

# Определение спектрально-кинематических характеристик поверхностного волнения по оптическим изображениям поверхности моря

В.В. Баханов, Э.М. Зуйкова, О.Н. Кемарская, В.И. Титов, Ю.И. Троицкая

*Институт прикладной физики РАН  
603950 Н.Новгород, Ульянова, 46  
E-mail: [titov@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:titov@hydro.appl.sci-nnov.ru)*

Как известно, в последнее время появились модели морского волнения, основанные на каскадных механизмах взаимодействия волн разных масштабов. В связи с этим в ИПФ РАН разработан корабельный оптический комплекс для регистрации характеристик морского волнения в широком диапазоне длин волн: от сантиметровых до энергонесущих поверхностных волн. Короткомасштабное волнение анализируется с помощью оптических спектраллизаторов на некогерентном свете (ДОСА), а параметры длинных поверхностных волн определяются по панорамам морской поверхности (изображения в координатах дальность - время - интенсивность света), конструируемых по оптическим профилям морской поверхности. Эти панорамы являются как бы оптическими аналогами РЛ-панорам морской поверхности, но обладают гораздо большим поверхностным разрешением и некоторыми дополнительными возможностями для диагностики волнения, связанными с особенностями формирования оптических изображений морской поверхности. Оптические панорамы обладают определенной "гибкостью": в зависимости от требуемого пространственного разрешения можно формировать панорамы различной ширины от сотен метров до километров.

Приведены данные исследования морского волнения в широком диапазоне длин поверхностных волн от сантиметров до десятков метров с помощью оптического комплекса, а также предварительные результаты по созданию модели двумерного спектра ветрового волнения.

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

## Введение

Для исследования морского волнения в широком диапазоне длин волн в ИПФ РАН создан комплекс оптических приборов. Короткомасштабное волнение анализируется с помощью оптических спектраллизаторов на некогерентном свете (ДОСА), а параметры длинных поверхностных волн определяются по панорамам морской поверхности, конструируемых по оптическим профилям морской поверхности. Разработан прибор для регистрации оптических панорам на основе линейки фотоприемников. Приведены некоторые результаты экспериментов, проведенных в г. Феодосия в 2008 г. Наблюдения проводились на Узком молу в Феодосийском заливе. Получены данные о частотной и угловой структуре спектра возвышений для волн длиной от 2,2 см до 84 см. Проведено сравнение с имеющимися модельными представлениями о спектре волнения. Проведен анализ оптических панорам морской поверхности, который позволил определить кинематические характеристики длинных волн. Впервые на оптических панорамах зарегистрировано проявление групповой структуры длинных энергонесущих волн.

## Спектральный анализ изображения морской поверхности

Классическая модель зависимости яркости поверхности  $I$  от уклонов волн при освещении ясным небом или однородным пасмурным небом использует в первом приближении линейную зависимость [1, 2]:

$$I(\mathbf{q}) = I_0 + \mathbf{q}\nabla I. \quad (1)$$

Флуктуации яркости пропорциональны произведению градиента яркости поверхности  $\nabla I = (\partial I/\partial q_x, \partial I/\partial q_y)$  на вектор уклонов волн  $\mathbf{q} = (\partial z/\partial x, \partial z/\partial y)$ , где  $z(x, y)$  – возвышения волн,  $I_0$  - средняя яркость поверхности моря.

На поверхности моря наибольший оптический контраст будут иметь волны, распространяющиеся в направлении градиента яркости и не будут видны волны с направлением распространения, перпендикулярным градиенту яркости. Спектр волн можно оценить по спектру изображения поверхности моря  $G_I$ :

$$G_I(\mathbf{k}) = (\mathbf{k}\nabla I)^2 G(\mathbf{k}) = (k^2 \nabla I^2 \cos^2 \alpha) G(\mathbf{k}), \quad (2)$$

где  $G(\mathbf{k})$  - спектр возвышений поверхности моря,  $\mathbf{k}$  - волновой вектор,  $\alpha$  - угол между направлением градиента яркости поверхности и направлением распространения поверхностной волны. Спектр изображения морской поверхности будет равен нулю для волн с направлением распространения, перпендикулярным градиенту яркости.

Яркость поверхности моря равна произведению яркости неба на коэффициент отражения света Френеля и видимые контрасты волн будут определяться как угловой зависимостью яркости неба для зеркального участка небосвода так и зависимостью коэффициента Френеля от локального угла падения света. При наблюдении в противосолнечных направлениях под скользящими углами градиент яркости поверхности будет ориентирован в направлении визирования.

Дальнейшее развитие этой модели связано с учетом квадратичного слагаемого в разложении яркости поверхности по степеням уклонов волн [1, 3].

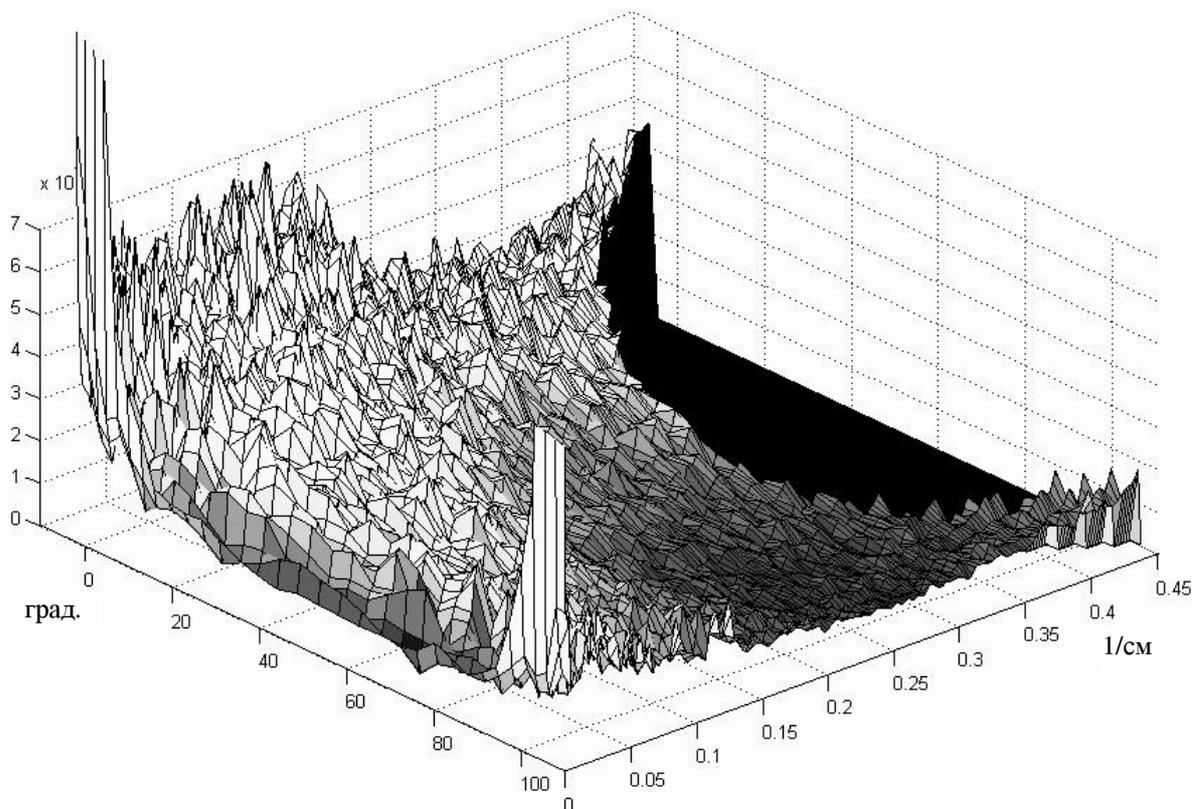
В работе [3] развита оптическая модель изображения ветрового волнения на морской поверхности в рассеянном свете неба на основе двухмасштабного представления поверхностного волнения. В рамках этой модели получено уточненное выражение для спектра изображения морской поверхности, которое позволило оценить вклад волн различных масштабов в спектр изображения. В частности, показано, что длинные волны обуславливают модуляцию контраста анализируемых коротких волн, что приводит к изменению коэффициента перед спектром уклонов волн. Вклад короткомасштабных волн в спектр изображения будет пропорционален свертке спектров этих волн.

Оценена точность определения спектральных контрастов волн в аномалиях поверхностного волнения (плёночных слайках, в поле внутренних волн и т.д.) и точность измерения двумерных спектров волн по спектру изображения морской поверхности. Показано, что относительные измерения спектров волнения (контрасты волн, частотные и угловые характеристики спектров) имеют гораздо более высокую точность, чем абсолютные измерения.

В ИПФ РАН разработан некогерентный двумерный оптический спектроанализатор (ДОСА) [4, 5] для спектрального анализа изображения морской поверхности в реальном времени без промежуточной регистрации изображения, использующий принцип модуляции изображения эталоном с гармоническим распределением коэффициента прозрачности. Цикл измерения двумерного спектра изображения занимает 1сек. За это время регистрируется спектр размерностью 200 пространственных частот на 33 направления волн в угловом секторе  $120^\circ$  ( $\pm 60^\circ$  от направления визирования ДОСА) с угловым разрешением примерно  $3,5^\circ$ . Диапазон пространственных частот спектра зависит от геометрии наблюдения и фокусного расстояния объектива.

На рис. 1 приведен пример спектра возвышений поверхности моря, который восстановлен из полученного ДОСА спектра изображения по формуле (1). ДОСА был установлен на берегу моря на высоте 8 м, угол визирования составлял  $25^\circ$ . Спектр представлен в координатах пространственная частота – угол направления волны относительно направления ветра. Кроме того, спектр помножен на величину  $k^2$ , так что фактически это спектр кривизны [6]. Центральная часть спектра в области высоких частот имеет “выемку”, которая обусловлена перспективными искажениями изображения при наклонном визировании. На рис. 2 и 3

представлены частотные и угловые характеристики дециметровых и сантиметровых волн с различным направлением распространения относительно ветра. Из этих данных можно сделать следующие предварительные выводы:



*Рис.1 Спектр возвышений поверхности моря (точнее, спектр кривизны), полученный с помощью ДОСА. По вертикали – спектральная плотность в условных единицах, по горизонтальным осям – пространственная частота поверхностной волны 1/см в линейном масштабе (длина волны меняется от 84 см до 2,2 см)) и угол распространения волны относительно направления ветра. Скорость ветра составляла 4 м/с на высоте 20м. “Выбросы” по краям спектра на низких частотах обусловлены средней яркостью поверхности моря*

1. Спектр кривизны сантиметровых волн с уменьшением длины волны (увеличением пространственной частоты) сначала падает, а потом растет. Такое поведение спектра согласуется с имеющимися данными экспериментов и с модельными представлениями [6, 7].

2. Экспериментальные спектры более узконаправленные, чем модельные.

3. Диаграмма направленности см волн почти не зависит от длины волны, как и для модельных спектров.

4. Предварительный анализ экспериментальных спектров для различных ветров показал, что в спектре дециметровых волн наблюдается интервал насыщения, когда интенсивность этих волн не зависит от скорости ветра, в то время как интенсивность капиллярных сантиметровых волн пропорциональна скорости ветра.

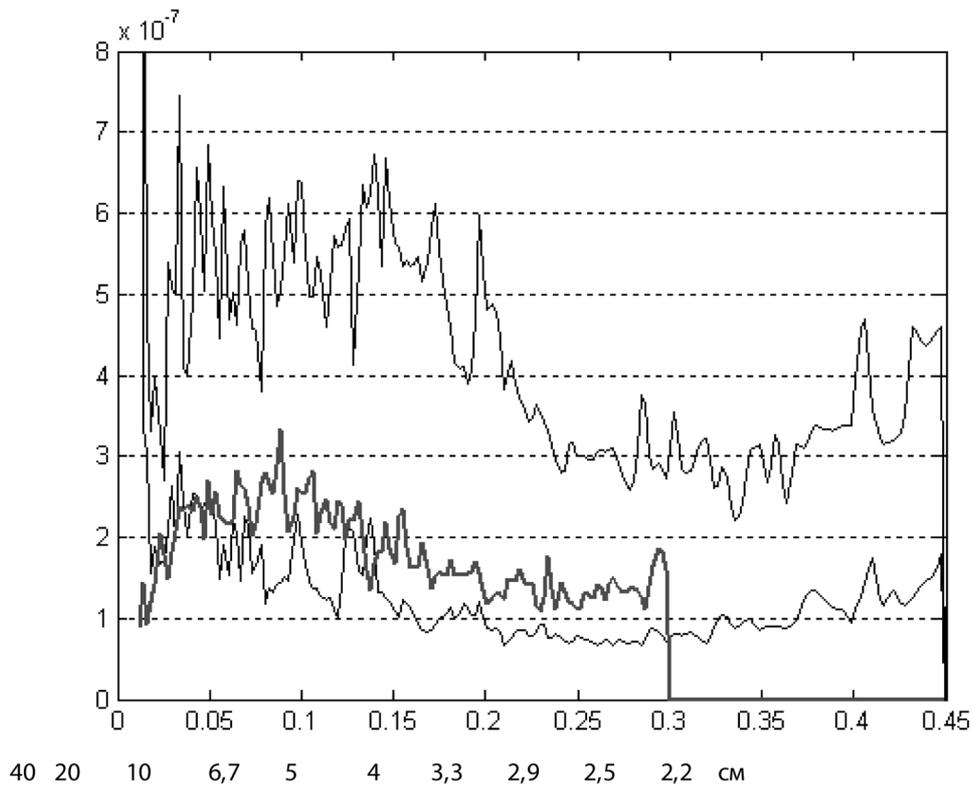


Рис. 2 Сечения спектра рис.1 по пространственной частоте для 3-х направлений распространения поверхностных волн относительно ветра. По горизонтали – пространственная частота  $1/\text{см}$  в линейном масштабе (длина волны от 84,3 см до 2,2 см)

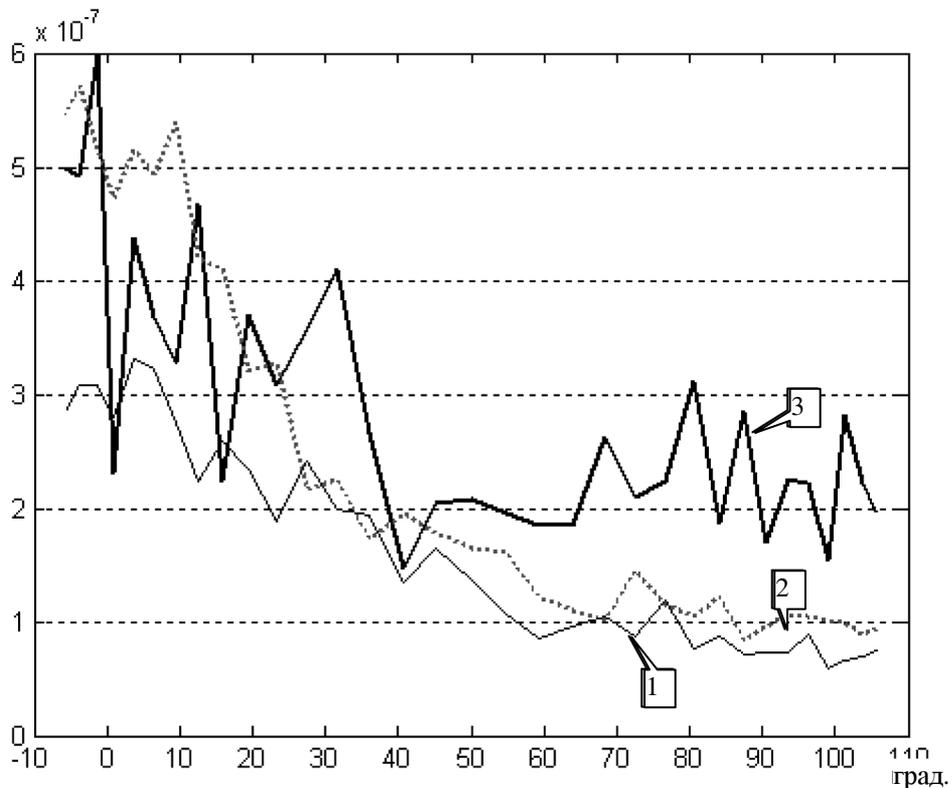


Рис.3 Угловые спектры волн различной длины: ряд 1 – длина волны 3,7 см, ряд 2 – длина волны 6,3 см, ряд 3 – длина волны 44 см. Углы отсчитываются относительно направления ветра. По вертикали – спектральная плотность кривизны в условных единицах.

Полученные данные о спектрах волнения являются предварительными; планируется продолжение исследований спектров волнения, в частности, набор статистики по спектрам волнения и расширение спектрального диапазона измеряемых спектров в область метровых волн и область коротких капиллярных волн до сантиметра и короче.

### Оптические панорамы морской поверхности

Для формирования оптических ДВИ-панорам (панорам в координатах дальность – время – интенсивность света) морской поверхности по оптическим профилям поверхности разработан прибор на основе так называемой ПЗС линейки [8, 9].

ПЗС линейка – оптическое устройство для регистрации профилей морской поверхности. Она состоит из объектива и линейки ПЗС-фотодиодов, расположенных в фокальной плоскости объектива. При установке на судне этим прибором регистрируются профили морской поверхности на расстоянии примерно 30м от судна до горизонта и часть неба с угловыми размерами несколько градусов.

Два таких устройства устанавливались на носу судна, чтобы регистрировать пространственно-временные изображения для двух направлений наблюдения. Как будет показано ниже, два таких изображения позволяют получить полную информацию о кинематических характеристиках длинных волн. Кроме того, так как оптический контраст волн падает с увеличением угла между направлением волны и направлением наблюдения (формула (1)), панорамы с разным направлением визирования позволяют зарегистрировать все длинные волны, существующие на морской поверхности.

Изображение линии горизонта на пространственно-временной панораме будет "извилистой" кривой из-за изменения угла  $\beta$  при качке судна. Для устранения влияния качки судна на пространственно-временные изображения предлагается отсчитывать начало пространственно-временных панорам от изображения горизонта. Положение точки горизонта определяется по перепаду яркости на горизонте.

Тогда при условиях  $x/h \gg 1$ ,  $v \ll 1$  а также, что высоты волн много меньше высоты установки ПЗС линейки над средним уровнем моря, будем иметь:

$$\Delta \approx -fh/x \cos^2 \beta \approx -fh/x, \quad (3)$$

где  $f$  - фокальное расстояние объектива,  $v$  - угол наблюдения,  $h$  - вертикальное расстояние между объективом и точкой на морской поверхности,  $x$  - горизонтальное расстояние вдоль линии наблюдения от объектива до точки на морской поверхности.

Координата  $D_u$  изображения точки на поверхности, отсчитываемая от изображения горизонта, не зависит от качки судна и обратно пропорциональна расстоянию  $x$  точки поверхности от судна. Этот способ "привязки" начала отсчета панорам к линии горизонта используется для коррекции исходных панорам, полученных с борта корабля и с берега.

Обработка оптических панорам для формирования скорректированного ДВИ - изображения морской поверхности заключается в разработке алгоритмов для выделения линии горизонта, устранения качки корабля и перспективных искажений изображения морской поверхности при наклонном визировании (формула (2)).

На рис. 4 представлено исходное пространственно-временное изображение морской поверхности, полученное во время корабельной экспедиции. Перепад яркости вверху панорамы – линия горизонта, которая случайным образом искривляется из-за качки корабля. Качка корабля и перспективные искажения изображения из-за наклонного визирования существенным образом искажают картину поверхности, превращая прямые фронты волн в кривые линии.

На рис. 5 приведены скорректированные оптические панорамы морской поверхности, полученные на НИС "Академик Штокман" с двух установленных рядом ПЗС линеек с разным

направлением визирования (азимутальный угол между направлениями визирования составлял около 60°). Панорамы “состыкованы” началами. Одна и та же система длинных волн отображается на панорамах в виде полос разной ориентацией, но с одним временным периодом. Длинные волны отображаются в виде системы прямых параллельных полос, что свидетельствует об эффективности алгоритма обработки исходных панорам.

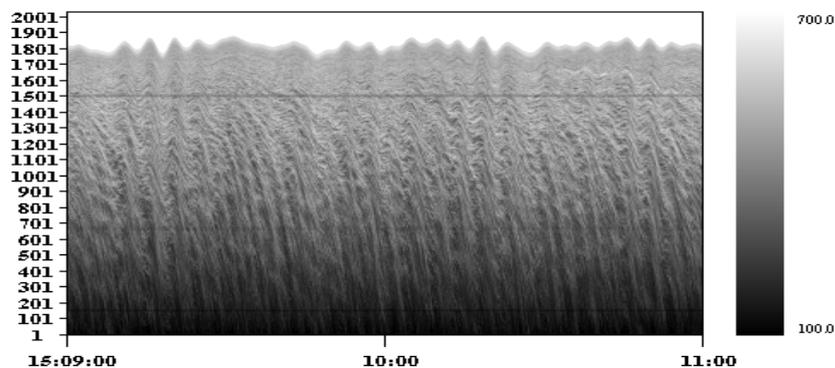


Рис. 4. Исходная оптическая панорама. По вертикали – пиксели ПЗС-линейки, по горизонтали – время. Яркость поверхности – в условных единицах в полутонной шкале. Извилистая линия сверху – изображение горизонта при качке корабля.  
НИС “Академик Штокман”, высота над уровнем моря 11 м.

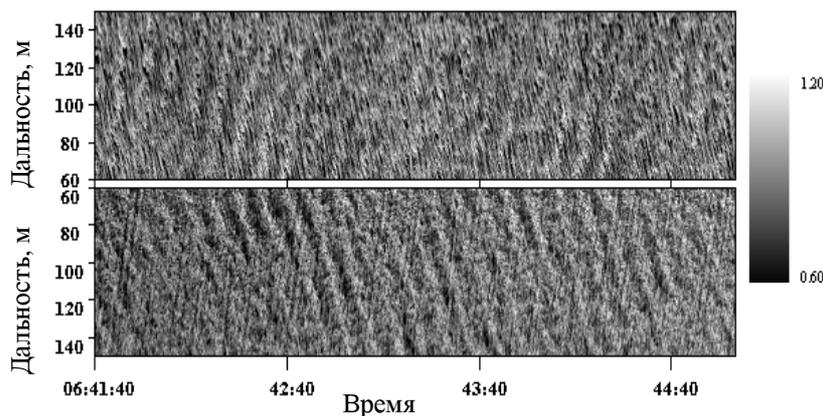


Рис. 5. Оптические панорамы морской поверхности, полученные с двух ПЗС – линеек с разным направлением визирования. Панорамы “состыкованы” началами. По вертикали – дальность в метрах, по горизонтали – время. Яркость поверхности – в условных единицах в полутонной шкале. На панорамах проявляется волна зыби, обгоняющая корабль.  
НИС “Ак. Штокман”

### Алгоритмы обработки пространственно-временных панорам морской поверхности для определения кинематических характеристик длинных волн

Длинные волны, существующие на морской поверхности, будут отображаться на ДВИ - панорамах в виде системы полос, период и наклон которых позволяют определить кинематические характеристики длинных волн. Ограничимся случаем, когда линейки установлены на неподвижном основании. Ориентация этих полос в координатах  $x, t$  (дальность, время) описывается уравнением:

$$x(\mathbf{k}l) - \omega t = const ,$$

где  $\mathbf{l}$  - единичный вектор, определяющий направление “луча” ПЗС линейки,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\mathbf{k}$ ,  $f$  - волновой вектор и временная частота длинной волны.

Очевидно, по одной панораме можно определить только  $\mathbf{k}\mathbf{l}$  и  $\omega$ . Временной период полос на панорамах (при постоянном  $x$ )  $T = 2\pi/\omega$ , произведение  $\mathbf{k}\mathbf{l} = \omega/\text{tg}\alpha$ , где  $\text{tg}\alpha$  - тангенс угла наклона полос к оси времени.

Для определения кинематических характеристик длинной волны (длины волны, скорости и направления распространения) необходимо привлекать дисперсионное соотношение для волн, либо, как уже отмечалось, регистрировать две панорамы с различными направлениями “лучей” ПЗС линеек.

Дисперсионное соотношение с учетом глубины моря и скорости течения имеет следующий вид:

$$\omega_d(k) = \sqrt{gk(1 + \gamma k^2/g)\text{th}(kd)} + kV_n, \quad (4)$$

где  $\gamma = \alpha/\rho = 70 \text{ см}^3/\text{с}^2$  ( $\alpha = 70 \text{ дин}/\text{см}$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$  – плотность воды),  $d$  – глубина моря,  $V_n$  - проекция скорости течения на направление распространения волны. В общем случае кроме скорости течения нужно учитывать и скорость ветрового сноса волн.

Тогда при  $\mathbf{k}\mathbf{l}$ , определенных по одной панораме, с привлечением дисперсионного соотношения (3) можно вычислить величину  $k(\omega)$  и отсюда определить угол между  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{l}$ , то есть определить направление волны. Очевидно, такой путь в принципе требует знания глубины моря и скорости течения и ветрового сноса. Для глубокого моря (глубина которого больше длины волны) для длинных гравитационных волн дисперсионное соотношение приводится к виду:

$$\omega_d(k) = \sqrt{gk} + kV_n.$$

Для двух панорам с направлениями визирования  $\mathbf{l}_1$  и  $\mathbf{l}_2$  имеем систему уравнений для определения координат волнового вектора  $\mathbf{k}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{k}\mathbf{l}_1 &= \omega/\text{tg}\alpha_1 \\ \mathbf{k}\mathbf{l}_2 &= \omega/\text{tg}\alpha_2, \end{aligned} \quad (5)$$

что позволяет определить полные кинематические характеристики длинной волны без привлечения информации о дисперсионном соотношении.

На рис. 6 приведены две панорамы, полученные на Узком молу, г. Феодосия, 23.06.08 с двух установленных рядом линеек ПЗС с различным направлением визирования. На панорамах отображается проходящая с моря волна зыби с периодом 2,34 сек. Длина волны, определенная двумя описанными выше способами по панорамам рис.6 получилась одинаковой и равной примерно 7,9 м, что является проверкой разработанных алгоритмов. Направление распространения волны – навстречу ПЗС линейкам.

Кроме изображения длинных волн на панорамах проявляются случайные наклонные темные полосы, контраст которых зависит от расстояния: с увеличением дальности контраст полос растет. Скорость этих полос, определенная по панорамам, была равна групповой скорости волн зыби. Судя по всему, эти полосы представляют собой полосы генерации короткомасштабных волн обусловленные групповой структурой волн зыби.

На рис. 7 представлены полученные с Узкого мола оптические панорамы в более “сжатом” масштабе по времени, чем панорамы на рис. 6. На панорамах наглядно проявляется групповая структура длинных волн, а также прохождение дрейфующего корабля через “лучи” линеек ПЗС и выглаженный след на поверхности моря.

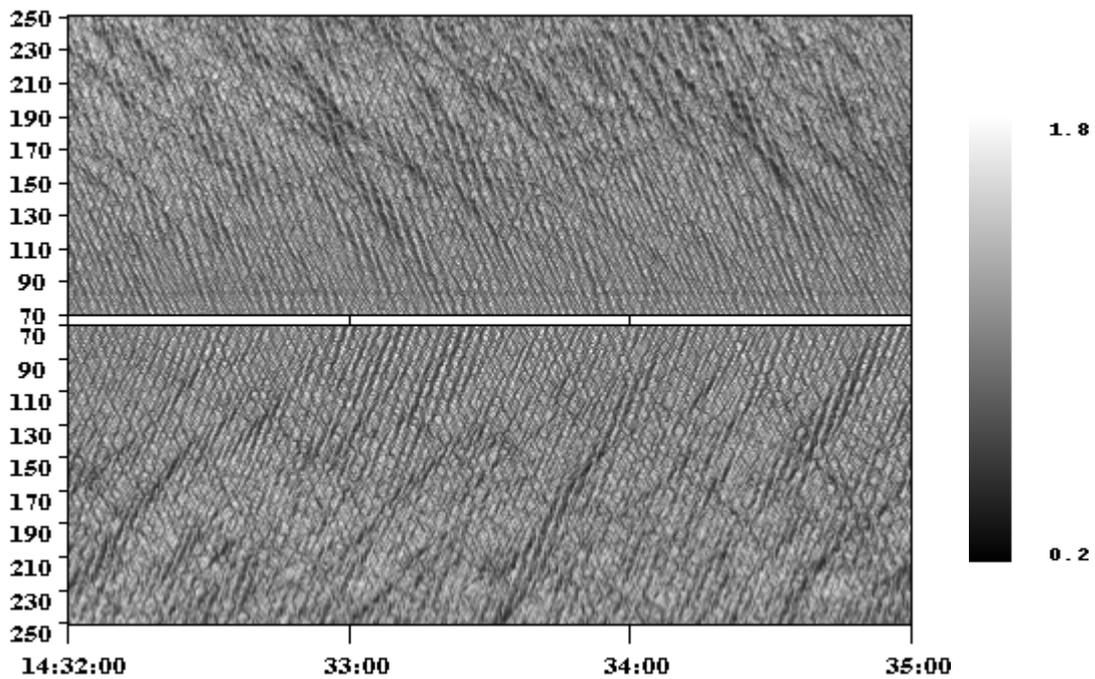


Рис. 6. Оптические панорамы морской поверхности, полученные с помощью ПЗС линеек с берега. Угол между направлениями линеек составлял  $40^\circ$ . Панорамы представлены в координатах дальность (по вертикали) от 70м до 250м – время. Яркость морской поверхности отображается в серой полутоновой шкале в условных единицах. Панорамы “состыкованы” началами по дальности. Феодосия, Узкий мол 23.06.08. Высота над уровнем моря 15 м

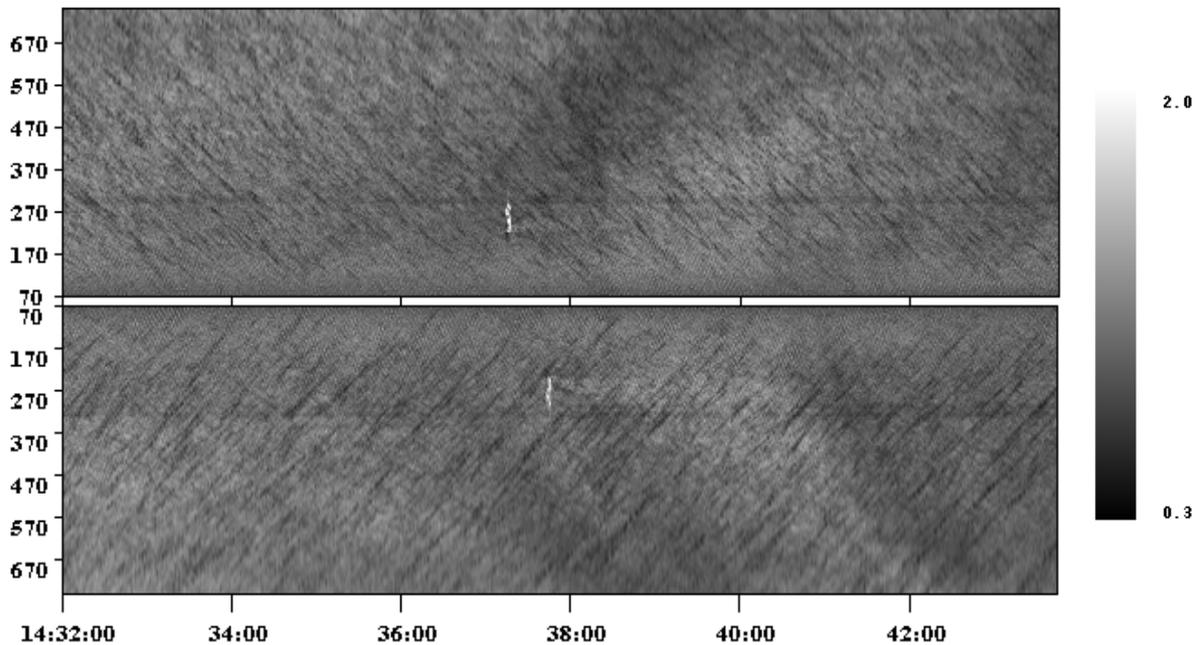


Рис. 7. Оптические панорамы в более “сжатом” по времени масштабе. Темные узкие полосы – групповая структура длинных волн. В районе 14:37:30 поле зрения линеек пересекло дрейфующее судно. По задержке между его изображениями на обеих линейках можно определить скорость и направление дрейфа. За судном “тянется” полоса выглаженного волнения, которая на обеих линейках выглядит светлее окружающего фона. Феодосия 23.06.08. Узкий мол.

## Спектральный анализ панорам

Энергетический спектр прямоугольного фрагмента панорамы поверхностных волн в рамках линейной модели (формулы (1), (2)) для полуплоскости  $\omega > 0$  описывается следующей формулой:

$$\langle |F|^2 \rangle(k, \omega) = \frac{|\nabla I|^2 T_a}{2} \frac{k_d^3(\omega)}{2\pi \omega_d'(k_d(\omega))} * \quad (6)$$

$$\int G_d(k_d \cos \varphi, k_d \sin \varphi) |F_x(k - k_d \cos(\varphi - \varphi_l))|^2 \cos^2(\varphi - \varphi_l) d\varphi$$

где  $|F|$  - модуль спектра Фурье фрагмента панорамы,  $k, \omega$  - пространственная и временная частоты,  $k_d(\omega)$  в зависимости от  $\omega$  определяется из дисперсионного уравнения ( $\omega = \omega_d(k_d)$ ),  $\omega_d'(k_d(\omega))$  - производная дисперсионного уравнения по пространственной частоте или групповая скорость волны с пространственной частотой  $k_d$ ,  $T_a$  - длительность анализируемого фрагмента панорамы,  $|F_x(k)|^2$  - квадрат модуля спектра прямоугольной функции, описывающей окно анализа по дальности,  $\varphi_l$  и  $\varphi_l$  - углы, определяющие направления оптического сечения и градиента яркости поверхности. При наблюдении под скользящими углами в противосолнечных направлениях градиент яркости поверхности будет ориентирован в направлении визирования, т.е. величины  $\varphi_l$  и  $\varphi_l$  будут совпадать.  $G_d(\mathbf{k})$  - спектр по направлениям волн, определяемый интенсивностью волны длиной  $1/k$  распространяющейся в направлении  $\mathbf{k}/k$ , который связан со спектром возвышений следующей формулой:

$$G(\mathbf{k}) = 0,5(G_d(\mathbf{k}) + G_d(-\mathbf{k})).$$

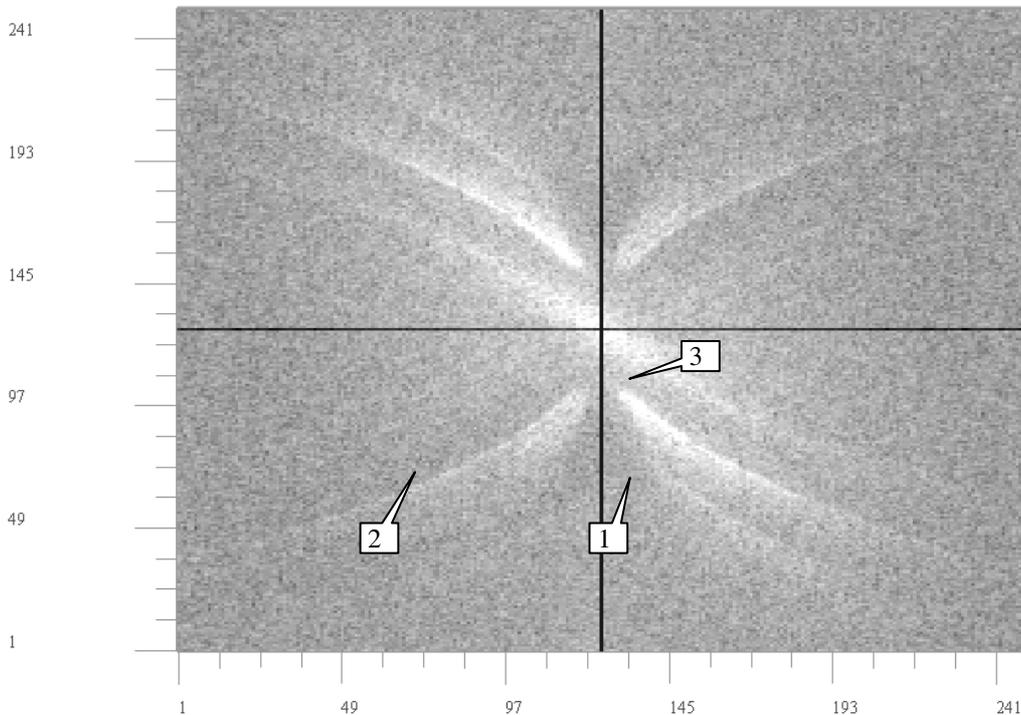


Рис. 8. Спектр прямоугольного фрагмента верхней панорамы рис. 6. Здесь 1 – спектр длинных волн, распространяющихся на наблюдателя, 2 – спектр отраженных от мола волн, которые распространяются от наблюдателя, и 3 – спектр темных полос на рис. 6, которые представляют собой полосы генерации короткомасштабных волн, обусловленные групповой структурой волн I. Феодосия, Узкий мол. 23.06.08.

Если на поверхности существует система волн с узким угловым спектром около направления  $\varphi_0$ , то спектр такой системы волн в координатах  $k, \omega$  будет сосредоточен вдоль “ветки” дисперсионного уравнения, определяемой выражением:

$$k - k_d(\omega) \cos(\varphi_0 - \varphi_l) = 0. \quad (7)$$

На рис. 8 представлен двумерный спектр Фурье фрагментов панорамы. Первоначальный фрагмент выбирается с помощью компьютерной мыши. Результирующий спектр вычисляется путем усреднения спектров нескольких фрагментов получающихся путем последовательного сдвигания первоначального фрагмента на определенное расстояние вдоль оси времени. На спектрах видно несколько систем длинных волн: ветка 1 соответствует волнам, распространяющимся с моря навстречу оптическим линейкам, а ветка 2 соответствует волнам, отраженным от мола, на котором были установлены оптические линейки. Наклонная полоса 3 проходящая через центр спектра представляет собой спектр полос, обусловленных групповой структуры волн длинных энергонесущих волн. Спектральный анализ оптических панорам позволяет “разделить” различные системы волн существующих на морской поверхности. Можно в окрестностях выбранной ветки проинтегрировать спектр по пространственной или временной частоте и получить временной спектр или пространственный спектр выбранной системы волн.

### Заключение

Создан оптический корабельный комплекс для исследования волнения моря, включающий в себя некогерентный спектральный анализатор ДОСА и две ПЗС линейки для регистрации оптических панорам морской поверхности для двух направлений наблюдения. Разработана теория образования оптических ДВИ-панорам морской поверхности (изображения в координатах дальность - время - интенсивность света), конструируемых по оптическим профилям морской поверхности и предложен метод формирования панорам, позволяющий устранить влияние качки корабля при регистрации панорам с борта корабля.

Приведены предварительные результаты обработки данных экспедиции 2008 г., которая проводилась на Черном море в г. Феодосия, которые позволили получить новые сведения о морском волнении.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 08-05-00195-а, 08-05-00252-а, НШ-1244.2008.2, 07-05-00125, 07-05-12011-офи).

### Литература

1. *Chapman R.D. and Irani G.B.* Errors in estimating slope spectra from wave images // *Applied Optics*, 1981. V. 20. № 20. P.3645-3652.
2. *Зуйкова Э.М., А.Г. Лучинин, В.И. Титов.* Определение характеристик пространственно - временных спектров волнения по оптическому изображению поверхности моря // *Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*, 1985. Т.21. № 10. С.1095-1102.
3. *Баханов В.В., Э.М. Зуйкова, О.Н. Кемарская, В.И. Титов.* Определение спектров волнения по оптическому изображению морской поверхности // *Известия вузов. Радиофизика*, 2006. Т. XLIX. № 1. С.53-63.
4. *Bakhanov V.V. et al.* A computer ship complex of remote sensing for investigation of ocean subsurface processes // *Black Sea`92 Proceedings*, Varna, Bulgaria, 1992. P.24-26.
5. *Titov V.I. et al.* Investigation of variations of long surface wave parameters by optical technique during JUSREX 1992 // *IGARSS`94 Proceedings*, Pasadena, USA, 1994. P.759.
6. *Bernd Jane, Klaus S. Riemer.* Two-dimensional wave number spectra of small-scale water surface waves // *Journ. of Geophys. Res.* 1990. V.95. NO C 7. P.11,531 – 11,546.

7. *Elfouhaily T., B. Chapron, and A. Katsaros.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // *Journ. of Geophys. Res.* 1997. V.102. NO C7. P.15,781 – 15,796.

8. *Баханов В.В., Браво-Животовский Д.М., Зуйкова Э.М., Кемарская О.Н., Титов В.И.* Методы диагностики спектрально-кинематических характеристик поверхностного волнения по оптическим изображениям поверхности моря // *Сб. Проявление глубинных процессов на морской поверхности.* Н.Новгород, 2004. С.102-110.

9. *Баханов В.В., Э.М. Зуйкова, О.Н. Кемарская, В.И. Титов.* Диагностика спектрально-кинематических характеристик длинных поверхностных волн по оптическим изображениям поверхности моря // *Препринт № 775.* издательства Института прикладной физики РАН, 2008. 20 с.

## **Determination of spectral – kinematic characteristics of sea waves from sea surface images**

**V.V. Bakhanov, E.M. Zuikova, O.N. Kemarskaja, V.I. Titov, J.I. Troitzkaya**

Institute of Applied Physics of RAS  
603950, Nizhny Novgorod, Ul'yanova Str., 46

The ship complex of optical devices for remote sensing of sea surface waves for wide diapason of wavelength from centimeters to long energy surface waves was created. The short waves are analyzed by the optical spectrumanalyzer and kinematics parameters of long waves are determined from optical RTI images (range-time-intensity) of sea surface. The theory of formation of optical RTI images created from optical profiles of sea surface is developed and method for formation of RTI images permitted to remove influence of ships roll is proposed. The original device for recoding of RTI images using the linear array of CCD-photodiodes is created. The preliminary results of sea surface wave's investigations with optical devices for wide diapason of wavelength and new data about twodimensional spectra of sea waves are presented.

**Keywords:** optics of ocean, sea waves, spectral analysis, image processing, remote sensing.