

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

**Титов В.И., Баханов В.В., Зуйкова Э.М., Лучинин А.Г.**

Институт прикладной физики РАН,  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

[titov@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:titov@hydro.appl.sci-nnov.ru)

## Направления исследований:

1. Разработка оптических методов исследования поверхностного волнения для волн длиной от миллиметров до сотен метров:
  - а) определение 2D и 3D спектров уклонов волн по изображению взволнованной поверхности с помощью оптических спектраллизаторов на некогерентном свете;
  - б) методы, основанные на анализе пространственно – временных изображений водной поверхности (оптических панорам).
2. Дистанционное зондирование прибрежной зоны:
  - а) Исследование ветровых полей по оптическим панорамам водной поверхности;
  - б) Определение поверхностных течений;
  - в) Исследование вихрей, корабельных волн и корабельных следов, нефтяных slickов;
3. Создание комплекса оптических приборов для дистанционного зондирования поверхности моря.

## Пространственно – временные изображения морской поверхности

Разработан метод построения крупномасштабных ПВ-изображений морской поверхности по оптическим сечениям поверхности при скользящих углах наблюдения. Создан макет оптического устройства на основе ПЗС (ССТ) – линейки. ПВ –изображения позволили выявить новые особенности на морской поверхности. Основной механизм, определяющий видимость объектов на поверхности (волн, сликов, проявлений ветровых потоков) при скользящих углах наблюдения – затенение уклонов волн. Разработаны принципы определения кинематических характеристик объектов по ПВ – изображениям. Два ПВ –изображения с различным направлением наблюдения позволяют получить полную информацию о кинематических характеристиках волн, сликов и т.д..

### Характеристики оптической системы

Полоса обзора: до 20-30 км  
 Разрешение: 2m – 50 m  
 Частота кадров: 20 Hz;  
 Частота АЦП: 30 kHz;  
 Количество точек в сечении: 2000  
 Разработан пакет программ для коррекции перспективных искажений, формирования и обработки ПВ –изображений.



ПВ-изображение и дисперсионное уравнение

$$kl = \omega / \operatorname{tg} \alpha \quad \omega_d(k) = \sqrt{gk \operatorname{th}(kd)} + kV_n$$

Два ПВ-изображения с различными направлениями наблюдения

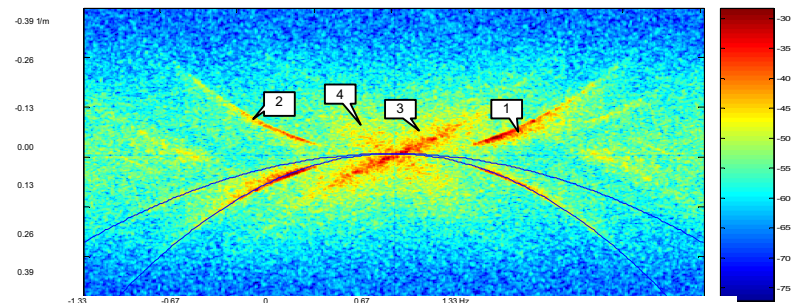
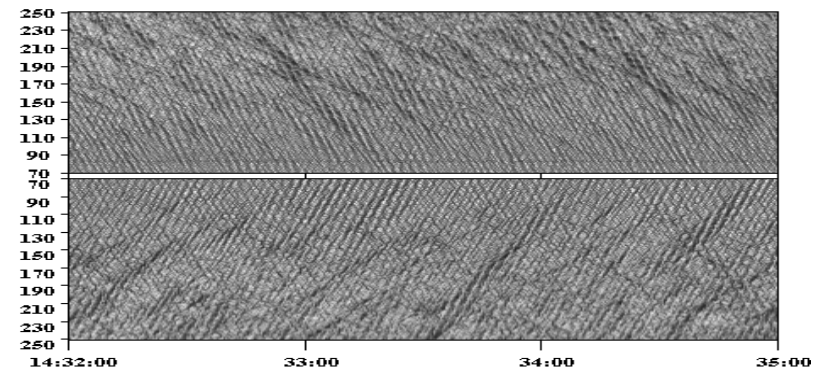
$$kl_1 = \omega / \operatorname{tg} \alpha_1 \quad kl_2 = \omega / \operatorname{tg} \alpha_2$$

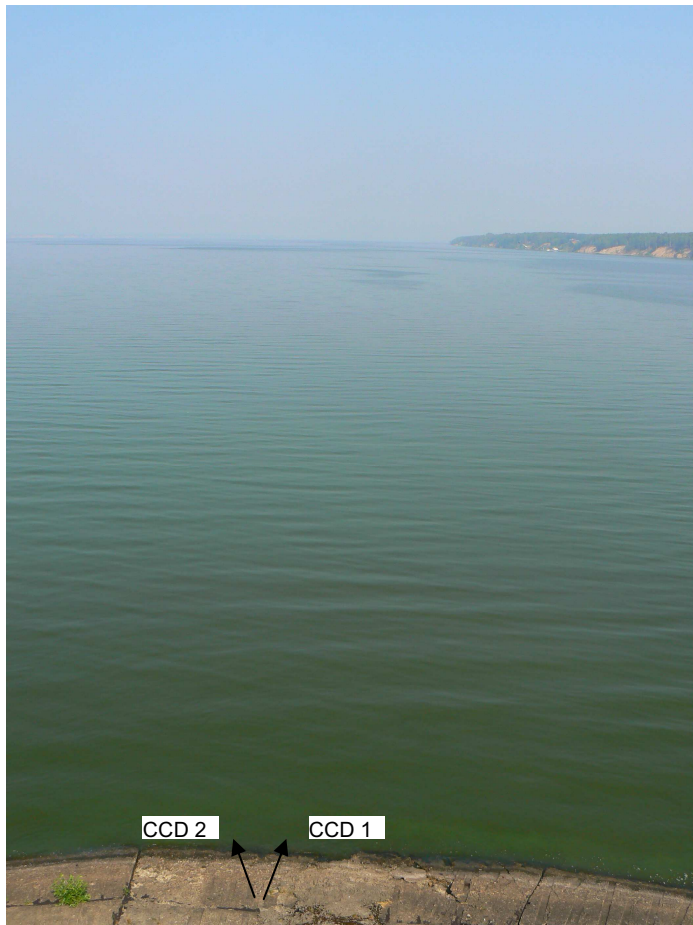
Оптические ПВ-изображения поверхности моря для двух направлений наблюдения. Пирс, высота 15 м. По вертикали – дальность, по горизонтали – время. Здесь видна длинная волна, распространяющаяся с моря, обратная волна, а также наклонные темные полосы, контраст которых увеличивается к горизонту. Эти полосы – проявление групповой структуры длинных волн.

Спектр ПВ-изображений волн с узкой угловой диаграммой направленности в координатах  $k, \omega$  будет сосредоточен вдоль кривой, определяемой выражением:

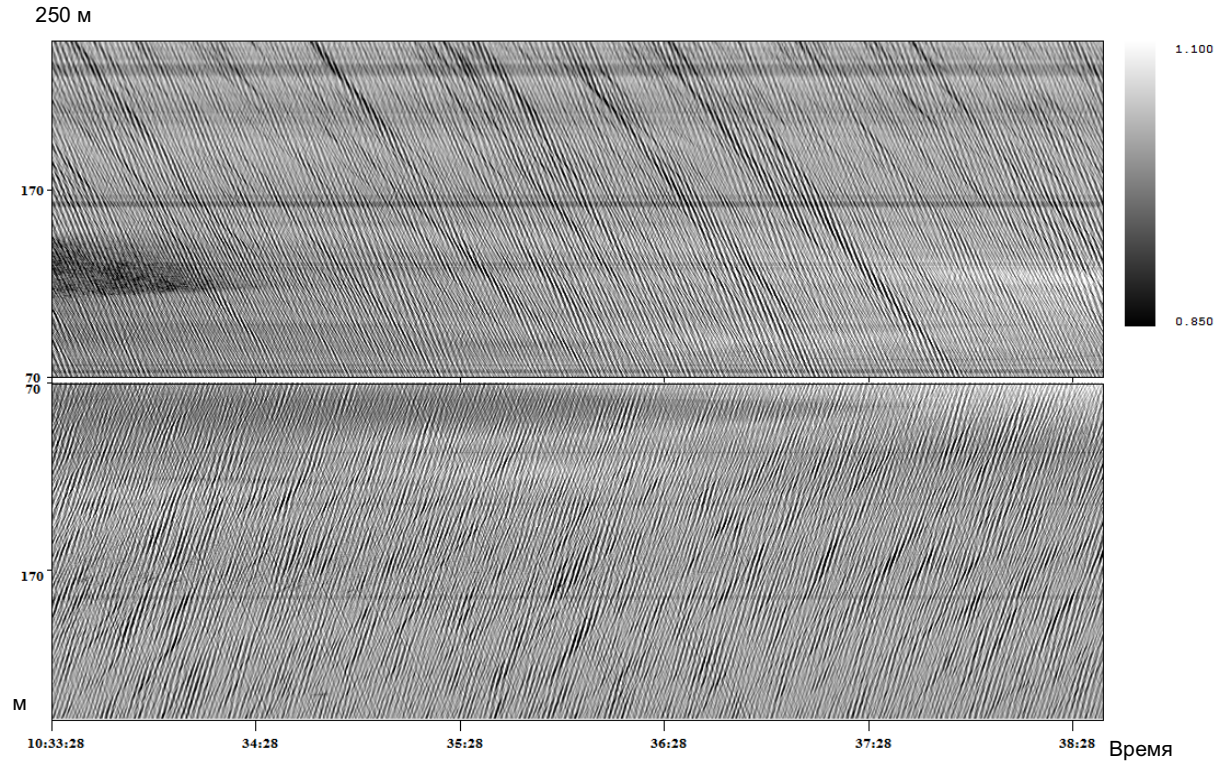
$$k - k_d(\omega) \cos \varphi_0 = 0$$

Спектр в координатах пространственная частота (вертикальная ось) – временная частота. 1 – спектр длинных волн, распространяющихся с моря, 2 – спектр “встречных” волн, 3 и 4 – спектры темных полос, являющихся проявлением групповой структуры волн. Особенности волнени



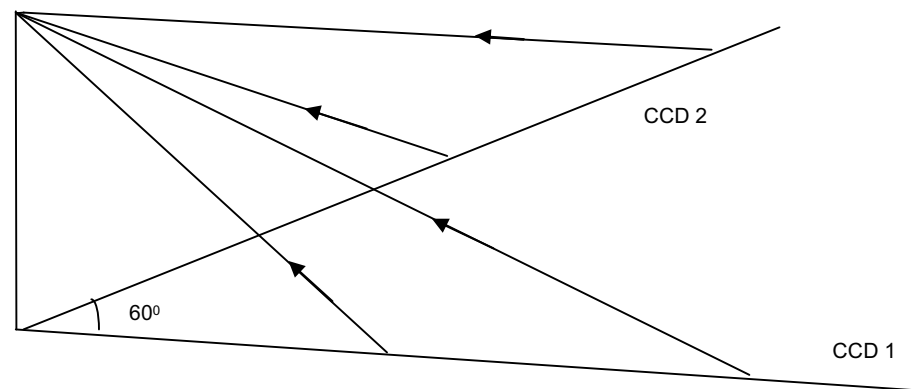


Горьковское море 22.07.2010.  
 Маяк, высота 12 м. Слабое волнение.



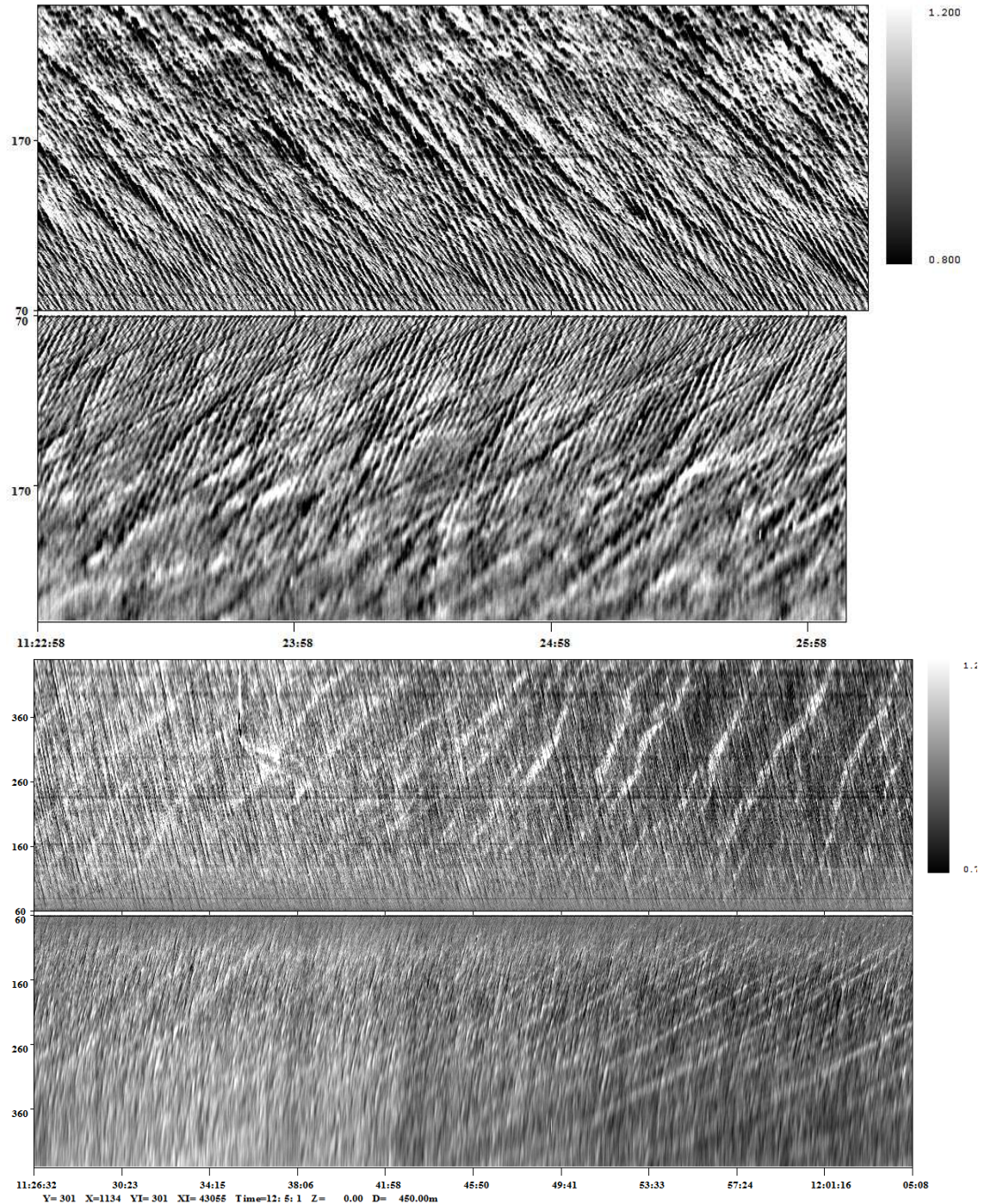
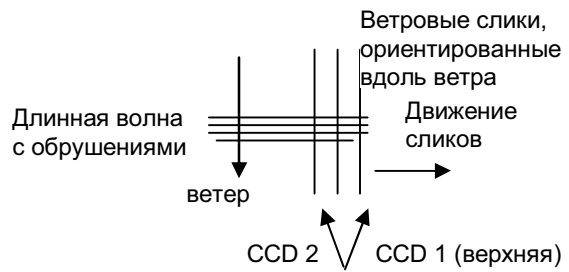
Оптические панорамы поверхности. По вертикали – дальность, по горизонтали – время. Панорамы для двух направлений наблюдения “состыкованы” началами.

Схема наблюдения

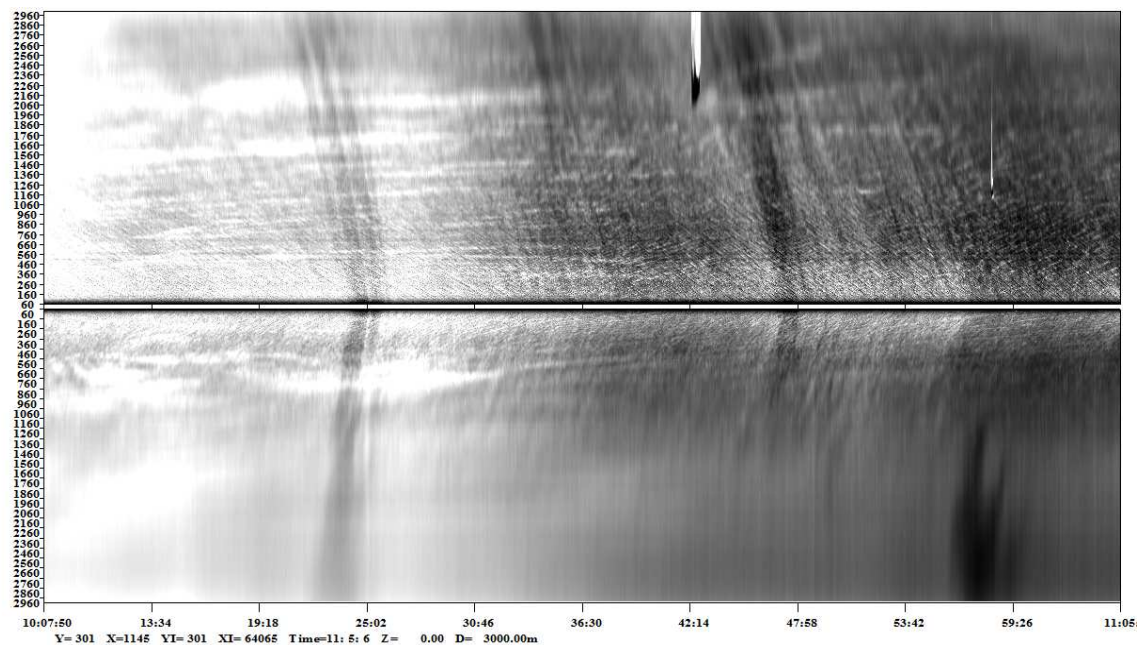




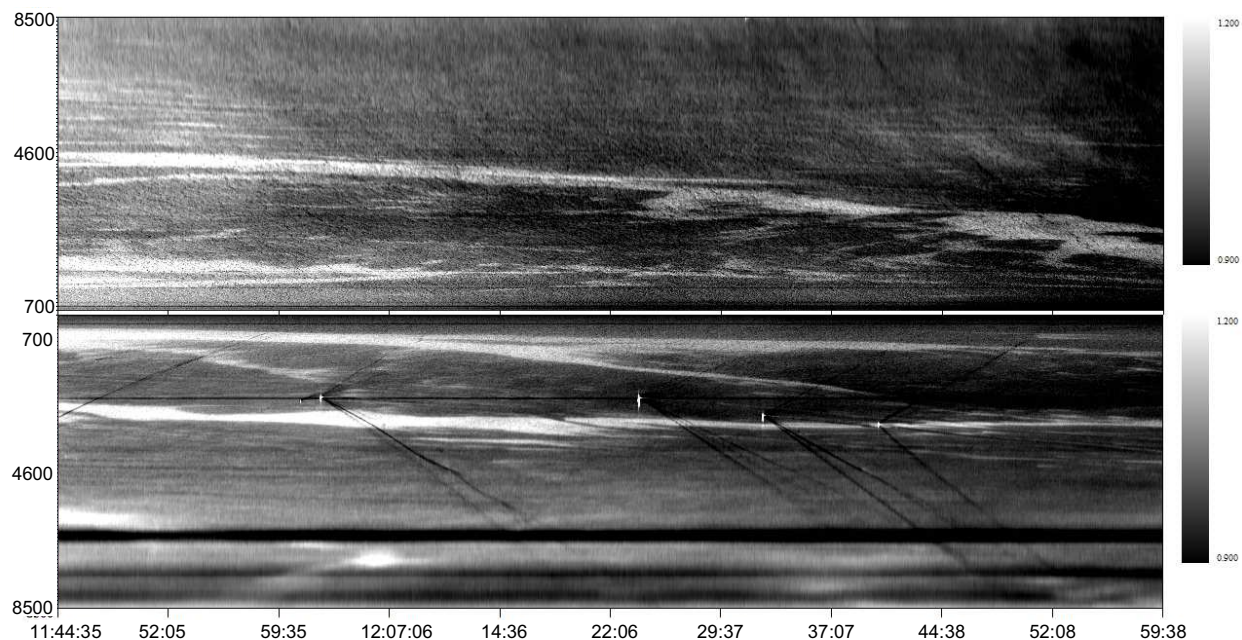
Горьковское море. 11.07.2010. Маяк, высота 12 м.  
 Определение поверхностного течения по полосам Ленгмюра.



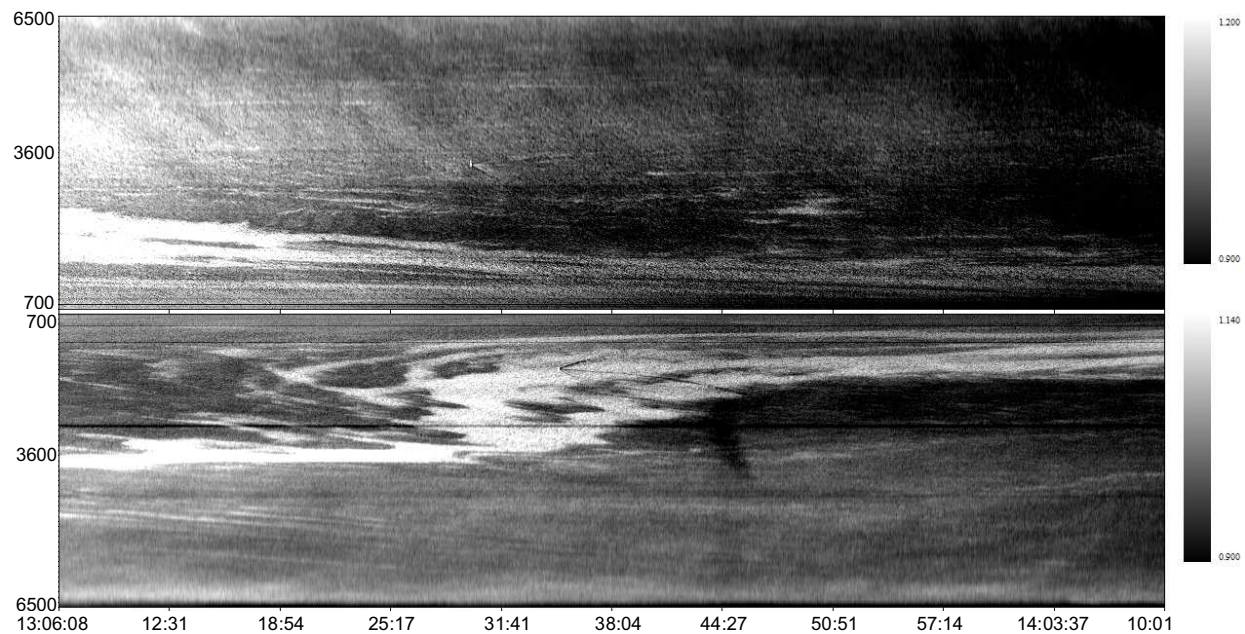
## Исследование ветрового поля над морской поверхностью по оптическим панорамам



Оптические панорамы, по вертикали – расстояние, по горизонтали – время.  
Горьковское море. Маяк, высота 12 м. Яркость поверхности – в условной “серой”  
шкале. “Быстрые” полосы – проявления ветровых фронтов на поверхности моря.  
Основной механизм видимости волн при скользящих углах наблюдения – затенения  
склонов волн. Стики на поверхности выглядят ярче, а генерации волнения – темнее.

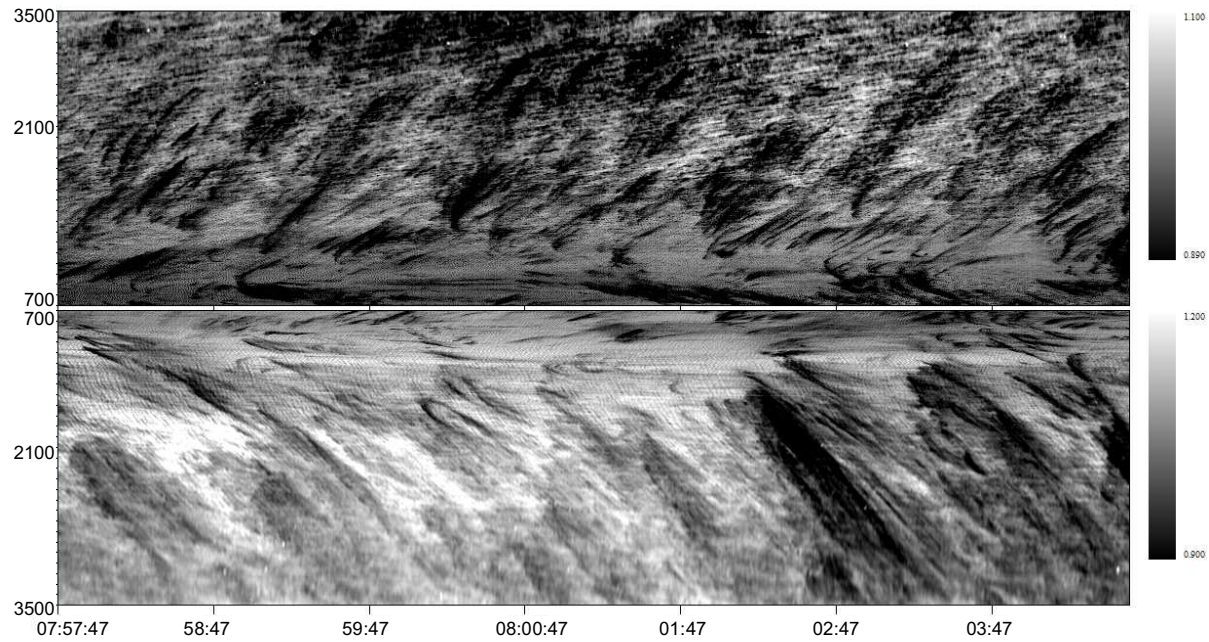


Оптические панорамы, по вертикали – расстояние, по горизонтали – время.  
 Черное море. Феодосия, мыс Илья, высота 100 м.  
 На нижней панораме – суда и корабельные волны. Как правило, наблюдаются две волны от носа и от кормы судна, распространяющиеся с разной лучевой скоростью. Однако, иногда может наблюдаться система из трех корабельных волн.  
 На верхней панораме – начало формирования вихря.  
 Большая высота установки оптической системы позволяет формировать панорамы шириной десятки километров.

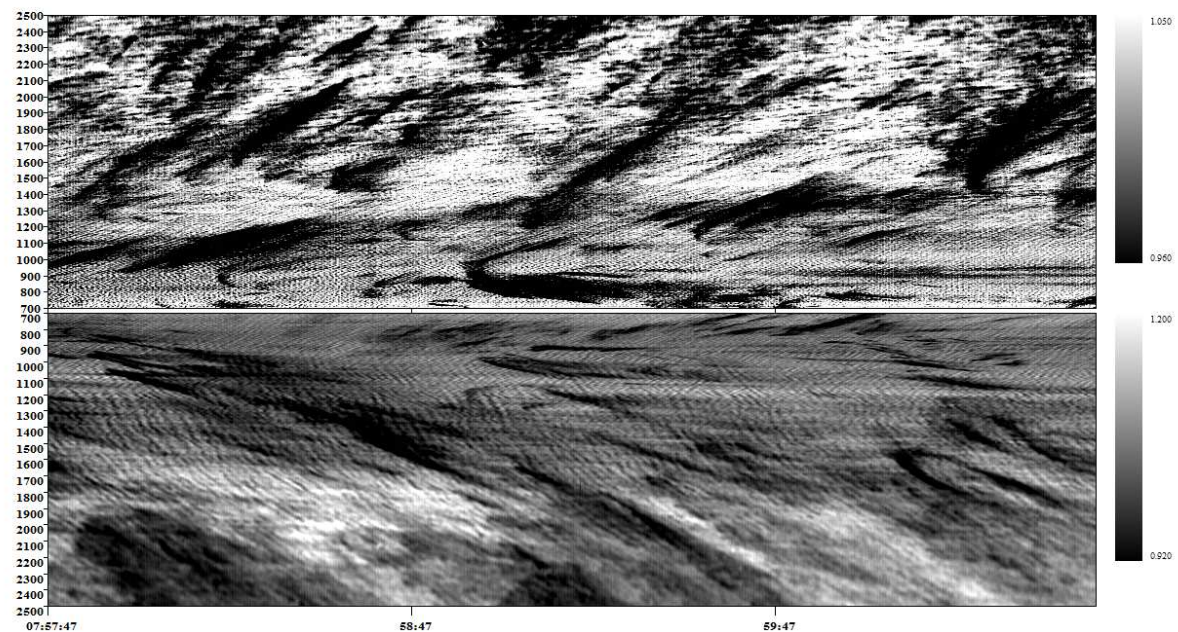


Оптические панорамы, по вертикали – расстояние, по горизонтали – время.  
 Феодосия, мыс Илья, высота 100 м.  
 На нижней панораме – проявление приповерхностного ветрового вихря. Диаметр вихря – около 3 км, скорость движения – 5 км/час. На верхней панораме и на нижней в центре вихря – судно.

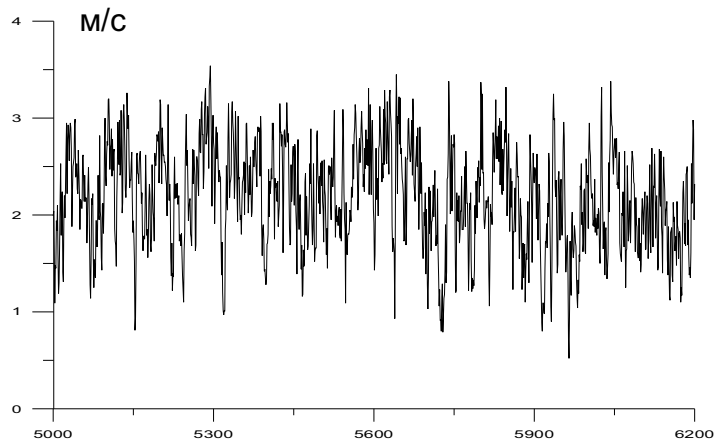




Оптические панорамы, по вертикали – расстояние, по горизонтали – время.  
Черное море. Феодосия, мыс Илья, высота 100 м.  
Катабатический ветер с гор (поток ветра, обусловленный разностью температур).



Оптические панорамы, по вертикали – расстояние, по горизонтали – время.  
Феодосия, мыс Илья, высота 100 м.  
Катабатический ветер с гор (поток ветра, обусловленный разностью температур).  
Увеличенный фрагмент предыдущего рисунка. Вблизи берега ветер меняет  
направление на противоположное.



Скорость ветра в м/с в месте установки оптического устройства

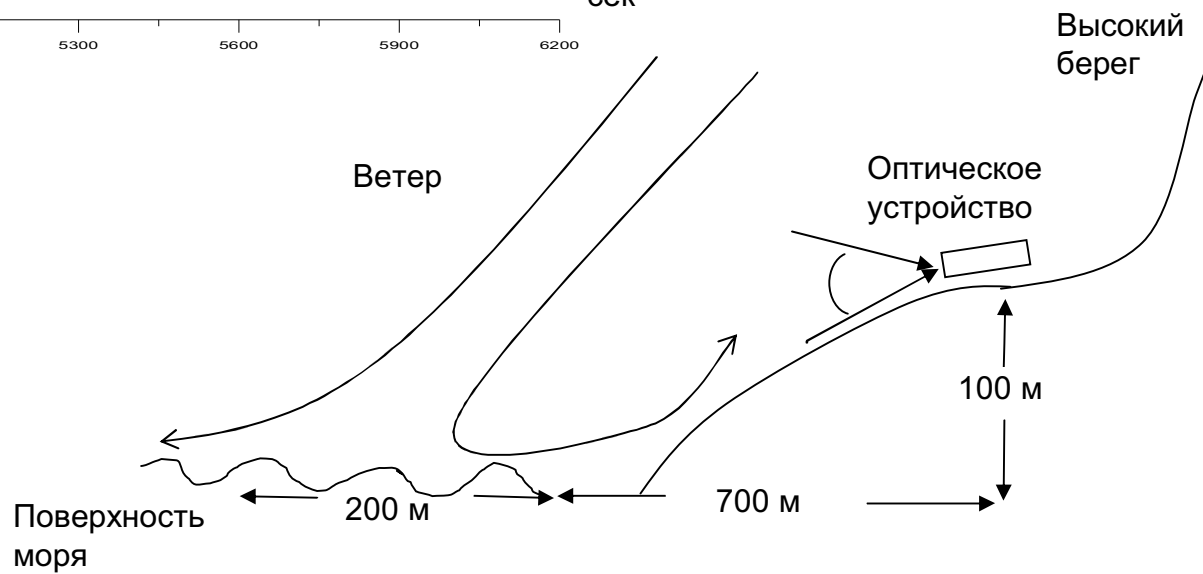
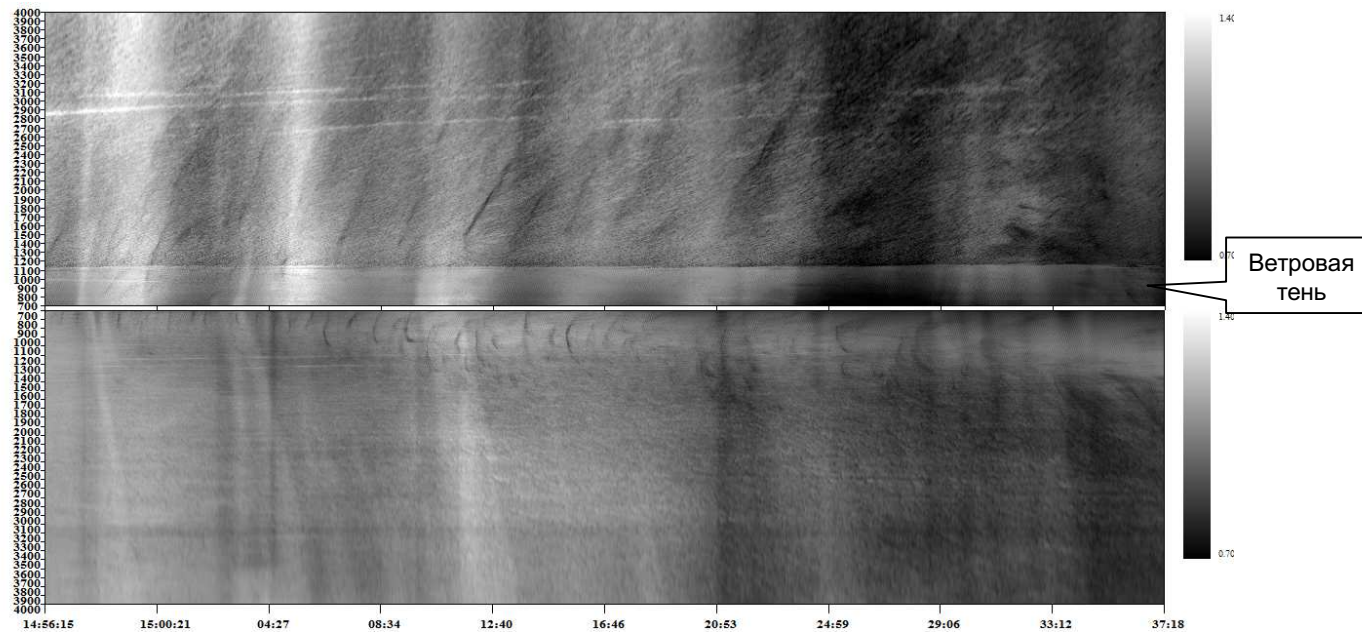


Схема нисходящего ветрового потока. Вблизи берега ветер делится на два потока с противоположным направлением ветра.



Оптические панорамы, по вертикали – расстояние, по горизонтали – время.  
 Феодосия, мыс Илья, высота 100 м.  
 Скорость ветра падает и около берега образуется полоса “ветровой тени”.

## Восстановление скорости ветра по яркости поверхности моря

Средняя яркость поверхности моря с учетом затенения определяется выражением:

$$I = \int I_s(\boldsymbol{\eta}) W_v(\boldsymbol{\eta}) d\boldsymbol{\eta}$$

$\boldsymbol{\eta} = \left( \frac{\partial \xi}{\partial x}, \frac{\partial \xi}{\partial y} \right)$  - вектор уклонов волн,  $W_v(\boldsymbol{\eta})$  - распределение видимых уклонов поверхности:

$$W_v(\eta_x, \eta_y) = W_{vx}(\eta_x) W_y(\eta_y)$$

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

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

$W_x$  и  $W_y$  - гауссовы функции распределения уклонов по осям  $x$  и  $y$ ,  $\theta$  - угол падения.

Яркость поверхности будет равна произведению коэффициента отражения Френеля на яркость неба:  $I_s = \Gamma I_{sky}$

Для ясного неба (наблюдение вне солнечной дорожки), либо неба, полностью покрытого облаками, яркость поверхности можно разложить в ряд по степеням уклонов волн:

$$I_s = I(0) + I' \eta_x + \frac{1}{2} I'' \eta_x^2$$

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

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

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

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

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

## Заключение

1. Разработаны методы создания крупномасштабных оптических пространственно – временных изображений (ПВ-изображений) водной поверхности при скользящих углах наблюдения.
2. Создана оптическая система для мониторинга прибрежной зоны и внутренних водоемов в полосе до нескольких десятков километров, которая может устанавливаться на берегу, судне или самолете;
3. Разработаны принципы восстановления кинематических характеристик объектов на поверхности моря (поверхностных волн, сликов и т.д.) по их ПВ-изображениям.
4. Натурные эксперименты показали наличие проявлений ветровой структуры на поверхности моря, рек и внутреннего водохранилища (ветровых фронтов, кататических ветровых потоков, турбулентности поля ветра). Эти проявления можно выявить благодаря их пространственной структуре и большой скорости распространения.
5. Разработаны методы определения характеристик приводного ветра (скорости, пространственной структуры ветра) по его проявлениям на водной поверхности.

Работа проведена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований проекты 11-05-97045-р\_поволжье\_а, 11-05-97027-р\_поволжье\_а, 11-05-97022-р\_поволжье\_а, 11-05-00384-а, 10-05-00101-а.