

# «ВНУТРЕННИЕ СМЕРЧИ» В ВОДАХ ШЕЛЬФОВ.

Бондур В.Г.\*, Гребенюк Ю.В.\*, Муякшин С.И.\*\*,  
Сабинин К.Д\*\*\*, Серебряный А.Н.\*\*\*

*\* Научный центр аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос»,*

*\*\* Нижегородский университет им. Н.И.Лобачевского,*

*\*\*\* Акустический институт им. акад. Н.Н.Андреева*

Изучение мелкомасштабной изменчивости морских течений на шельфе Гавайев вблизи глубоководного выпуска сточных вод показало, что помимо внутренних волн и вихрей там встречаются узкие компактные вихри, диаметр которых существенно меньше их высоты.

*(Бондур, Гребенюк, Сабинин. ДАН 2009 т.429, №1, с110-11*

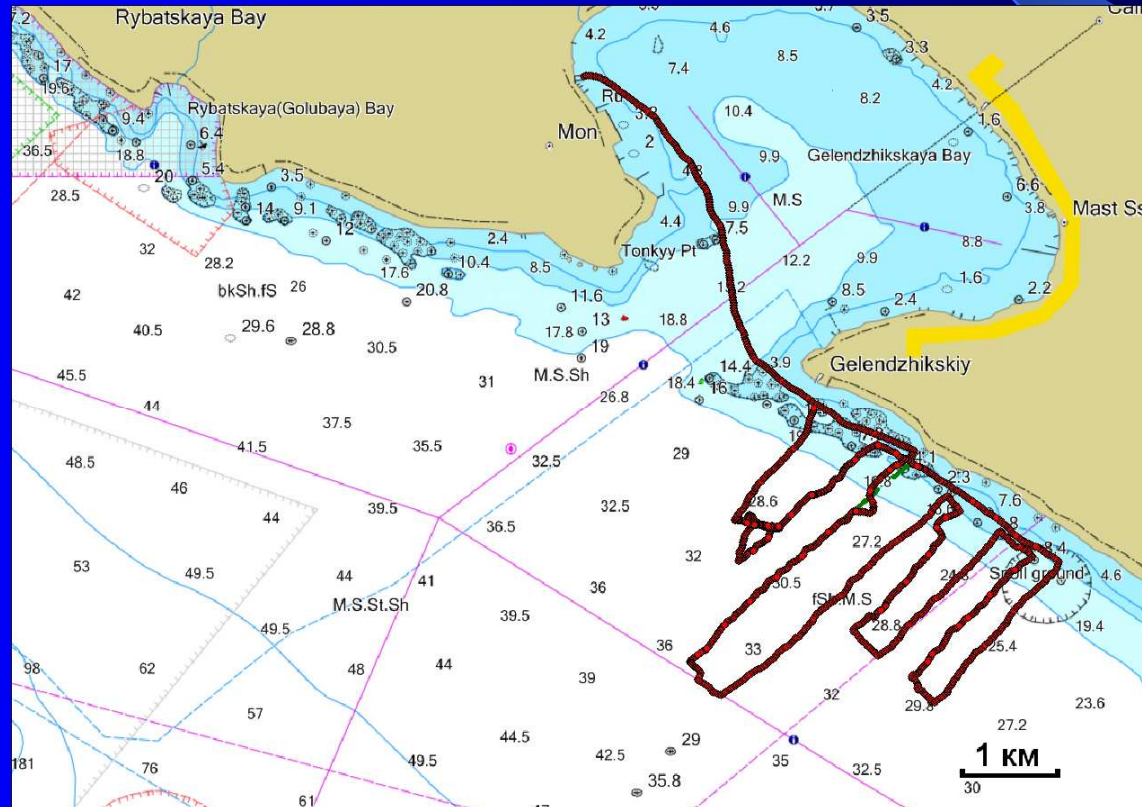
*Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Муякин С.И., Сабинин К.Д. ФАО, 2011, т. 47, №2, с. 1-9)*

Была выдвинута гипотеза, что такие вихри возникают в конвективных плюмах, связанных с придонными источниками вод пониженной плотности.

С целью продолжения изучения таких вихрей осенью 2009 г. были проведены исследования мелкомасштабных течений и звукорассеивающих слоев в районе глубоководного выпуска сточных вод на Геленджикском шельфе.

## Описание измерений

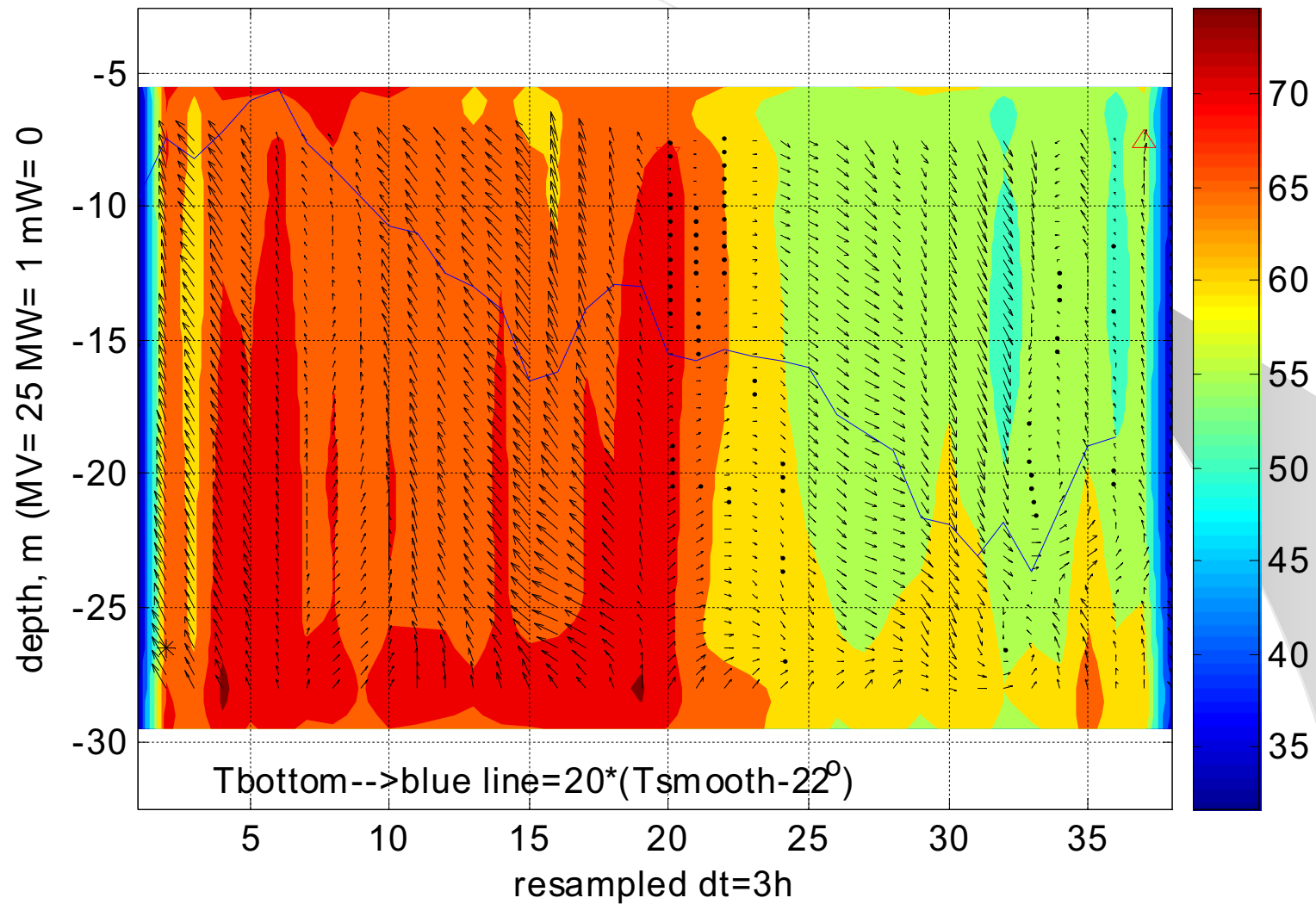
29 сентября - 10 октября были выполнены СТД-съёмки района с записями течений и обратного рассеяния с помощью буксируемого ADCP (Rio Grande 600 kHz), а с 6 по 11 октября проведены измерения с помощью донного ADCP и заякоренной термогирлянды, стоящих в десятке метров к северо-западу от конца сточной трубы. (Показана съёмка 10 октября)



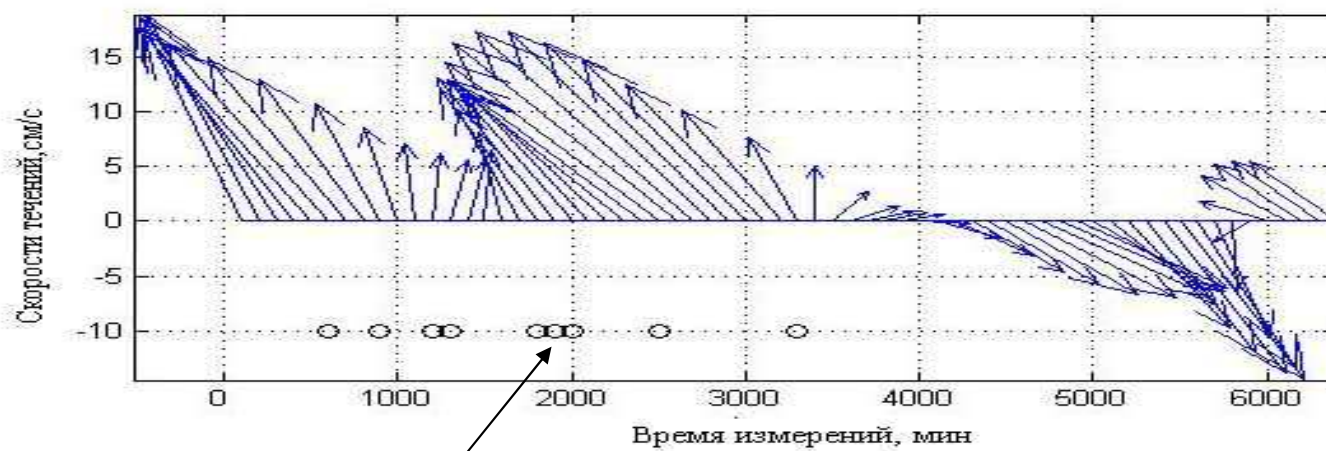


# Течения у конца трубы

[TubeUVbsLF} UVWBS4=(3,<250cpkm), resample(UVWBS4,8,1440)

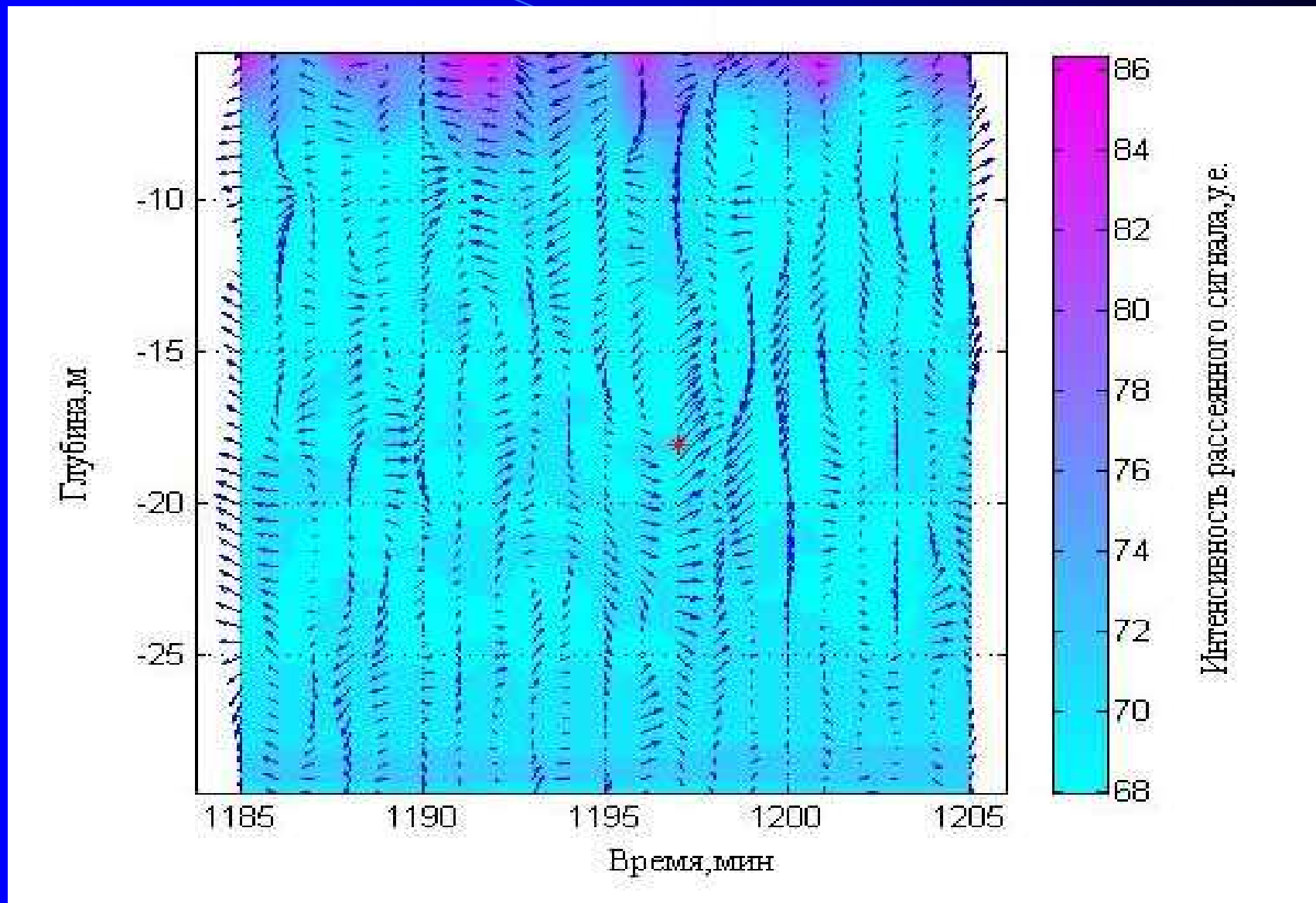


## Баротропные течения у конца трубы



Моменты  
появления импульсов

Донный ADCP: Резкие скачки скорости на многих горизонтах (до  $\pm 15$  см/с при СКО измерений  $\sim 1.7$  см/с). Наблюдались с 6 по 8 октября



Пример высокочастотных ( $>1$  цикл/час) двухполярных импульсов

## Принцип действия ADCP (пара лучей в вертикальной плоскости в поле скорости, однородном по горизонтали)

$$V_x = u = V \cdot \sin B$$

$$V_z = w = V \cdot \cos B$$

$$P_1 = V \cdot \cos(B - A)$$

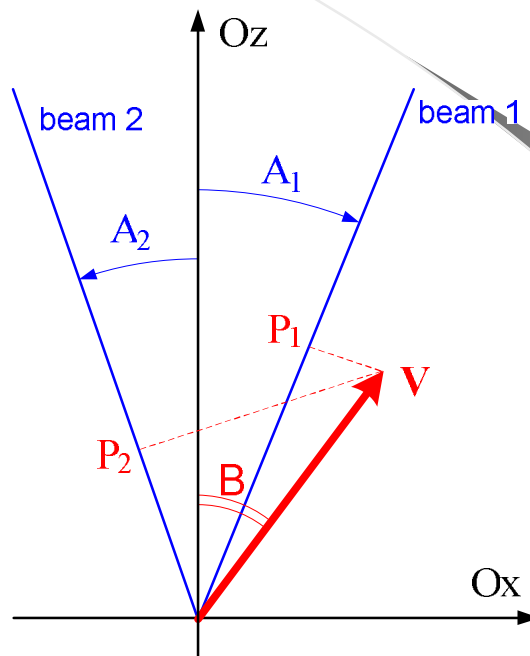
$$P_2 = V \cdot \cos(B + A)$$

$$P_1 = w \cdot \cos A + u \cdot \sin A$$

$$P_2 = w \cdot \cos A - u \cdot \sin A$$

$$u = (P_1 - P_2) / 2 \sin A$$

$$w = (P_1 + P_2) / 2 \cos A$$



При  $A = 20^\circ$   
расстояние  
между лучами  $\approx$   
расстоянию от  
ADCP.

Алгоритм расчета  
скоростей и «ошибки» для  
4-х лучевого ADCP

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ V_{err} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 \sin \alpha & -1/2 \sin \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 \sin \alpha & 1/2 \sin \alpha \\ 1/4 \cos \alpha & 1/4 \cos \alpha & 1/4 \cos \alpha & 1/4 \cos \alpha \\ 1/2\sqrt{2} \sin \alpha & 1/2\sqrt{2} \sin \alpha & -1/2\sqrt{2} \sin \alpha & -1/2\sqrt{2} \sin \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix}$$



## «Ошибка» измерений ADCP

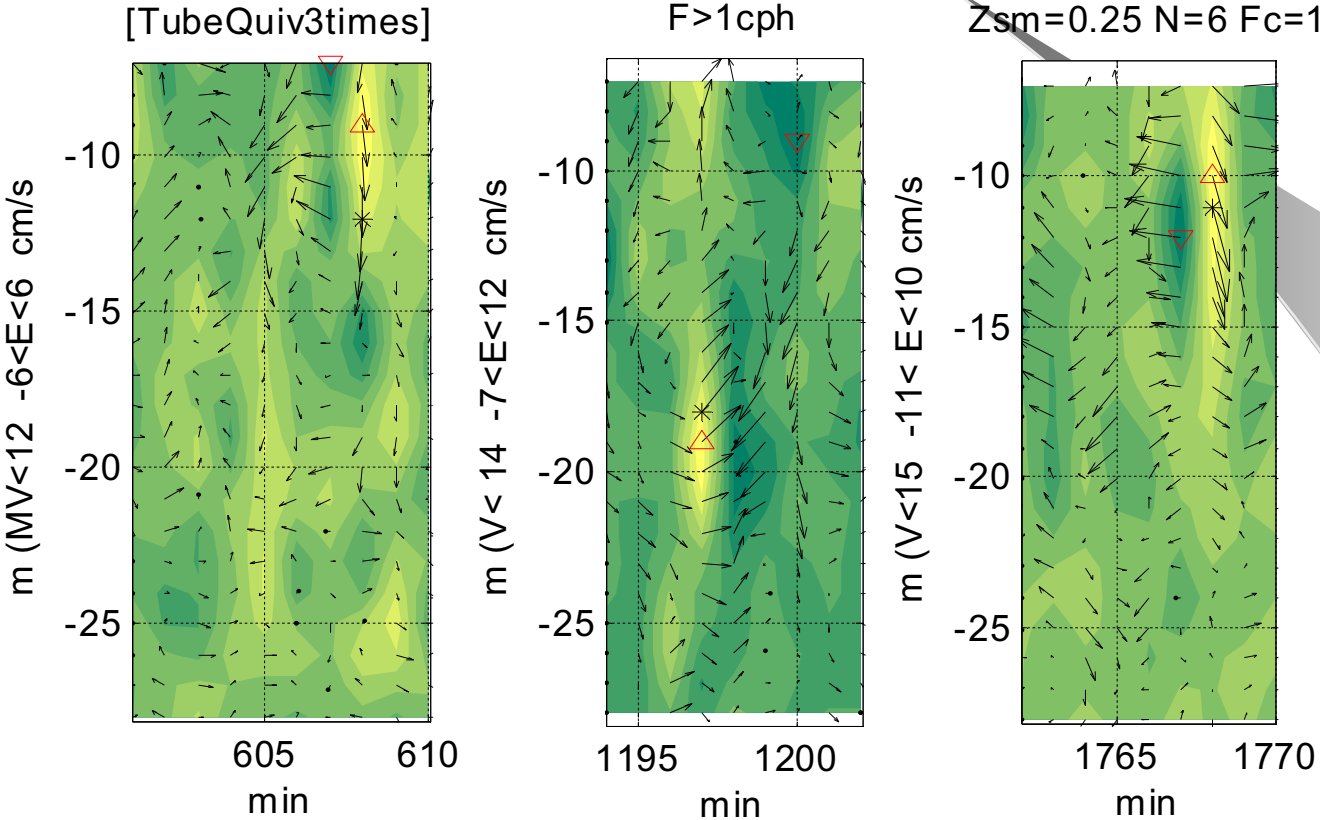
ADCP предназначен только для тех случаев, когда масштаб неоднородностей течения существенно больше расстояния между лучами прибора.

Минутные скачки скорости в показаниях ADCP не могут быть связаны с достаточно большими пространственными масштабами и поэтому сигнализируют лишь о неоднородности поля течений между лучами.

Мерой неоднородности является величина «Error» («ошибка») в 4-х лучевом ADCP, пропорциональная разности оценок  $V_z = W$  на двух парах лучей прибора, расположенных в перпендикулярных плоскостях.

Наблюдается приуроченность экстремумов «ошибки» измерений к выбросам течений.

# Вектора скорости и «ошибки»



## Моделирование отклика ADCP на прохождение тонких вихрей

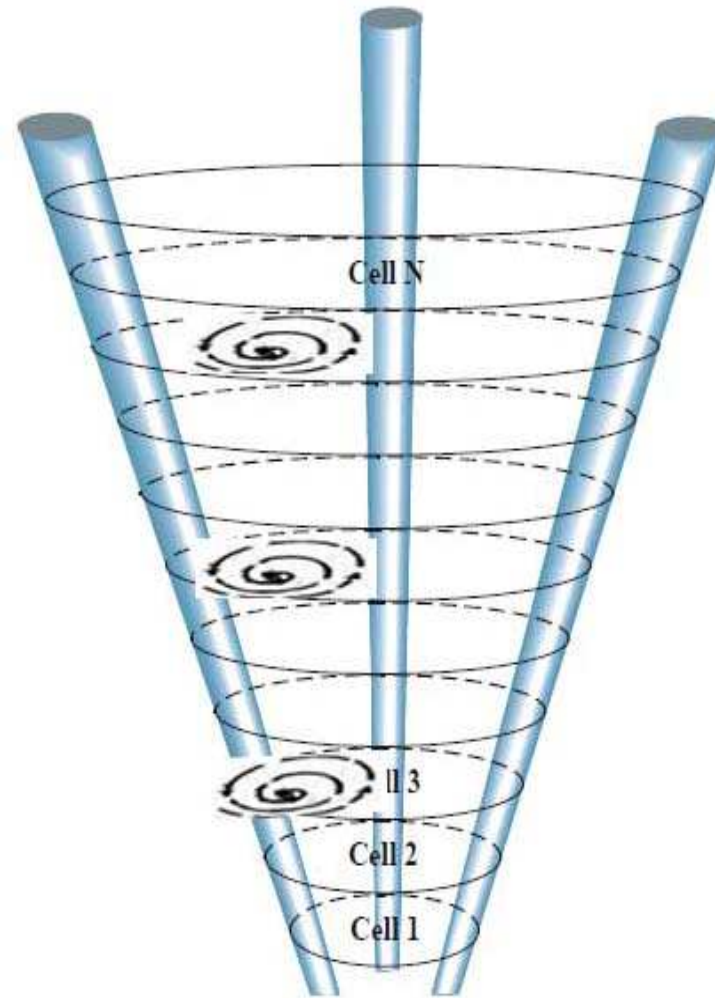
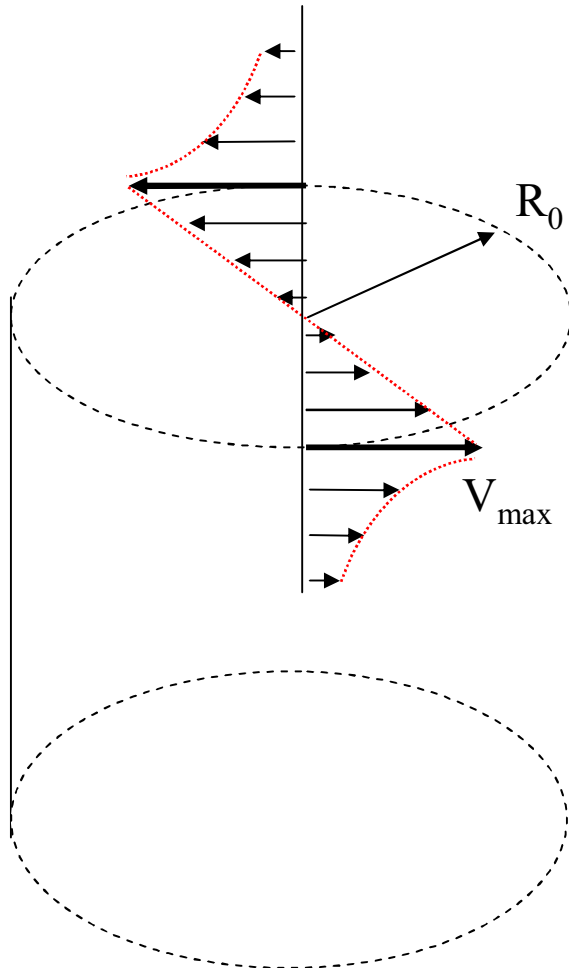
Моделировались отклики ADCP на цилиндрические вихри Рэнкина с радиусами 4 -10 м и с небольшими вертикальными течениями - от +2 см/с в центральной части вихря до -1 см/с на его периферии.

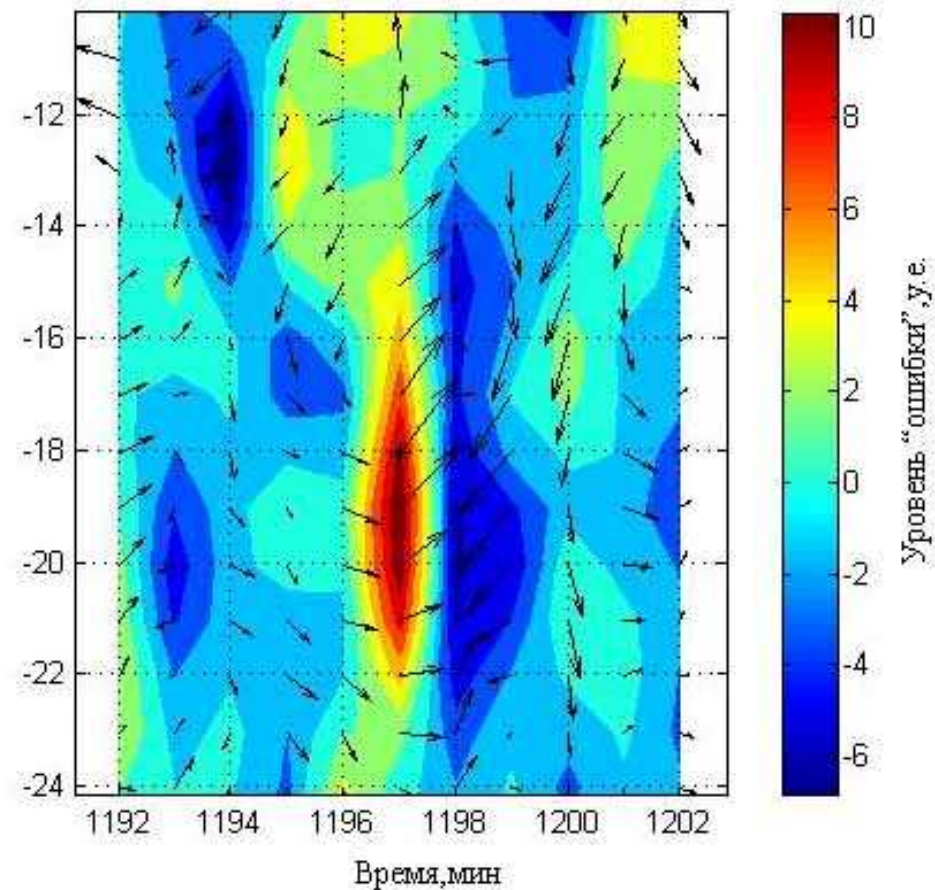
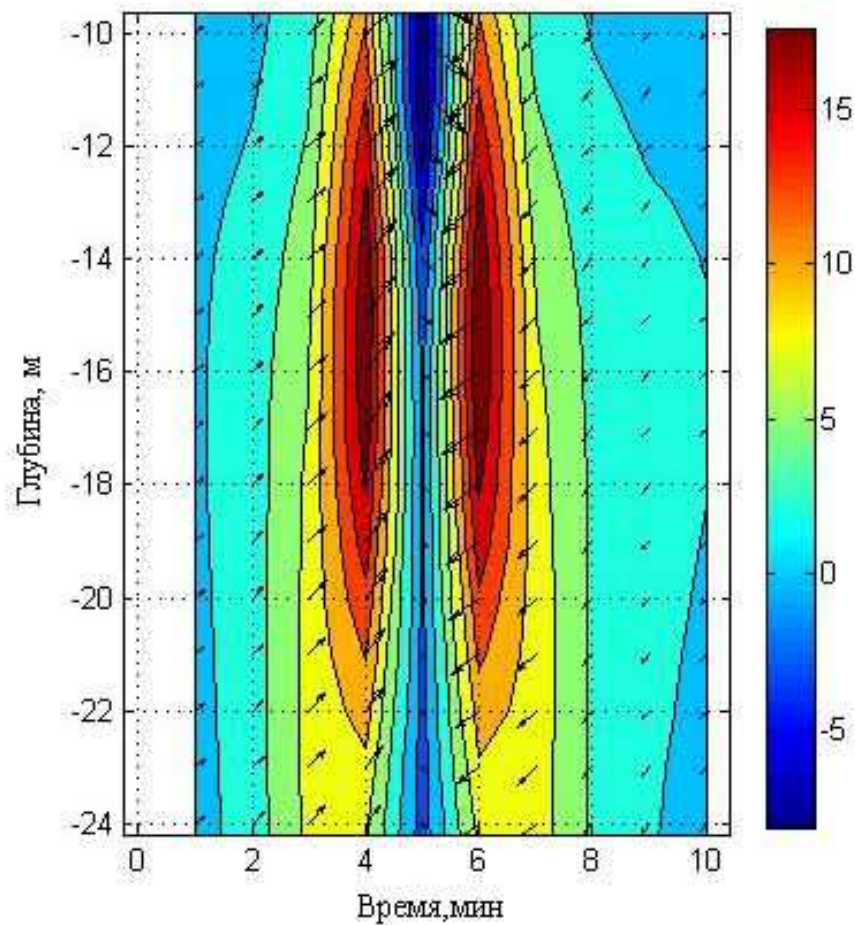
Азимутальная скорость в вихре Рэнкина линейно нарастает с удалением от центра до максимального значения  $V_{\max}$  при радиусе  $R_0$ , после чего спадает обратно пропорционально расстоянию:  $V=V_{\max} R_0/R$ .

Кроме параметров вихря, отклик зависит от знака его вращения, скорости и направления перемещения, положения траектории вихря относительно лучей ADCP и моментов времени снятия данных.

Наилучшее согласие модельных оценок с наблюдениями течений на 1194-1201 мин. было получено для антициклонического вихря с радиусом 8 м, проходившего над ADCP в северо-западном направлении со скоростью 0.15 м/с, что несколько отличается от пассивного переноса фоновым течением, равного 0.07 м/с и направленного на север.

# Вихрь Рэнкина и лучи ADP





Сравнение модельных оценок (а) с наблюдениями высокочастотных течений на 1194-1201 мин (б) по полю (время-глубина) векторов течений (стрелки) и уровню «ошибок» измерений (цветовая градация).

## Обсуждение результатов моделирования отклика ADCP на прохождение вихрей

Реальный вихрь не может полностью соответствовать упрощенной модели, тем более, что форма конвективных плюмов, в которых рождаются вихри, может отличаться от вертикального факела. Поэтому даже качественное совпадение картины векторов, меняющих направление на противоположное за 2 минуты при изменении погрешности «ошибки» с положительных на отрицательные значения за 1 минуту в модели и наблюдениях, позволяет считать, что над ADCP проходил компактный антициклонический вихрь с указанными выше параметрами.

Поскольку реальные вихри изгибаются фоновыми течениями и приобретают форму изогнутых вихревых шнуров, подобных скорее *смерчам*, чем колоннообразным вихрям, такие различия в результатах модельных расчётов и наблюдений вполне ожидаемы.

## Сравнение натуральных и модельных данных для Гавайского шельфа (ФАО, 2011, т. 47, №2, с. 1-9)

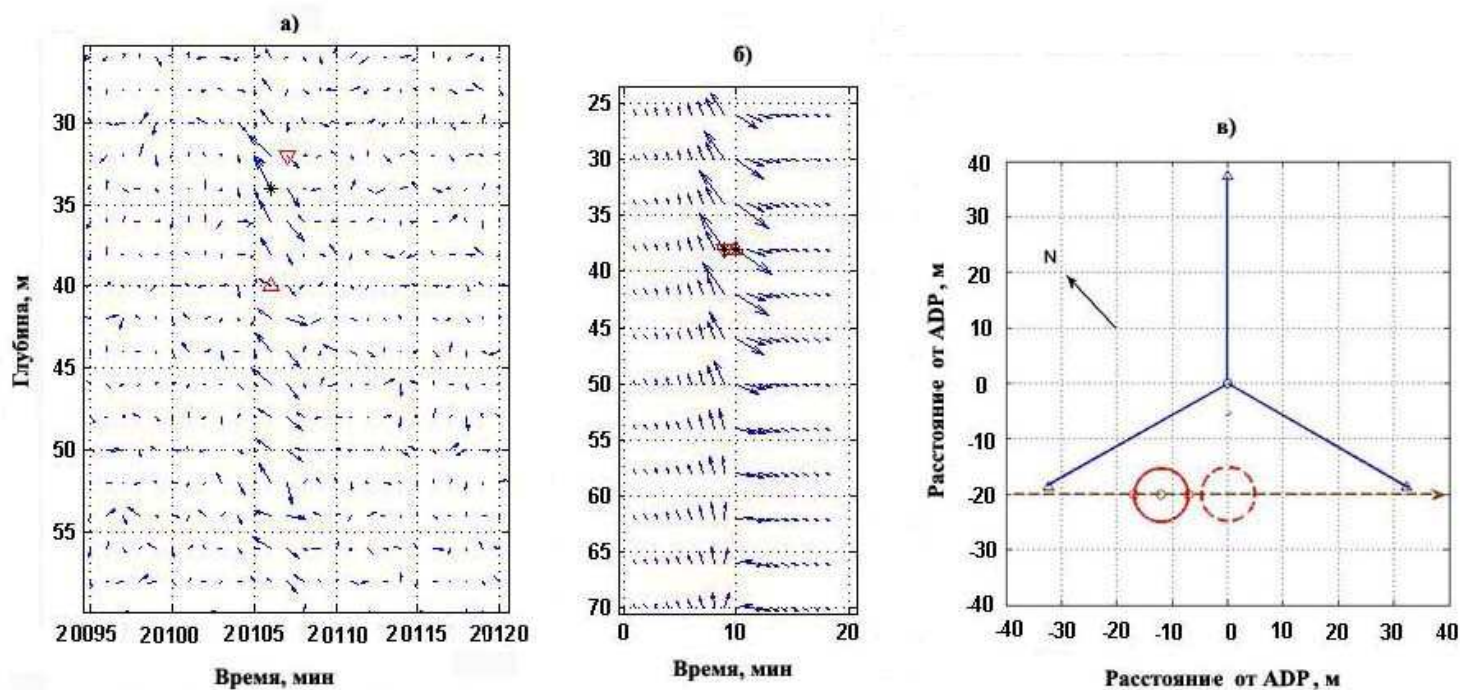


Рис.7 а-в. а) Импульсная вспышка высокочастотных (выше 10 ц/час) течений, зарегистрированная на 20106-ой минуте измерений в точке Bv в 2004 г. Изображены вектора течений (стрелки, север вверху). Положение максимума скорости, равного 42 см/с, отмечено звездочкой, а экстремумов вертикальной скорости, равных 6 и -5 см/с, - треугольниками с вершинами вверх и вниз, соответственно;  
б) Вектора течений по модели отклика ADP на антициклональный вихрь Рэнкина с параметрами  $R=5$  м и  $V_{max}=0.5$  м/с, проходящего мимо ADP на юго-восток со скоростью 0.2 м/с (центр вихря проходит в 20 м к юго-западу от ADP). Максимум горизонтальной скорости достигает 29 см/с, экстремумы вертикальной скорости равны +/-6 см/с.  
в) Схема движения вихря; тремя отрезками прямых, исходящими из общей точки, показаны проекции лучей АДП на морскую поверхность; граница центральной части вихря, на которой орбитальная скорость достигает максимума, показана окружностями для 9-ой (сплошная линия) и 10-ой (пунктир) минут расчёта, что соответствует 20106-ой и 20107-ой минутам измерений; стрелкой указано направление на север, пунктирной линией - траектория вихря

## Заключение

Факты: в окрестностях сточной трубы на Геленджикском шельфе, как и на Гавайском, встречаются компактные смерчеобразные вихри, диаметр которых меньше их высоты (глубины).

Генезис: вихреобразование в конвективных плюмах сточных вод.

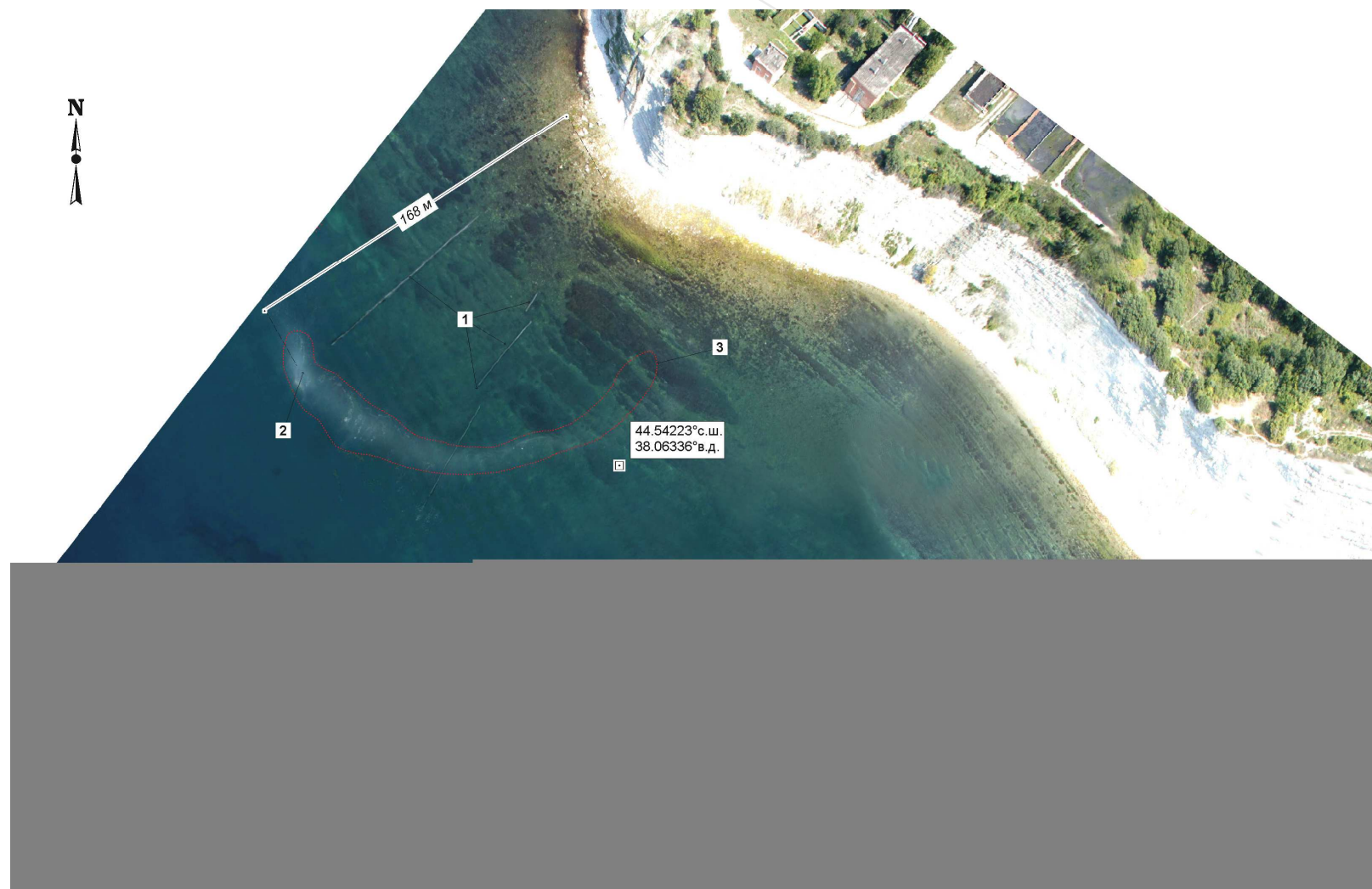
Значение: захваченная такими антропогенными вихрями загрязнённая вода может распространяться не так, как при диффузии, т.е. без разбавления и на более значительные расстояния.

Задачи:

- (1) Изучение подробной структуры и эволюции антропогенных «внутренних смерчей» с целью выяснения их роли в распространении загрязнённых вод.
- (2) Поиск не-антропогенных «внутренних смерчей» в местах выхода со дна вод пониженной плотности и газа
- (3) Изучение проявлений «внутренних смерчей» на морской поверхности.



# Вертолётный снимок района трубы сброса сточных вод у Геленджика (О.Ю.Лаврова)





Laboratory experiments showing similar behavior in case of sinking liquid in rotating fluid.

(Courtesy by Yuli D. Chashechkin and E.V. Stepanova),

Transport of a dye (uranil) in a compact compound vortex from a drop placed on some distance from the vertical axe of rotation (Water depth 40 cm, rate of rotation 800 cycle per minute, the disc radius 7.5 cm), age of a dye spot= 79 s.

