## Вихри в океане: наблюдение и моделирование



### А.Г. Зацепин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН zatsepin@ocean.ru

Школа молодых ученых, ИКИ РАН, 16 ноября 2010 г.

# Пример вихревого движения в гидродинамическом лотке



## Содержание лекции

•Мезомасштабные (синоптические) вихри, как одна из основных форм движения вод океана: механизмы образования, динамика вихрей

•Общебассейновая циркуляция и мезомасштабная
вихревая динамика Черного моря: влияние ветрового
воздействия и рельефа дна

•Субмезомасштабные вихри на узком черноморском шельфе: механизмы образования и роль в кроссшельфовом водообмене

## Гольфстрим и его вихревые кольца



## Вихри Куросио



# Вихревые структуры в Индийском океане: ТПО



## Внутрипикноклинный вихрь в Арктике (Dmitrenko et al., 2007)



Figure 4: An enlarged view of the February 2005 eddy. Temperature (°C, top left), potential density (kg/m<sup>3</sup>, top right), and zonal (bottom left) and meridional (bottom right) current (cm/s) records as a function of depth; McLane Moored Profiler (MMP) records from February 9-19, 2005.

Исследование антициклонического вихря Гольфстрима с помощью спутниковой альтиметрии и судовых измерений



Data from satellite altimeters, which measure sea surface heights, show depressions (blue) and bumps (red) that mark cold- and warm-water eddies in the ocean on June 17, 2005. Researchers tracked the southwestward motion of eddy A4 by ship from June 24 to Sept. 12. (Courtesy of Dennis McGillicuddy, WHOI, and the Colorado Center for Astrodynamics Research

## Северо-западная часть Атлантического океана по данным спутниковой альтиметрии

Data by SSALTO/DUACS. 07-JUL-2007 00:19:52:000000



# Меандрирование струйных течений как один из основных механизмов вихреобразования в океане (на примере Гольфстрима)



![](_page_10_Figure_0.jpeg)

# Циклонический вихрь у Гавайских о-вов (1-4 декабря 2004)

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

Пример влияния вихрей на<br/>формированиевихрей наформированиепервичнойбиопродуктивности вод океанавод океана

#### Океан - стратифицированная вращающаяся жидкость (СВЖ)

Влияние вращения Земли на динамику вод океана на пространственных масштабах более 10-100 км и на временных масштабах порядка суток и более является определяющим наряду с влиянием стратификации. Вместе с тем, между плотностной стратификацией и вращением существует определенная аналогия. Основным размерным параметром, характеризующим стратификацию вод является частота плавучести (Вяйсяля-Брента) N ≈ [dp/dz(g/p)]<sup>1/2</sup>, являющаяся частотой свободных колебаний частицы жидкости, смещенной вверх или вниз относительно положения равновесия. Основным размерным параметром, характеризующим вращение Земли является параметр Кориолиса f = **2** $\Omega$ **sin** $\phi$ , где  $\Omega$  - угловая частота вращения Земли, а  $\phi$  - широта места. Параметр Кориолиса является частотой свободных колебаний частицы во вращающейся однородной жидкости – частотой инерционного колебания.

В однородной вращающейся жидкости вихри баротропизуются, т.е. Становятся однородными по вертикали (теорема Праудмена-Тейлора. В отсутствии трения относительная завихренность  $\omega = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$  определяется из закона сохранения потенциального вихря: **P** = [( $\omega$  + f)/H)] = const.

## Механизмы формирования мезомасштабных вихрей в океанах и морях

- 1. Бароклинно-баротропная неустойчивость фронтальных морских течений (Гольфстрим, Куросио и др.)
- 2. Топографические эффекты: обтекание подводных гор (антициклоны) и впадин (циклоны)
- 3. Обтекание островов, полуостровов, мысов и пр.
- 4. Прямая атмосферная генерация (интенсивные атмосферные вихри или долговременное воздействие атмосферной циркуляции того или иного знака завихренности
- 5. Глубокая конвекция (преимущественно циклонические вихри)
- 6. Гидротермальная активность (придонные и глубоководные вихри)
- 7. Водообменные процессы через проливы, крупные трансфронтальные интрузии (внутритермоклинные вихри МЕДДИ, РЕДДИ, арктические и пр.)
- 8. ????

# Черное море как лаборатория для изучения динамики вод океана (в т.ч., процессов вихреобразования)

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

![](_page_15_Figure_0.jpeg)

# Общая циркуляция и мезомасштабная динамика вод Черного моря

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

Международный дрифтерный эксперимент в Черном море (1999-2003) Журбас, Зацепин и др., 2004; Poulain, Barbatini, Motyzhev, Zatsepin, 2005

BLACK SEA

worossiyisk Belendzhik

Мезомасштабная вихревая динамика вод в Черном море

Гинзбург, 1994; Зацепин и др. 2003, 2008

## Международный дрифтерный эксперимент в Черном море (1999-2003)

![](_page_17_Figure_1.jpeg)

Poulain, Barbatini, Motyzhev, Zatsepin, 2005.

# Фрагменты траекторий дрифтеров, захваченных черноморскими вихрями

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

# Спектры составляющих лагранжевой скорости (черноморский дрифтерный эксперимент)

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

# Пример квази-инерционный колебаний, «прорисованных» дрифтером

#### (предоставлен С.В. Мотыжевым)

![](_page_20_Picture_2.jpeg)

## Обсуждаемые вопросы

- Общая циркуляция и мезомасштабная вихревая динамика вод Черного моря: их зависимость от ветрового воздействия
- Субмезомасштабные вихри на шельфе: наблюдения и лабораторное моделирование

## Район исследования и судовые станции

![](_page_22_Picture_1.jpeg)

### НИС «Акванавт»

![](_page_22_Figure_3.jpeg)

Завихренность напряжения трения ветра как движущий механизм общебассейновой циркуляции в море (1)

![](_page_23_Picture_1.jpeg)

"Горизонтальная неоднородность напряжения трения ветра является основной причиной горизонтальной циркуляции в замкнутых морях" (Штокман, 1941, 1945)

В.Б. Штокман (1909-1968)

 $\Delta_{\rm H} \operatorname{curl}_{\rm z} M = \operatorname{curl}_{\rm z} \tau / A_{\rm H} - Штокман, 1945.$ 

## Завихренность напряжения трения ветра как движущий механизм общебассейновой циркуляции в море (2)

 $w_E = \frac{curl \tau}{f\rho}$  - скорость экмановской накачки

Положительная (отрицательная) завихренность напряжения трения ветра на поверхности моря вызывает дивергенцию (конвергенцию) экмановского переноса и связанный с ней апвеллинг (даунвеллинг). В результате возникают горизонтальные градиенты давления, обусловленные наклоном уровня моря и изопикнических поверхностей, и продуцируются геострофические течения Геострофические течения, возбуждаемые положительной экмановской накачкой в двуслойной жидкости

fU=1/ $\rho$   $\delta$ P/ $\delta$ y - геострофический баланс U<sub>1</sub>=g/f  $\delta$ \xi/ $\delta$ y  $\cong$  - ( $\Delta\rho$ g/f $\rho_1$ )  $\delta$ h<sub>1</sub>/ $\delta$ y U<sub>2</sub>=(g/f $\rho$ )( $\Delta\rho$   $\delta$ h<sub>1</sub>/ $\delta$ y+ $\rho_1$   $\delta$ ξ/ $\delta$ y) $\cong$ 0

# Скорость экмановской накачки (W<sub>E</sub>- 10<sup>6</sup> м/с) на поверхности Черного моря по данным NCEP

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

 $W_{E} = curl\tau/(\rho f) = -\nabla_{H} M_{E} / \rho_{w}$ 

Положительные величины W<sub>E</sub> (красный) – циклоническая завихренность ветра

Отрицательные величины W<sub>E</sub> (синий) – антициклоническая завихренность ветра

![](_page_26_Figure_5.jpeg)

Внутригодовая изменчивость скорости экмановской накачки <W<sub>E</sub>> (a) и вдольбереговой компоненты геострофической скорости <V<sub>g</sub>> на поверхности (б) в С-В части Черного моря

![](_page_27_Figure_1.jpeg)

## Коэффициент корреляции между <W<sub>E</sub>> и <V<sub>g</sub>> как функция интервала осреднения W<sub>E</sub>

Коэффициент корреляции достигает максимума при временном интервале осреднения, близком к одному месяцу. Этот временной период можно рассматривать как характерное время приспособления ОЧТ к изменяющемуся уровню экмановской накачки

![](_page_28_Figure_2.jpeg)

Пример внутригодовой изменчивости напряжения трения ветра (синяя кривая) и скорости экмановской накачки (черная кривая) для С-В части Черного моря

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

![](_page_30_Figure_0.jpeg)

1-вращающаяся платформа; 2 – цилиндрический бассейн; 3 – откидная крышка; 4 –наклонное дно; 5 –бортик; 6 –воздуходувки; 7 –боковая стенка; 8 – система заполнения; 9 – видеокамера.

Схема бароклинной циркуляции возбуждаемой положительной экмановской накачкой: (а) – вид сбоку; (б) – вид сверху.

## Развитие неустойчивости прибрежного течения, возбуждаемого экмановской накачкой, на стадии его релаксации

![](_page_31_Picture_1.jpeg)

Развитое прибрежное течение перед окончанием ветрового воздействия

![](_page_31_Picture_3.jpeg)

на 4-й день релаксации

![](_page_31_Picture_5.jpeg)

на 17-й день

![](_page_31_Picture_7.jpeg)

на 45-й день

## Видеофильм

![](_page_32_Picture_1.jpeg)

# Сильная экмановская накачка и обусловленная ей интенсификация ОЧТ (ноябрь 2000)

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

## Слабая экмановская накачка, деградация ОЧТ и образование мезомасштабных вихрей (октябрь 2001)

![](_page_34_Figure_1.jpeg)

# Влияние изменчивости экмановской накачки на ОЧТ и мезомасштабную вихревую динамику

#### Экмановская накачка

сильная

слабая

Интенсификация прижатой к берегу струи ОЧТ, подавление ее неустойчивости и, как следствие, ослабление мезомасштабной вихревой динамики и поперечного берегу обмена

Ослабление и меандрирование ОЧТ, удаление струи от берега, формирование мезомасштабных вихрей вследствие развития неустойчивости, усиление поперечного берегу обмена

#### Влияние режима течения на распределение зоопланктона

![](_page_36_Figure_1.jpeg)

## Выводы

• Вследствие внутригодовой изменчивости экмановской накачки (ее усиления зимой и ослабления летом) для зимы более типично доминирование вдольбереговой струи ОЧТ, а для лета - мезомасштабных вихрей.

• Значительные вариации экмановской накачки с периодом более одного месяца могут приводить к изменению режима течения от доминирования вдольбереговой струи ОЧТ при усилении накачки до преобладания мезомасштабных вихрей при ослаблении накачки.

• Смена режимов течения может происходить многократно в годовом цикле.

• Режим течения влияет на пространственное распределение зоопланктона:

А) при интенсивном ОЧТ и подавленном поперечном обмене возникает неравномерное распределение зоопланктона с высокой концентрацией в прибрежной зоне и резким уменьшением в глубоководной части моря, причем сообщества шельфовой и глубоководной зоны изолированы друг от друга;

Б) при слабом и меандрирующем ОЧТ, в условиях интенсивного поперечного обмена, распределение зоопланктона является более равномерным: прибрежные виды наблюдаются не только в шельфовой, но и в глубоководной части моря и наоборот;

В) амплитуда пространственной изменчивости биомассы планктона при различных режимах течения может достигать порядка величин.

# Субмезомасштабные вихри на геленджикском шельфе Черного моря

Костяной А.Г. и др. (2008); Митягина и Лаврова (2008), Зацепин А.Г. и др. (2008)

![](_page_39_Figure_2.jpeg)

Справа: радиолокационное изображение поверхности моря с ярко выраженным суб-мезомасштабным вихрем (темные полосы – выглаженная поверхность воды); слева: суб-мезомасштабный вихрь в верхнем слое моря по данным съемки поля течений буксируемым за судном акустическим доплеровским профилографом. Стрелки–вектора скорости течения.

# Физические процессы на узком черноморском шельфе: исследования в районе г. Геленджик

Концепция узкого шельфа:  $L_{sh} < R_{d,r}$  where  $R_d = NH/f$ 

Глубоководная часть Черного моря:  $R_d = 15-20$  km, Ширина шельфа в С-В части моря:  $L_{sh} = 2-10$  km

Узкий шельф является зоной интенсивной диссипации кинетической энергии поступающей из глубокого моря. Одной из важнейших динамических диссипативных структур на шельфе являются субмезомасштабные вихри с горизонтальным масштабом сравнимым с шириной шельфа. Сравнительно небольшой размер этих вихрей и небольшое время жизни затрудняют их исследование. Ниже представлены некоторые результаты натурных наблюдений шельфовых вихрей, а также их лабораторного моделирования.

## Субмезомасштабные вихри на шельфе (1)

![](_page_41_Picture_1.jpeg)

Субмезомасштабный шельфовый вихрь между Голубой бухтой и Кабардинкой визуализированный спиральной сликовой полосой

## Субмезомасштабные вихри на шельфе (2)

![](_page_42_Picture_1.jpeg)

# Постановка донного акустического доплеровского профилографа (ADP Sontek)

![](_page_43_Picture_1.jpeg)

![](_page_44_Figure_0.jpeg)

## Буксируемый за судном в гондоле ADCP RDI 300 кГц

![](_page_45_Picture_1.jpeg)

![](_page_45_Picture_2.jpeg)

![](_page_46_Figure_0.jpeg)

![](_page_47_Figure_0.jpeg)

Генерация шельфовых вихрей в результате сдвиговой неустойчивости вдольберегового течения?

![](_page_47_Figure_2.jpeg)

## Усиление основного черноморского течения крупными циклоническими вихрями в сентябреоктябре 2008.

![](_page_48_Figure_1.jpeg)

# Поле скорости выше термоклина по данным измерений буксируемым ADCP выполненым 27.09.08 (слева) и 28.09.08 (справа)

![](_page_49_Figure_1.jpeg)

Штриховые линии обозначают позицию шельфового антициклона А1

Северная (слева) и восточная (справа) составляющие скорости течения на разрезе (28.09.2008) через центр шельфового антициклонического вихря "A1"

![](_page_50_Figure_1.jpeg)

# Поле скорости выше термоклина по данным измерений буксируемым ADCP выполненым 29.09.08 (слева) и 30.09.08 (справа)

![](_page_51_Figure_1.jpeg)

Пунктирные линии обозначают положение шельфовых вихрей A1 and A2 и циклонического вихря C1

# Эволюция шельфового антициклонического вихря A1: 28.09.08 06:59 GMT (a), 29.09.08 08:25 GMT (b), 30.09.08, 19.22 GMT (c) and 01.10.08, 09:53 GMT (d). Пунктирные линии

![](_page_52_Figure_1.jpeg)

![](_page_53_Figure_0.jpeg)

Профили температуры (голубые) и электропроводности (черные) измеренные (a) 27.09.08 and (b) 30.09.08 на внешнем геленджикском шельфе

Бароклинный радиус деформации  $R_d = [g(\Delta \rho / \rho)H]^{0.5} f^{-1} = 8 \text{ km}, \Delta \rho = 2*10^{-3} g/cm^3$ перепад плотности в термоклине,  $\rho = 1.0 g/cm^3$  – плотность воды,  $g = 10^3 cm/s^2$  – гравитационное ускорение, H = 30 m – толщина ВКС,  $f = 10^{-4} s^{-1}$  – параметр Кориолиса.

#### Кинематические и динамические характеристики вихря А1

Date 2008	Radius <b>R</b> , km	Orbital velocity V <sub>orb</sub> , cm/s	Translation velocity V <sub>tr</sub> , cm/s	Angular velocity, $\omega=2\pi T$ , rad*c <sup>-1</sup>	Ro=@f	R <sub>d</sub> /R	Vorb/ Vtr
28/09	~3	~ 40	<7	~ 1.3*10 <sup>-4</sup>	~ 1.3	> 2	6-7
29/09	4-5	~ 50	>7	$\sim 10^{-4}$	~ 1.0	~ 2	~ 5
30/09	~ 7	~ 50	25	$\sim 0.7*10^{-4}$	~ 0.7	~ 1.1	~ 2
01/09	~ 10	~ 40	40	$\sim 0.4*10^{-4}$	~ 0.4	~ 0.8	~ 1

В начале наблюдений вихрь А1 был субмезомасштабным и агеострофическим (*R<sub>o</sub>*/*R* >2; *Ro* >1).

В конце наблюдений он «вырос» до мезомасштабного и квазигеострофического  $(R_{o}/R < 1; Ro < 0.5)$ .

Благодаря его захвату струей ОЧТ произошло увеличение скорости его перемещения, которая стала сравнима с орбитальной (V<sub>orb</sub>/ V<sub>tr</sub> ≈ 1).

# Свидетельство квазипериодического вихреобразования?

![](_page_55_Figure_1.jpeg)

Восточная составляющая скорости течения, измеренная донным ADP (глубина около 30 m) на траверсе Голубой бухты (с 14:00 29.09.08, до 16:00 01.10.08).

### Периодическое образование субмезомасштабных вихрей на шельфе в области отрыва течения за мысом Идокопас и срыв вихрей набегающим потоком?

Условия квазипериодического образования вихрей за препятствием и их срыва:

- 1) Плохо обтекаемое тело (*L/D* <2-3, где *L* длина, а *D* поперечный размер препятствия);
- Re =UD/v ≥ 10<sup>2</sup> где U скорость в ядре набегающего потока, v кинематическая (эффективная) вязкость;
- 3)  $St = D/UT \approx 0.1$  число Струхаля (безразмерная частота срыва, T период срыва).

![](_page_56_Figure_5.jpeg)

По данным наблюдений:

*U* ≈ 40 cm/s; *D* ≈ 8 km; *T* ≈ 2 days

**St** = **D/UT** ≈ 0.1 !

### Лабораторные эксперименты по исследованию периодического вихреобразования за мысом во вращающейся жидкости

![](_page_57_Figure_1.jpeg)

Схема лаб. установки а): вид сбоку: 1 – вращающаяся платформа; 2 –цилиндрич. бассейн с однород./двуслойн. жидкостью; 3 –маркер с крист. марганца; 4 – мыс; 5 – видеокамера. b) вид сверху: 1 – маркер с крист. марганца; 2 – мыс; 3 – направление вдольберегового течения,

## Первые результаты

![](_page_58_Picture_1.jpeg)

Последовательные изображения, иллюстрирующие периодическое вихреобразование за мысом: a)  $t/T_2 = 1$ , где t – время, прошедшее от начала набегания течения на препятствие,  $T_2$  – период вращения платформы после ее замедления; b)  $t/T_2 = 5$  – появление первого вихря. c)  $t/T_2 = 6$  – отрыв первого вихря и появление второго; d)  $t/T_2 = 9$  – появление третьего вихря.

Видеофильм по эксперименту с периодическим вихреобразованием за мысом, обтекаемым течением, образованным замедлением вращения платформы

![](_page_59_Picture_1.jpeg)

## Conclusions

• By means of ADCP surveys, CTD sections, moored ADP stations strong shortterm (several days) dynamics variability over the shelf and upper part of continental slope was revealed. This variability appears in alongshore and cross-shore velocity components and leads to intensive cross-shelf water exchange.

• The reason of such variability is connected to formation and along-shore transfer of sub-mesoscale eddies with diameter less than 5-7 km. These eddies are not geostrophic balanced, their life time normally not exceeds several days. Theoretically two main sources of disturbances cause such eddies formation: external circulation (currents over the continental slope) and wind influence. During spring runoff a fresh water outflow also could produce such eddies.

• In case of strong external circulation (currents velocity over the shelf edge reaches 40-60 cm/s) a medium wind (up to 5-6 m/s) doesn't influence significantly on the shelf water dynamics, it mainly depends on external circulation impact. Over the shelf zone, in area of hollow coastline and current detachment from shelf edge sub-mesoscale eddies could be formed periodically, with energy supply from vorticity and velocity shear, could move alongshore and produce an intensive cross-shelf water-exchange. Some of eddies grow up rapidly and transform to mesoscale (geostrophic balanced) eddies and detach offshore.

![](_page_61_Picture_0.jpeg)