

Сравнение течений по данным КВ и СВЧ радиолокаторов с данными ADCР на гидрофизическом полигоне в Геленджике

Телегин В.А.^{1,2}, Горбацкий В.В.³, Зацепин А.Г.¹,
Ивонин Д.В.¹, Мысленков С.А.^{1,4,5}, Сильвестрова К.П.¹,
Баранов В.И.⁶, Куклев С.Б.⁶, Дудко Д.И.³, Шпилев Н.Н.³

(1) *Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН*

(2) *ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.*

(3) *ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт Петербург, 196158, Россия*

(4) *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

(5) *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации*

(6) *Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН*



План доклада

- Опыт использования доплеровского радара Sea Sonde (CODAR, США) для измерения скорости поверхностного течения на акватории **гидрофизического** полигона г. Геленджик в 2015-2016 гг.
- **Возможности оценки вектора скорости течения по однопозиционным данным КВ радара**
- Сопоставление данных радиолокационных КВ измерений с измерениями *in situ* с помощью ADCP
- **Сопоставление данных радиолокационных КВ и СВЧ измерений скорости течения**
- Предварительны выводы и планы развития радиолокационных методов измерения скорости течения на полигоне в ближайшие годы.



2015-2016 гг.

Опыт использования доплеровского радара

Sea Sonde (CODAR, США)

для измерения скорости поверхностного течения

на акватории **гидрофизического** полигона

г. Геленджик

Доплеровский КВ (25 МГц) радиолокатор Sea Sonde (CODAR, США) – КГНЦ, СПб

Блоки передатчика и приёмника



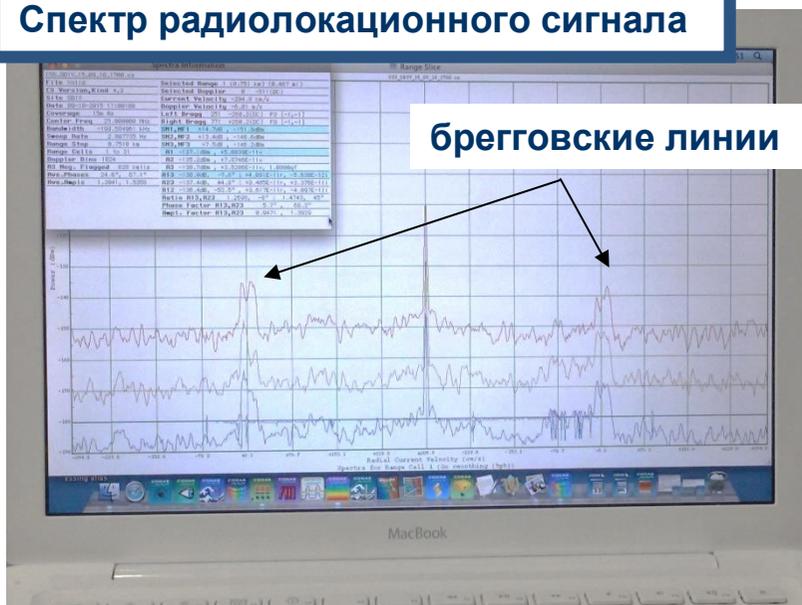
Приёмная и передающая антенны



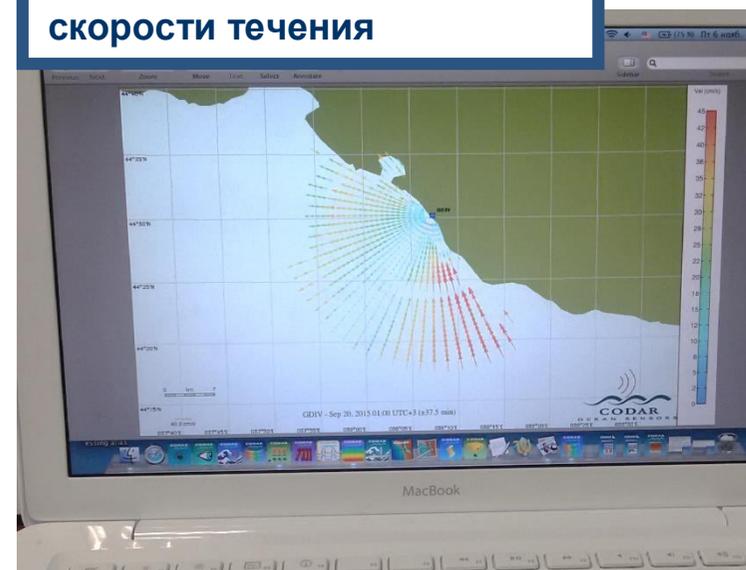
Комбинированная антенна



Спектр радиолокационного сигнала

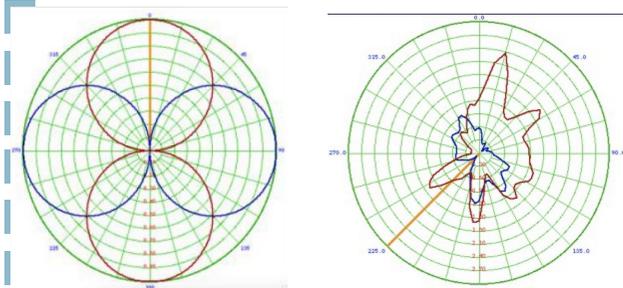


Радиальные составляющие скорости течения



Настройка измерительной системы радиолокатора Sea Sonde

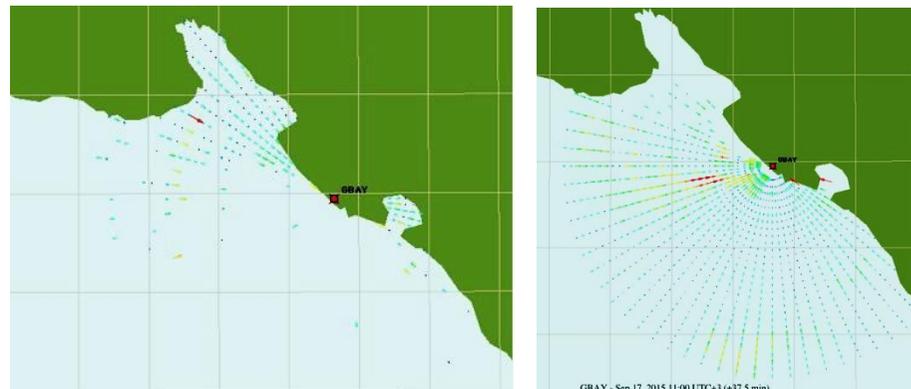
Диаграмма направленности



Идеальная диаграмма направленности

Фактическая диаграмма в точке приёмной ант

Фазовый параметр - определяется по результатам предварительных измерений (4 - 5 часов)



Поле радиальных скоростей комбинированной антенны

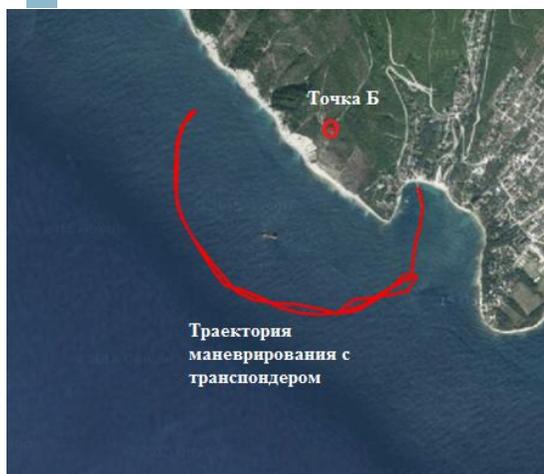
Без фазы

С фазой

Параметры передатчика, настраиваемые в точке стационарной установки антенн

Receiver Controller			
Freq	25.000000 MHz	Sweep Rate	2.01 Hz
BW	199.585 kHz	Bandwidth	200 kHz
Blank	364.800 μ s	Blanking	Pulse
BDelay	8.550 μ s	Transmit	Pulse
Atten	4.0 dB	Freq. Sweep	Sweep
Align	1635.2 μ s	Freq. Inc Rate	7600nS
Send	VER	Sweep Direction	Down
Rng Step: 0.751km Max: 33km		Sampling	243.2 μ S
Samples per Sweep is 2048		Freq. Band	Low
Refresh	Store	Pulse Shaping	Off

Полное время настройки радара Sea Sonde в одной точке – 2 дня

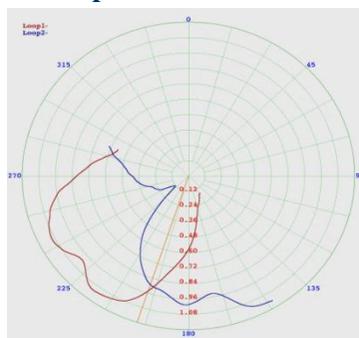


Траектория маневрирования с транспондером

Траектория измерения диаграммы в точке Б



Транспондер для измерения диаграммы

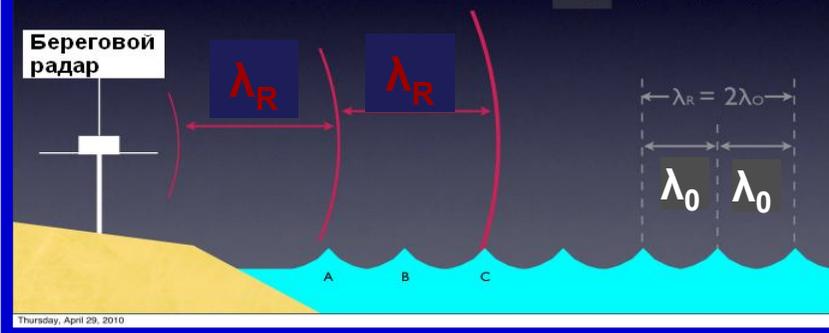


Измеренная диаграмма

Принципы радиолокационного измерения скорости течения

Береговое рассеивание радиолокационного сигнала от морского волнения

Скорость течений определяется путём спектральной обработки рассеянного сигнала



Условие резонансного (берегового) рассеяния

$$\lambda_0 = \frac{1}{2} \lambda_R$$

Базовая доплеровская частота определяется из дисперсионного соотношения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \frac{2\pi}{\lambda_0}}$$

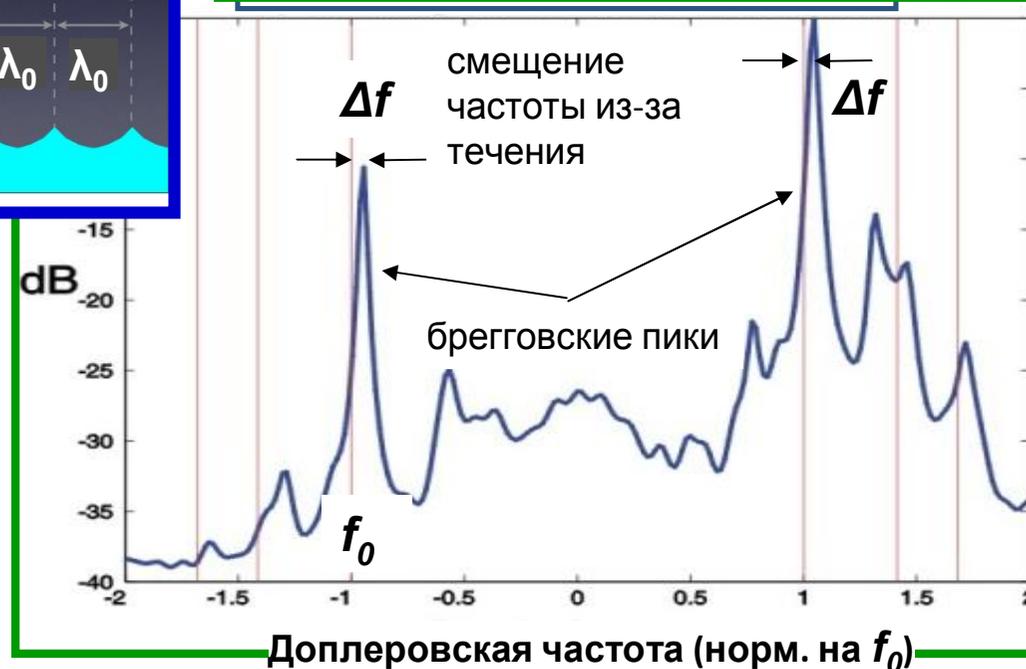
7

Для радара 25 МГц: $f_0 = 0.5$ Гц

Радиальная (вдоль луча радара) скорость течения

$$U_{radial} = \frac{1}{2} \lambda_R \Delta f$$

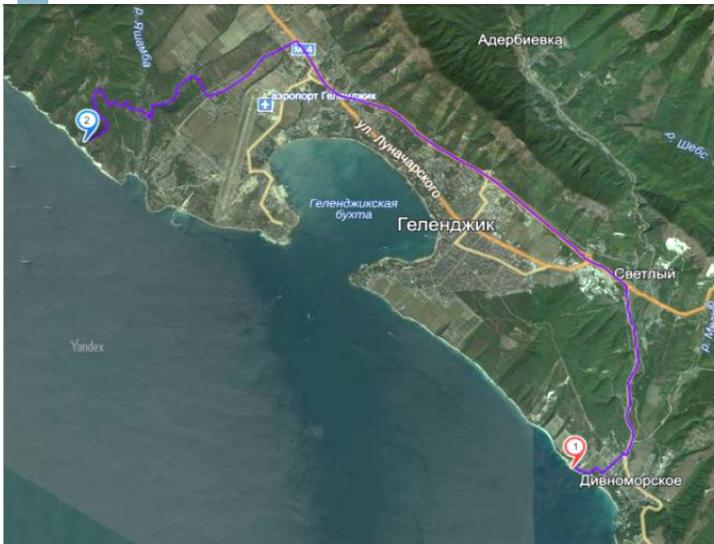
Доплеровский спектр сигнала КВ радара, отражённого от морской поверхности



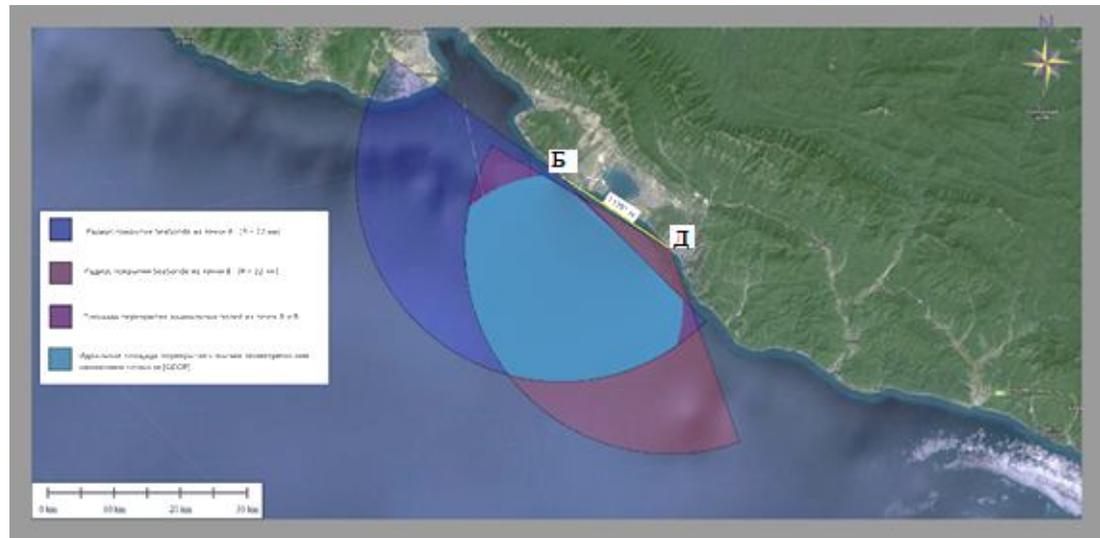
← волны, бегущие от радара →

← волны, бегущие на радар →

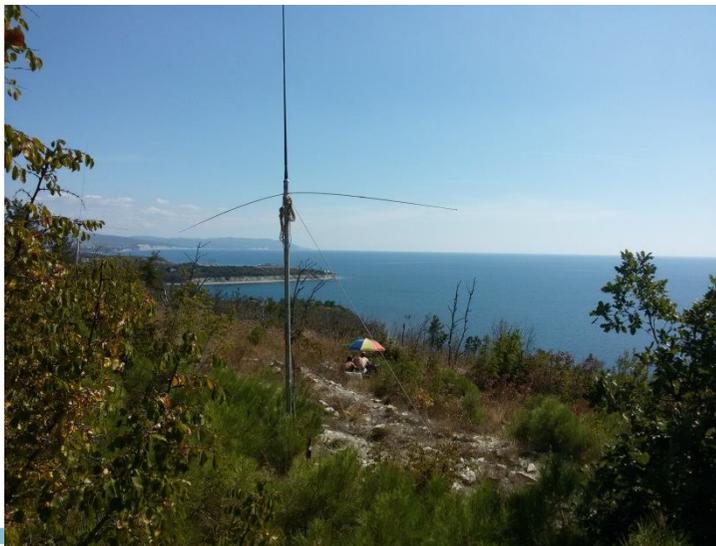
Измерение скорости течения доплеровским КВ радаром Sea Sonde в 2015 г.



Автомобильный путь между точкам установки антенн - 27 км, вдоль берега – 13 км.



Область зондирования течений на морской поверхности



8

Антенны в точке Б (над Голубой бухтой)



Антенны в точке Д (Дивноморское)

Возможности оценки **вектора** скорости течения по однопозиционным данным КВ радара

1. CODAR

- Aguilar, H., Fitzgerald, R., Barrick, D., Bonner, J., & Perez, J. (2003, March).

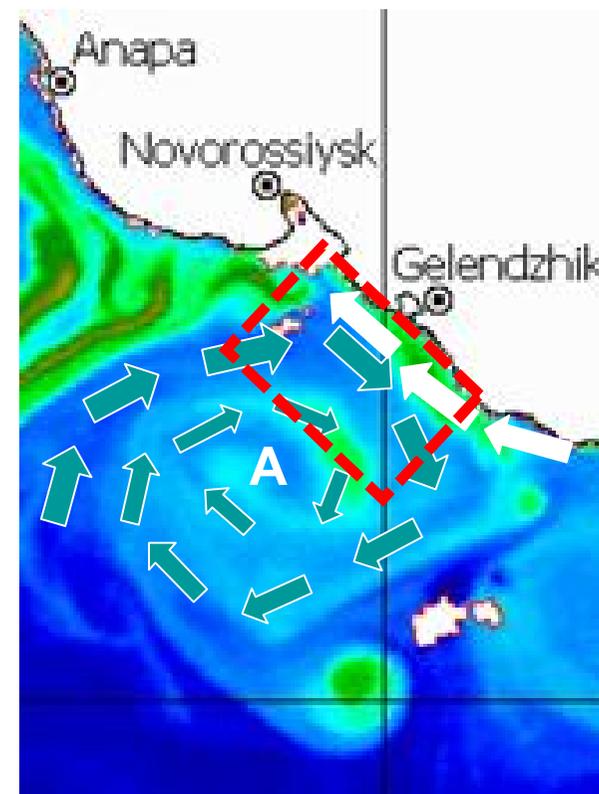
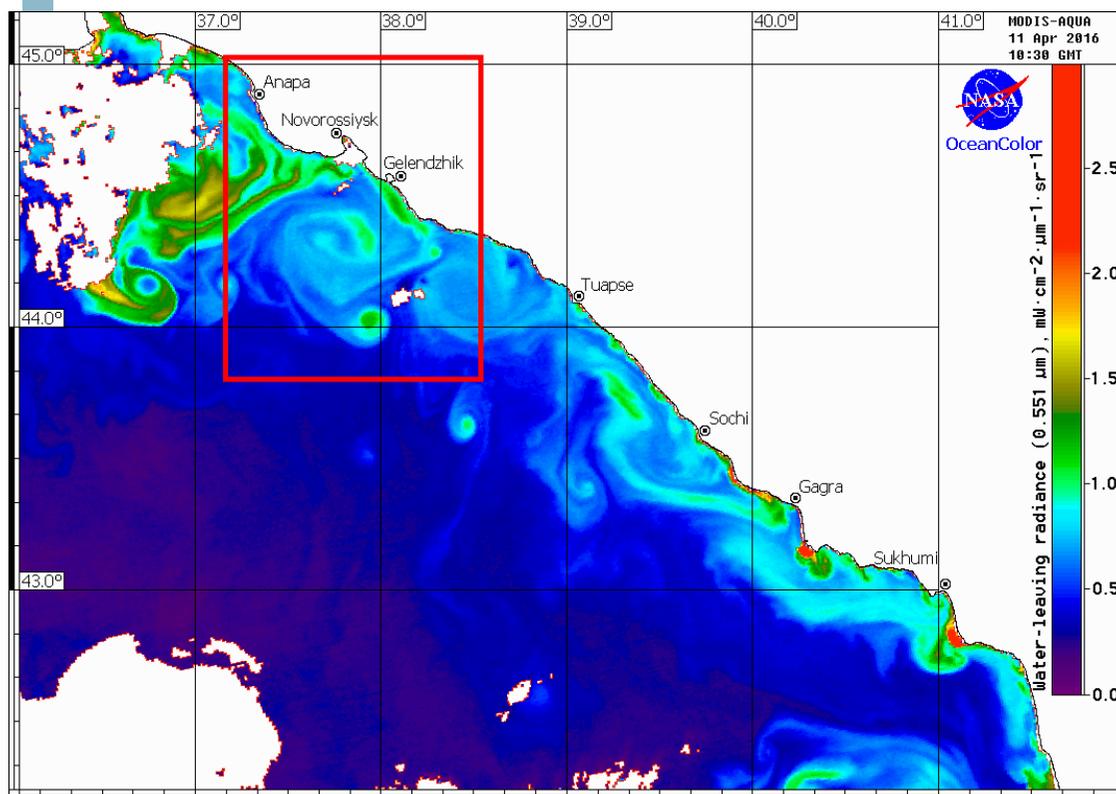
Fitting normal modes to HF radial and total surface current vector data over enclosed bays and estuaries // In Current Measurement Technology, 2003. Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on (pp. 101-104). IEEE.

- Aguilar H. **Fitting Normal Modes to HF Radial and Total Surface Current Vector Data Over the Corpus Christi Bay Area** // MASTER OF SCIENCE THESIS, the Faculty of the Graduate School, The University of Texas at El Paso, Physics Department, July 2003, 124 p.

2. Горбацкий и др. (НИЦ им. Крылова), **пример в данном докладе**

3. в предположении однородности течения на элементарных участках 3×3 кв. км (Сабинин, Ивонин, **пример в данном докладе**).

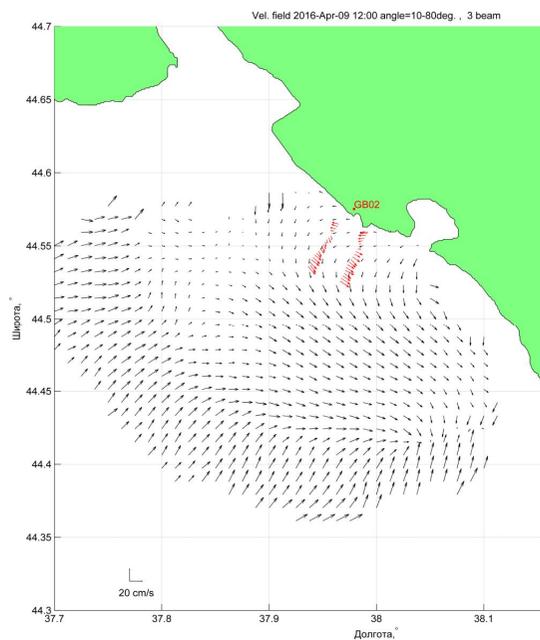
Прибрежные вихревые системы 11 апреля 2016 на спутниковом снимке MODIS-Aqua в поле взвешенного вещества



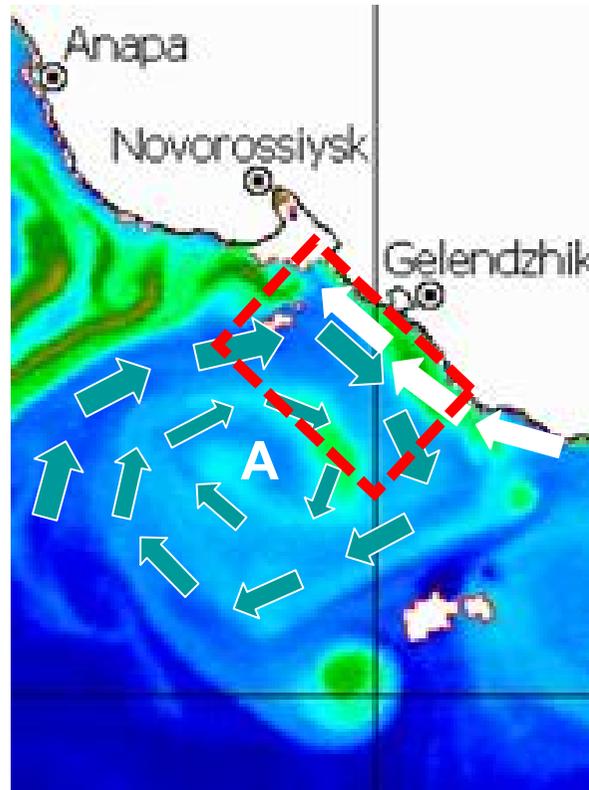
Изображение, отмеченное красным прямоугольником на снимке слева, показано справа крупным планом. Серыми стрелками отображается поле скорости поверхностного течения в мезомасштабном антициклоническом (A) вихре. Черными стрелками у берега показано циклоническое «отжимное» течение. Это структура поля течения проявляется в результатах съемки буксируемым ADCP и в результатах обработки радарных одноточечных измерений. Область радарных измерений на правом рисунке отмечена жирным красным пунктиром.

Сопоставление результатов построения поля скорости поверхностного течения по «одноточечным» (Горбацкий) радарным измерениям и по результатам буксировки ADCP

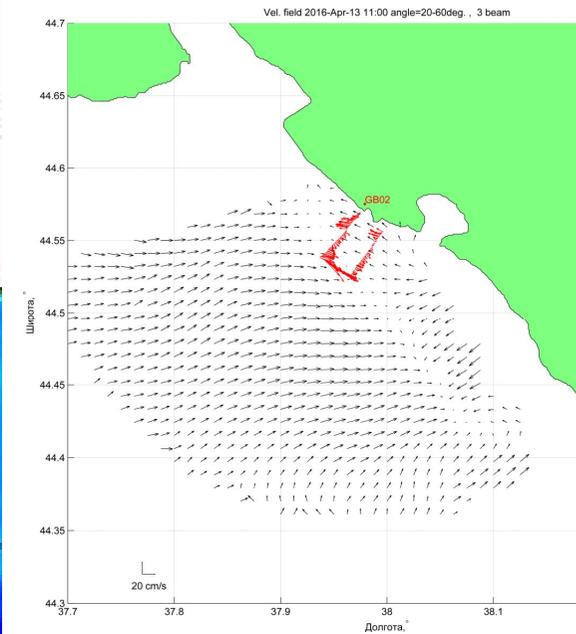
9 апреля 2016 г.



11 апреля 2016 г.



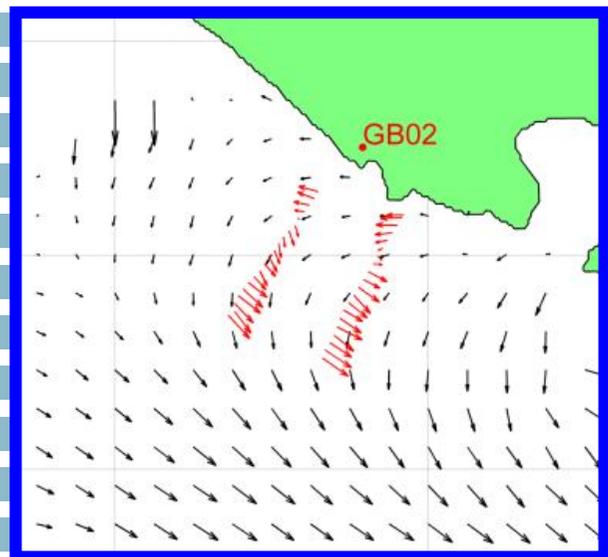
13 апреля 2016 г.



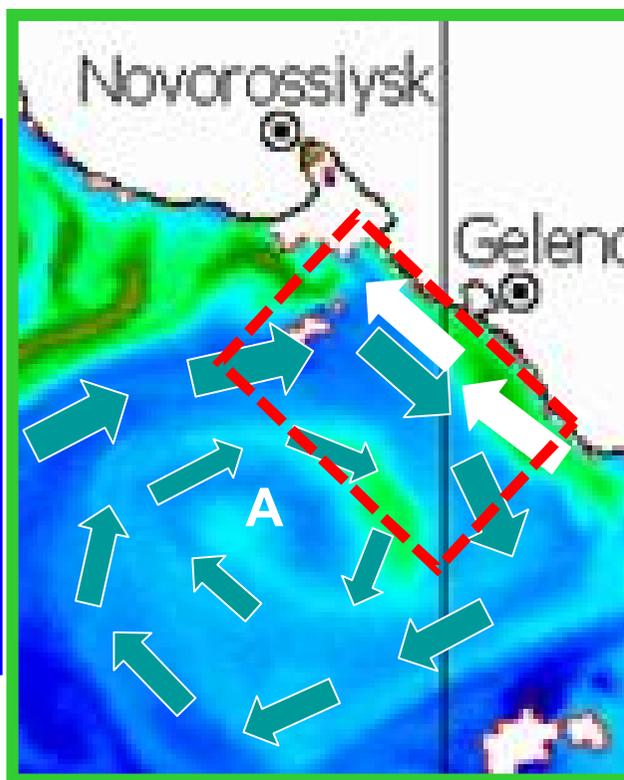
Сопоставление результатов построения поля скорости
поверхностного течения по «одноточечным» (Горбацкий)
радарным измерениям, результатам буксировки ADCP и данным
MODIS-Aqua (9-13 апреля 2016 г.)

Крупный план

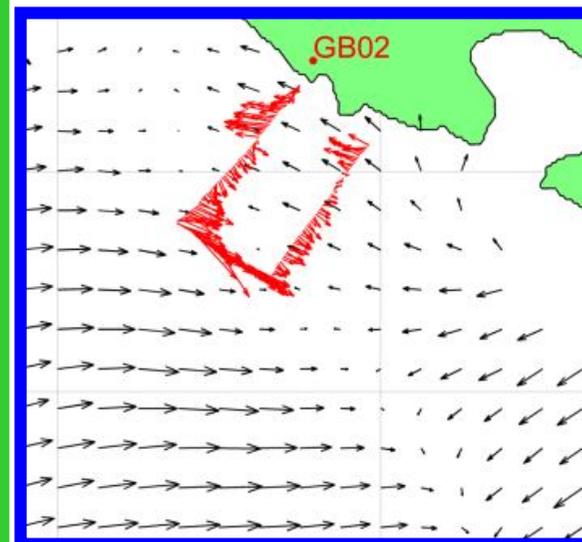
9 апреля 2016 г.



11 апреля 2016 г.



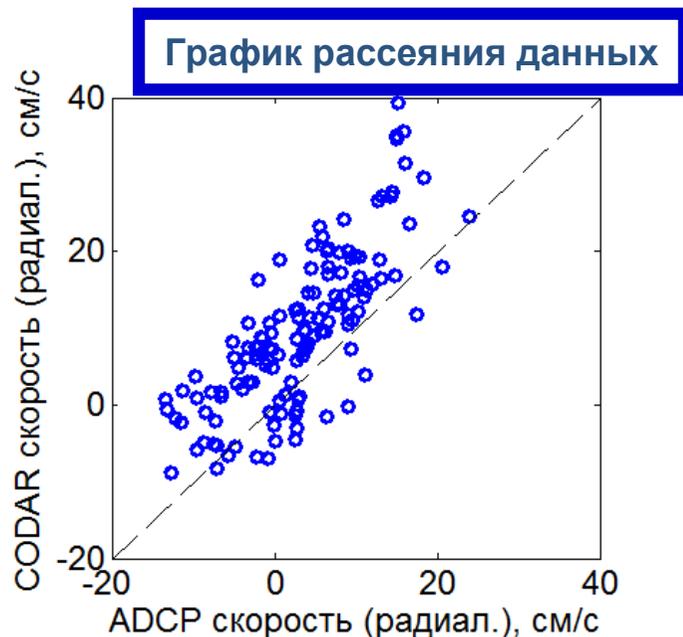
13 апреля 2016 г.



12

Вывод: наблюдается корреляция между данными КВ радара,
буксируемого ADCP и снимком MODIS-Aqua

Сравнение радиальной компоненты течения по данным КВ радара и ADCP (октябрь 2016 г.)

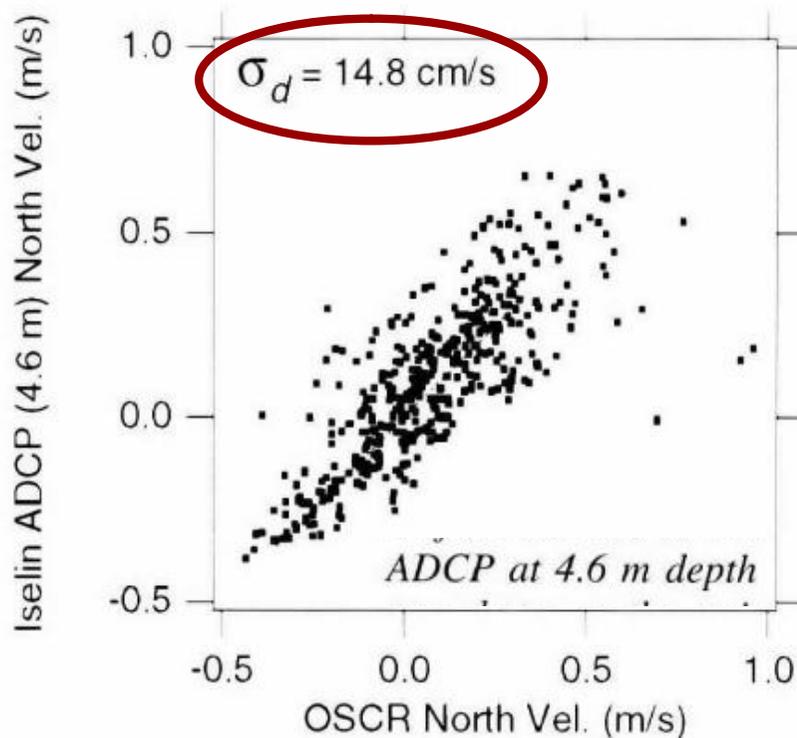


- КВ радар завышает течение на 7 см/с по сравнению с ADCP
- среднеквадратичный разброс 7 см/с

Мировой опыт: график рассеяния данных КВ радара и ADCP для радиальной компоненты скорости течений (Chapman & Graber, 1997; Kohut et al., 2006)

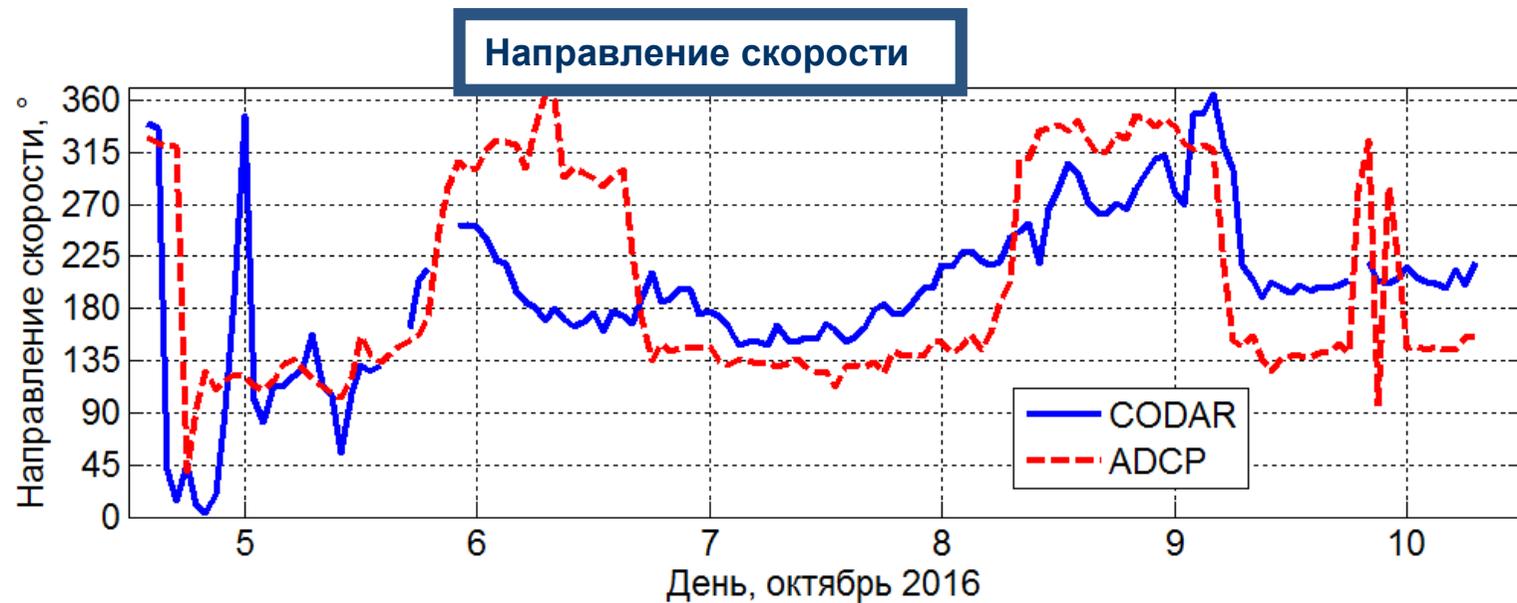
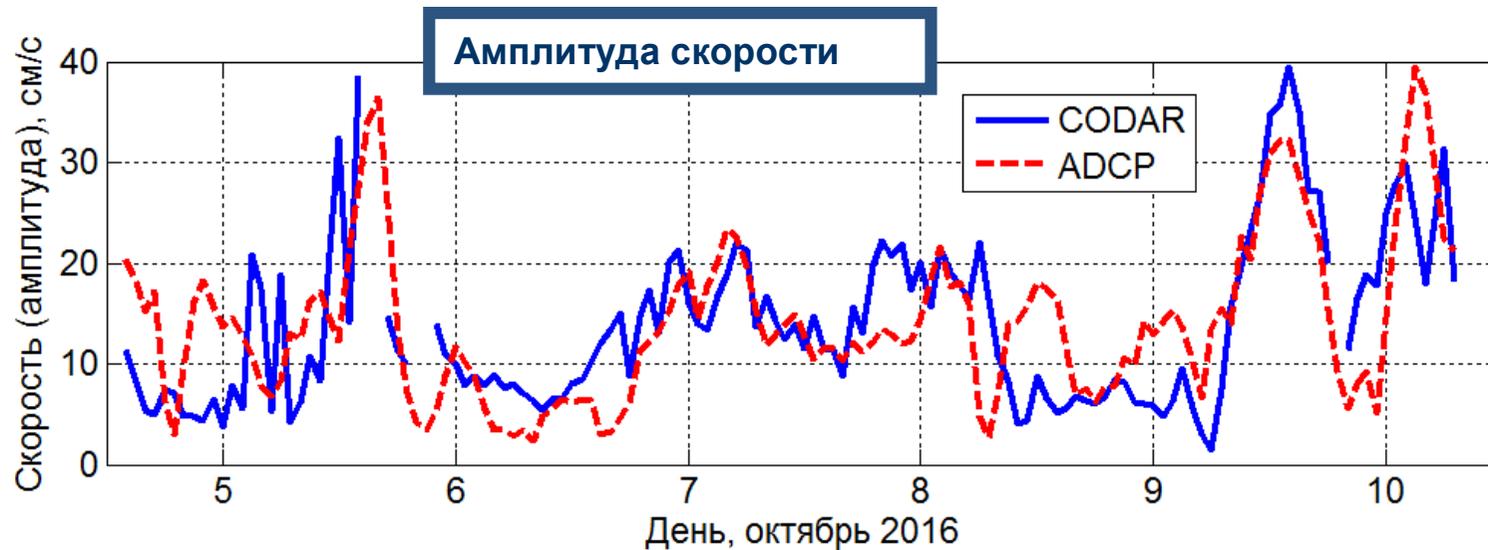
1) Chapman R. D., Graber H. C. **Validation of HF radar measurements** // Oceanography, Washington DC, Oceanography Society. – **1997**. – Т. 10. – С. 76-79.

2) Kohut J. T., Roarty H. J., Glenn S. M. **Characterizing observed environmental variability with HF Doppler radar surface current mappers and acoustic Doppler current profilers: Environmental variability in the coastal ocean** //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2006. – Т. 31. – №. 4. – С. 876-884.



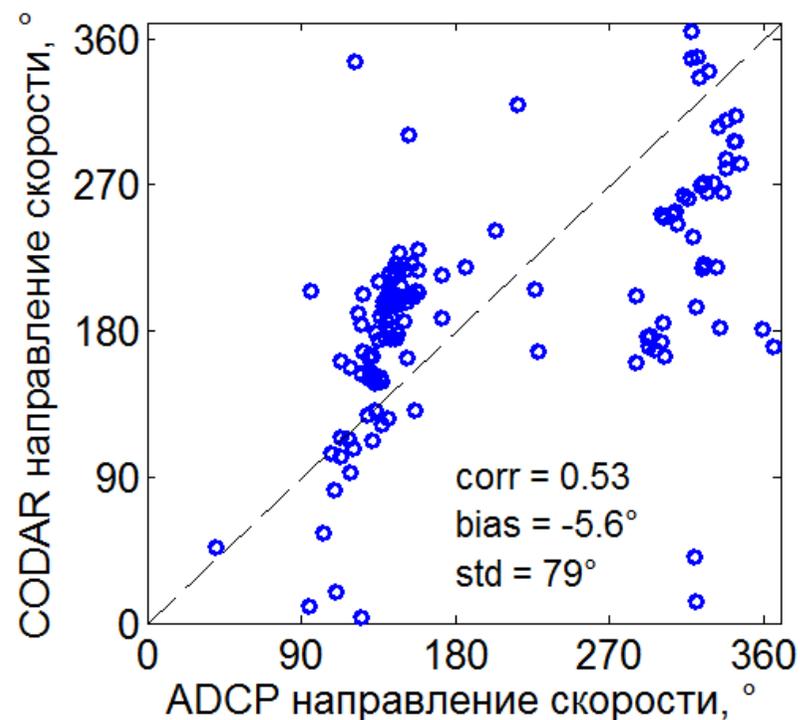
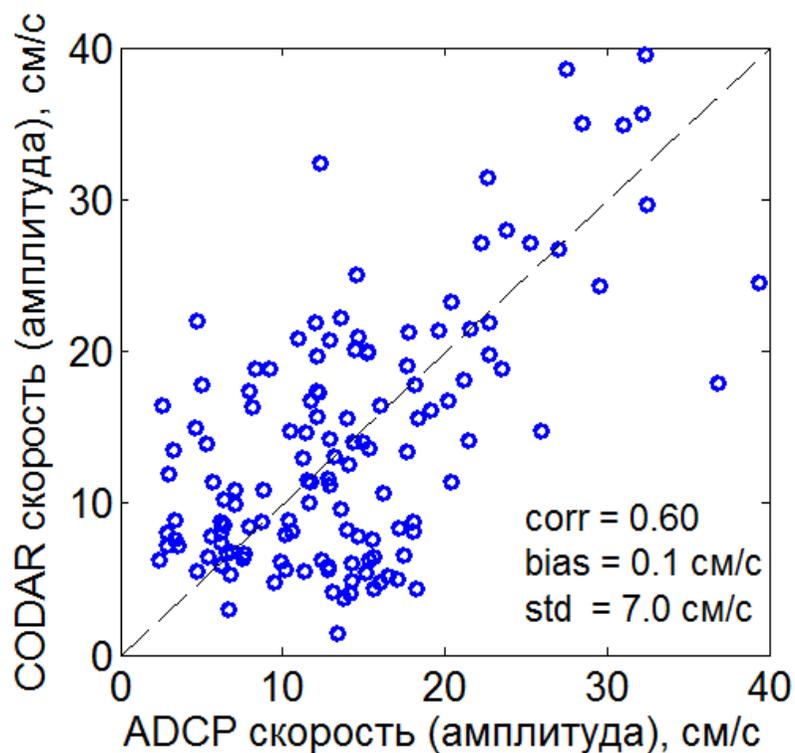
- **наш опыт:**
КВ радар завышает течение на 7 см/с по сравнению с ADCP
+ среднеквадратичный разброс 7 см/с
= суммарная ошибка 14 см/с
(при типичном течении 20 см/с)
- **мировой опыт:**
среднеквадратичный разброс 10-27 см/с
(при типичном течении 30-60 см/с)

Сравнение **вектора** течений по данным КВ радара и ADCP октябрь 2016 г. (использовалась процедура Горбацкий и др.)

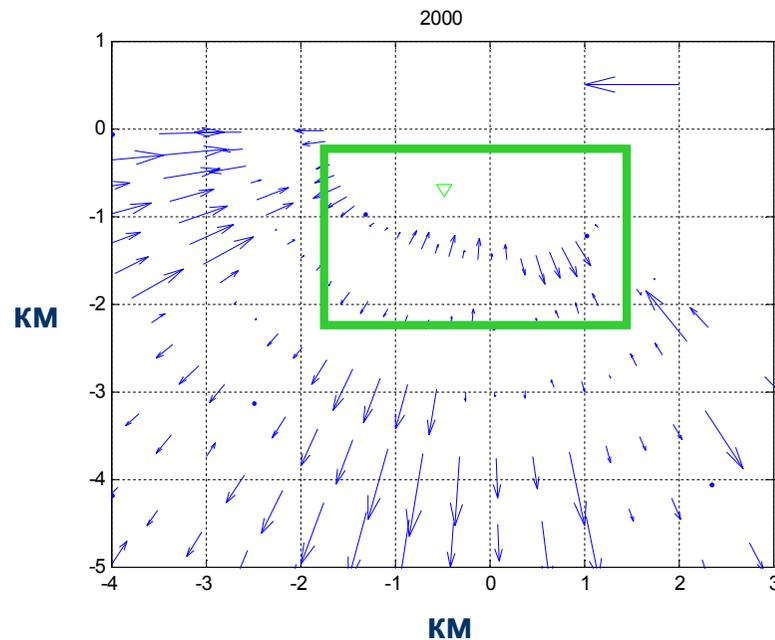


Графики рассеяния данных КВ радара и ADCP для вектора скорости течений

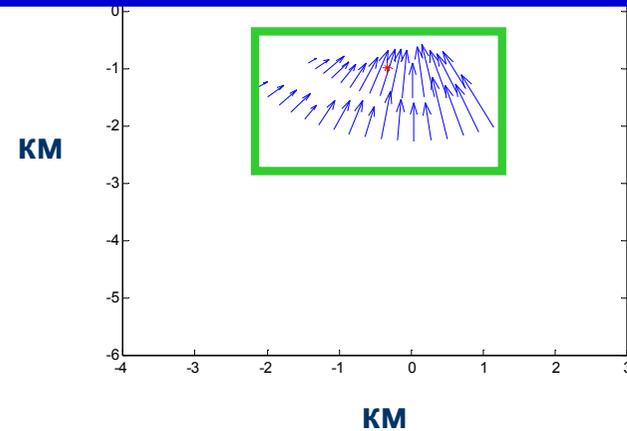
октябрь 2016 г. (использовалась процедура Горбацкий и др.)



Методика восстановления вектора скорости течений по данным КВ радара в предположении однородности течения на элементарных участках 3 км × 3 км (Сабинин, Ивонин) данные - апрель 2016 г.



Радиальные компоненты CODAR скорости течения на участке 3 км × 3 км

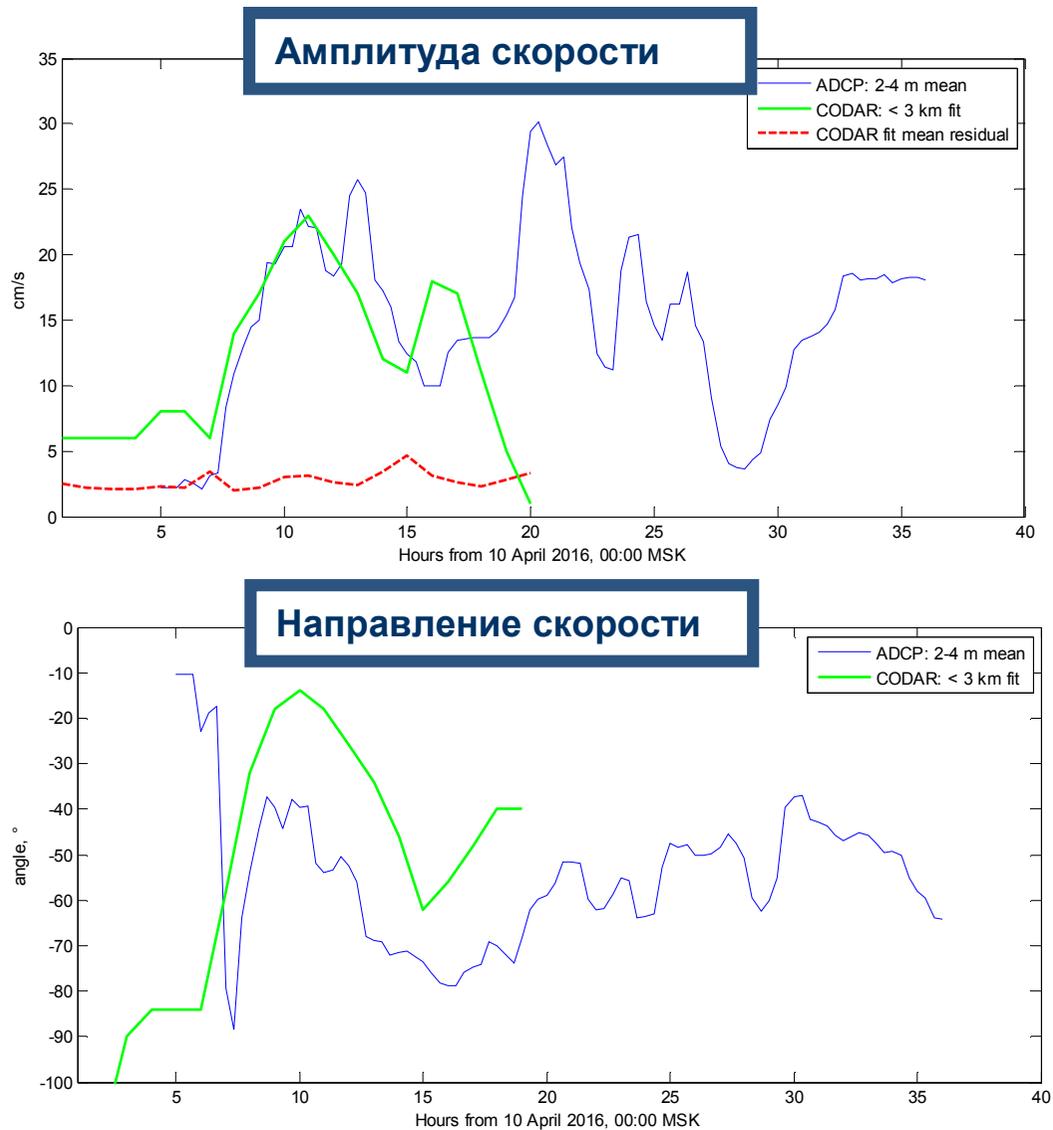


Минимизируется функционал невязок на участке 3 км × 3 км

$$res_1(U_{1,mean}, \theta_{1,mean}) = \frac{\sum_{i,j} [U_1(r_i, \varphi_j) - U_{1,mean} \cdot \cos(\theta_{1,mean} - \varphi_j)]^2 \cdot \psi_1(r_i, \varphi_j)}{\sum_{i,j} \psi_1(r_i, \varphi_j)}$$

Радиальные компоненты Искомые |U| и направление θ веса

Сравнение **вектора** течений по данным КВ радара и ADCP апрель 2016 г. (использовалась процедура Ивонин и др.)

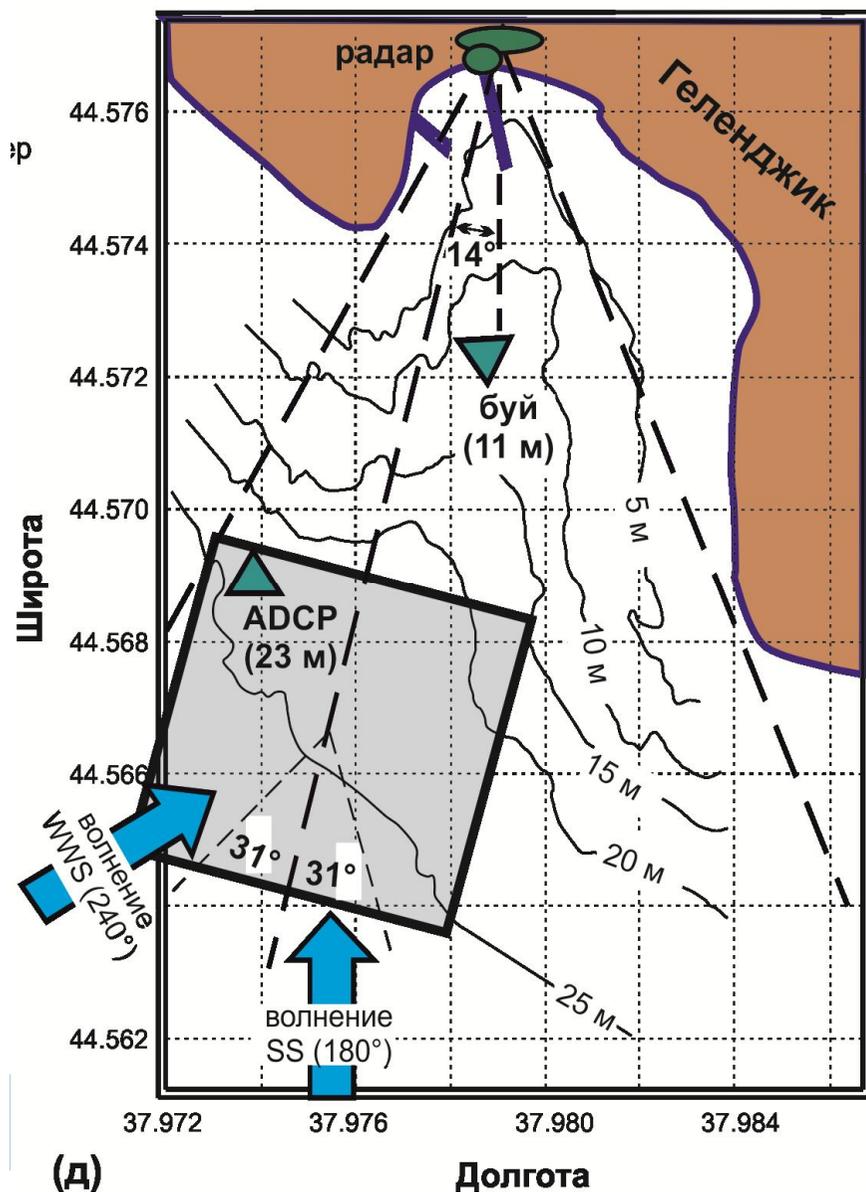




апрель 2016 г.

**Сопоставление данных радиолокационных
КВ и СВЧ измерений скорости течения**

Комплекс задействованных приборов в ЮО ИО РАН



(Д)



РЛС «Река» Микран

- Размер антенны: 2м
- Частота: 9.41 ГГц
- Разрешение по дальности: 0.7м
- Разрешение по углу: $<1^\circ$
- Дальность действия: 7 км
- Частота вращения антенны: 24 об./мин.



Блок управления РЛС

- работает под Windows
- позволяет под TeamViewer дистанционно управлять РЛС из любой точки мира



Донная станция ADCP Workhorse 600

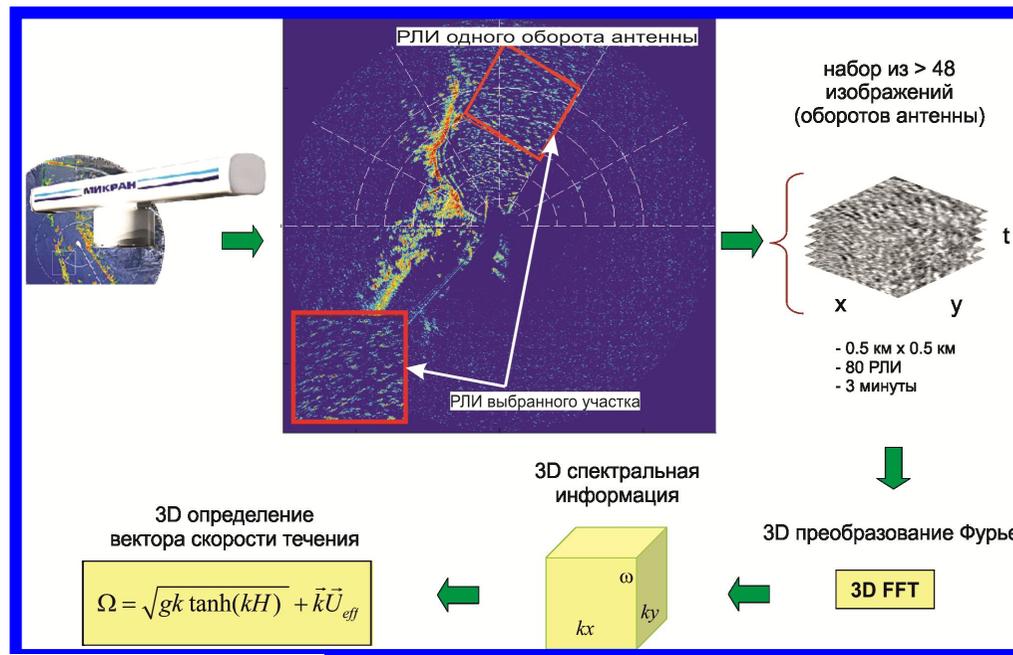
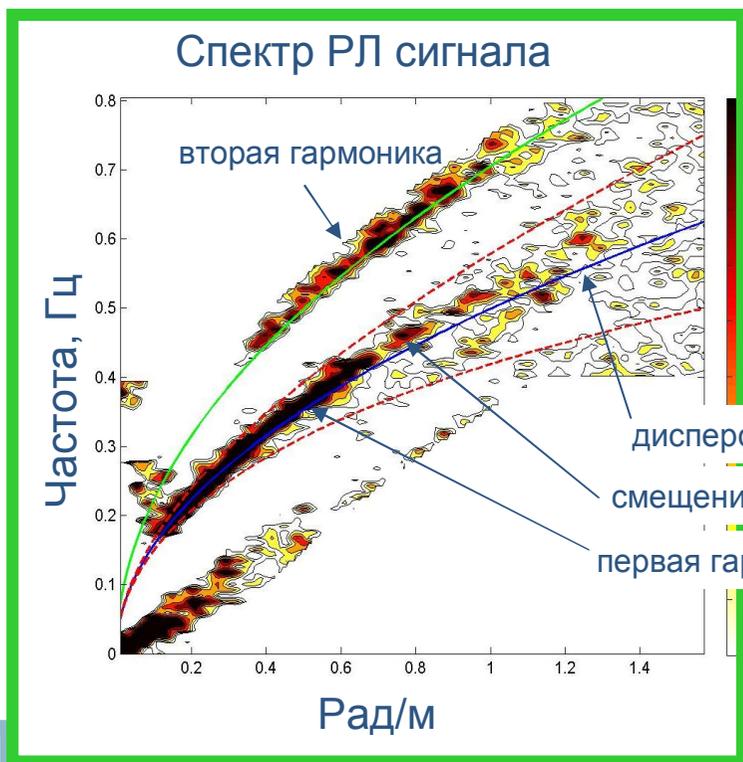
- глубина установки 23 м
- он-лайн передача данных по телеметрическому каналу

Процедура обработки данных СВЧ (X-диапазон) некогерентного радара

- Требуется 2 мин для сбора минимальной информации
- Для получения достаточно качественного результата требуется 10 мин сбора инф.

вектора скорости течения

$$\Omega = \sqrt{gk \tanh(kH)} + \vec{k}\vec{U}_{eff}$$



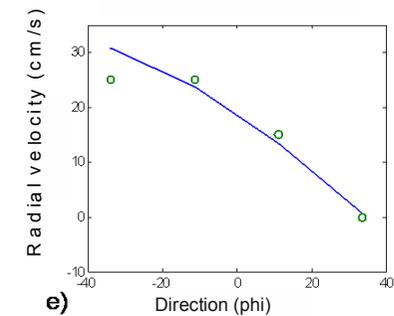
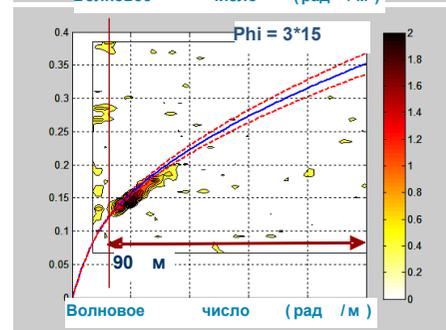
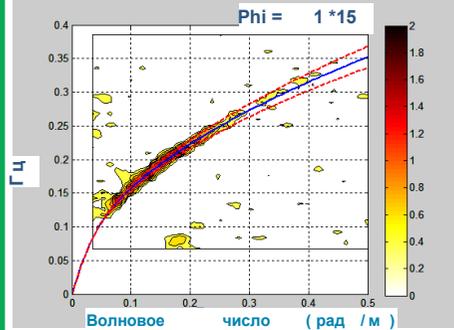
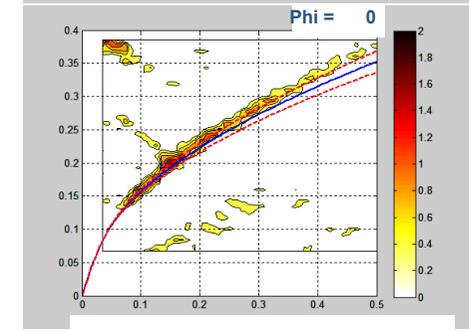
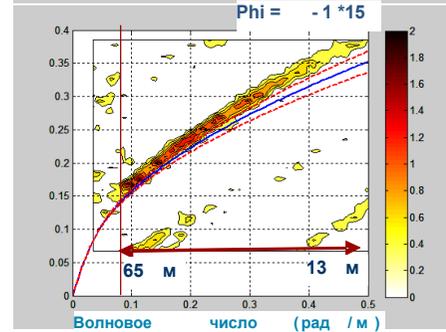
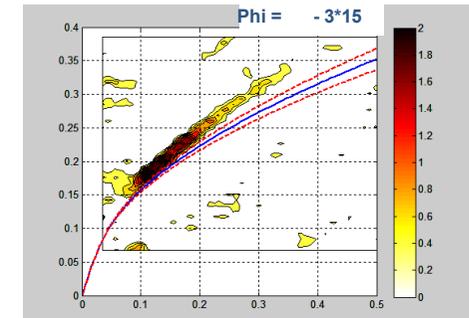
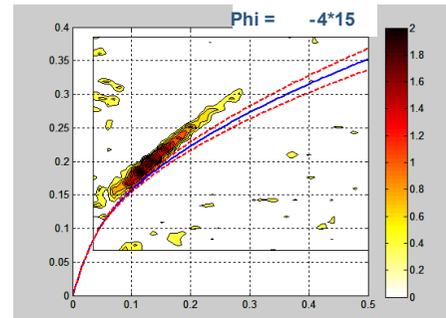
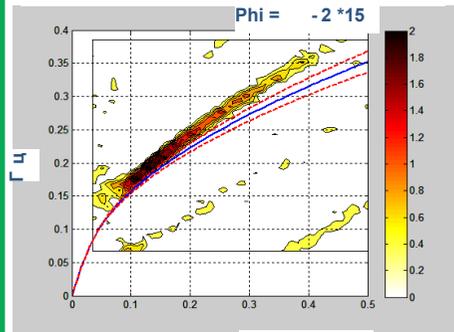
- Наблюдается диапазон поверхностных от 5 м до 65 - 85 м

Х-диапазон, некогерентный радар

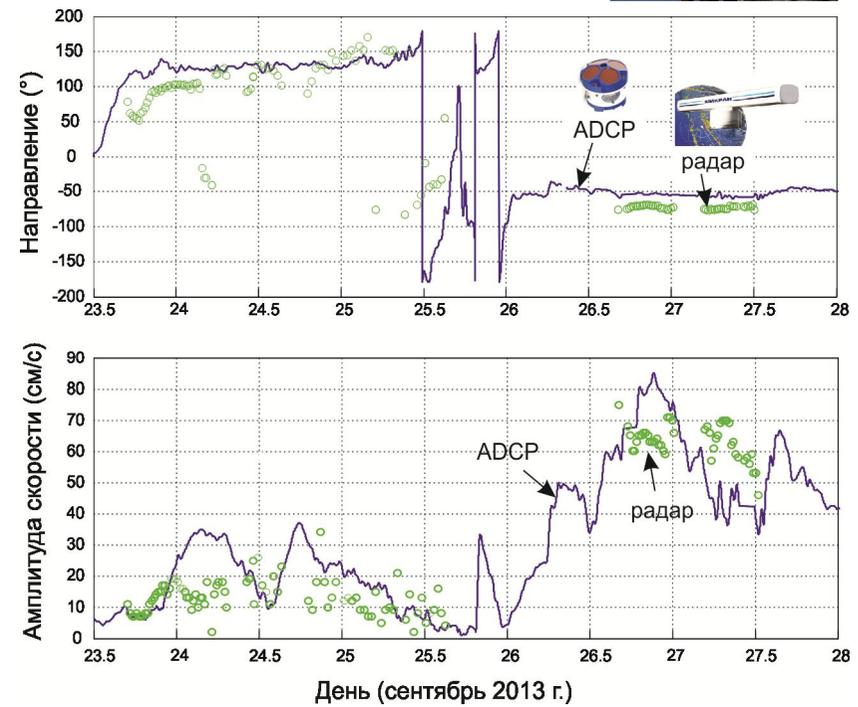
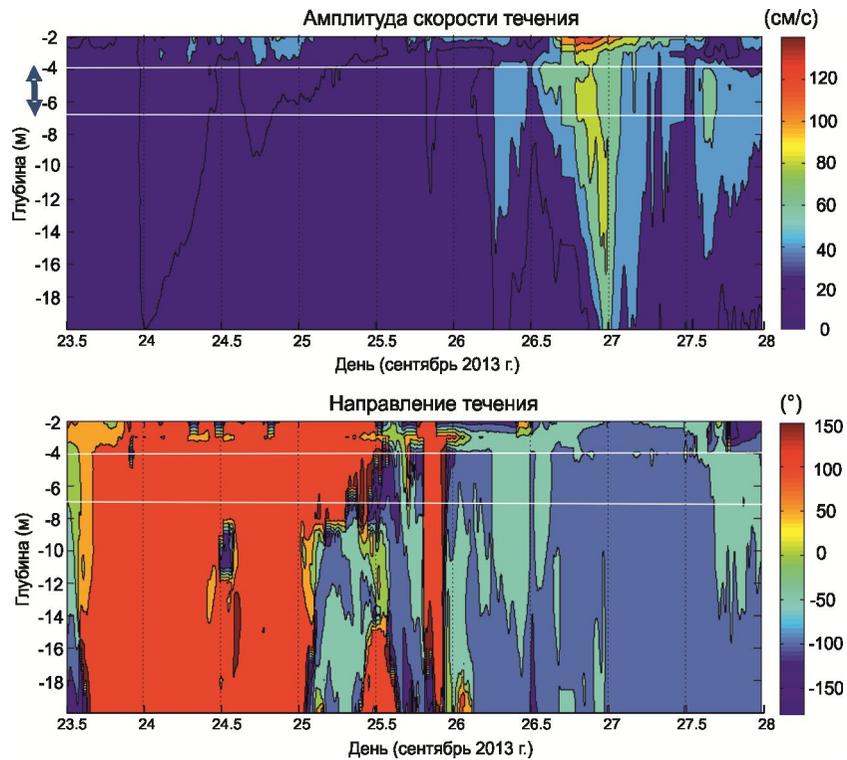
Процедура восстановления вектора скорости течения



a)



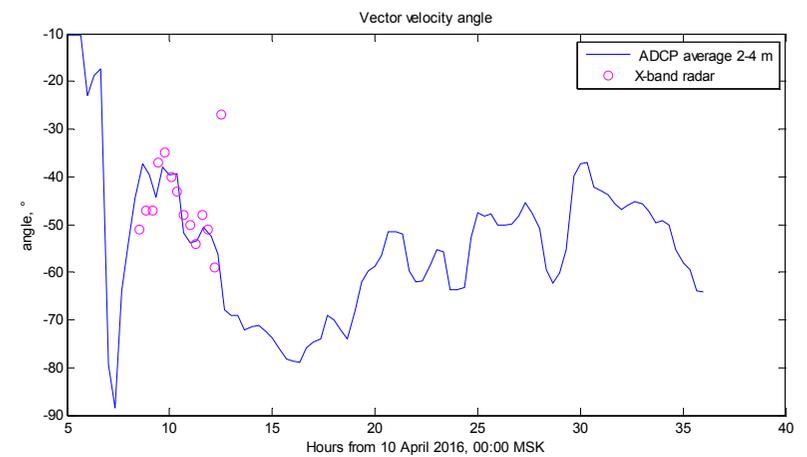
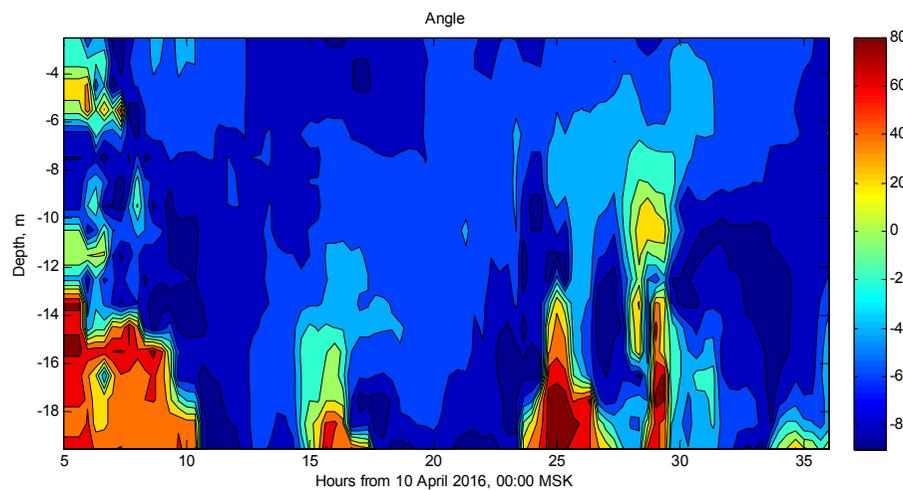
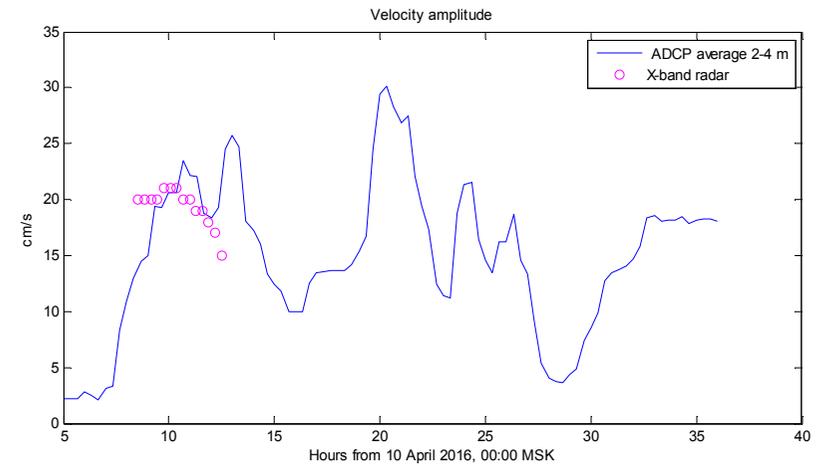
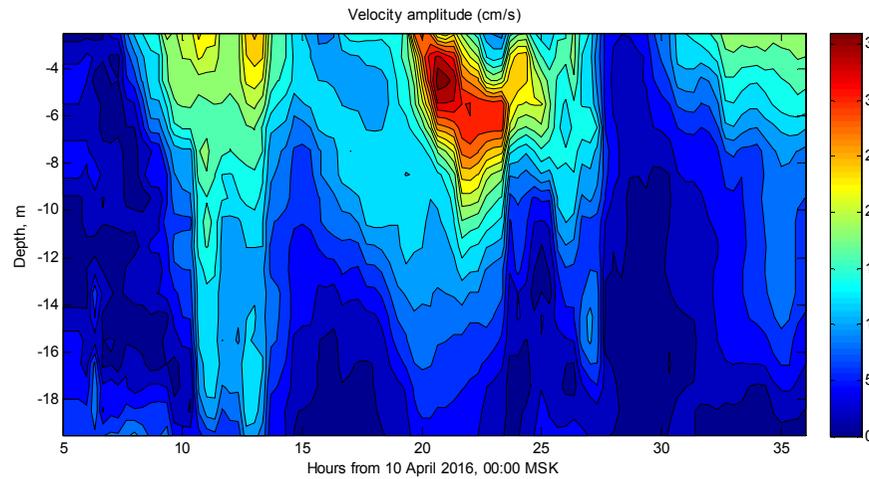
Сравнение вектора течений по данным радара и ADCP сентябрь 2013 г.



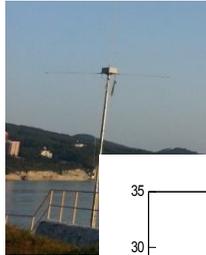
Сравнение вектора течений по данным радара и ADCP апрель 2016 г.



ADCP
Workhorse 600

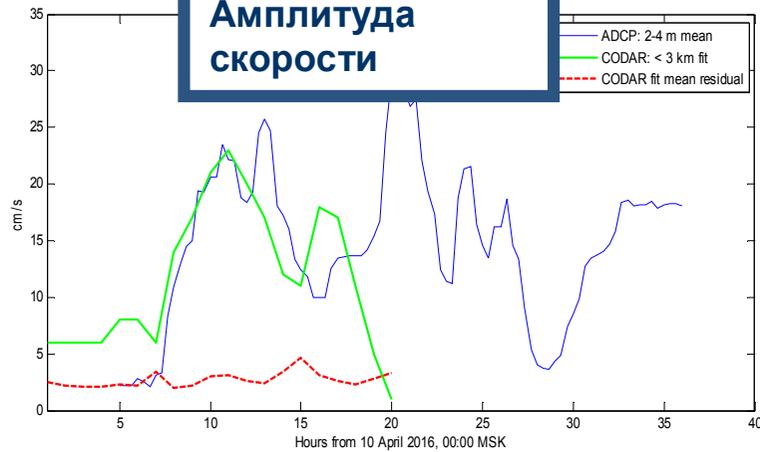


Сравнение вектора течений по данным КВ, СВЧ радаров и ADCP (апрель 2016 г.)

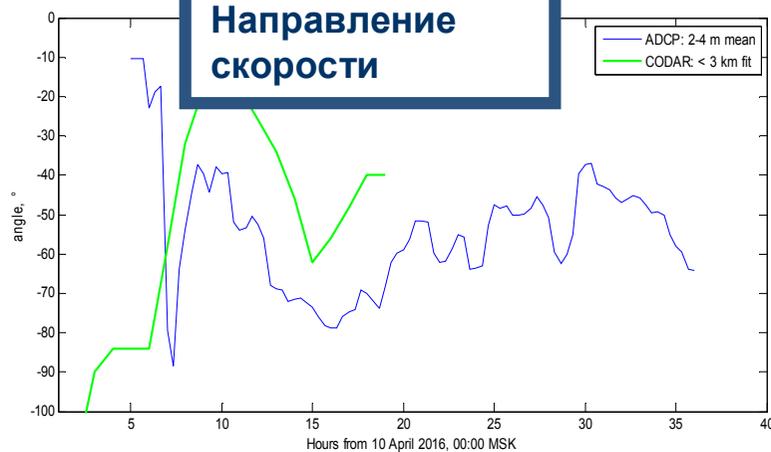


CODAR

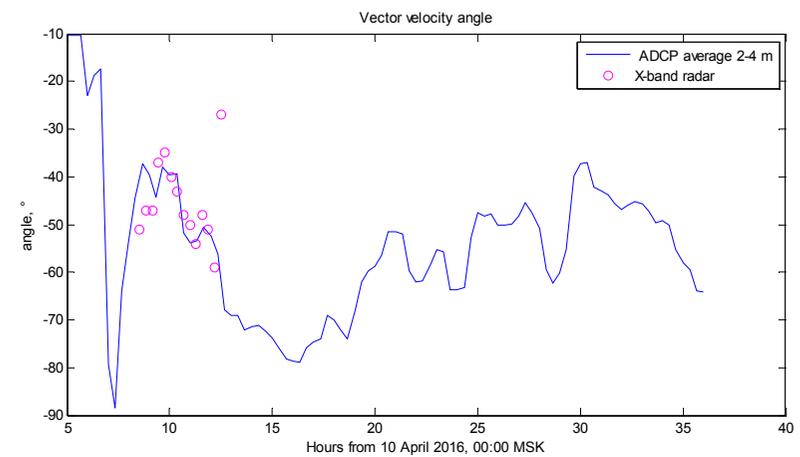
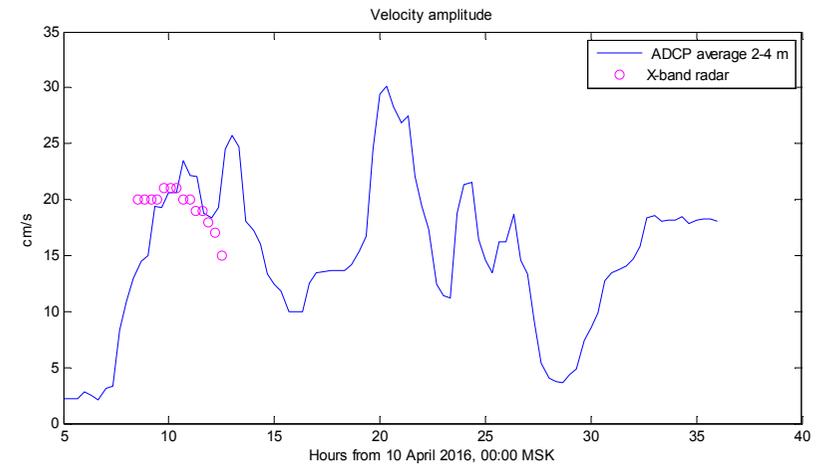
Амплитуда скорости



Направление скорости



«Река»



Резюме

1. Использование радиолокатора Sea Sonde (CODAR, США) для измерения скорости приповерхностного течения позволяет получать карту скорости течения на акватории, размером не менее 15 км x 20 км (включающую в себя акваторию Черноморского полигона ИО ИОРАН) и с пространственным разрешением порядка 750 м.
2. При наличии одного радара, методика «одноточечных» измерений представляется более рациональной по сравнению с методикой «двухточечных» измерений, требующей больших трудозатрат. Обработка данных одноточечных измерений по методам (Сабинина, Ивонина, Горбацкого), и сопоставление результатов обработки с данными измерений скорости течения ADCP и дрейфтерами показали, при определенных условиях, их удовлетворительное соответствие друг другу.
3. Репрезентативное сравнение данных КВ радарных измерений с данными измерений ADCP и СВЧ радара: 1) течение было интенсивным (скорость течения > 15-20 см/с); 2) ветровое воздействие было достаточно слабым (скорость ветра < 5-7 м/с); 3) расстояние от берега области совместных измерений превышало 1 км.
4. В случае слабого, неоднородного по глубине и нестационарного течения, а также при сильном ветре, его значительной пространственной и временной изменчивости расхождения между результатами измерений различными приборными комплексами существенны. В частности, это указывает на целесообразность измерения и моделирования поля ветра с высоким пространственно-временным разрешением, а также разработки методики для учета его влияния на радиолокационные измерения.