Наличие спектральных провалов, обусловленных полосами Фраунгофера и поглощением водяного пара, требует особого подхода к обработке: используемая в работе методика опирается не на абсолютные значения яркости, а на ее относительные флуктуации, что обеспечивает устойчивость алгоритма к указанным спектральным особенностям (подробнее см. п. 4).

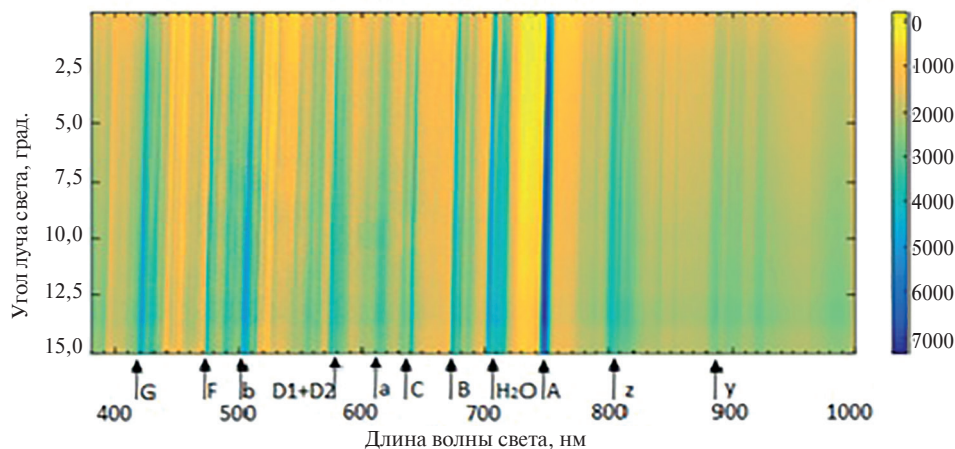


Рис. 4. Полосы Фраунгофера и полоса поглощения воды, выделенные на кадре гиперспектрометра. Сплошная облачность, спектр красного цвета на рис. 3.

Fig. 4. Fraunhofer bands and water absorption band highlighted in the hyperspectrometer frame. Overcast, red-colored spectrum in Fig. 3

4. Методика восстановления характеристик волнения

4.1 Базовая модель восстановления уклонов

В наших предыдущих работах [14–16] изложен оригинальный способ восстановления уклонов поверхности моря и формирования ПВИ уклонов поверхности моря («рельефа» уклонов волн) по ПВИ поверхности моря, полученным с помощью линейки фотоприемников при рассеянном небесном освещении вне зоны солнечных бликов.

Ключевая особенность способа — его независимость от спектральной яркости водной поверхности, так как в нем формируются относительные флуктуации спектральной яркости (или спектральный коэффициент яркости), что должно компенсировать изменения спектральной яркости во Фраунгоферовых спектральных линиях и полосе поглощения воды в спектре водоема. В дальнейшем термин «спектральный» означает яркость поверхности водоема для определенного значения длины волны света в спектре излучения водоема (или интегральное значение спектра яркости водоема в пределах заданного интервала длин волн света).

Принцип восстановления уклонов волн заключается в следующем: в каждой точке поверхности моря формируется не зависящий от яркости безразмерный сигнал S (относительные флуктуации спектральной яркости моря $I(\eta)$, где η — вектор уклонов волн), который в приближении линейной зависимости яркости поверхности моря от уклонов волн будет равен:

$$S = I(\eta) / I_0 - 1 = \eta(\nabla I / I_0), \quad (1)$$

где I_0 — средняя спектральная яркость поверхности моря. В формуле (1) перед искомым вектором уклонов волн η находится безразмерный коэффициент $(\nabla I / I_0)$, который не зависит от параметров оптического приемника (диаграммы направленности, оптического фильтра), усиления сигнала и т. д. и зависит от градиента коэффициента отражения Френеля F , т. е. от поляризации регистрируемого излучения и от угловой зависимости спектральной яркости неба I_{sky} .

При наклонном визировании уклоны волн в направлении визирования η_1 будут выражаться через относительные флуктуации яркости формулой [13–15]:

$$\eta_1 = S / k \sin \theta, \quad (2)$$

где θ — зенитный угол наблюдения, $k(\theta)$ — безразмерный относительный оптический контраст уклонов волн:

$$k = F'(\cos \theta) / F(\cos \theta) + 2I'_{sky}(\cos \theta) / I_{sky}(\cos \theta), \quad (3)$$

где F — коэффициент отражения Френеля, $I_{sky}(\cos \theta)$ — яркость зеркального участка неба. Выражение для коэффициента Френеля известно и зависит от поляризации регистрируемого света, отношение $2I'_{sky}(\cos \theta) / I_{sky}(\cos \theta)$ можно взять из модельного выражения для яркости неба, либо определить по фотоснимку неба.

Относительная производная коэффициента Френеля при наклонном визировании водной поверхности в диапазоне зенитных углов наблюдения $60\text{--}80^\circ$ [12] в несколько раз больше относительной производной угловой зависимости яркости безоблачного неба, так что контраст волн в первом приближении не будет зависеть от условий освещения небом:

$$\eta_1 = S / k_1 \sin \theta,$$
$$k_1 = F'(\cos \theta) / F(\cos \theta), \quad (4)$$

где k_1 — оптический контраст уклонов волн, обусловленный коэффициентом Френеля, без учета градиента яркости неба. Зависимости k_1 от θ для различной поляризации света приведены в работах [14]. В частности, для неполяризованного света (в случае пасмурного неба) при наклонных углах наблюдения k_1 почти не зависит от θ и его можно оценить как $k_1 = 5$.

4.2. Уточненная модель с учетом градиента яркости неба

Базовая модель (3), (4) не требует знания абсолютных значений яркости неба и параметров оптического приемника, поскольку в формулах фигурируют только относительные величины, но нуждается в информации о коэффициенте отражения света и об угловом распределении яркости неба. В общем случае для определения относительного оптического контраста уклонов волн k необходимо учитывать параметры Стокса отраженного излучения неба, что является сложной задачей.

В работе [15] предложен новый способ оценивания оптического контраста уклонов волн k , основанный на определении относительного градиента средней яркости поверхности моря I_0 по зенитному углу наблюдения θ . Относительный градиент средней яркости поверхности моря имеет вид:

$$dI_0 / I_0 = k_2 \sin \theta d\theta,$$
$$k_2 = F'(\cos \theta) / F(\cos \theta) + I'_{sky}(\cos \theta) / I_{sky}(\cos \theta), \quad (5)$$

где k_2 — уточненное значение оптического контраста уклонов волн с учетом относительного градиента яркости неба.

Данный способ является «самосогласованным»: он не требует привлечения дополнительных данных, и необходимая для восстановления рельефа морской поверхности и спектральных характеристик волнения информация извлекается из градиента яркости поверхности моря. Как известно, при восстановлении спектра волнения в зоне солнечных бликов используется градиент яркости солнечного блика [17], однако отсутствуют работы по восстановлению спектров волнения с помощью градиента яркости поверхности моря при освещении поверхности моря рассеянным светом неба.

5. Результаты и обсуждение

5.1. Разделение волновых и неволновых однородностей

Кроме волн, на водной поверхности могут присутствовать такие «образования», как следы судов, обрушения волн, групповая структура волн, слики, обусловленные загрязнениями на водной поверхности (пленками ПАВ). Эти «образования» можно «разделить» с помощью спектрального анализа ПВИ при условии, что волны подчиняются дисперсионному соотношению [14].

На ПВИ, зарегистрированных гиперспектрометром с моста на реке Оке (рис. 5), наряду с ветровыми волнами отчетливо видны движущиеся полосы — слики, обусловленные загрязнениями на поверхности реки. Уклоны в направлении визирования η_1 (цветовая шкала) вычислялись по приближенной формуле (4) при длине волны света 451 нм. Приведено ПВИ без исправления перспективных искажений.

Контрасты сликов растут, а контрасты волн падают с увеличением зенитного угла наблюдения (уменьшением угла скольжения) за счет эффекта затенения волн. На рис. 5 с расстоянием увеличивается контраст движущихся полос (сликов), обусловленных загрязнениями на поверхности реки. Слики движутся по течению реки, а ветер дует навстречу течению, так что ветровые волны с групповой структурой движутся навстречу течению на наблюдателя. По полосам сликов можно оценить скорость течения реки, которая составила 0,8 м/с. Это значение скорости течения находится в соответствии с наблюдаемой в августе скорости течения реки Ока.

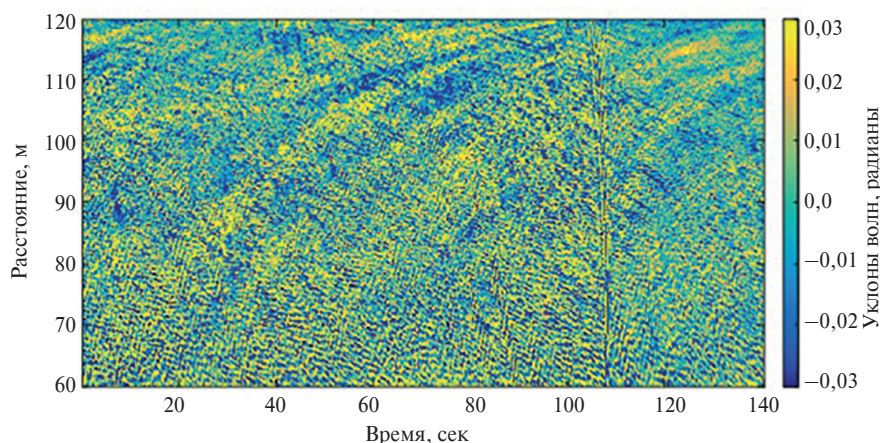


Рис. 5. ПВИ уклонов волн водной поверхности. По вертикальной оси отложено расстояние от места установки гиперспектрометра (вдоль реки от моста), по горизонтальной оси — время. Величина уклонов волн в радианах отображается в цветовой шкале справа. Длина волны света 451 нм

Fig. 5. Spectral spatial and temporal image of the slopes of the water surface waves. The vertical axis shows the distance from the location of the hyperspectrometer (along the river from the bridge), and the horizontal axis shows the time. The magnitude of the wave slopes in radians is displayed on the color scale on the right. The light wavelength is 451 nm

5.2. Статистические характеристики уклонов и эффект затенения

На рис. 6 приведены гистограммы уклонов волн в цветовой шкале в зависимости от расстояния от моста. Гистограммы вычислялись по ПВИ (рис. 5) «построчно», т. е. по времени. С расстоянием от моста гистограмма сужается, что связано с увеличением относительного вклада длинных волн из-за расфокусировки изображения коротких волн и затенения.

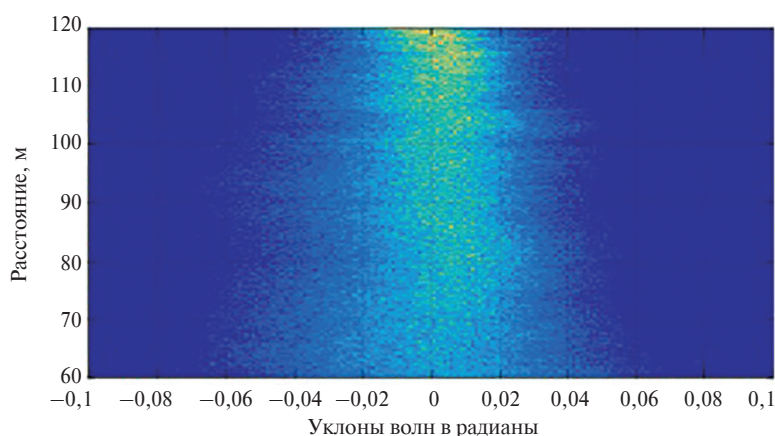


Рис. 6. Гистограммы уклонов волн в цветовой шкале в зависимости от расстояния от моста. Длина волны света 451 нм

Fig. 6. Histograms of wave slopes on a color scale depending on the distance from the bridge. Light wavelength of 451 nm

На рис. 7 приведены гистограммы видимых уклонов волн для расстояний от моста 60 м (синяя кривая) и 80 м (красная кривая), где контрасты снимков еще малы относительно контрастов уклонов волн и длины волны света 451,08 нм и 515,7 нм. Максимум гистограмм сдвинут от нулевого уклона в сторону отрицательных уклонов, что может быть связано с течением реки.

Для сравнения на рис. 8 приведены гистограммы видимых уклонов волн для двух расстояний от океанографической платформы 40 м (синий график) и 100 м (красный график). Гистограммы получены с помощью линейки фотоприемников. Черное море, п. Кацивели, высота океанографической платформы над уровнем моря составляла 13 м [14].

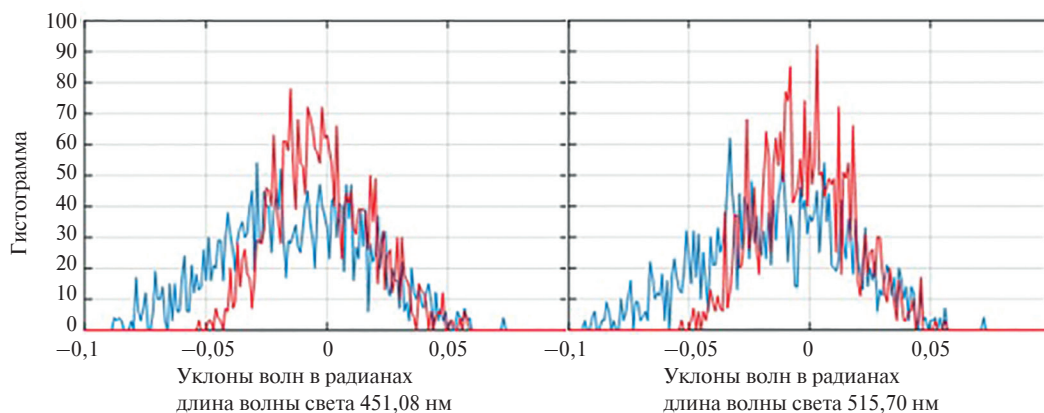


Рис. 7. Гистограммы уклонов волн для расстояний от моста 60 м (синяя кривая) и 80 м (красная кривая). Длина волны света 451,08 нм и 515,7 нм

Fig. 7. Histograms of wave slopes for distances from the bridge of 60 m (blue curve) and 80 m (red curve). Light wavelength of 451,08 nm and 515,7 nm

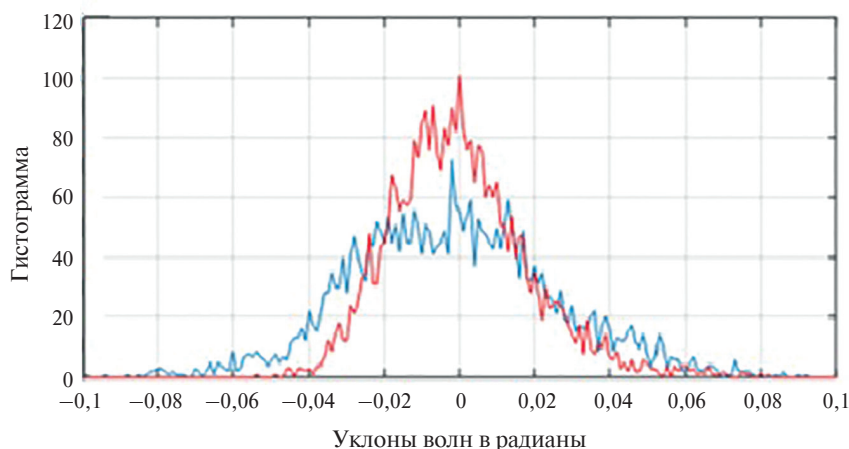


Рис. 8. Гистограммы видимых уклонов волн для двух расстояний от платформы в 40 м (синяя кривая) и 100 м (красная кривая). Океанографическая платформа, п. Кацивели, Черное море

Fig. 8. Histograms of visible wave slopes for two distances from the platform: 40 m (blue graph) and 100 m (red graph). Oceanographic platform, Katsiveli, Black Sea

Гистограммы на рис. 7 и 8 вычислялись по приближенной формуле (4). У гистограмм на рис. 7 и 8 для большого расстояния от оптического приемника (для малых углов скольжения) уменьшается доля отрицательных уклонов волн, т. е. уклонов, обращенных «от наблюдателя», и, соответственно, увеличивается количество малых уклонов волн, что связано с явлением затенения склонов волн при скольжащих углах наблюдения.

Значения уклонов волн, гистограммы уклонов волн, вычисленные по формуле (4) для различных акваторий, различных условий освещения и разных длин волн оптического излучения, очень близки, что свидетельствует о применимости модели (4) для оценки значений уклонов волн.

5.3. Валидация методики: уточненная модель и сравнение с волнографом

В [18] представлены результаты апробации разработанного способа на примере ПВИ морской поверхности при пасмурном небе (океанографическая платформа, п. Кацивели, Черное море). Как известно, яркость пасмурного неба убывает к горизонту, что уменьшает оптический контраст волн. Соответственно, уточненное значение оптического контраста уклонов волн для пасмурного неба $k_2 = 4$ должно быть меньше оптического контраста волн $k_1 = 5$, вычисленного по формуле (4) без учета градиента яркости неба.

На рис. 9 приведены спектры возвышений волн для оптического контраста уклонов волн $k_1 = 5$, уточненного оптического контраста уклонов волн $k_2 = 4$ (левый график) и соответствующий спектр возвышений, зарегистрированный волнографом (правый график). Спектр возвышений волн вычислен по ПВИ уклонов волн по методике работ [14, 15]. Спектр возвышений волн для уточненного оптического контраста волн по амплитуде соответствует спектру волнографа, что свидетельствует об увеличении точности восстановления уклонов волн.

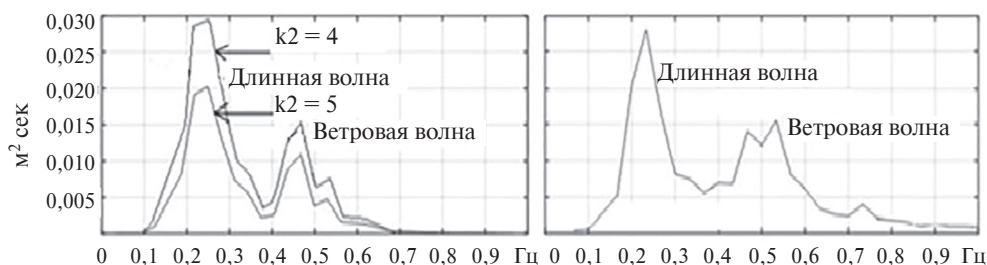


Рис. 9. Спектр возвышений волн, вычисленный по методике из работы [14] для оптического контраста уклонов волн $k_1 = 5$ и оптического контраста уклонов волн $k_2 = 4$, и соответствующий спектр возвышений, зарегистрированный волнографом (справа)

Fig. 9. The wave height spectrum calculated according to the method of work [14] for the optical contrast of wave slopes = 5 and the optical contrast of wave slopes = 4, and the corresponding wave height spectrum recorded by the wave gage (on the right)

Таким образом, погрешность в вычислении уклонов волн по приближенной формуле (4) можно прогнозировать в районе 20–30 %.

Следует учесть, что апробация предложенного метода проводилась для пасмурного неба, свет которого неполяризован. В общем случае яркость света неба частично поляризована и надо использовать параметры Стокса для описания отражения света взволнованной водной поверхностью [8]. Однако описанная методика восстановления характеристик волнения по изображению поверхности моря может быть применима при установке на объектив гиперспектрометра поляроида.

6. Заключение

В работе рассмотрено новое применение сканирующего гиперспектрометра для диагностики волнения водной поверхности. По натурным данным, полученным при наклонном наблюдении, обработан яркостный сигнал с узкой линии на поверхности воды и сформированы спектральные пространственно-временные изображения в координатах «расстояние — время» для различных участков оптического диапазона. Это позволило восстановить рельеф уклонов волн, их статистические характеристики, пространственно-временной спектр уклонов и спектр возвышений волн.

Высокое спектральное разрешение гиперспектрометра (1,3 нм в диапазоне 380–1000 нм) обеспечивает два ключевых преимущества. Во-первых, появляется возможность выбирать для обработки спектральные каналы, свободные от полос поглощения Фраунгофера и водяного пара, либо использовать относительные флуктуации яркости $\delta I/I$, которые автоматически компенсируют эти спектральные провалы, поскольку постоянное занижение яркости сокращается при делении флуктуации на среднее значение. Во-вторых, спектральное разложение позволяет отслеживать поведение волнения в различных участках оптического диапазона и сравнивать результаты. Базовая модель восстановления уклонов основана на анализе относительных флуктуаций спектральной яркости поверхности и предполагает постоянный оптический контраст ($k \approx 5$ для неполяризованного света), не зависящий от условий освещения. Эта модель обеспечивает полу-

чение абсолютных значений уклонов без контактной калибровки. Наряду с базовой моделью предложена новая уточненная модель, учитывающая градиент яркости неба по зенитному углу наблюдения. В отличие от базовой, уточненная модель является самосогласованной: оптический контраст определяется непосредственно из градиента средней яркости поверхности, без привлечения внешних данных о яркости неба.

Обработка данных натурных экспериментов, выполненных на реке Ока и в Черном море при различных углах наблюдения, условиях освещения и длинах волн, позволила выявить ряд закономерностей. Зарегистрирован сдвиг максимума гистограмм уклонов волн в сторону отрицательных значений, обусловленный течением реки. Обнаружен эффект затенения склонов волн при скользящих углах наблюдения: на больших расстояниях от прибора гистограммы уклонов сужаются, доля отрицательных уклонов уменьшается, а количество малых уклонов возрастает. Примечательно, что значения уклонов и форма гистограмм, восстановленные для различных акваторий, условий освещения и длин волн оптического диапазона, оказываются близки между собой. Эта повторяемость результатов в существенно различных условиях подтверждает достоверность предложенного подхода и универсальность используемых моделей.

Спектральный анализ пространственно-временных изображений позволил разделить волновые и неволновые образования на водной поверхности. В частности, на реке Ока отчетливо наблюдались движущиеся полосы — слики, обусловленные загрязнениями поверхности пленками поверхностно-активных веществ. По скоростям перемещения сликов оценена скорость течения реки, согласующаяся с данными прямых наблюдений. Полученные результаты показывают, что предложенная модификация гиперспектрометра перспективна для задач комплексного мониторинга морских акваторий: обнаружение тонких пленок поверхностно-активных веществ может осуществляться одновременно по спектральному контрасту и по аномалиям волнения — «выглаживанию» в зоне сликов.

Финансирование

Работа выполнена по Госзаданию ИПФ РАН, проект FFUF-2024–0033 (Разработка радиофизических методов исследования океана и внутренних водоемов).

Funding

This work was performed under the State Assignment of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), project No. FFUF-2024-0033.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Литература

1. Lucke R.L., Corson M., McGlothlin N.R., et al. Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: instrument description and first images // *Applied Optics*. 2011. Vol. 50, No. 11. P. 1501–1516. <https://doi.org/10.1364/AO.50.001501>
2. Cox C., Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter // *Journal of the Optical Society of America*. 1954. Vol. 44, No. 11. P. 838–850. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000838>
3. Салин Б.М., Салин М.Б. Комбинированный метод измерения трехмерных спектров волнения. I. Алгоритмы преобразования поля оптической яркости в распределение высот волнения // *Известия вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58. № 2. С. 123–133. EDN TQMLBF
4. Баханов В.В., Разумов Д.Д., Салин М.Б. Определение параметров спектра поверхностного волнения с использованием видеосъемки в естественном свете // *Научное приборостроение*. 2025. Т. 35, № 1. С. 93–105. EDN QFNABU
5. Yang J., Hu Y., Ma Y., et al. Combined Retrieval of Oil Film Thickness Using Hyperspectral and Thermal Infrared Remote Sensing // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, 5415. <https://doi.org/10.3390/rs15225415>
6. Xiaobo Zhu, Yingcheng Lu, Jianqiang Liu, et al. Optical Extraction of Oil Spills From Satellite Images Under Different Sunlight Reflections // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3213590>

7. Satriano V., Ciancia E., Lacava T. et al. Improving the RST-OIL Algorithm for Oil Spill Detection under Severe Sun Glint Conditions // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, 2762. <https://doi.org/10.3390/rs11232762>
8. Malinowski M., Gilerson A., Vandenbergue S., et al. Surface roughness and wave slope statistics from the multi-spectral polarimetric imaging of the ocean surface // *Optics Express*. 2024. Vol. 32, No. 13. P. 22110. EDN QESKQX. <https://doi.org/10.1364/OE.521650>
9. Корчемкина Е.Н., Мольков А.А. Региональный биооптический алгоритм для Горьковского водохранилища: первые результаты // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 3. С. 184–192. EDN XSNFRR. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192>
10. Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Ермаков С.А. Дистанционные методы определения толщины пленок нефти и нефтепродуктов на морской поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 3. С. 9–27. EDN DGEAYG. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27>
11. Титов В.И., Артамонов А.Ю., Баханов В.В. и др. Мониторинг состояния поверхности моря по пространственно — временным оптическим изображениям // *Исследование Земли из космоса*. 2014. № 5. С. 3–14. EDN SMMQUL. <https://doi.org/10.7868/S0205961414050078>
12. Баханов В.В., Демакова А.А., Кориненко А.Е., Рябкова М.С., Титов В.И. Оценка спектров ветровых волн с длинами от сантиметров до метра по изображениям поверхности моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 192–205. EDN YNHCTB. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-3-192-205>
13. Титов В.И., Антонов А.А. Диагностика водного бассейна с помощью сканирующего гиперспектрометра. // *Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. Москва, 2023. EDN ACYTDD. <https://doi.org/10.21046/21DZZconf-2023a>
14. Титов В.И., Антонов А.А. Восстановление рельефа морской поверхности и спектра волнения по изображению поверхности моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20, № 5. С. 39–49. EDN CPBALY. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-39-49>
15. Способ определения рельефа уклонов волн морской поверхности по оптическим пространственно-временным изображениям морской поверхности: пат. 2837976 Рос. Федерация: МПК: G01C13/00 / Баханов В.В., Антонов А.А., Титов В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН). № 2837976; заявл.02.12.2024, опубл. 07.04.2025, бюл. № 10. 15с. EDN YFSQVY
16. Программа восстановления рельефа уклонов волн по оптическому изображению взволнованной поверхности моря. Программа для ЭВМ № 2025617552 правообладатель ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» / Титов В.И., Баханов В.В., Антонов А.А. заявл. 19.03.2025, опубл. 26.03.2025, объем программы 34 КБ, Матлаб. EDN LNCLKX
17. Юровская М.В., Кудрявцев В.Н., Широков А.С., Надоля И.Ю. Натурные измерения спектра поверхностных волн по фотографиям с беспилотного мультикоптера // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 1. С. 245–257. EDN XPNWMP. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-245-257>
18. Титов В.И., Антонов А.А., Баханов В.В., Разумов Д.Д. Диагностика волнения в натуральных и лабораторных условиях с привлечением данных сканирующего гиперспектрометра. // *Современные проблемы оптики естественных вод. Труды XIII Всероссийской конференции с международным участием: сборник научных трудов*. Санкт-Петербург, 2025, с. 195–200. EDN DWWGEH

References

1. Lucke RL, Corson M, McGlothlin NR, et al. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images. *Applied Optics*. 2011;50:1501–1516. <https://doi.org/10.1364/AO.50.001501>
2. Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *Journal of the Optical Society of America*. 1954;44:838–850. <https://doi.org/10.1364/JOSA.44.000838>
3. Salin BM, Salin MB. Combined method for measuring 3D wave spectra. I. Algorithms to transform the optical-brightness field into the wave-height distribution. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015;58(2):114–123.
4. Bakhanov VV, Razumov DD, Salin MB. Determination of surface wave spectrum parameters using video recording in natural light. *Nauchnoe Priborostroenie*. 2025;35(1):93–105.
5. Yang J, Hu Y, Ma Y, Wang M, Zhang N, Li Z, Zhang J. Combined retrieval of oil film thickness using hyperspectral and thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing*. 2023;15(22):5415. <https://doi.org/10.3390/rs15225415>
6. Zhu X, Lu Y, Liu J, Ju W, Ding J, Li M, Suo Z, Jiao J, Wang L. Optical extraction of oil spills from satellite images under different sunglint reflections. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022;60:1–12. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3213590>
7. Satriano V, Ciancia E, Lacava T, Pergola N, Tramutoli V. Improving the RST-OIL algorithm for oil spill detection under severe sun glint conditions. *Remote Sensing*. 2019;11(23):2762. <https://doi.org/10.3390/rs11232762>

8. Malinowski M, Gilerson A, Vandenbergue S, Ahmad PJ, Bostater C. Surface roughness and wave slope statistics from the multi-spectral polarimetric imaging of the ocean surface. *Optics Express*. 2024;32(13):22110. <https://doi.org/10.1364/OE.520854>
9. Korchemkina EN, Molkov AA. Regional bio-optical algorithm for the Gorky Reservoir: first results. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018;15(3):184–192. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-184-192> (In Russ)
10. Molkov AA, Kapustin IA, Ermoshkin AV, Ermakov SA. Remote methods for determination of oil and oil-product thickness on the sea surface. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020;17(3):9–27. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-9-27> (In Russ)
11. Titov VI, Artamonov AY, Bakhanov VV, Ermakov SA, Luchinin AG, Repina IA, Sergievskaya IA. Monitoring the state of the sea surface using spatio-temporal optical images. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2014;(5):3–14. <https://doi.org/10.7868/S0205961414050078> (In Russ)
12. Bakhanov VV, Demakova AA, Korinenko AE, et al. Estimation of the wind wave spectra with centimeters-to-meter lengths by the sea surface images. *Physical Oceanography*. 2018;25(3):177–190. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-3-177-190>
13. Titov VI, Antonov AA. Water basin diagnostics using a scanning hyperspectrometer. In: *Proceedings of the 21st International Conference “Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”*. Moscow; 2023. <https://doi.org/10.21046/21DZZconf-2023a> (In Russ)
14. Titov VI, Antonov AA. Reconstruction of sea surface relief and sea wave spectra using a sea surface image. *Cosmic Research*. 2024;62(Suppl 1): S150–S156. <https://doi.org/10.1134/S0010952524601270>
15. Bakhanov VV, Antonov AA, Titov VI. Method for determining the relief of sea surface wave slopes from optical spatio-temporal images of the sea surface. Patent RU2837976. 2025 Apr 7. (In Russ)
16. Titov VI, Bakhanov VV, Antonov AA. Program for reconstructing wave slope relief from an optical image of a rough sea surface. Certificate of state registration of the computer program RU2025617552. 2025 Mar 26. (In Russ)
17. Yurovskaya MV, Kudryavtsev VN, Shirokov AS, Nadolya IYu. In-kind measurements of the surface wave spectrum from photographs taken by an unmanned multicopter. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2018;15(1):245–257. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-1-245-257> (In Russ)
18. Titov VI, Antonov AA, Bakhanov VV, Razumov DD. Wave diagnostics in natural and laboratory conditions using scanning hyperspectrometer data. In: *Modern Problems of Natural Water Optics. Proceedings of the XIII All-Russian Conference with International Participation: Collection of Scientific Papers*. St. Petersburg; 2025:195–200. (In Russ)

Об авторах

ТИТОВ Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), ORCID: 0000-0001-9483-8231, Scopus AuthorID: 7201990965, WoS ResearcherID: KFR-6898-2024, SPIN-код (РИНЦ): 6304-6773, e-mail: titov@ipfran.ru

БАХАНОВ Виктор Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией гидрофизического и акустического моделирования, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), ORCID: 0009-0004-1075-4401, Scopus AuthorID: 6603623205, WoS ResearcherID: ISV-2716-2023, SPIN-код (РИНЦ): 1031-9060, e-mail: bakh@ipfran.ru

АНТОНОВ Андрей Антонович, инженер, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), Scopus AuthorID: 6603623205, e-mail: andendton@ipfran.ru

РАЗУМОВ Дмитрий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), ORCID: 0000-0002-9629-6699, SPIN-код (РИНЦ): 3791-6124, e-mail: ddrazumov@ipfran.ru