



# ИЗМЕРЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БПЛА) ДЛЯ ЗАДАЧ ОКЕАНОЛОГИИ: НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

**Кубряков А.А. , Лишаев П.Н., Станичный  
С.В., Чепыженко А.И., Кубрякова Е.А.,  
Алескерова А.А., Латушкин А.С., Кудинов  
О.Б.**

*Морской Гидрофизический Институт РАН, Севастополь*

Семнадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы  
дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ  
Москва, 2019

Бурное развитие электроники дало возможность резко увеличить качество и удешевить производство беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и сделать их доступными для широкого круга пользователей.

БПЛА позволяют получить информацию о состоянии поверхности океана **с высоким пространственным разрешением (<1 см) и достаточно широким охватом (около 1 км)**

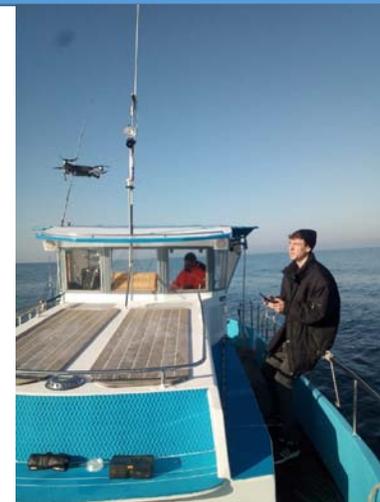
БПЛА позволяют осуществлять видеосъёмку, т.е. наблюдать эволюцию гидрофизических процессов с **крайне высоким временным разрешением в 1/24 с**

**Цель настоящей работы:** продемонстрировать некоторые возможности измерений БПЛА для исследований гидрофизических процессов в морской среде

# Данные и методы

Работа основана на измерениях **DJI MAVIC PRO/DUO**  
**DJI MAVIC 2 ENTERPRISE DUO**

DJI MAVIC PRO	
Масса (с аккумулятором, пропеллерами)	734 г
Максимальная скорость полета	65 км/ч
Максимальная высота подъема	500 м
Максимальное время полета	27 мин
Спутниковая система позиционирования	GPS/GLONASS
Точность позиционирования	Вертикаль: +/- 0.1 м Горизонталь: +/- 0.3 м
FOV	78.8° 26 мм
Максимальный размер кадра фотосъемки	4000x3000 px



Измерения осуществлялись с суши, с маломерных судов, в том числе резиновой лодки



## Контактные измерения

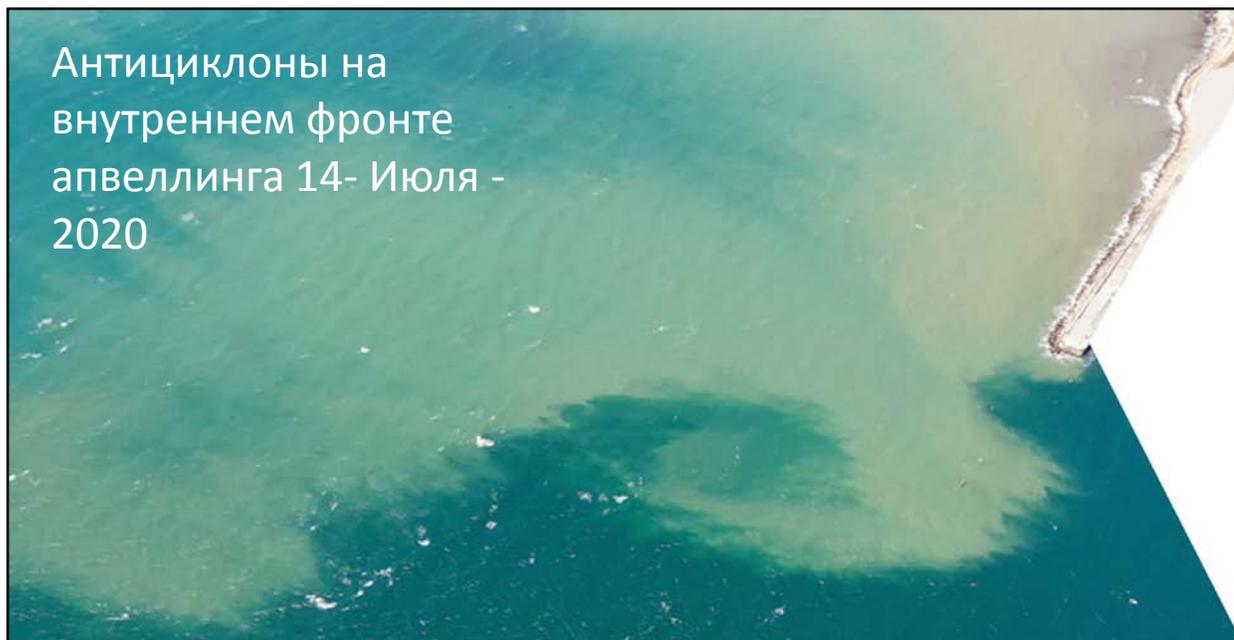
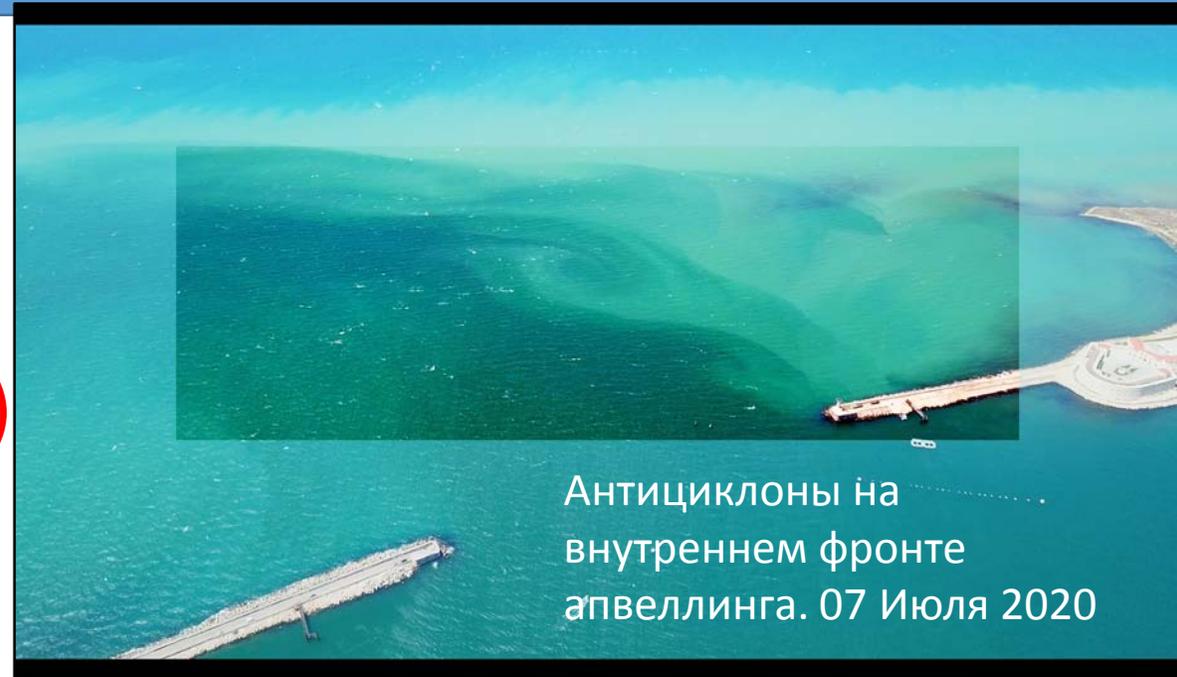
Использовались данные контактных измерений о температуре, солёности, концентрации взвеси и растворенного органического вещества по измерениям мультипараметрического зонда RBR и «КОНДОР» (<http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> )

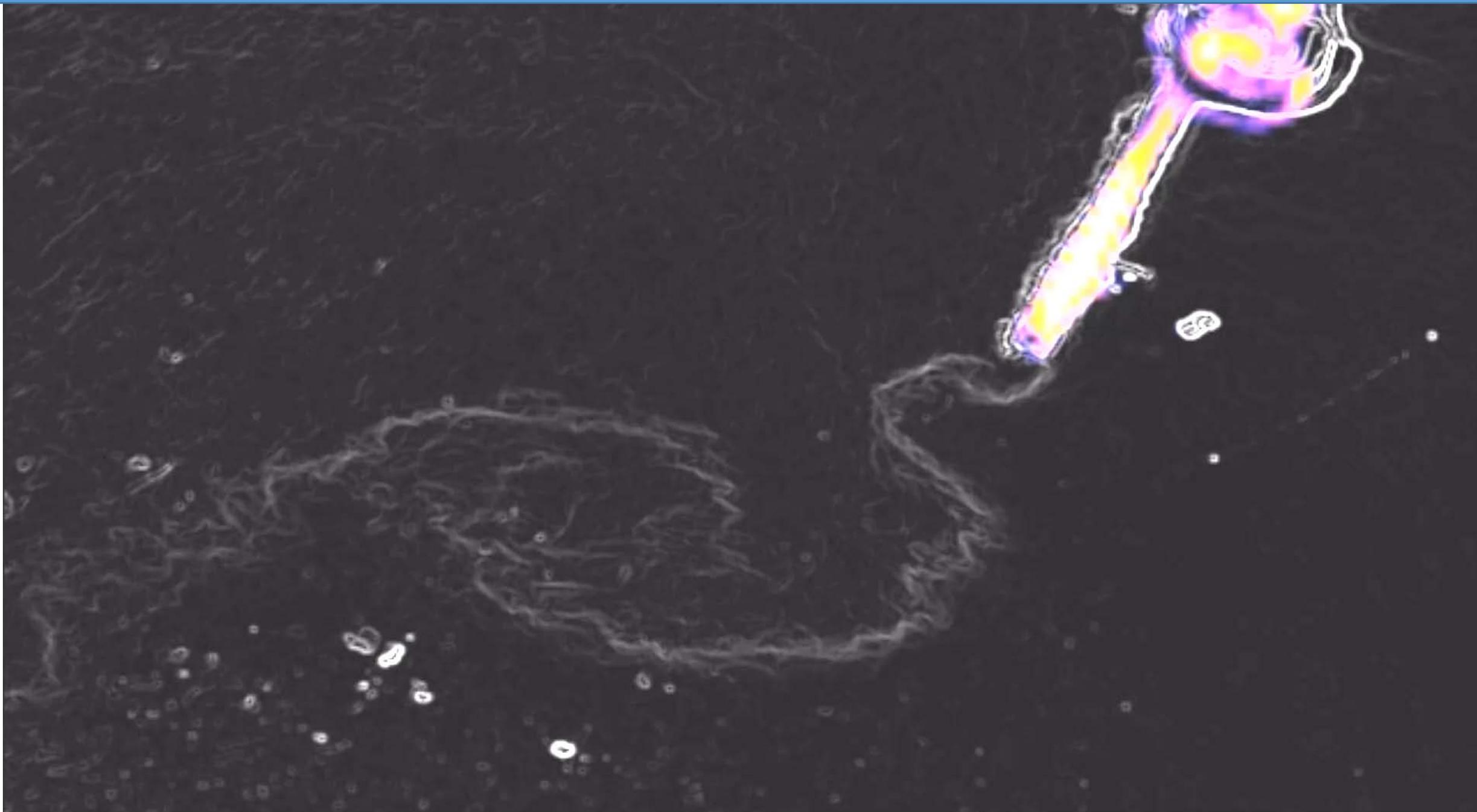
# 1. Субмезомасштабная динамика

14 июля 2020



Вихри на фронте апвеллинга по наблюдениям БПЛА



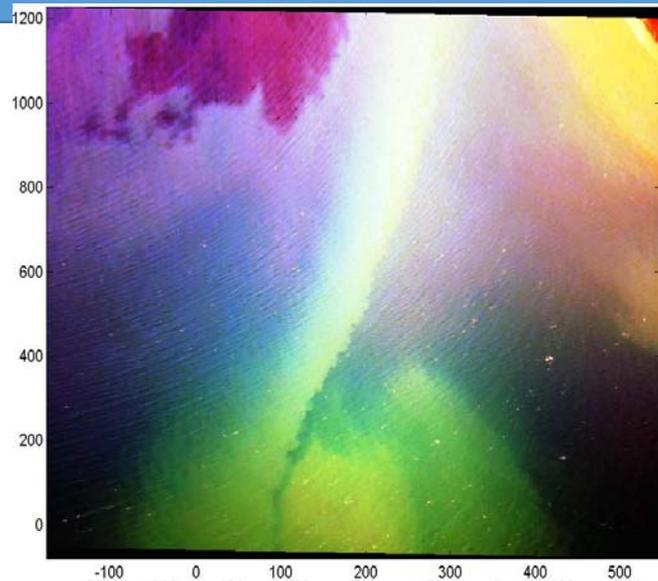




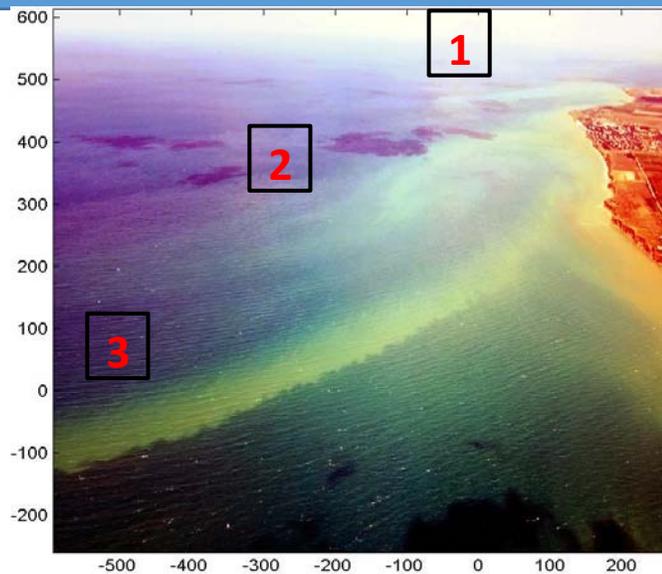
Вихрь вид сбоку



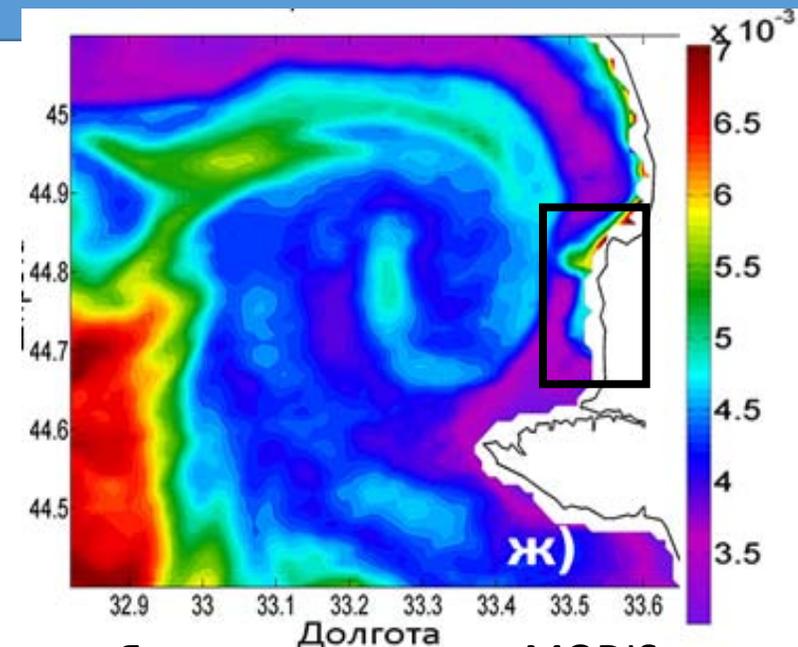
## Структура вихря по данным БПЛА



Вихрь вид спереди



В момент съемки наблюдалась серия из 3 вихрей



Яркость по данным MODIS

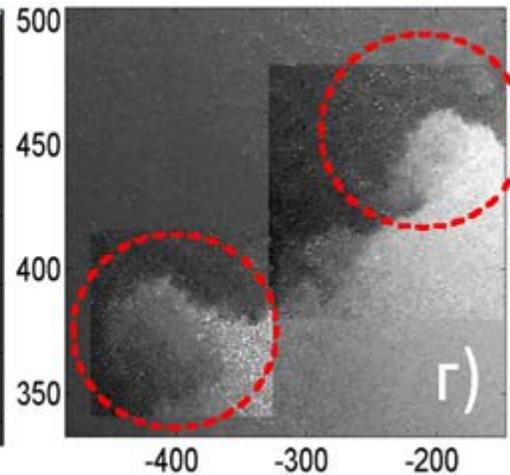
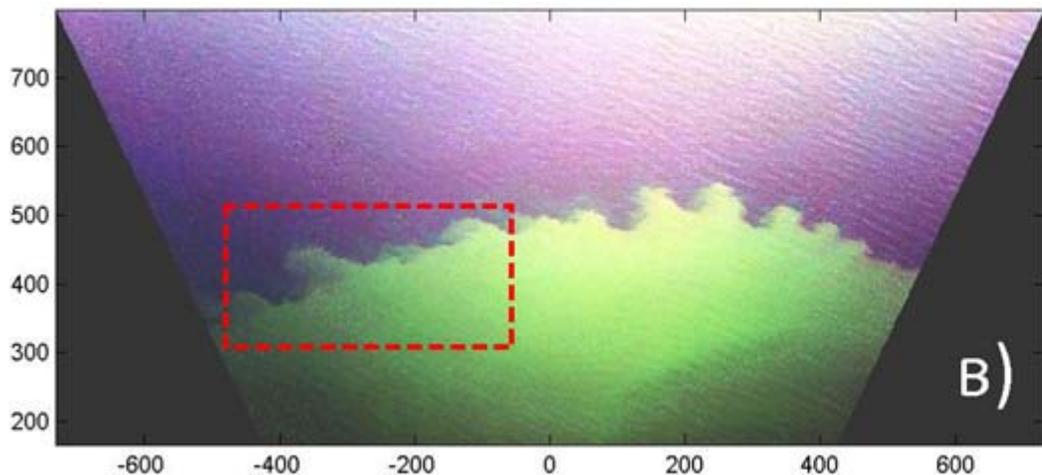


Структура ножки вихря

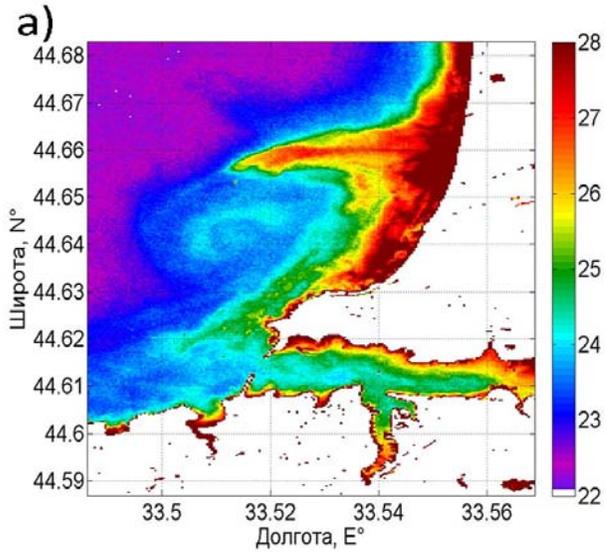
Циклон диаметром около 1 км переносит взвесь от берега на расстояние 2 км и аккумулируется её в своем ядре.

На периферии кросс-шельфового потока к вихрю выделяются ряд неустойчивостей

Во время экспедиции 25 октября 2019 г по БПЛА был обнаружен вихрь диаметром около 2.5 км, окруженный выраженной фронтальной зоной



На фронте вихря отмечался ряд диаметром около 40м , вероятно вызванных сдвиговой неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца



Снимок Landsat-8 26 октября 2019 г

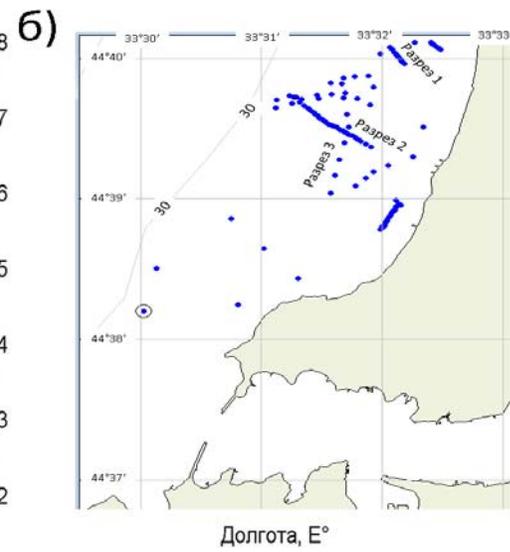
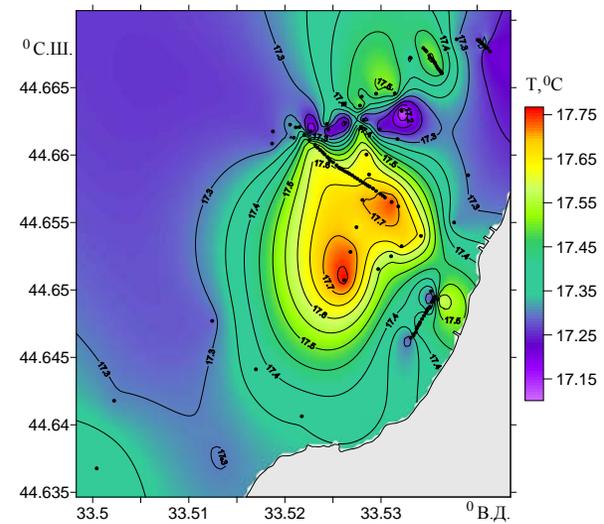


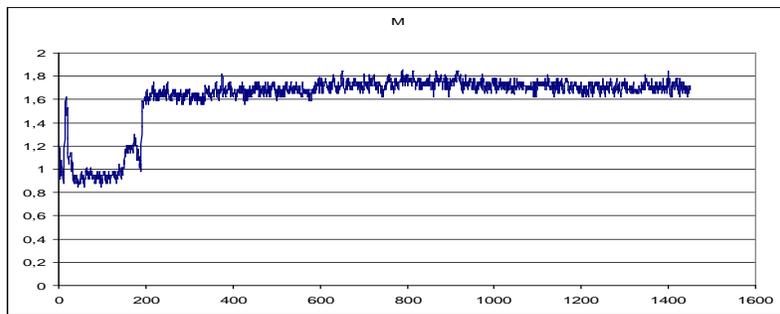
Схема измерений 25 октября 2019 г (> 100 станций)



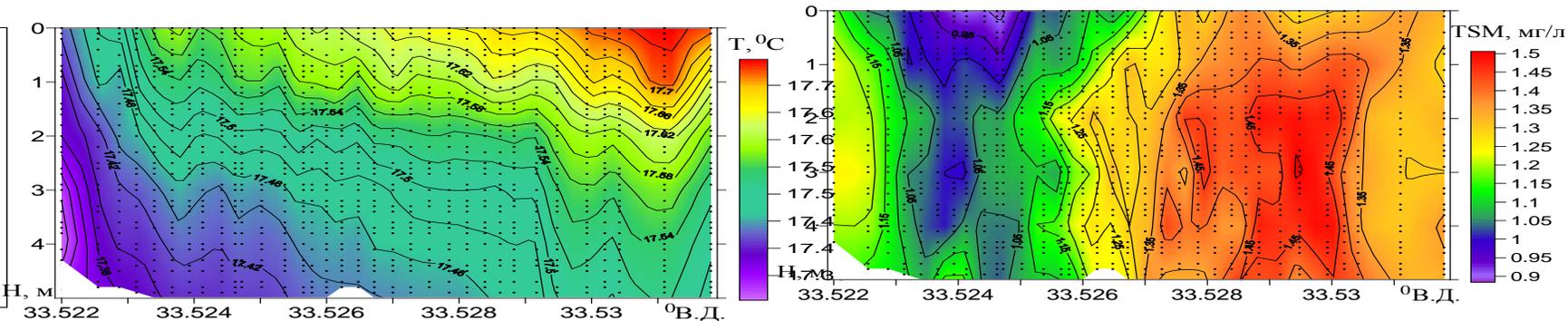
Температура в вихре

**БПЛА позволяют  
наводить судно на  
наиболее  
интересные районы  
для съемки**

Вихрь имел относительно  
теплое и пресное ядром и  
аккумулировал значительное  
количество взвеси



Разрез TSM через фронт



Разрез температуры и концентрации взвешенного вещества через вихрь с разрешением 10 м

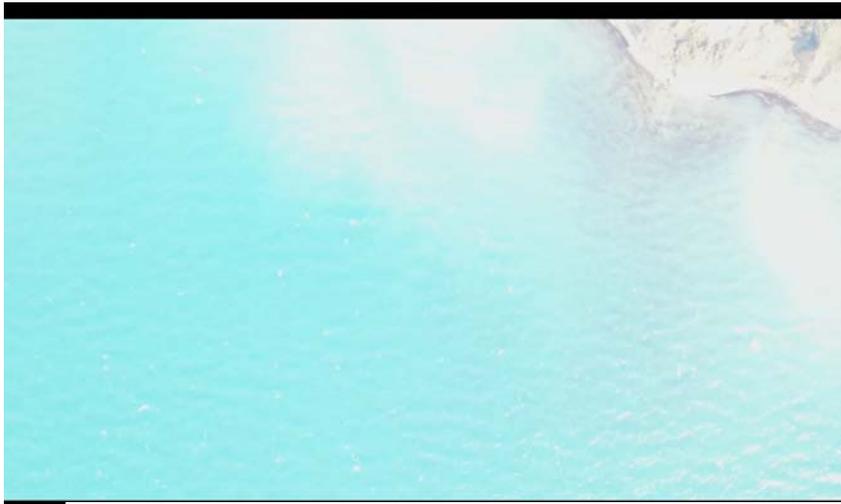
## 2. Поверхностные волны

## Наблюдения за волновыми процессами

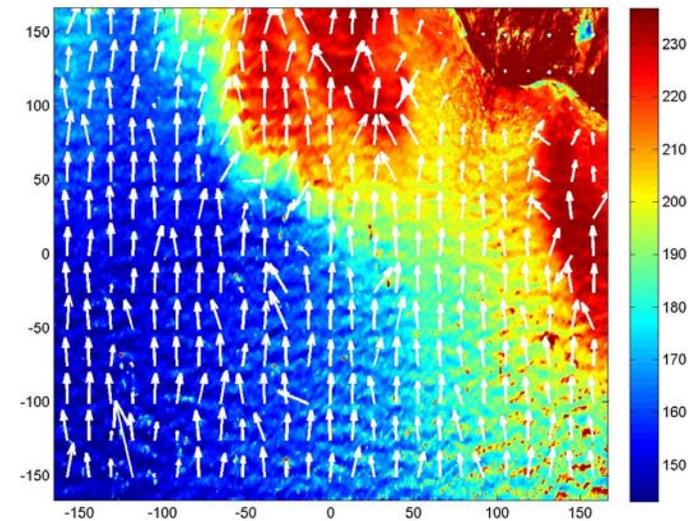
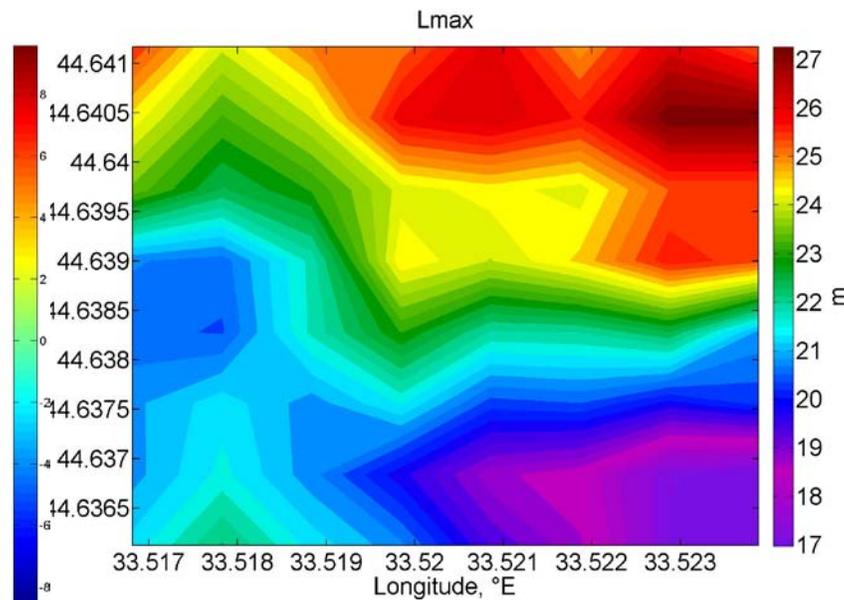
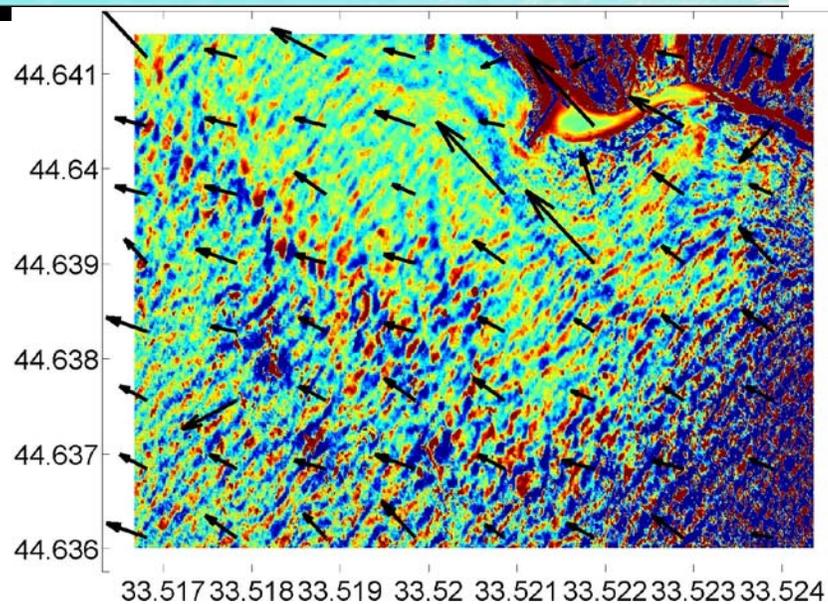
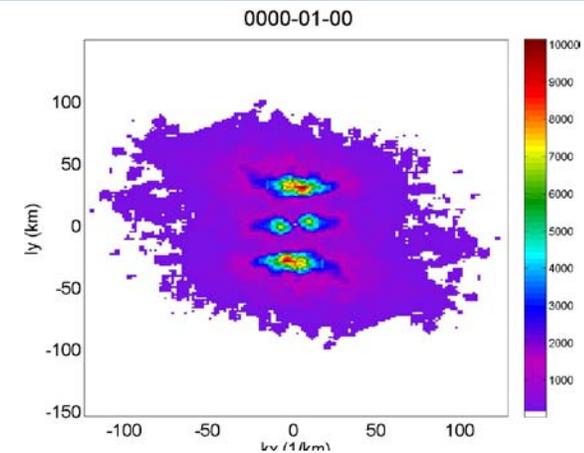
Во время всех съемок БПЛА, в первую очередь, наблюдаются поверхностные волны и их трансформация



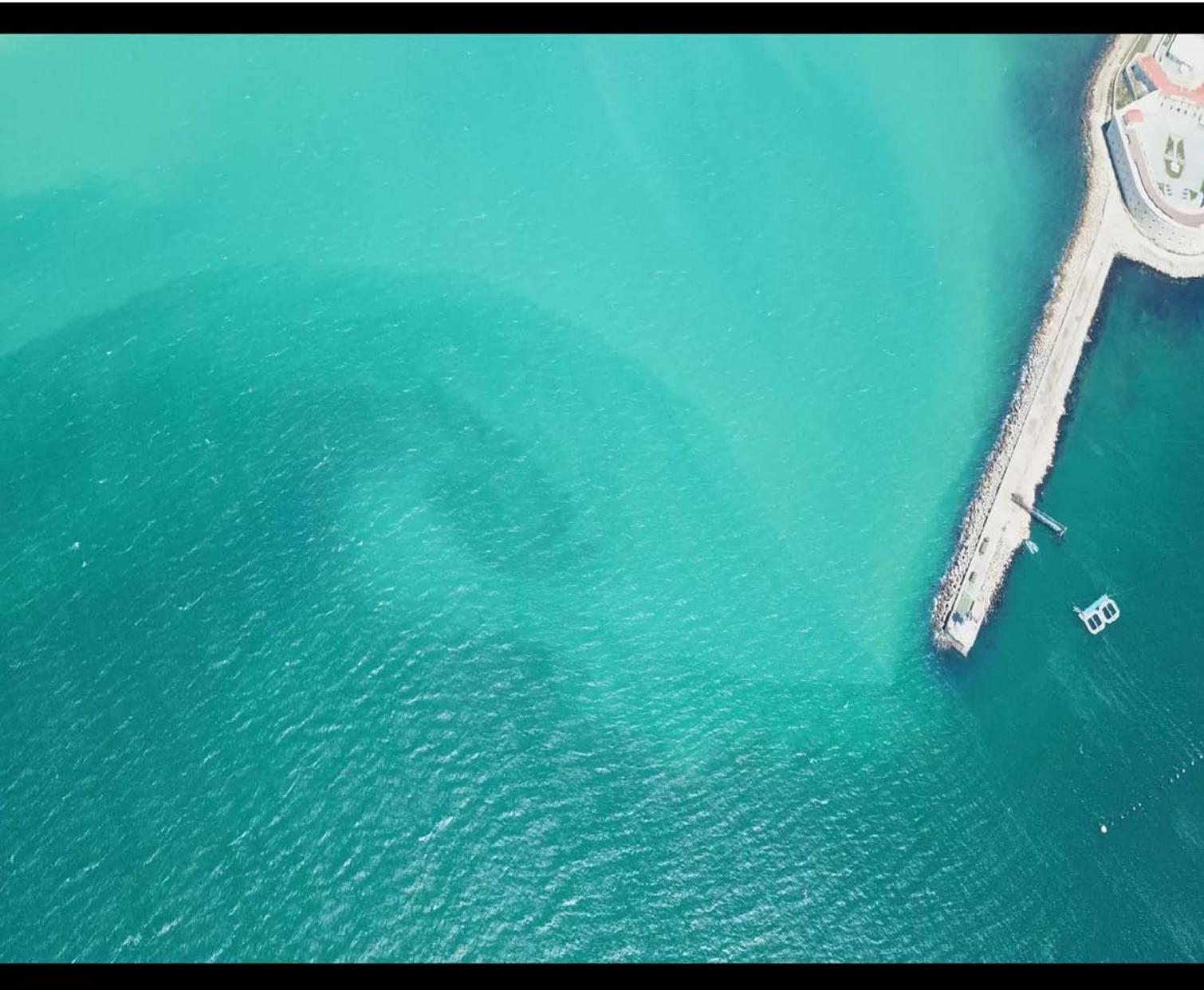
# Характеристики волн по данным БПЛА



Спектральный анализ распределения яркости позволяет определять характеристики длину, направление и скорость волн

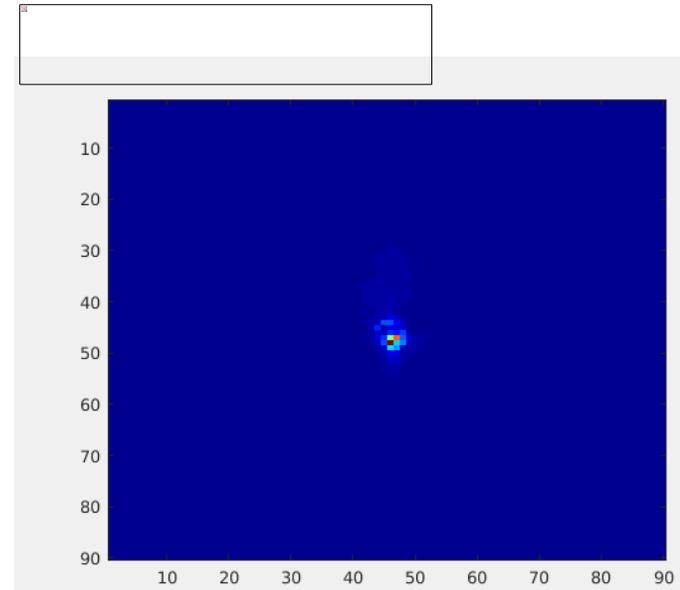


Направление гребней, длина и скорость доминантных волн

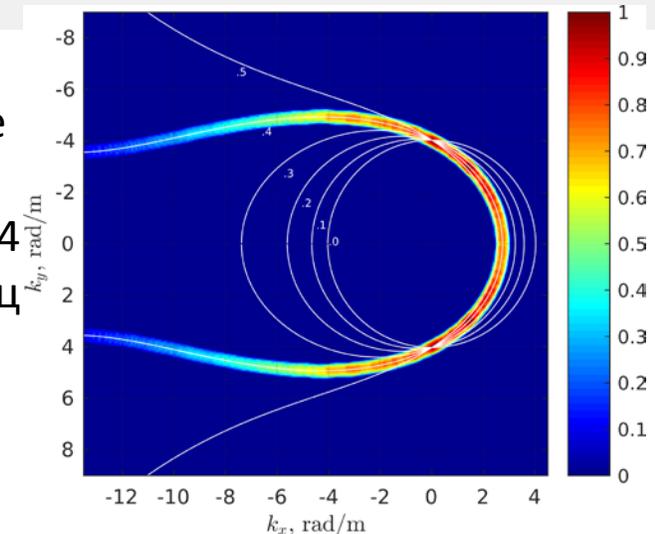


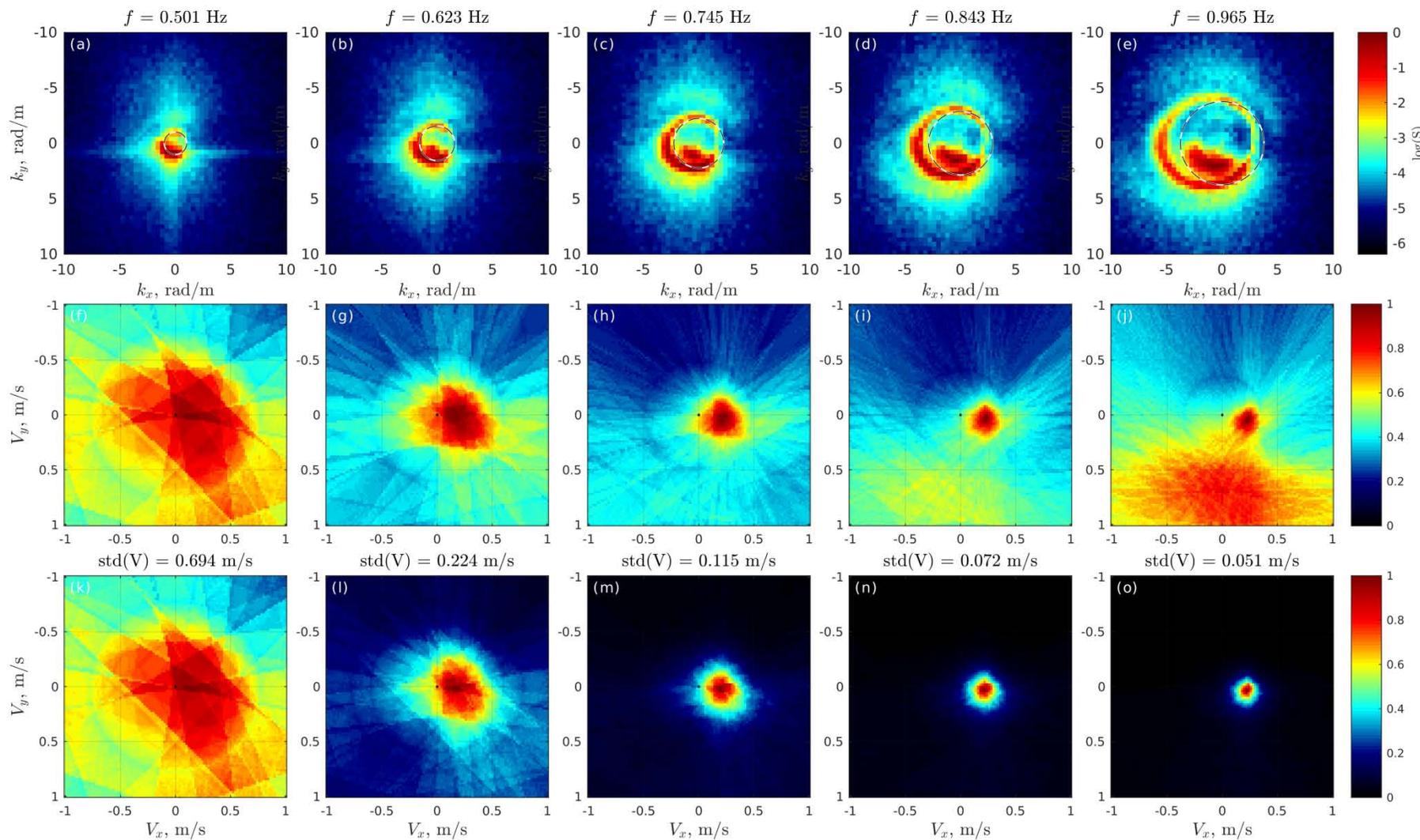
Смещение волн при видеосъёмке дает возможность определять трехмерные спектры волн  $E(k_x, k_y, f)$

Разрез 3d спектра яркости для разных частот



Теоретические дисперсионные кривые для скоростей 0.1-0.4 м/с для волн 1 гц (Yurovsky et al., 2018)

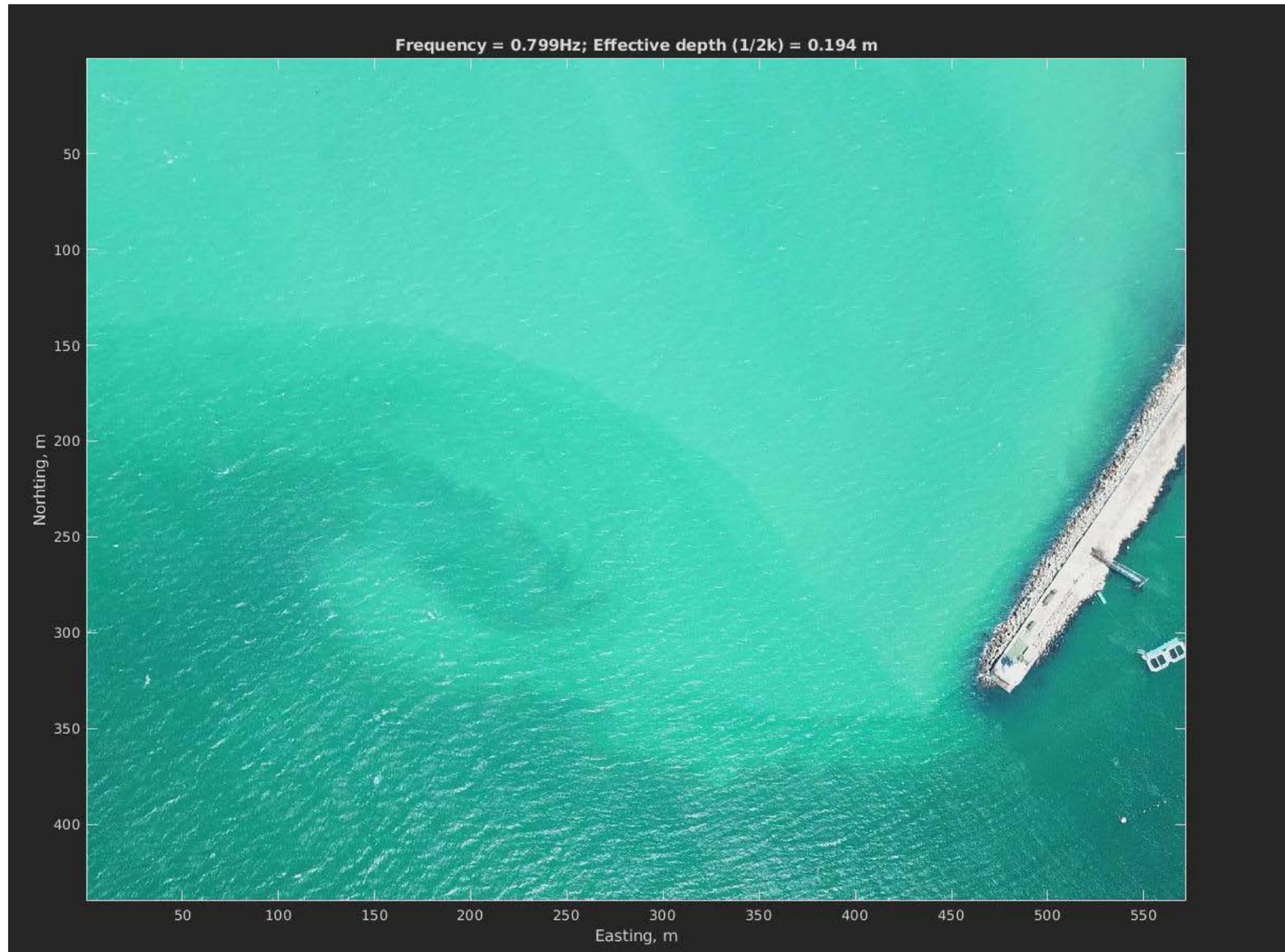




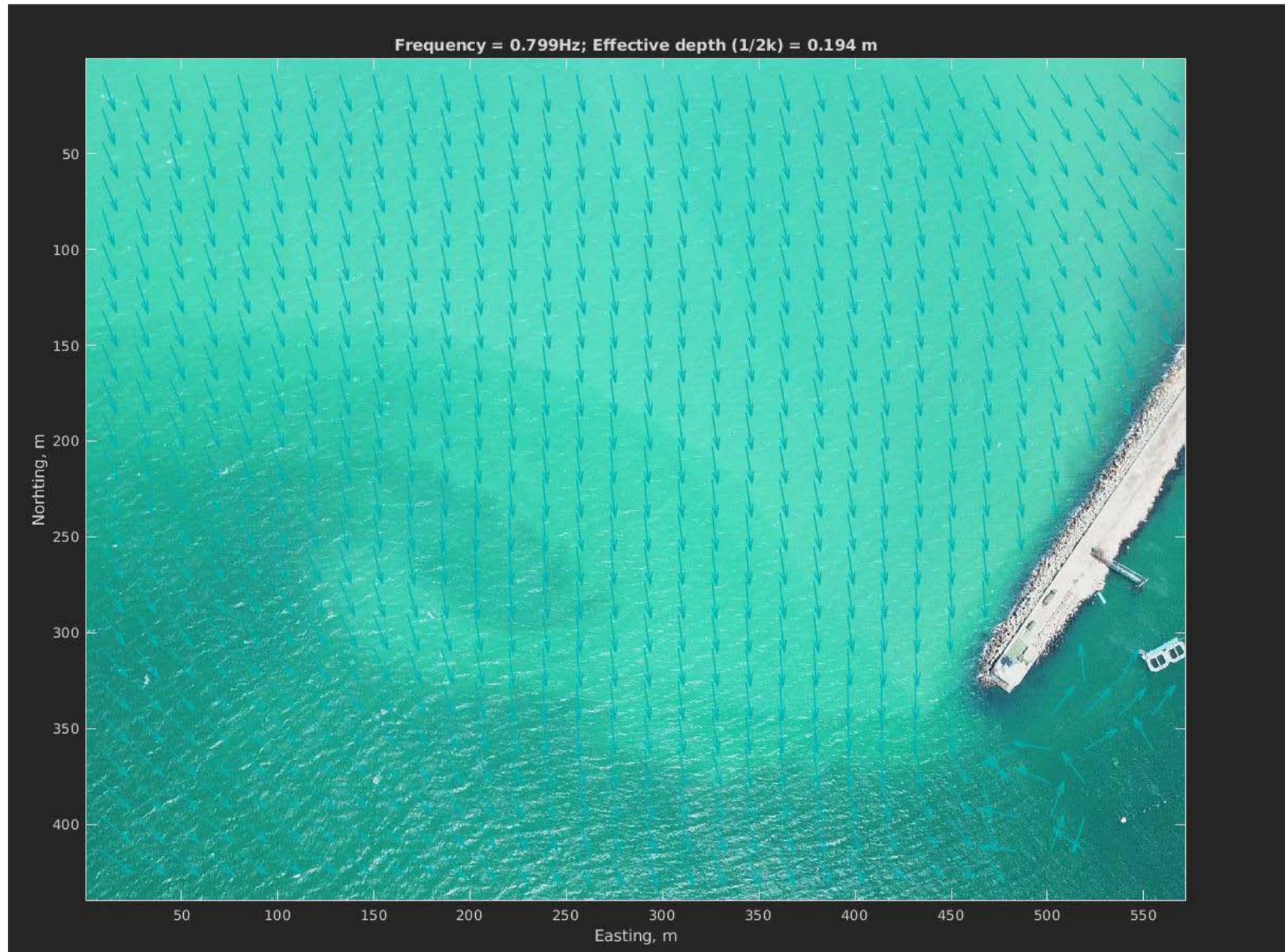
$$\omega_i^2 = gk_i + k_i \cdot U$$

Кросс-корреляционный анализ между спектром яркости и модельным доплеровским спектром позволяет определить скорости течения

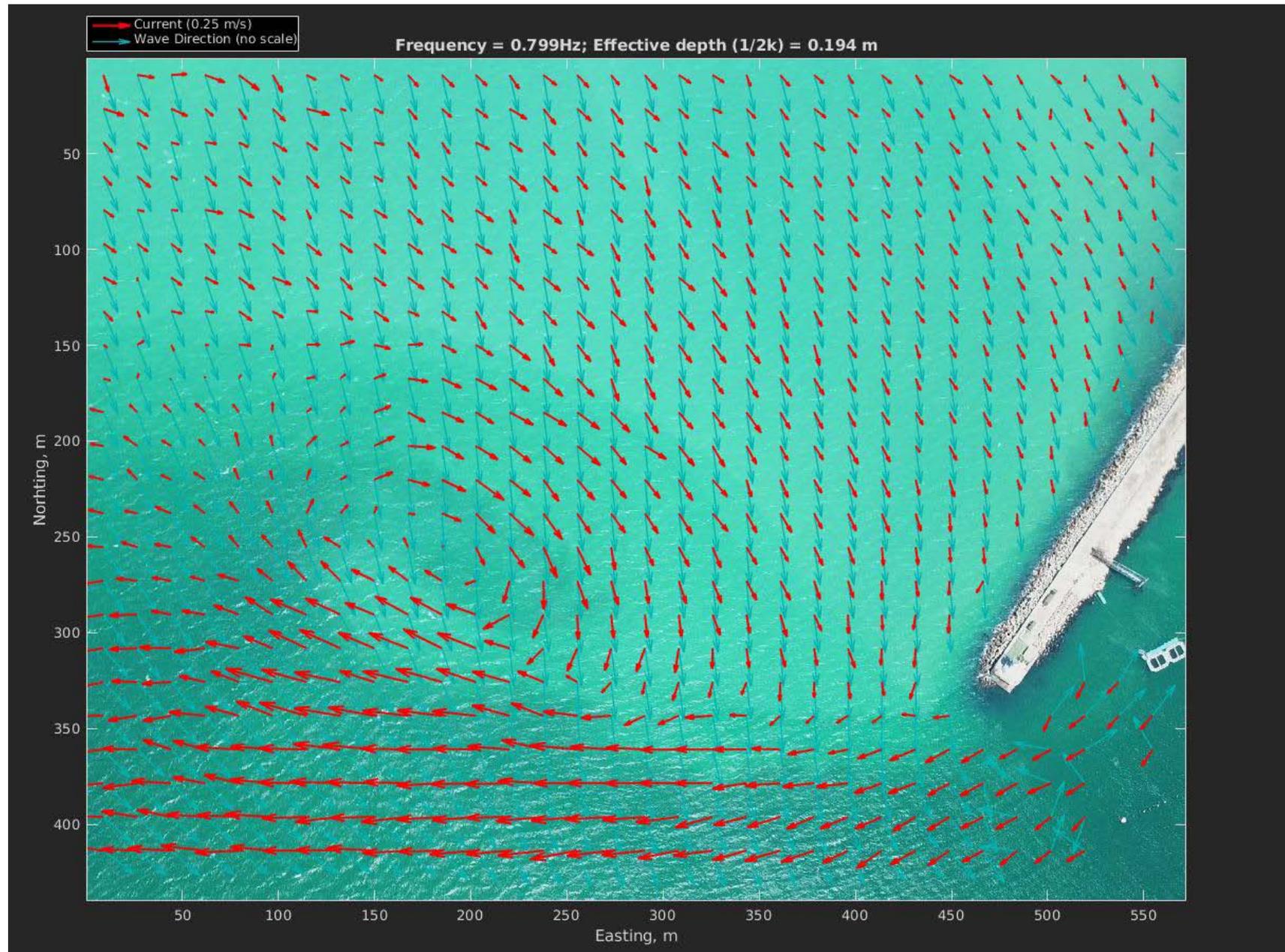
# Исходное поле



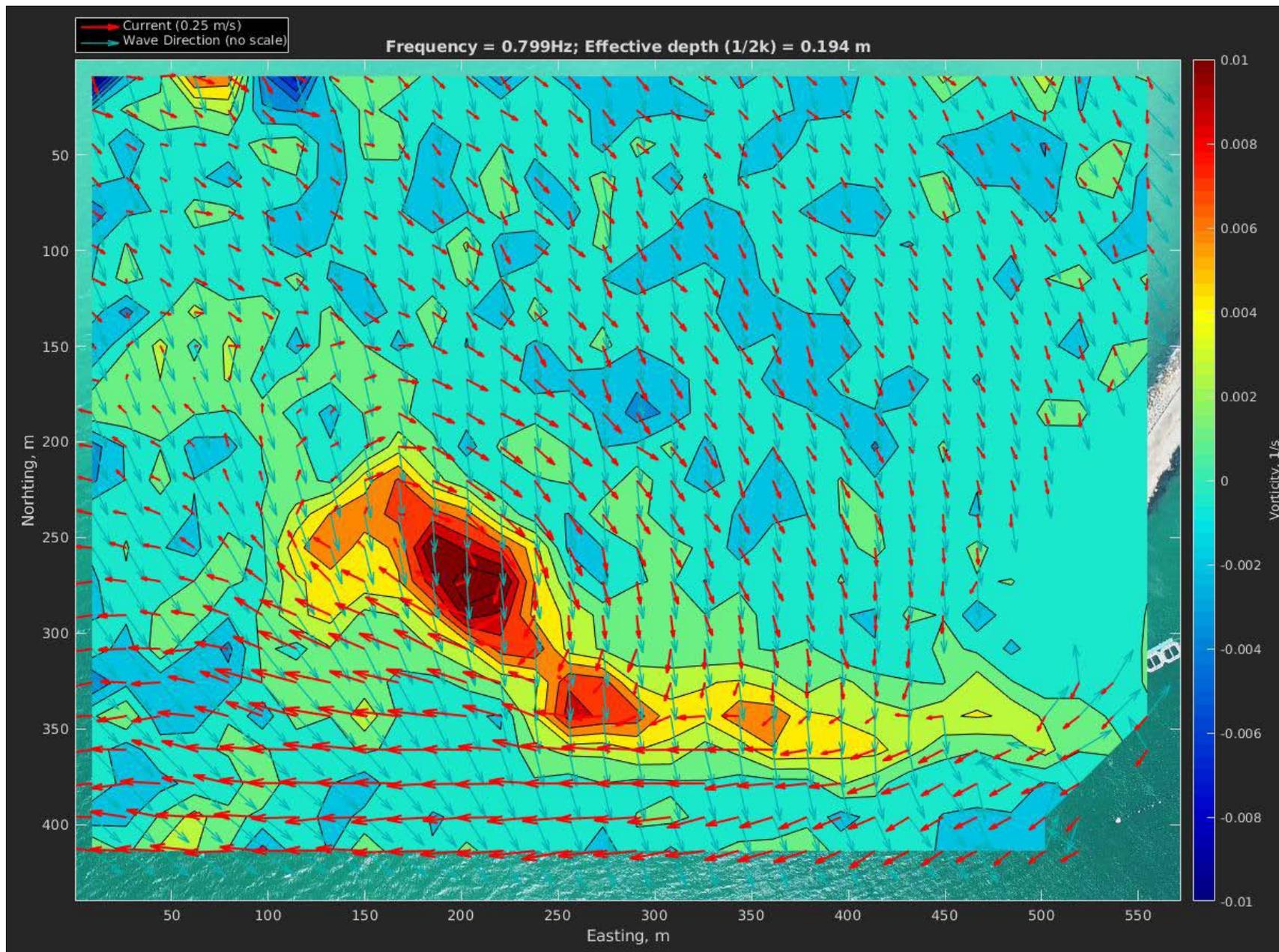
# Скорости волн



# Скорости течений



# Завихренность течений



# Два метода определения скорости течений по измерениям БПЛА

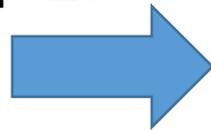
Скорость течения может также быть восстановлена по полю взвеси на основе методов оптического потока, например 4d-Var (Korotaev et al., 2009)

$$\frac{\partial I}{\partial t} + u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} = 0, \quad \text{(Плотников и др., 2020)}$$

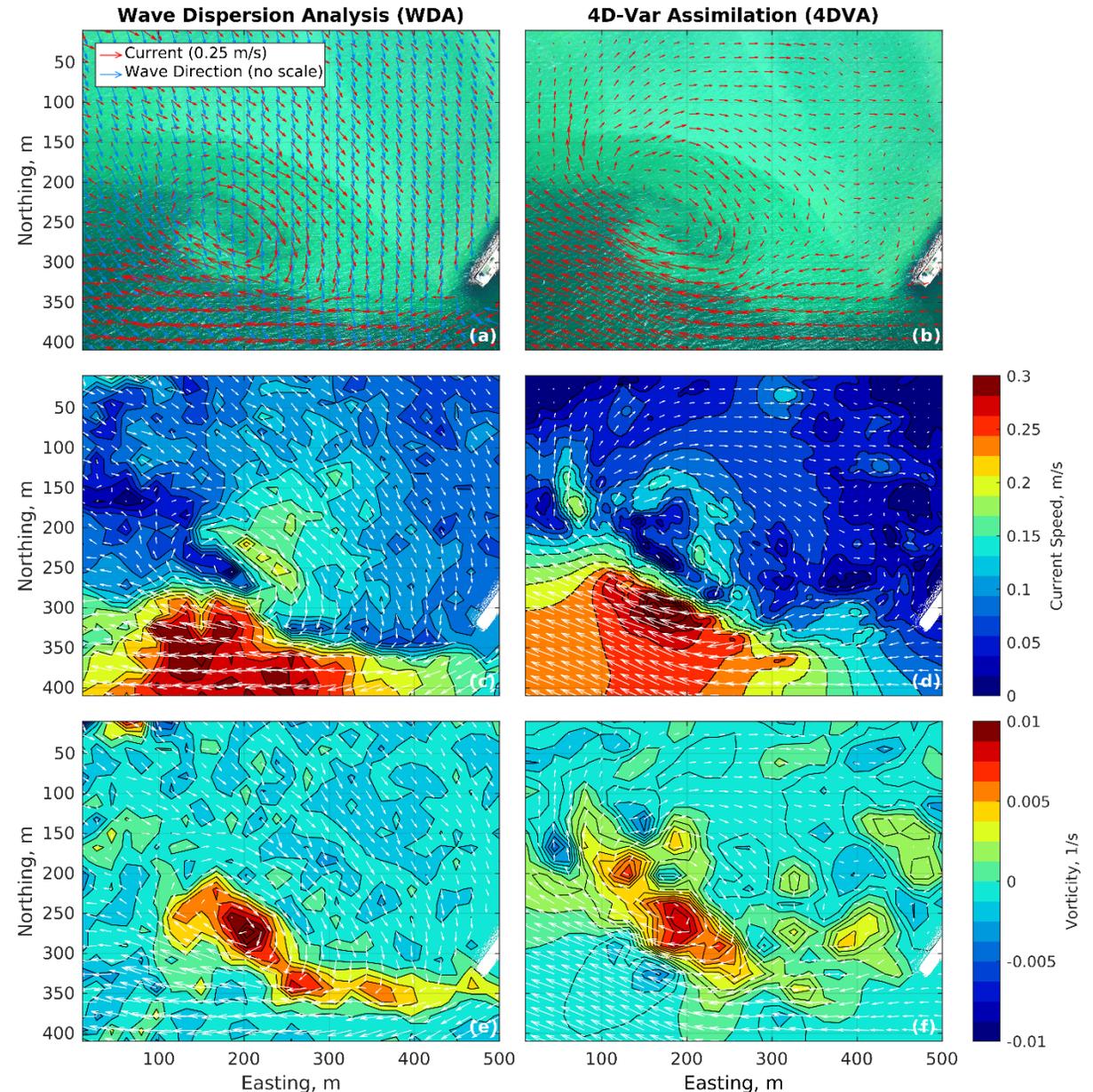
Далее, ищется минимизация функционала

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \int_{\Omega} (I(t_k) - I'(t_k))^2 ds + \frac{\alpha}{2} \int_{\Omega} |\text{grad}V|^2 ds + \frac{\beta}{2} \int_{\Omega} (\text{div}V)^2 ds,$$

Результаты, полученные обоими методами хорошо согласуются между собой



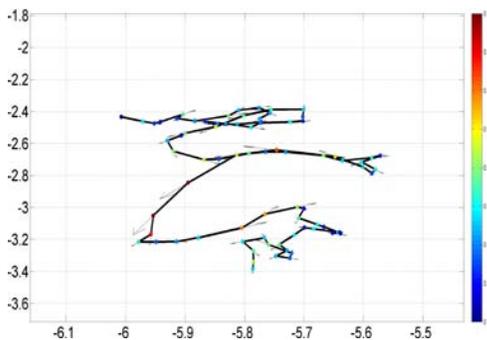
Оба эти метода могут быть эффективно использованы для восстановления поля скорости течений с разрешением <math><10\text{m}</math>!



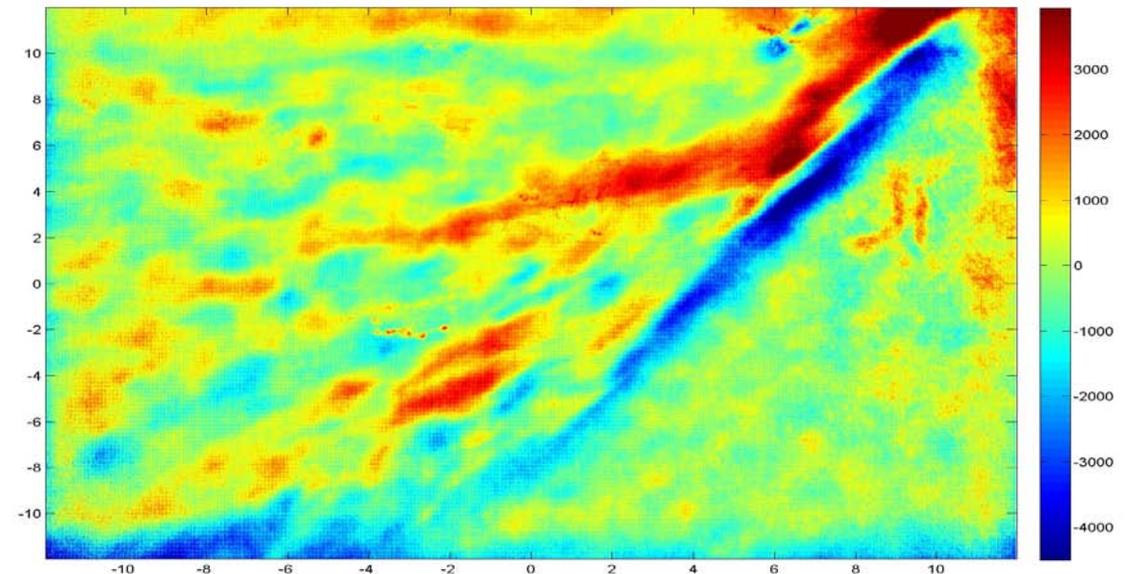
Yurovsky et al., 2021 (in press)



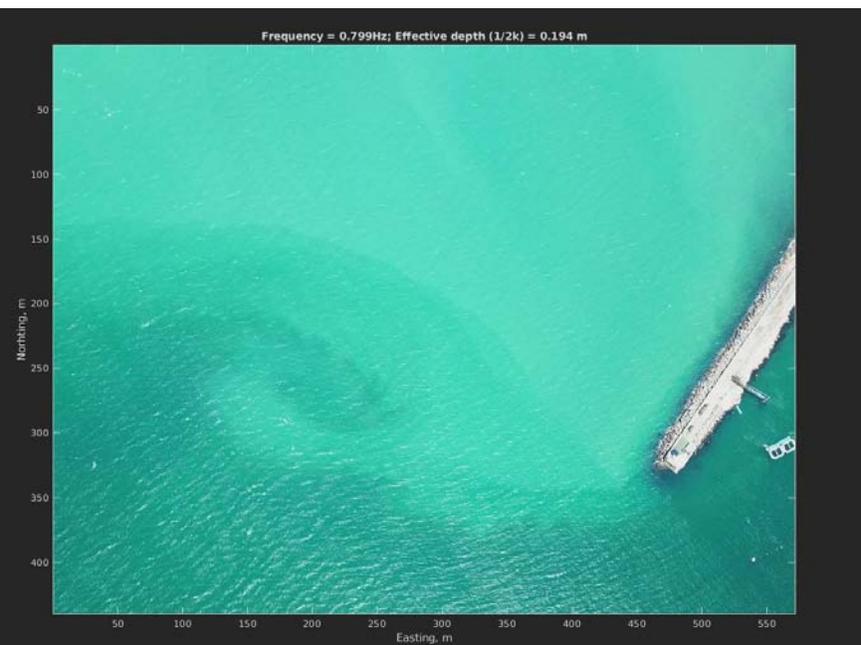
Ослабление/усиление яркости показывает области подавления/укрочения коротких волн зоны дивергенции и конвергенции



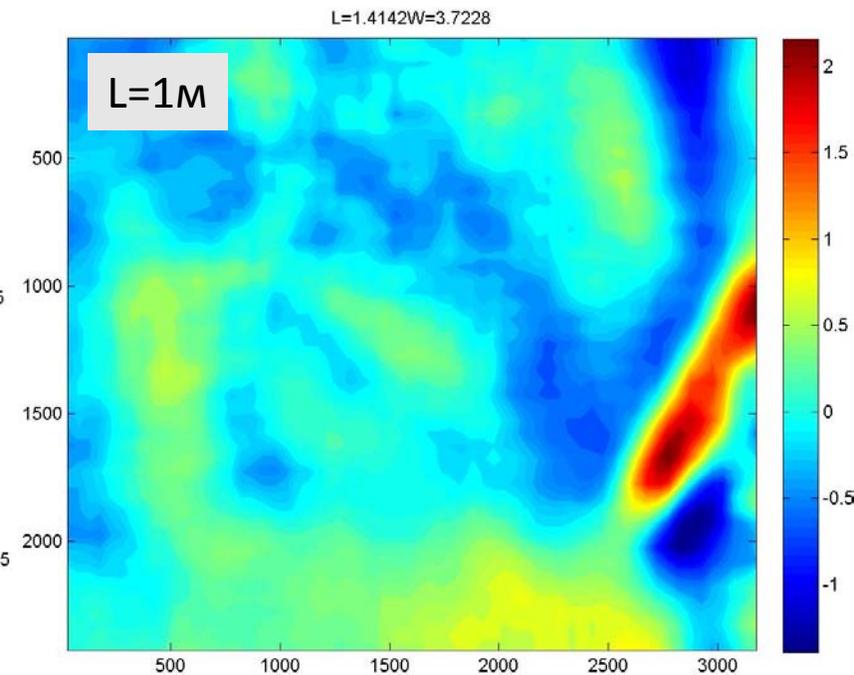
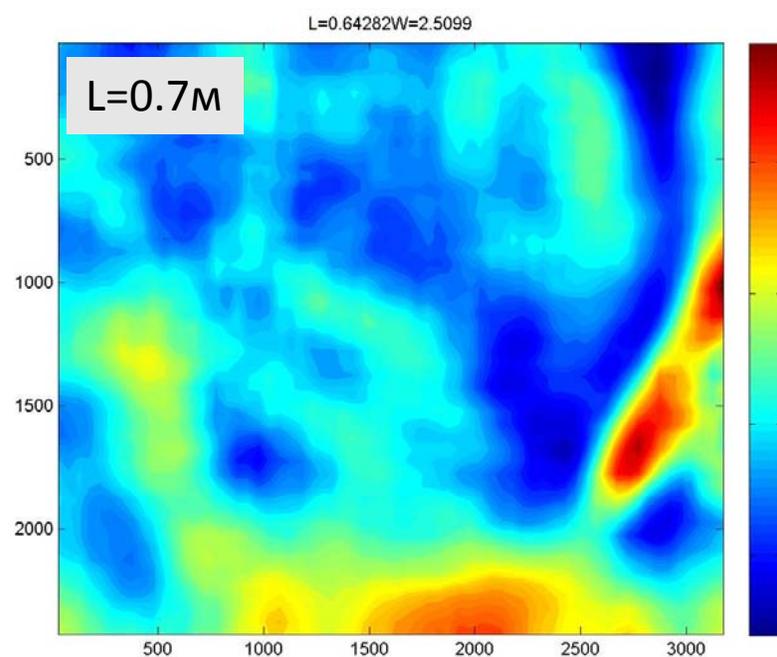
Наблюдаемая траектория частицы под влиянием волн



Среднее за 2 минуты поле яркости в районе фронта после высокочастотной фильтрации



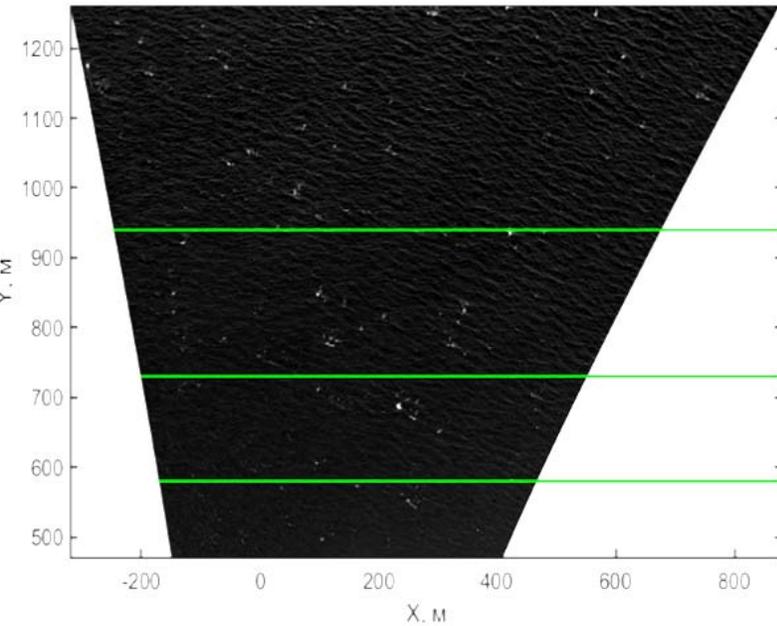
Исходный снимок



Рассчитанная спектральная энергия волн длиной 70 см и 1.5 метра по данным БПЛА (блик предварительно удален пространственной фильтрацией спектральной энергии)

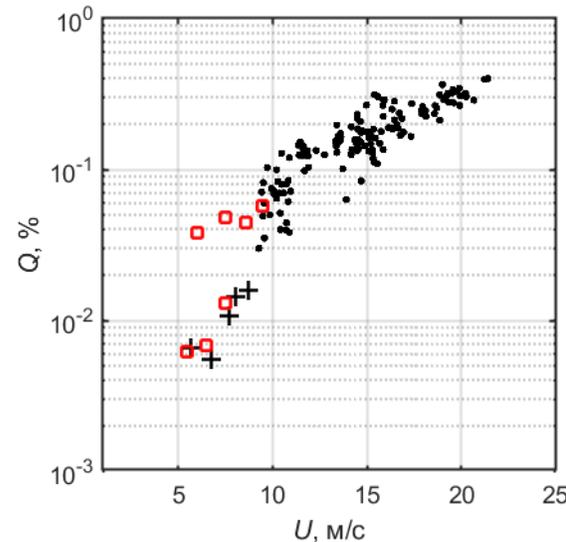
Анализ распределения спектральной энергии коротких волн позволяет обнаружить динамические структуры даже по единичному снимку в поле дивергенции/конвергенции скорости течений

DJI MAVIC PRO позволяет осуществлять стабильные измерения при ветрах до 15 м/с – наблюдать за трансформацией волн в шторм – определять характеристики обрушений

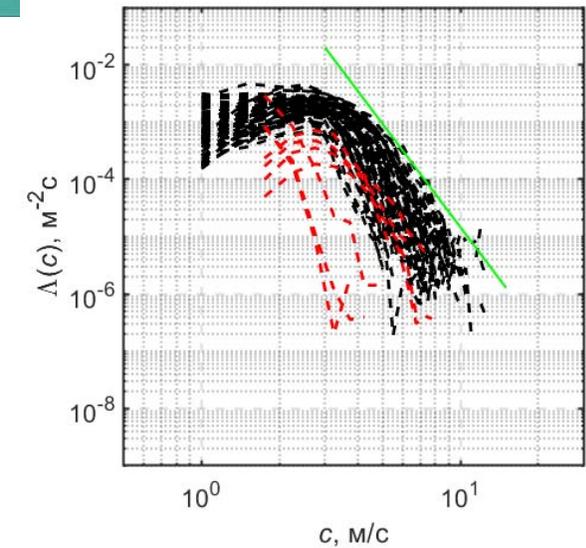


Выделение обрушений на проецированном снимке БПЛА

**Кориненко и др., 2021**

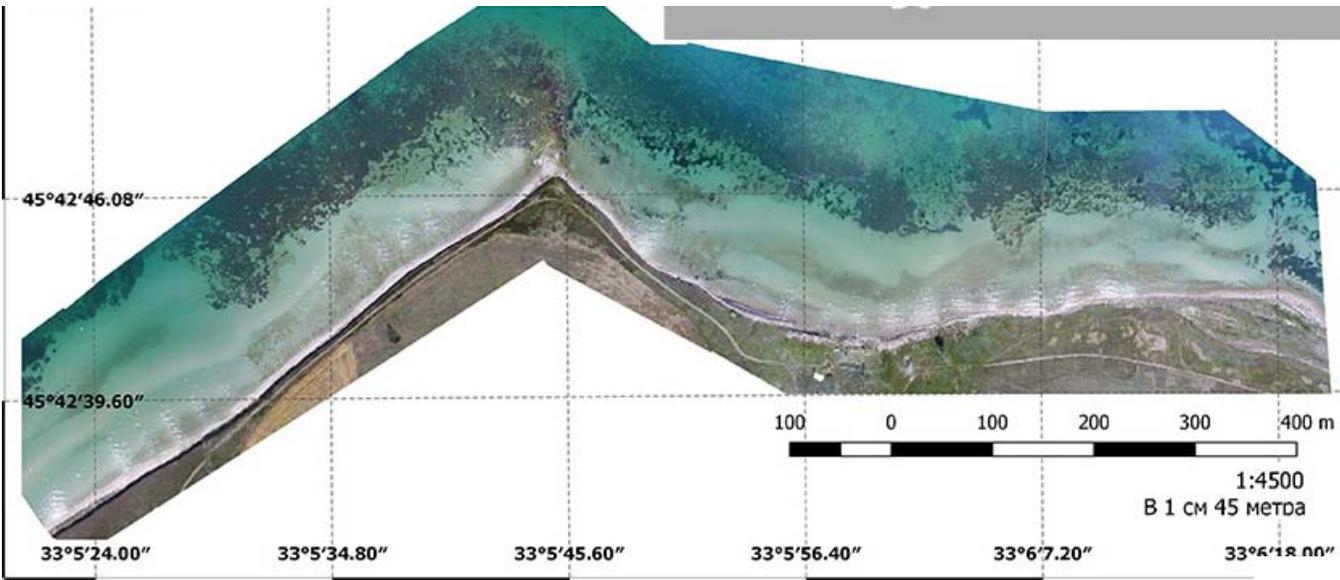


Доля обрушений от скорости ветра (красные квадратики), точки – данные из работы [Кориненко\_2020]



Распределение зависимости длины от скорости обрушений (Λ-функция)

## 3. Другие возможности



Данные БПЛА несут информации о структуре дна на мелководье

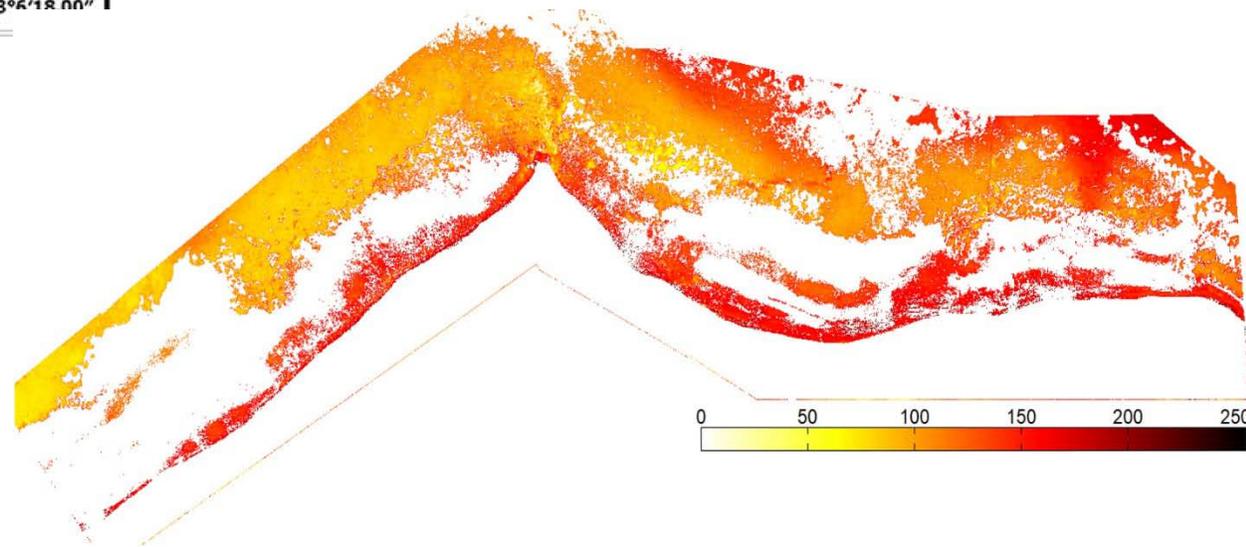
Композитный снимок у северо-западного берега Крыма

Информация в разных спектральных каналах (RGB) позволяет определять площади бентосных водорослей и или песка

$$VDVI = \frac{2L_{green} - L_{red} - L_{blue}}{2L_{green} + L_{red} + L_{blue}}$$

Jiang et al., 2020

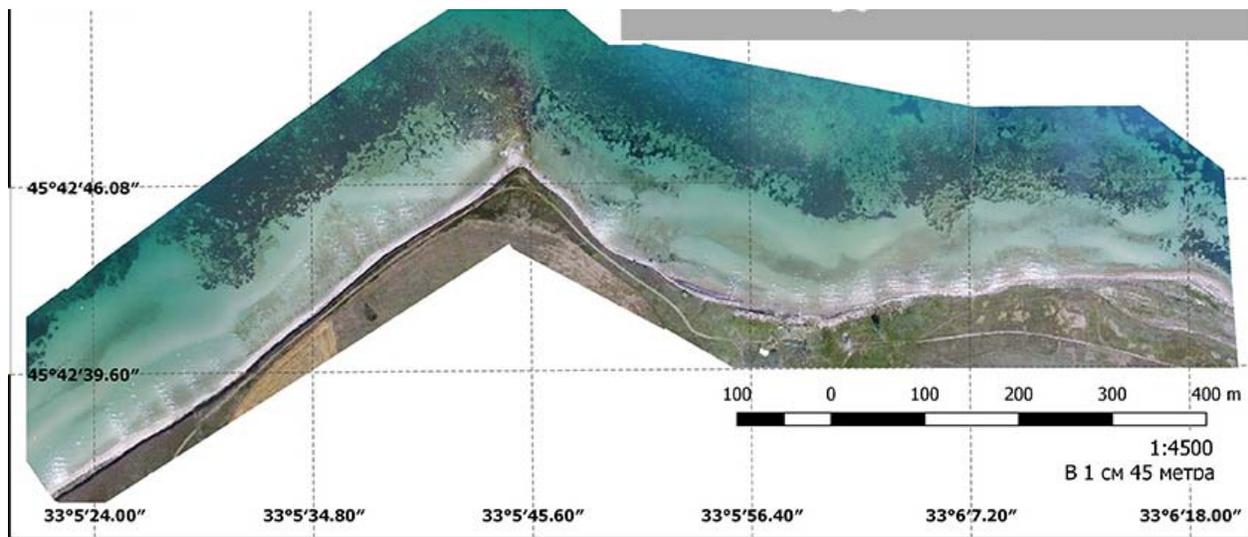
$$Benthos = \sqrt{(VDVI)^2} < 0.33$$



Выделенные области, занятые бентосными водорослями

Новиков и др., 2021 (in preparation)

# Глубина дна



Композитный снимок у северо-западного берега Крыма

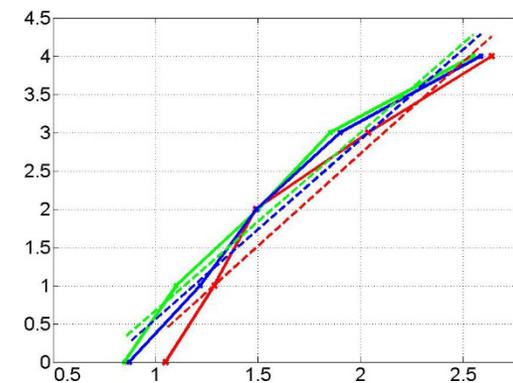
Измерения в трех каналах БПЛА позволяет восстанавливать глубину дна с разрешением в несколько сантиметров

$$L = L_b \exp(-Kz) + L_v$$

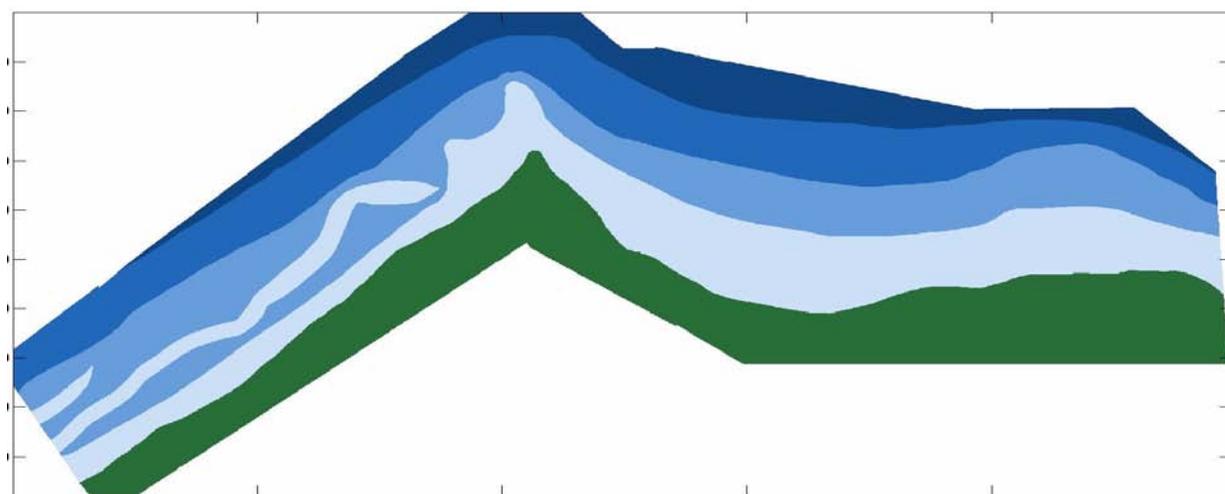
$$z = m_1 \frac{\ln(L(\lambda_2))}{\ln(L(\lambda_1))} - m_0$$

Stumpf et al, 2003

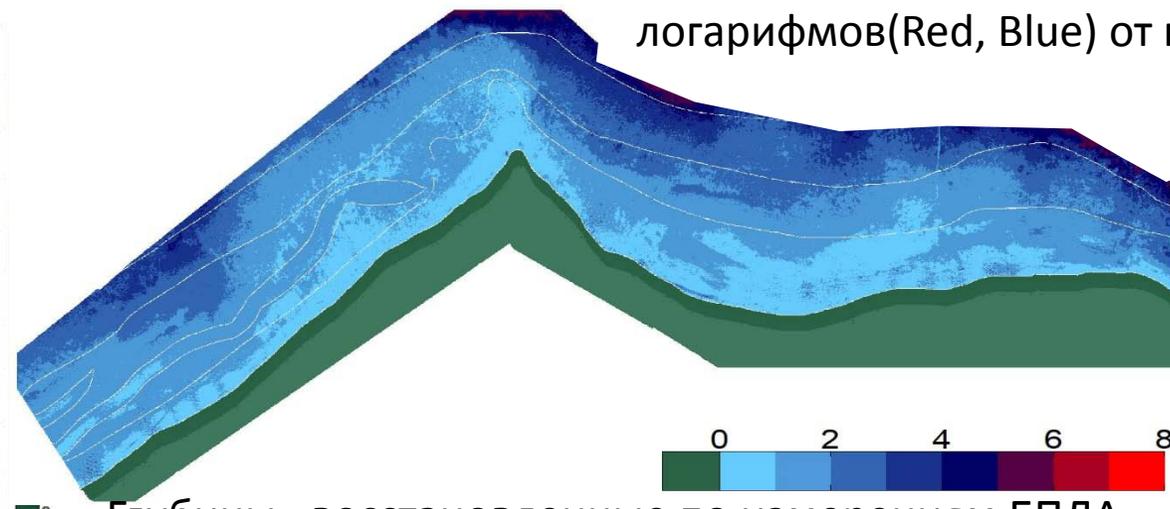
Константы  $m_0$ ,  $m_1$  находятся на основе сопоставления с опорными данными



Зависимость отношения логарифмов(Red, Blue) от глубины



Глубины по данным Navionics (эхолокация)



Глубины, восстановленные по измерениям БПЛА

Новиков и др., 2021 (in preparation)

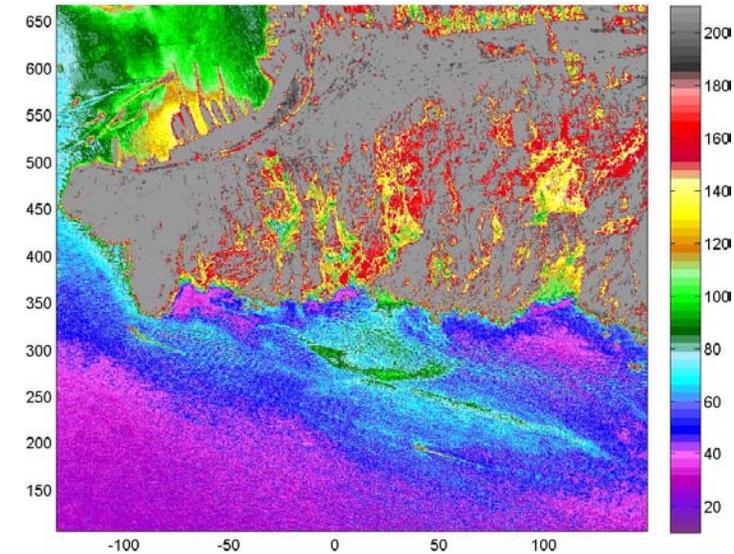
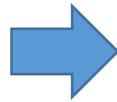
# Слики, нефтяные загрязнения

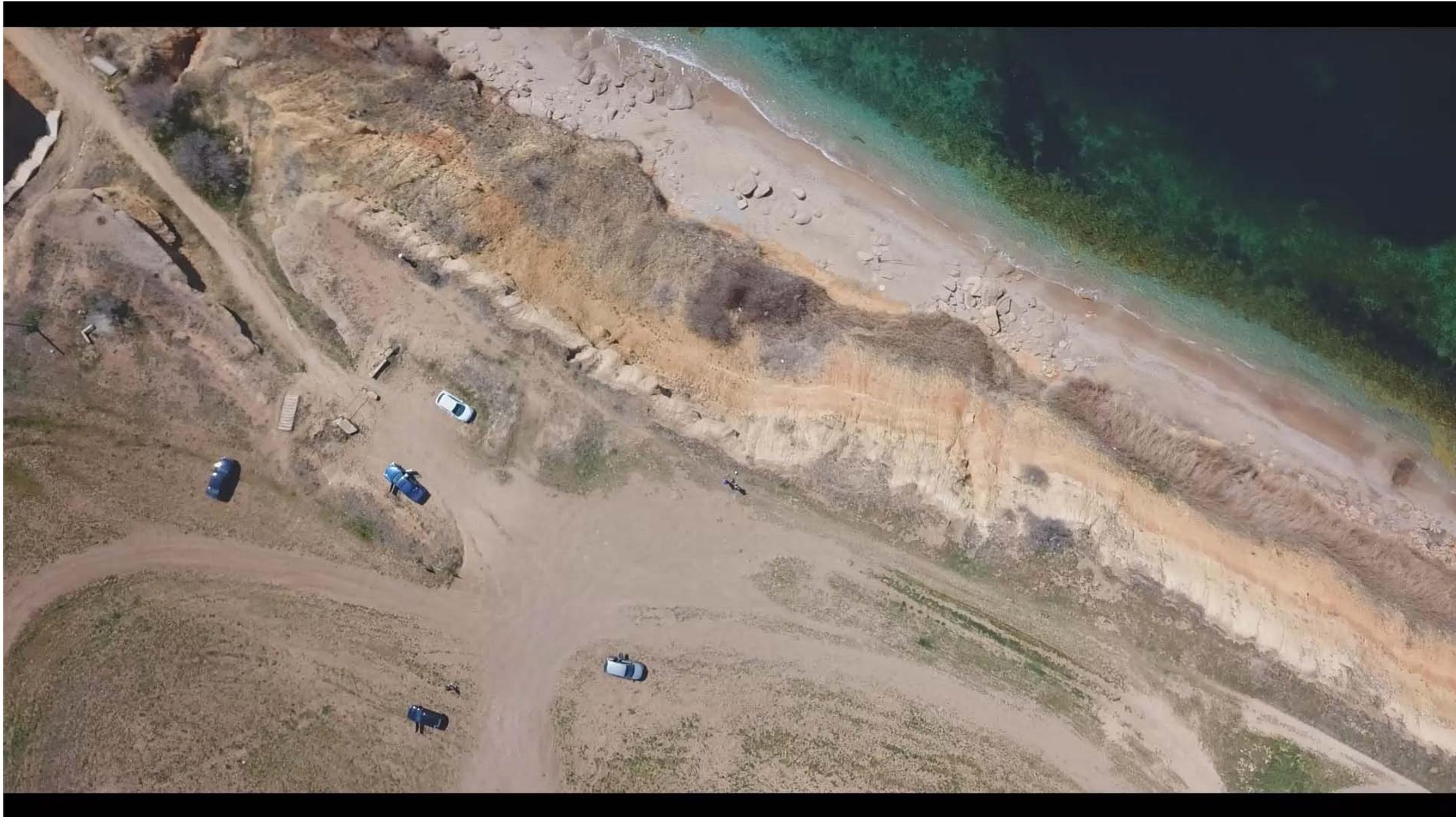


Толстые пленки (нефтяные загрязнения) по измерениям БПЛА

Слики различного происхождения в отраженной составляющей сигнала

Канализационный сток в районе Балаклава и его репроекция в красном цвете





[Полное видео](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=A3mrRWcyATU>

Масштабное “загрязнение” у побережья Качи 9 апреля 2020г

Измерения БПЛА позволяет получать большое количество информации о гидрофизических процессах в морской среде: волновых процессах, фронтальной и вихревой динамике, перераспределения взвешенного вещества, загрязнений, глубин дна и др.

Эти измерения могут быть использованы для восстановления поля течений на самых малых масштабах, исследованию трансформации волн, взаимодействия волн и течений, что открывает новые возможности для решения многих океанологических задач

# Спасибо за внимание!

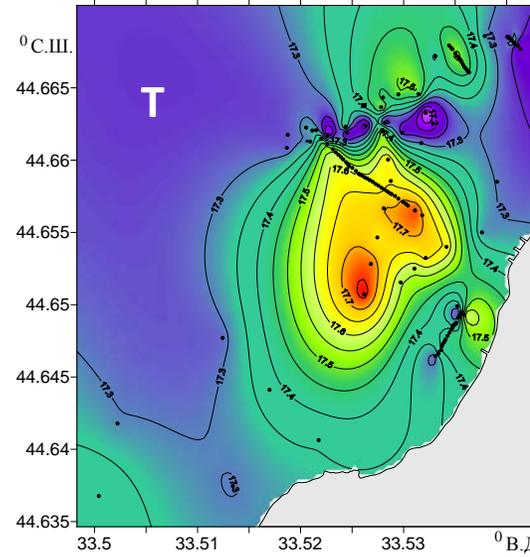
Кубряков Арсений,  
зав. лаб. инновационных  
методов океанологических  
исследований,  
МГИ РАН, Севастополь

Рады сотрудничеству!  
[arskubr@ya.ru](mailto:arskubr@ya.ru)

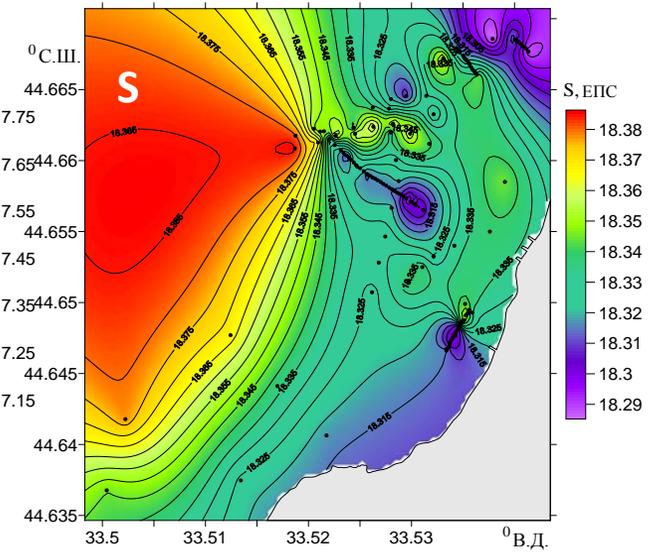
# Результаты контактных измерений



Схема измерений в вихре (>100 станций)

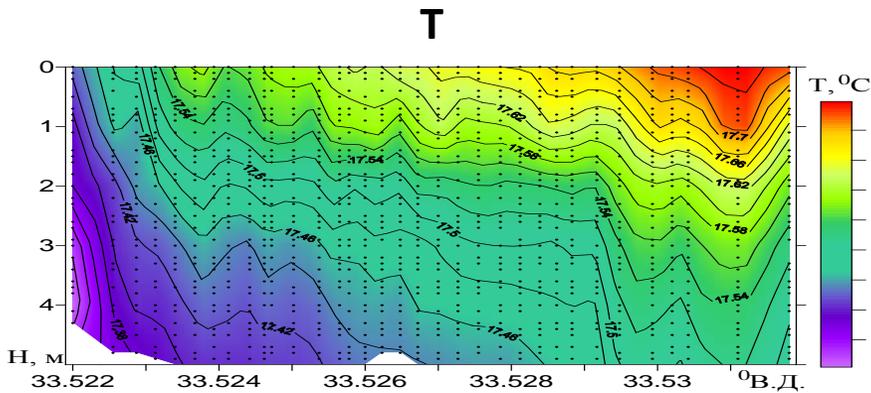


T, среднее в слое 0-1 м

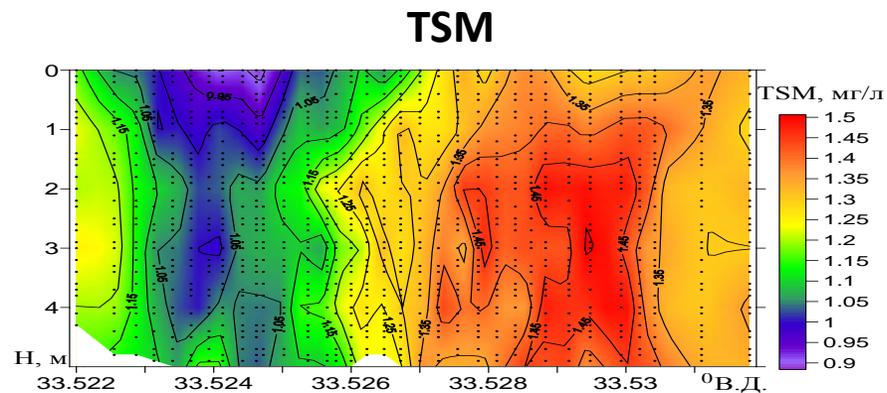


S, среднее в слое 0-1 м

Температура и соленость в вихре

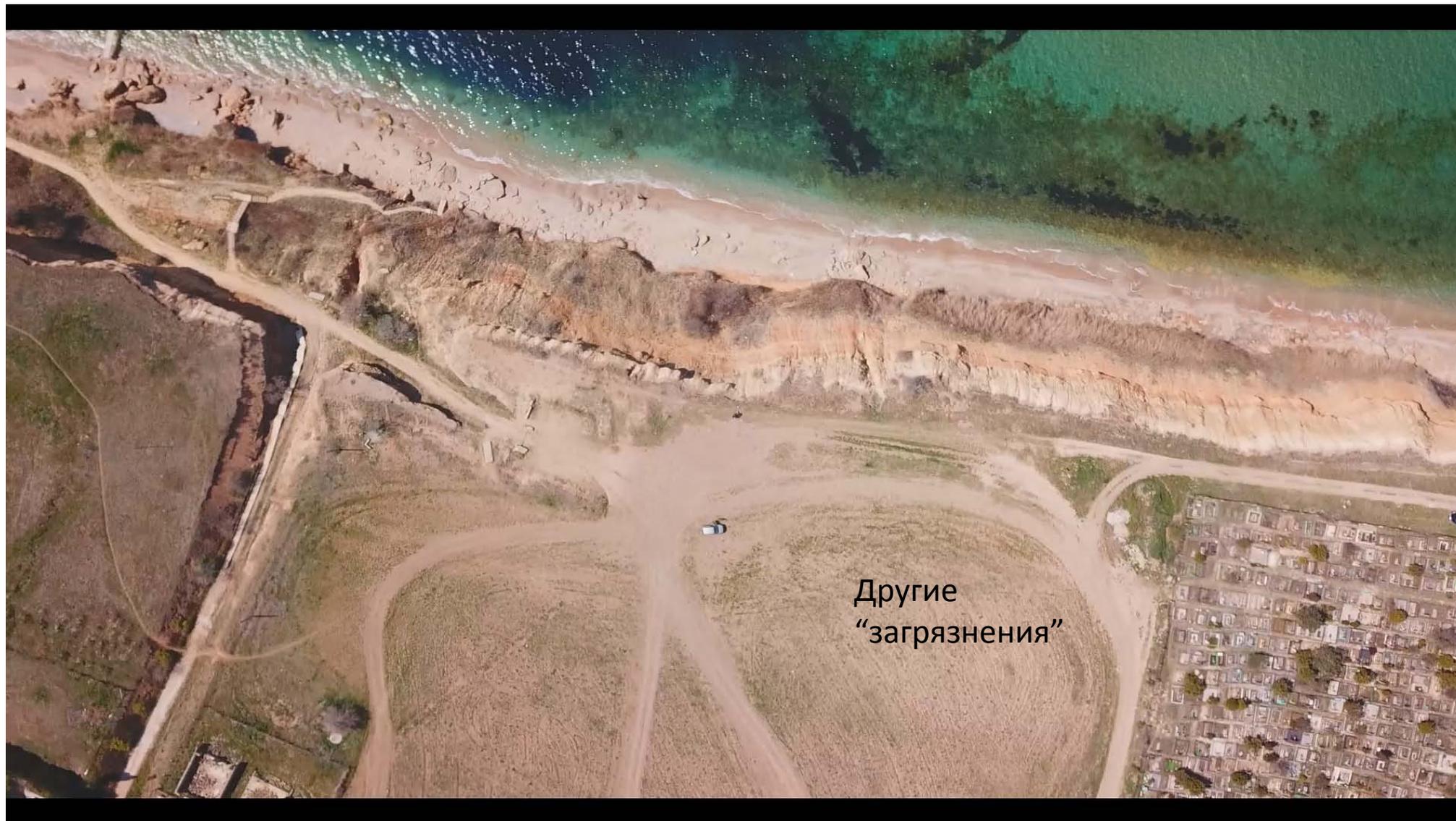


Разрез температуры и концентрации взвешенного вещества через вихрь



Фронт вихря

Вихрь имел относительно теплое и пресное ядром и аккумулировал значительное количество взвеси



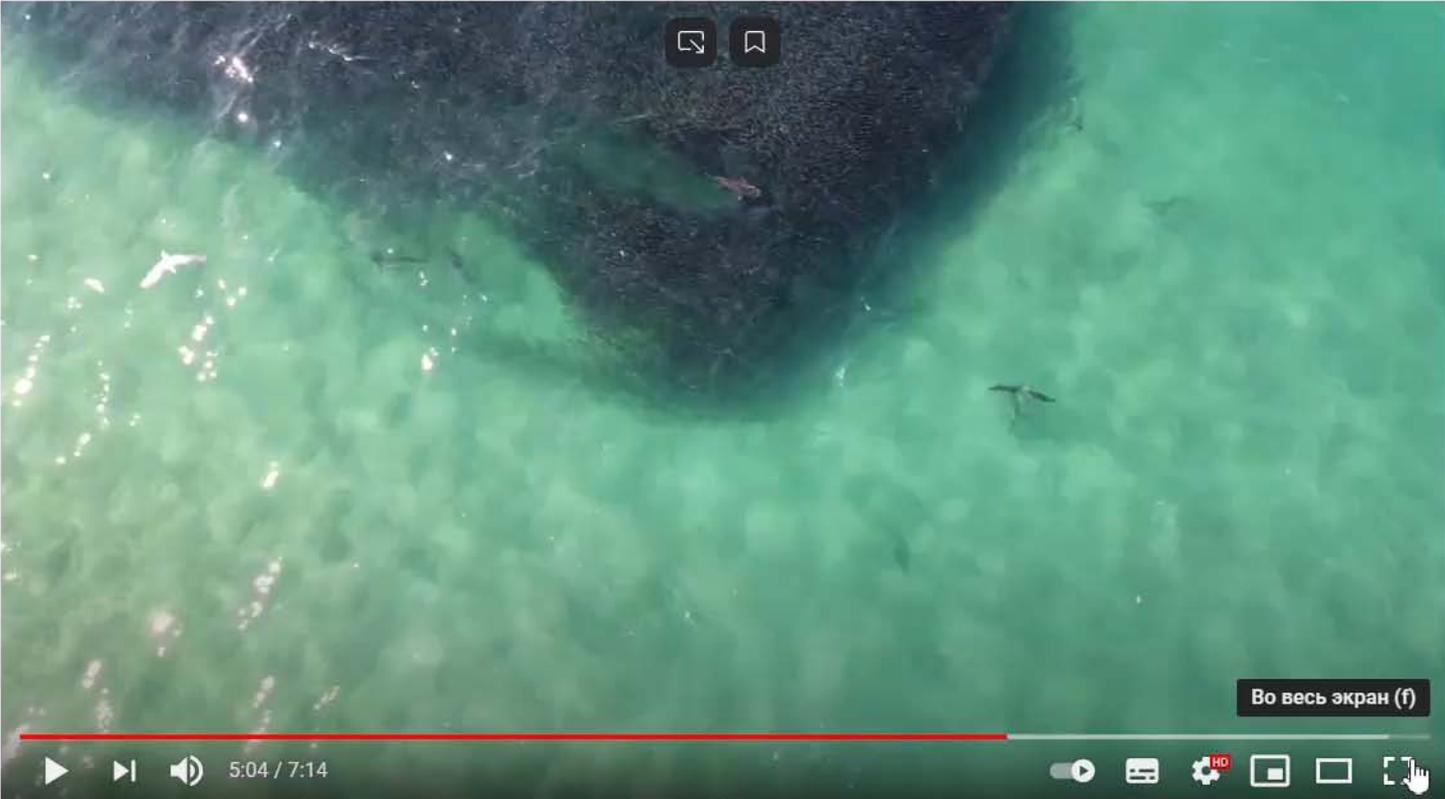
[Полное видео](#)

<https://www.youtube.com/watch?v=A3mrRWcyATU>

Масштабное "загрязнение" у побережья Качи 9 апреля 2020г

www.youtube.com A Short Flight over the 2020 Sardine Run - YouTube

Введите запрос



Во весь экран (f)

5:04 / 7:14

SOUTH AFRICA

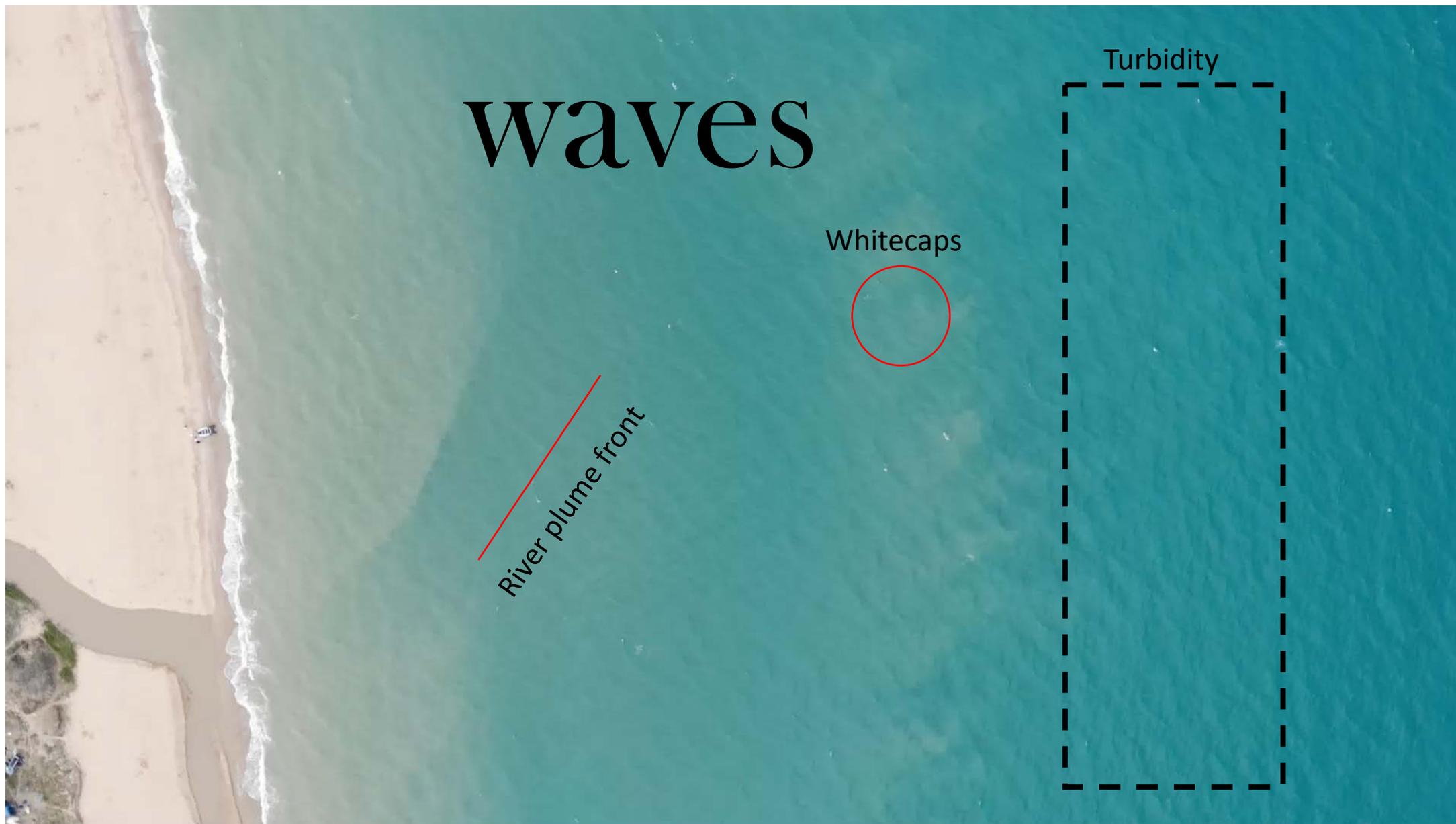
### A Short Flight over the 2020 Sardine Run

9 133 просмотра • 21 июн. 2020 г.

91 2

ПОДЕЛИТЬСЯ СОХРАНИТЬ

- SARDINE RUN SOUTH AFRICA** 7:23  
Sardine Run South Africa 2020 Freediving with Andy Coetzee  
Andy Coetzee  
9,6 тыс. просмотров • 11 месяцев назад
- Gold particles background effect || Dark background ||...  
Background Effects Hub  
1,1 млн просмотров • 4 месяца назад
- Sardine Run 2019  
ClaudiaWeber-Gebert  
24 тыс. просмотров • 2 года назад
- ИТАЛЬЯНЦЫ ХИТЫ 80-Х  
Лучшие итальянские песни,...  
Mari Music  
1,1 млн просмотров • 3 месяца назад
- Уральские Пельмени После корпоратива  
DEDMOROZ  
19 млн просмотров • 8 лет назад
- Интервью месяца! Переводчики Путина...  
Россия 24  
3,3 млн просмотров • 1 год назад
- Crazy Shark Action Sardine Run 2020

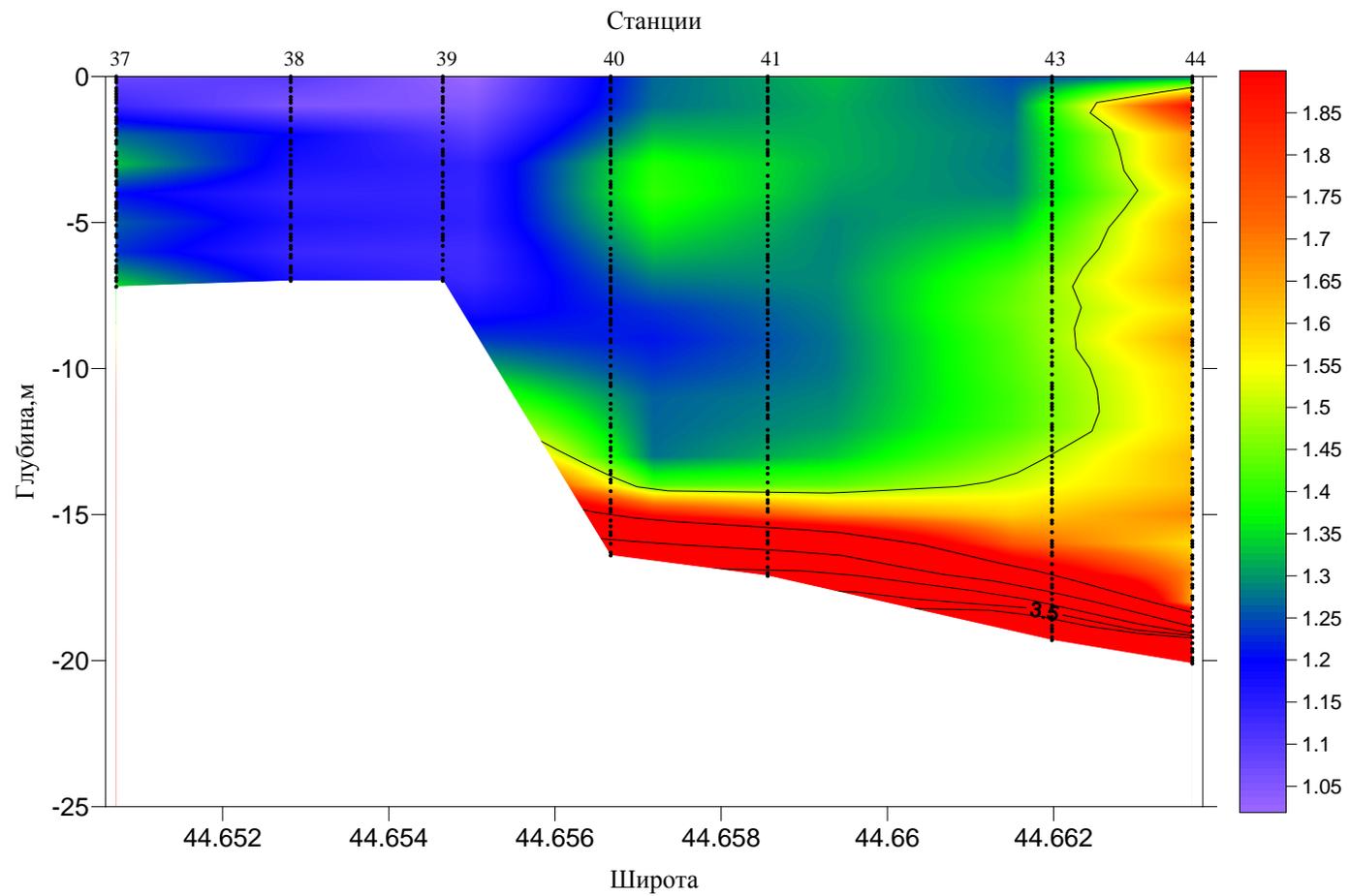


waves

River plume front

Whitecaps

Turbidity

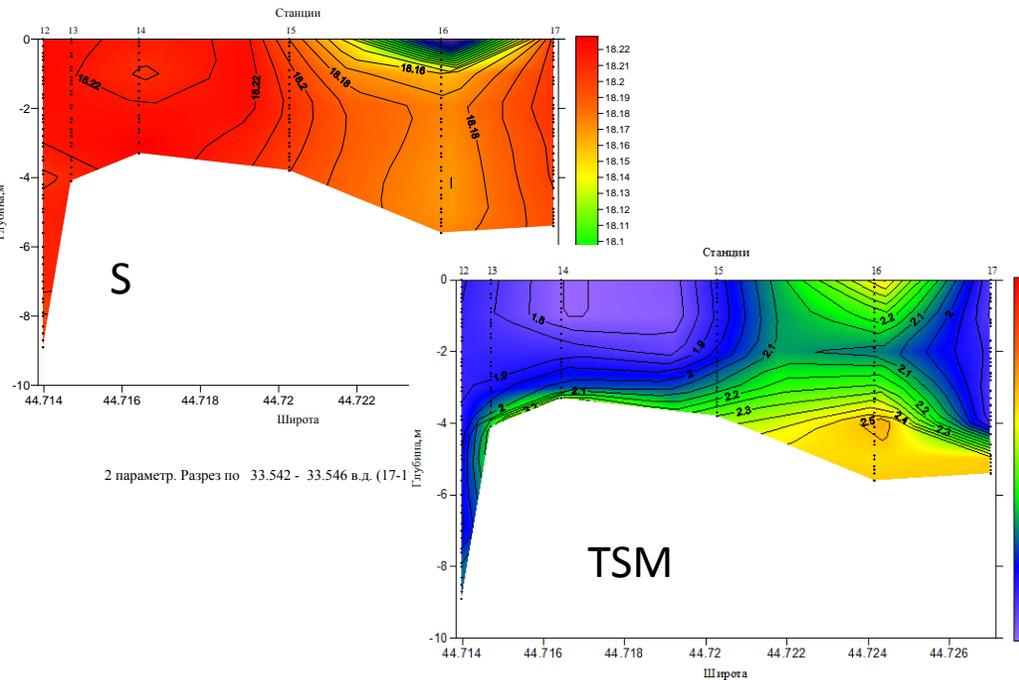


3 параметр. Разрез по 33.526 - 33.529 в.д. (17-17 сентября 2019 г.)

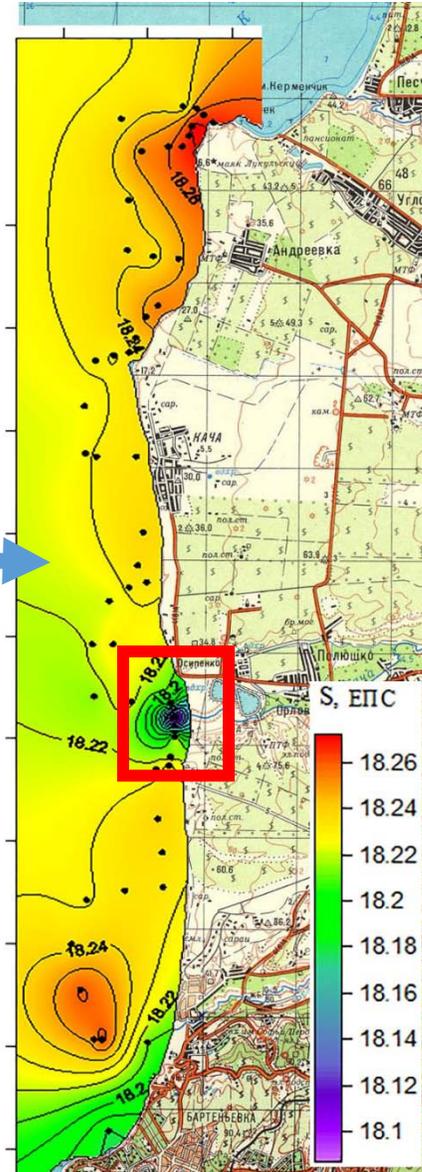
# Плюмы малых рек



Плюм реки Кача по измерениям БПЛА

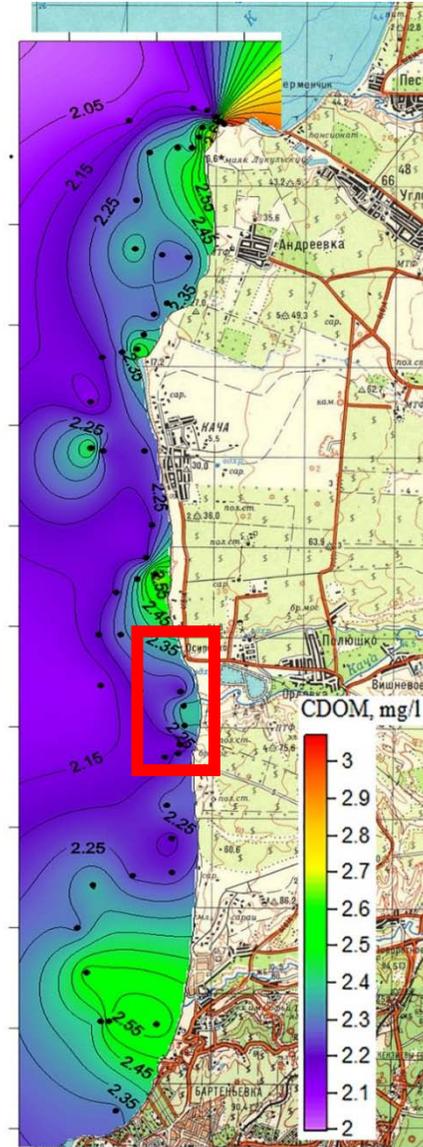


Соленость



Результаты экспедиционных исследований

Концентрация РОВ



Концентрация Хл

