

Разработка принципов мониторинга состояния водной поверхности и приводного слоя атмосферы по оптическим изображениям поверхности

В.И. Титов^{1,2,3}, В.В. Баханов¹, Э.М. Зуйкова¹, А.Г. Лучинин¹

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,

²Нижегородский госуниверситет, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,

³Российский государственный гидрометеорологический университет,

Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98.

E-mail: titov@hydro.appl.sci-nnov.ru

Разработаны методы создания крупномасштабных оптических пространственно – временных изображений водной поверхности при скользящих углах наблюдения. Создана оптическая система для мониторинга прибрежной зоны и внутренних водоемов в полосе до нескольких десятков километров, которая может устанавливаться на берегу, судне или самолете; Проведены натурные эксперименты, которые показали наличие проявлений ветровой структуры на поверхности моря (ветровых фронтов, катабатических ветровых потоков, вихрей). Эти проявления можно выявить благодаря их пространственной структуре и большой скорости распространения. Разработаны методы определения характеристик приводного ветра (скорости, пространственной структуры ветра) по его проявлениям на водной поверхности.

Ключевые слова: оптика океана, морские волны, спектральный анализ, обработка изображений, дистанционное зондирование, капиллярные волны.

Как известно, развитие новых методов мониторинга поверхности моря является актуальной задачей. В данной работе предлагается новый дистанционный метод, основанный на оптических пространственно – временных изображениях (ПВИ) морской поверхности (B.L. Gotwols and G.B. Irani, 1980, Titov V.I. et al, 1994, David V. Vang and Paul A. Hwang, 2004). Разработан способ создания крупномасштабных оптических ПВИ изображений морской поверхности по оптическим сечениям поверхности и создан оптический прибор на основе линейки ПЗС – фотоприемников (Titov V.I. et al, 2009). Разработаны принципы использования такого метода для судов или воздушных носителей, позволяющие устраниить влияние качки судов или самолетов.

Одним из основных механизмов видимости различных объектов на морской поверхности (поверхностных волн, групповой структуры длинных волн, сликов, проявлений внутренних волн, структуры приводного ветрового поля и т.д.) для скользящих углов наблюдения является затенение волн. Таким образом, слик (т.е. область с пониженной шероховатостью) будет выглядеть ярче окружающей морской поверхности а область с повышенной шероховатостью будет выглядеть темнее. Поверхностные волны на ПВИ изображениях будут выглядеть полосами, наклон которых будет определяться скоростью волн. Два оптических прибора устанавливаются вместе (на берегу, судне, морской платформе и т.д.) чтобы регистрировать два ПВИ изображения с различным направлением визирования. Два таких изображения позволяют получить полную информацию о кинематических характеристиках различных объектов на морской поверхности, в том числе поверхностных волн независимо от их дисперсионного соотношения (Titov et al, 2009). Ширина ПВИ изображения зависит от высоты установки оптического прибора: она увеличивается с увеличением высоты. Например, для высоты над уровнем моря около 100 м ширина изображения может достигать нескольких десятков километров в зависимости от требуемого пространственного разрешения.

Во время экспериментов по мониторингу морской поверхности с берега высотой около 100 м (мыс “Илья” около г. Феодосия на Черном море) в 2008 г. был обнаружен ряд проявлений на поверхности неоднородностей поля приводного ветра, таких как вихри и так называ-

емые катабатические ветра (холодный ветровой поток, направленный вниз по склонам). Эти проявления можно выявить благодаря их пространственной структуре и большой скорости распространения, которая может составлять до 40-50 км/ч.

На рис. 1 приведены ПВИ изображения морской поверхности, полученные с установленных на мысе “Илья” двух оптических приборов с различными направлениями наблюдения; угол между этими направлениями составлял 60° . Изображения “состыкованы” начальами. Время отложено по горизонтали, расстояние от места установки в направлении визирования приборов отложено по вертикали. Яркость морской поверхности отображается в условной “серой” шкале. Ширина панорамы от 700 м от места установки приборов (это край берега) до 8500 м. На нижнем изображении видны движущиеся суда в виде ярких точек, от которых отходят темные полосы, представляющие собой изображения корабельных волн. Наклон полос определяется их лучевой скоростью распространения (скоростью вдоль “луча” оптического прибора). Могут наблюдаться до трех систем корабельных волн, распространяющихся с разной скоростью. Скорости судов, определенные по двум изображениям, составляли около 15 км/ч. На верхнем изображении на поверхности виден вихрь, формирующийся, по-видимому, под действием ветрового вихря. На рис. 2 виден тот же вихрь, но на нижнем изображении. Скорость движения вихря вдоль берега определялась по этим двум изображениям и составила около 5 км/ч. Диаметр вихря составил примерно 2500 м.

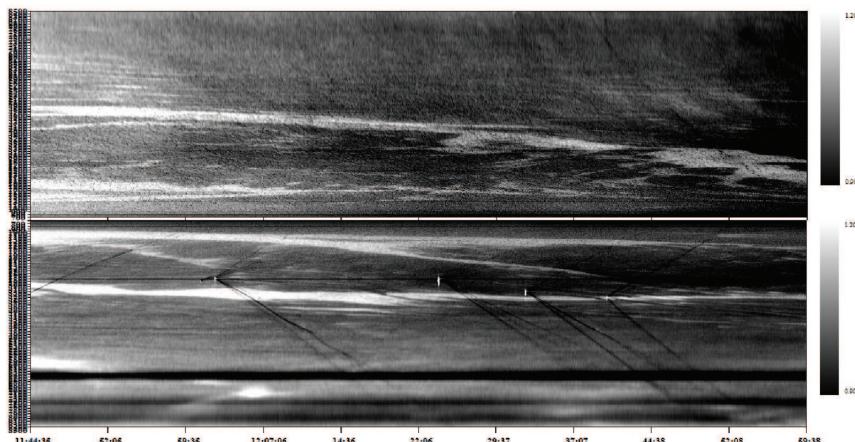


Рис. 1. ПВИ изображения поверхности моря, полученные с двух оптических приборов с разным направлением визирования установленных на высоком берегу. Изображения “состыкованы” начальами.

Время – по горизонтали, дальность в направлении наблюдения в километрах – по вертикали.

Яркость поверхности моря отображается в условной серой шкале

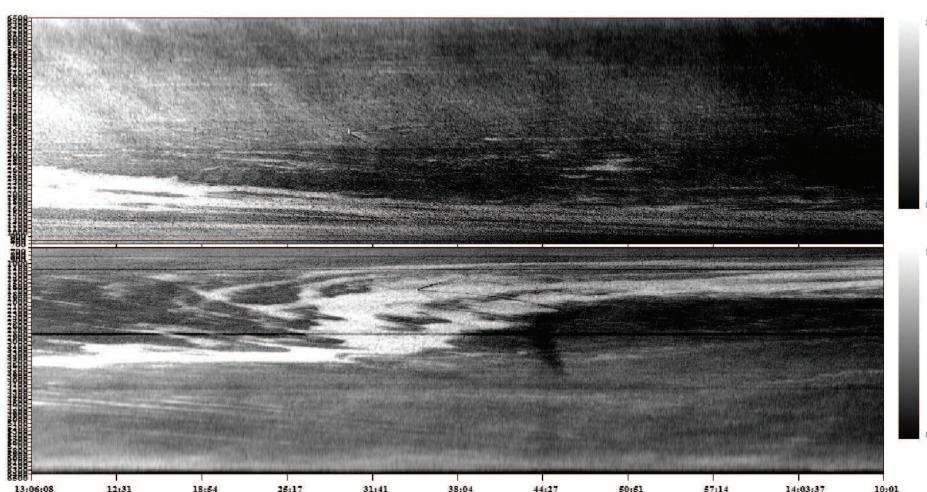


Рис. 2. ПВИ изображения поверхности моря. Небольшой вихрь, являющийся проявлением ветрового вихря, виден на нижнем изображении

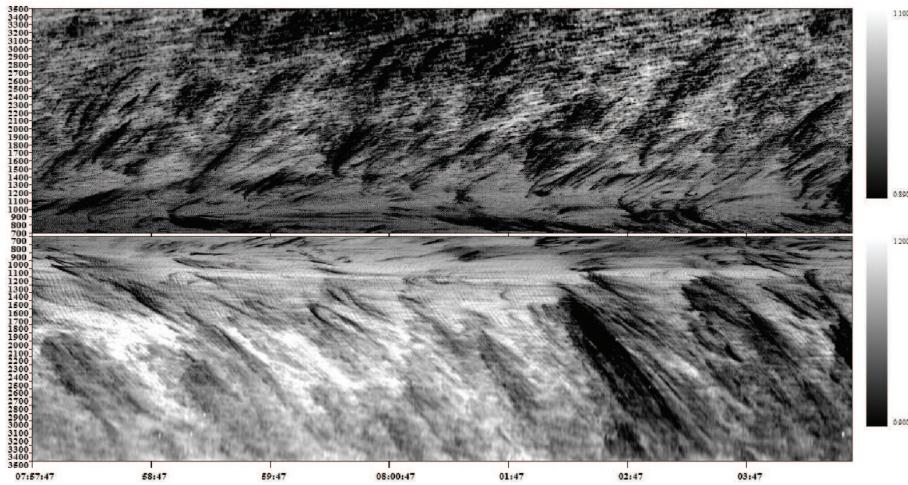


Рис. 3. ПВИ изображения проявления на поверхности моря катабатического ветрового потока с прибрежных гор

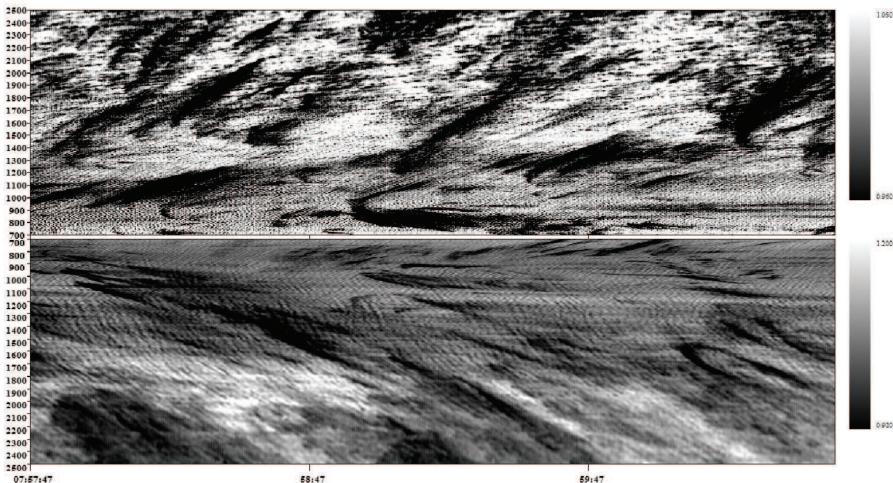


Рис. 4. Крупномасштабная часть предыдущего рисунка. На нижнем рисунке видны длинные поверхностные волны

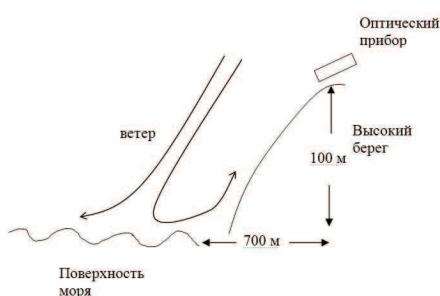


Рис. 5. Схема нисходящего ветрового потока. Вблизи берега ветер делится на два потока с противоположным направлением ветра

На рис.3 приведены ПВИ изображения морской поверхности при катабатическом ветре с высокого берега. Темные полосы – проявления порывов ветра, в которых возрастает верхностное волнение. Скорость ветровых порывов на поверхности составляла 40–60 км/ч. Рис. 4 – фрагмент рис. 3 в более крупном масштабе. Из рис. 3 и 4 можно видеть, что вблизи берега темные полосы изгибаются и меняют свое направление на противоположное. Это означает, что ветровой поток вблизи берега делится на два потока с противоположными направлениями: от берега и к берегу (рис. 5). Этот вывод подтверждается поведением длин-

ных волн, видимых на нижнем изображении рис. 4: около берега волны распространяются к берегу, а с расстояния около 900–1000 метров (от берега с расстояния 200–300м) волны распространяются уже в открытое море.

Предполагаемая структура ветрового поля изображена на рис. 5. Такая структура ветрового потока напоминает так называемый пристеночный вихрь, формирующийся в турбулентном потоке воздуха вблизи границы. Следует отметить, что с увеличением расстояния от берега интенсивность ветровых потоков падает и на расстоянии 8 км – 10 км ветровые порывы пропадают, а изображение морской поверхности становится однородным.

Можно предложить следующий метод определения скорости ветра по яркости поверхности моря с учетом затенения волн.

Средняя яркость поверхности моря с учетом затенения определяется выражением:

$$I = \int I_s(\eta) W_v(\eta) d\eta ,$$

где $\eta = (\frac{\partial \xi}{\partial x}, \frac{\partial \xi}{\partial y})$ – вектор уклонов волн, $W_v(\eta)$ – распределение видимых уклонов поверхности.

Полагаем $W_v(\eta_x, \eta_y) = W_{vx}(\eta_x)W_y(\eta_y)$, где ось x - в направлении визирования, $W_{vx}(\eta_x)$ и $W_y(\eta_y)$ – распределение видимых уклонов по осям x и y :

$$W_{vx}(\eta_x) = C(\theta)W_x(\eta_x)(1 + \eta_x \operatorname{tg} \theta), -ctg \theta \leq \eta_x < \infty \text{ и } W_{vx} = 0, \eta_x < -ctg \theta .$$

W_x и W_y – гауссовые функции распределения уклонов по осям x и y , θ – угол падения.

Рассмотрим случай ясного неба (наблюдение вне солнечной дорожки), либо неба, полностью покрытого облаками, когда яркость поверхности будет «гладкой» функцией уклонов волн и эту яркость можно разложить в ряд по степеням уклонов волн.

Тогда для скользящих углов наблюдения ($\theta \rightarrow 90^\circ$) средняя яркость поверхности будет определяться выражением:

$$I \rightarrow I(0) + \sigma_x I' \sqrt{\frac{\pi}{2}} + \sigma_x^2 I'' ,$$

где $I(0)$ - яркость гладкого моря, I' и I'' - производные яркости по уклонам волн.

Из этого уравнения можно восстановить значения дисперсии уклонов волн и далее скорость ветра V_w , например, по известным формулам (Cox, Munk):

$$\sigma_{11} = (3 + 1,92V_w(m/c) \pm 2) \times 10^{-3} ,$$

$$\sigma_{22} = (3,16V_w(m/c) \pm 4) \times 10^{-3} .$$

Заключение

- Создана оптическая система для мониторинга прибрежной зоны и внутренних водоемов в полосе до десятков километров, которая может устанавливаться на берегу, судне или самолете;
- Разработан уникальный метод исследования поля приводного ветра по пространственно – временным изображениям водной поверхности.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-05-97045-р_поволжье_a, 11-05-97027-р_поволжье_a, 11-05-97022-р_поволжье_a, 11-05-00384-a, 10-05-00101, 11-05-97029) и Минобрнауки РФ (ГК | 16.515.11.5077, договоры | 11.G34.31.0048 и | 11.G34.31.0078).

Литература

1. *B.L. Gotwols and G.B. Irani* Optical Determination of the Phase Velocity of Short Gravity Waves // Journal of Geophysical Research. 1980. V.85. NO C7. P.3964 – 3970.
2. *Titov V.I., V.V. Bakhanov, G.N. Balandina, D.L. Belyakov, O.N. Kemarskaya and E.M. Zuikova* Investigation of variations of long surface wave parameters by optical technique during JUSREX 1992 // Proceeding of IGARSS'94 Pasadena, USA. 1994. P.759.
3. *David V. Vang and Paul A. Hwang* The dispersion relation of short wind waves from space-time wave measurements // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2004. V.21. P.1936 – 1945.
4. *Titov V.I., Zuikova E.M., Kemarskaja O.N., Troitskaja J.I.* Optical remote sensing of sea surface waves. Proc. V International Conference Current problems in optics of natural waters ONW'2009. St-Petersburg, Russia. 2009. P.139-143.
5. *Titov V.I., Bakhanov V.V., Kemarskaja O.N., Luchinin A.G., Troizkaja J.I., Zuikova E.M.* Investigation of sea roughness with complex of optical devices. Proc. Conference SPIE'09 "Remote Sensing of the Ocean Sea Ice and Large Water Regions 2009". Berlin. 2009.

The development of technique for monitoring of water basins and near surface wind using images of water surface

V.I. Titov, V.V. Bakhanov, E.M. Zuikova, A.G. Luchinin

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
46 Ul'yanov Street , 603950, Nizhny Novgorod , Russia, titov@hydro.appl.sci-nnov.ru*

The paper is devoted to the development of optical method for investigation of surface waves using RTI images (images in range – time – intensity coordinates) constructed from optical sections of surface. The technique for creating of large scale RTI images of sea surface under grazing angles was developed. The optical system for monitoring of coastal zone and inland waters from a ship or airplane was created. Some examples of large scale RTI images recording from high shore for various wind conditions, sea state are presented.

The underwater processes and wind are displayed on water surface due to its influence on surface roughness. The method for registration of large scale features of near surface wind fields using its manifestations on water surface is presented and method for retrieval of wind speed from optical image of waved water surface is discussed.

Keywords: optics of ocean, sea waves, spectral analysis, image processing, remote sensing, gravity - capillary waves.