

**XX Научная школа
«Нелинейные волны - 2022»**

Вытягивание мезомасштабных вихрей океана в субмезомасштабные вихревые нити как способ передачи энергии по каскаду размеров. Проявление свойств отрицательной вязкости при вытягивании вихрей

В. В. Жмур^{1,2}, Т. В. Белоненко³, Н. В. Новоселова³, Б. С. Суетин², Д. А. Арутюнян²

1 -Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

2- Московский физико-технический институт (государственный университет)

3- Санкт-Петербургский государственный университет

zhmur-vladimir@mail.ru

Нижний Новгород
10 ноября 2022

Пространственно-временные характеристики мезомасштабных вихрей

Характерные горизонтальные размеры мезомасштабных вихрей L порядка радиуса деформации Россби

$$L \sim L_R = \frac{N^* H}{f}$$

N^* характерная частота Вайсяля-Брента,

H глубина океана

f параметр Корриолиса

Для тропической Атлантики $L_R \approx 100 - 250$ км, для центральной Атлантики $L_R \approx 70$ км, для Северной Атлантики $L_R \approx 10 - 15$ км, для Северного ледовитого океана $L_R \approx 5$ км.

Вертикальные размеры вихревого ядра порядка 100-300 м, как правило не более 0.5 км.

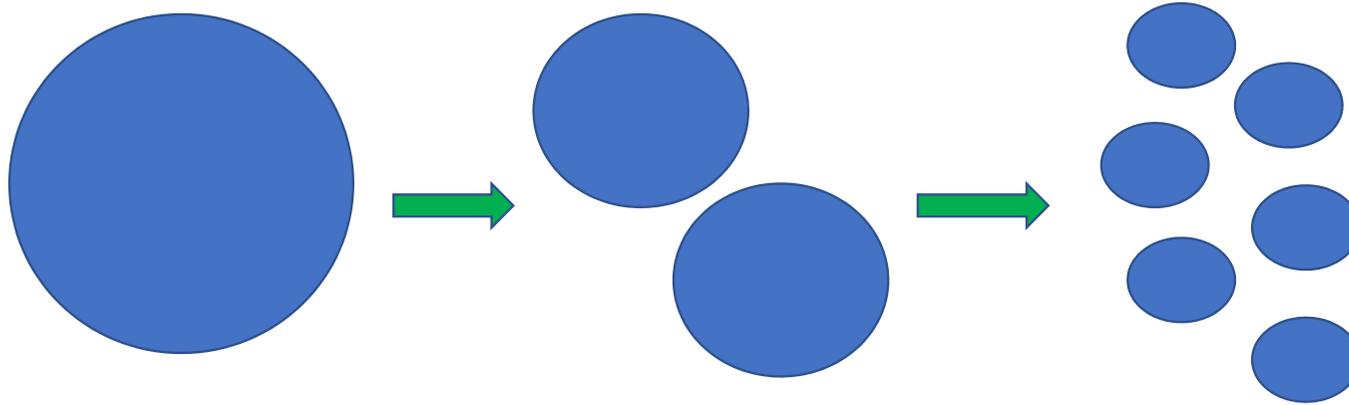
Характерные времена превышают инерционный и приливные периоды. В Центрально Атлантике порядка 10 суток, на Севере порядка суток.

Субмезомасштабные явления

Характерные горизонтальные размеры субмезомасштабных явлений L заметно меньше радиуса деформации Россби L_R . Характерные времена – порядка суток.

Передача энергии с больших масштабов на малые

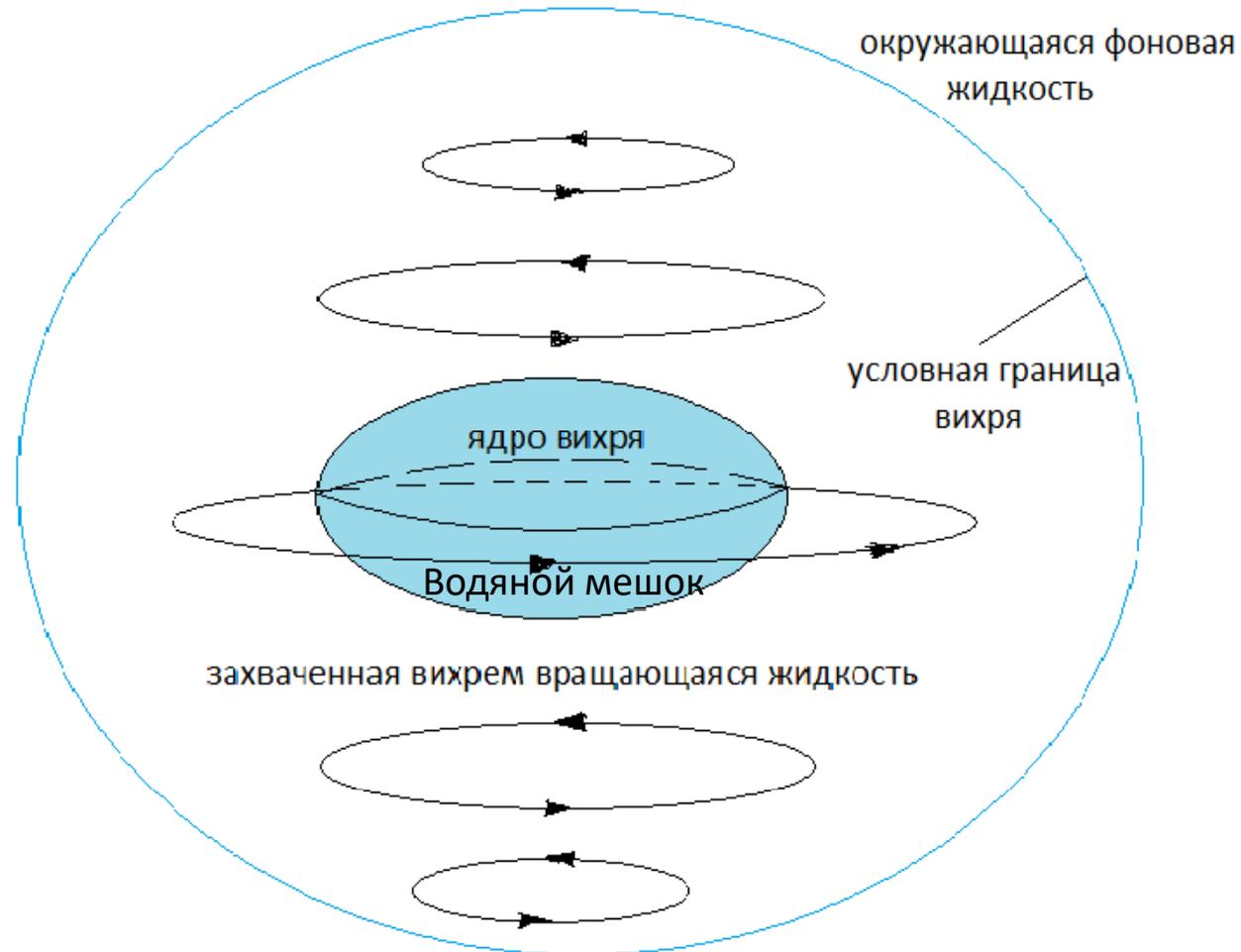
Идея классической теории турбулентности (Колмогоров, Обухов, Монин), инерционный интервал, прямой энергетический каскад



Вытягивание вихря неоднородным течением, прямой энергетический каскад



Как устроен мезомасштабный вихрь океана



схематическое строение мезомасштабного вихря
вертикальный разрез

Характеристики неоднородного горизонтального течения, линейного по горизонтальным координатам

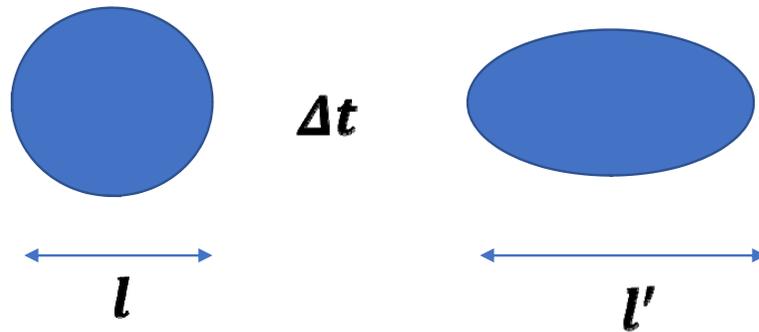
$$u_x(x, y) = u_{x0} + ex - \gamma y$$

$$u_y(x, y) = u_{y0} + \gamma x - ey$$

Размерные параметры неоднородности: e и γ ; $[e] = [\gamma] = 1/c$

$\gamma = \frac{1}{2} \text{rot}_z \vec{u}$ - угловая скорость вращения жидких частиц

e - коэффициент деформации

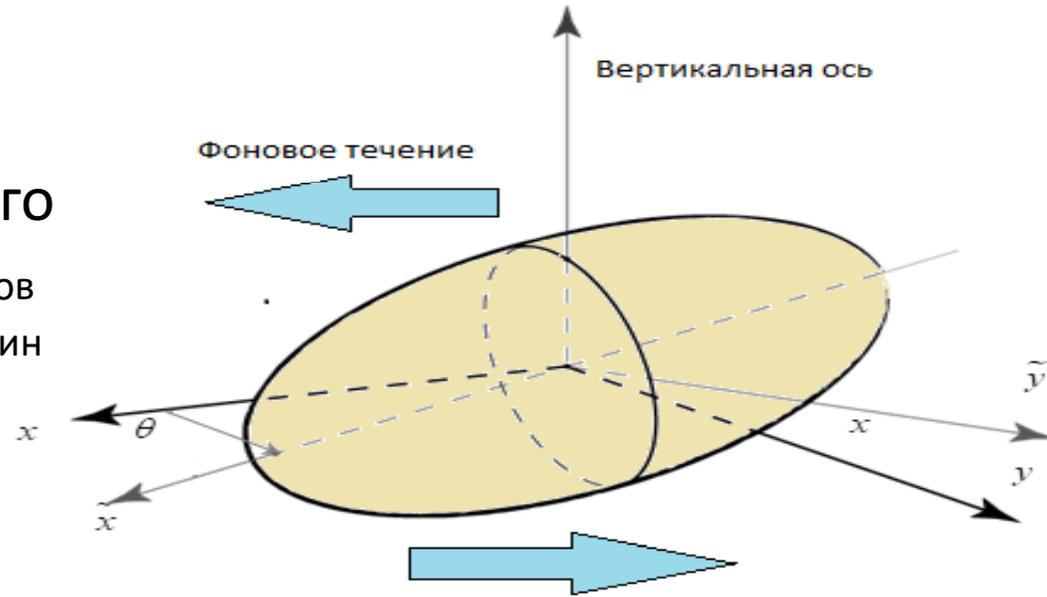


$$e = \frac{1}{l} \cdot \frac{l' - l}{\Delta t}$$

$\frac{\gamma}{e}$

безразмерная характеристика течения

Модель
 эллипсоидального
 вихря (Жмур, Панкратов
 1989,1990; Жмур, Щепеткин
 1991)



Схематическое изображение ядра эллипсоидального вихря

Характеристики вихря: a, b горизонтальные полуоси; c — вертикальная полуось;

Интенсивность ядра σ — потенциальная завихренность по Россби, $[\sigma] = 1/c$

$\varepsilon = \frac{a}{b}$ безразмерный параметр горизонтальной вытянутости

$K = \frac{N}{f} \frac{c}{\sqrt{ab}}$ безразмерный параметр вертикальной сплюснутости -

Варианты поведения вихревых ядер
в неоднородных течениях согласно
теории эллипсоидальных вихрей



Определяющие параметры задачи

$\gamma, e, \sigma,$ $[\gamma, e, \sigma] = \frac{1}{c}$ Размерные определяющие параметры задачи

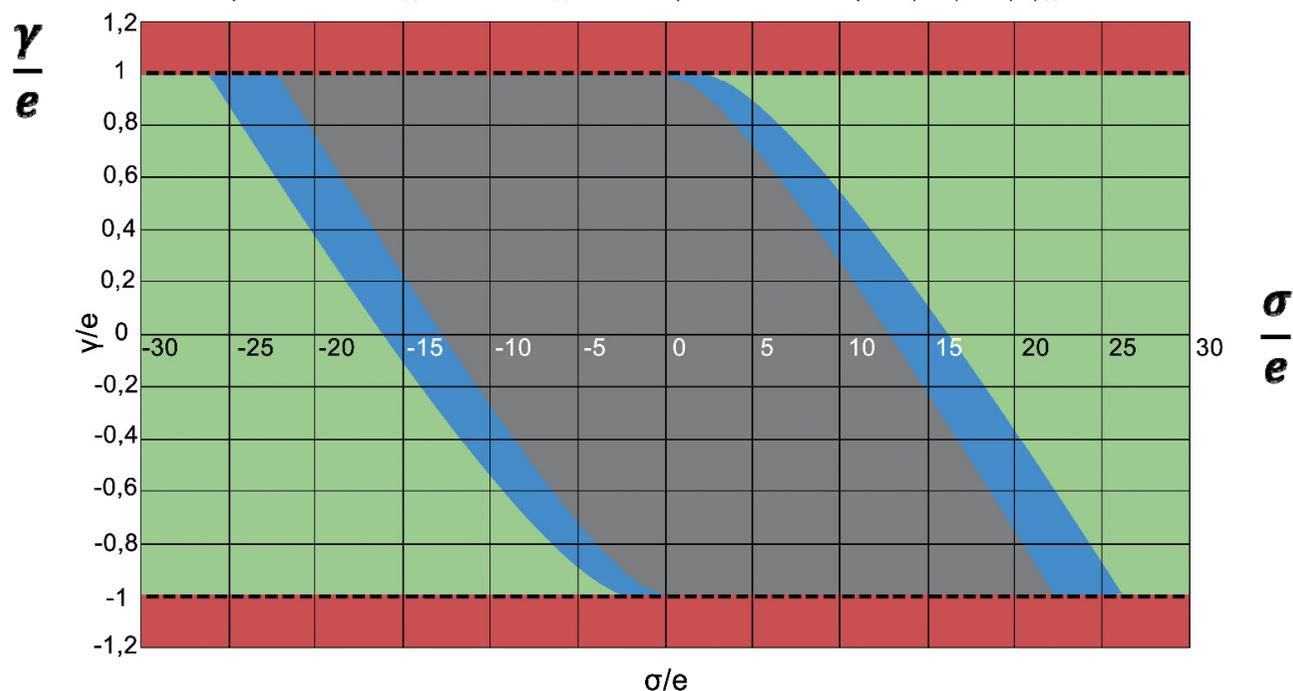
Безразмерные $\frac{\gamma}{e}, \frac{\sigma}{e}, K$

Параметр K при деформации вихря баротропным потоком не меняется

Вывод: характер поведения вихря удобно изучать на плоскости параметров $\left(\frac{\gamma}{e}, \frac{\sigma}{e}\right)$ при фиксированном K .

Карта областей поведения эллипсоидальных вихрей в плоскости параметров $\left(\frac{\sigma}{e}; \frac{\gamma}{e}\right)$ при $K=1$

Карта областей поведения эллипсоидальных вихрей в плоскости параметров $(\sigma/e, \gamma/e)$ для $K=1$

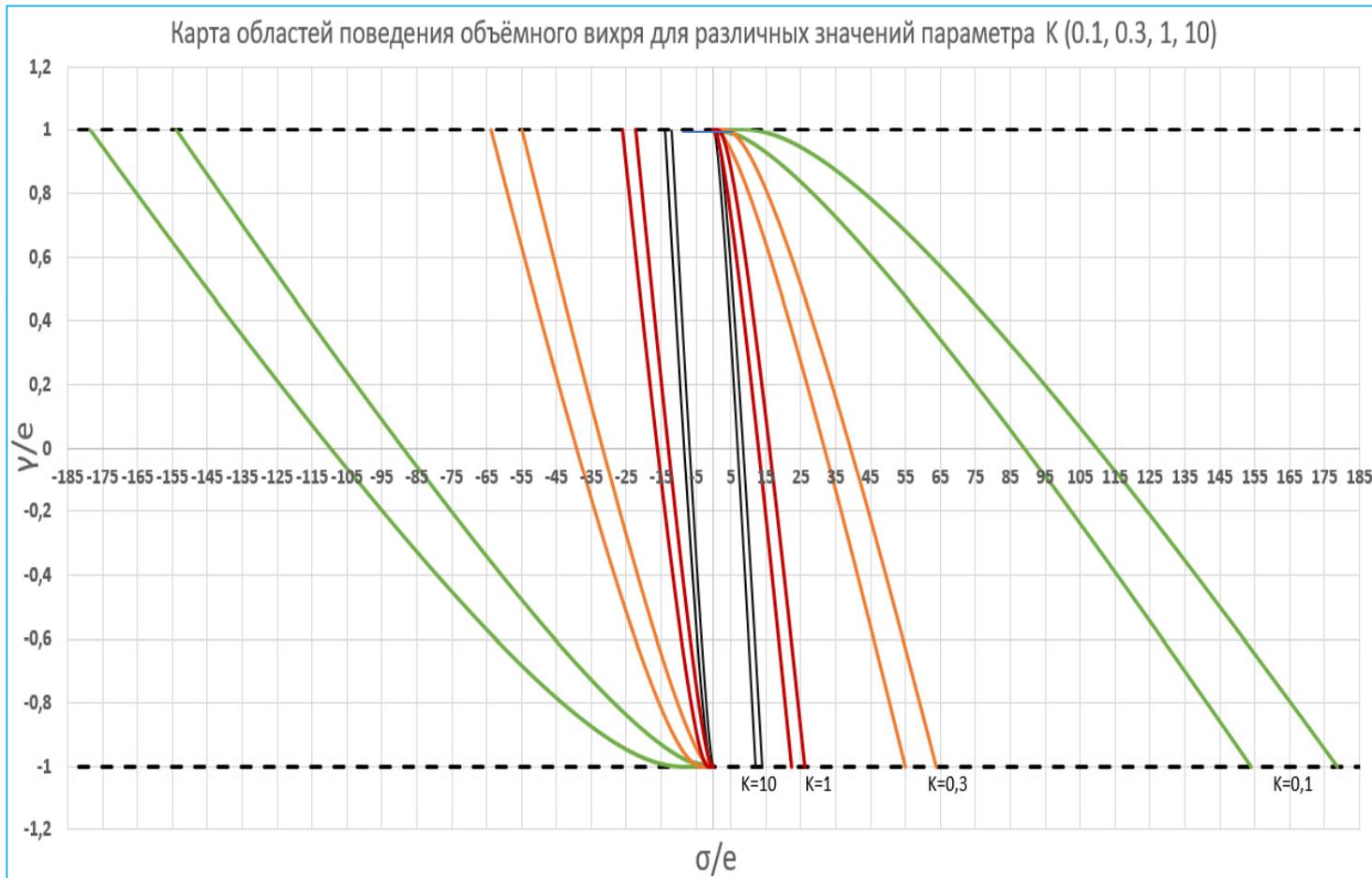


Внешняя (красная зона) - режимы вращательный и колебательный;

Внешняя (зеленая зона) – все режимы вращательный , колебательный и режим неограниченного вытягивания;

Промежуточная (синяя зона) - колебательный режим и режим неограниченного вытягивания;

Внутренняя (серая зона) - только режим неограниченного вытягивания ядра вихря



Перестройка серой зоны с увеличением параметра K . Серая зона уменьшается, но в пределе при $K \rightarrow \infty$ остается ненулевая центральная часть -сердцевина, соответствующая границе зоны неограниченного вытягивания 2D эллиптических вихрей.

Серая зона-зона неминуемого удлинения вихрей.

Ограничение на интенсивность вихрей – параметр $|\sigma/e|$ ограничен по модулю. Этой зоне соответствуют **условно слабые вихри**.

Слабые вихри растягиваются в **вихревые нити (филаменты)**. К выражению “слабые вихри” следует относиться с некоторой осторожностью. Реальные значения параметра $|\sigma/e|$ в этой зоне для малых значений K оказываются заметно большими...

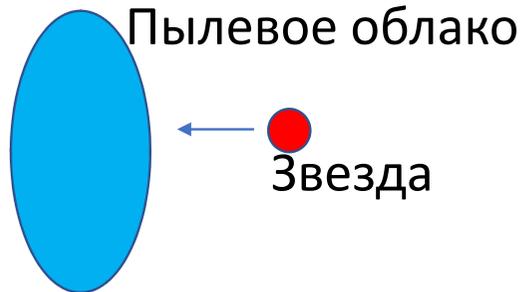
Ограничение на параметры фонового потока $|\gamma/e| \leq 1$. Деформационные свойства течений должны быть больше “вращательных” свойств.

Несимметричность серой зоны относительно осей σ/e и γ/e . Лучше подвергаются вытягиванию вихри с условием $\sigma/\gamma < 0$, а успешнее сопротивляются вытягиванию вихри с $\sigma/\gamma > 0$.

Интересное свойство серой зоны – фоновые течения со слабыми деформационными свойствами в состоянии растянуть сильный вихрь. Почему?

Условие неограниченного вытягивания вихря течением : $-M_1\left(\frac{\gamma}{e}\right) < \frac{\sigma}{e} < M_2\left(\frac{\gamma}{e}\right)$
 $M_1\left(\frac{\gamma}{e}\right)$ и $M_2\left(\frac{\gamma}{e}\right)$ достаточно большие.

Аналогия гравитационного взаимодействия звезд со звездной пылью и взаимодействия фонового течения с вихрем



$$\Delta\varphi = \rho$$

φ - гравитационный потенциал

ρ - распределение плотность массы

Вихрь в течении

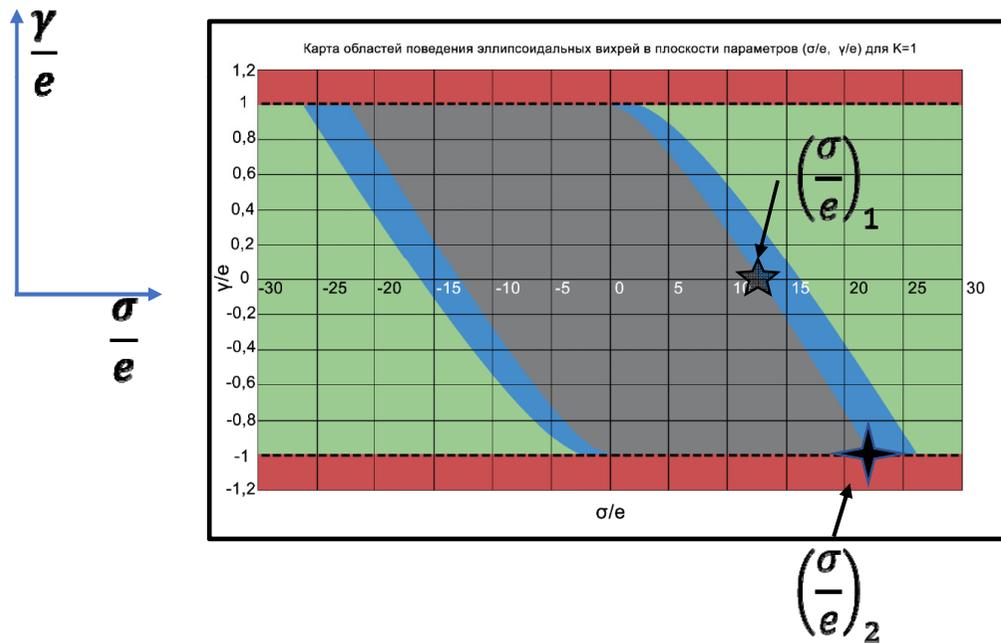
$$\Delta\psi = \sigma$$

ψ - функция тока

σ - распределение потенциальная завихренности

Если интегральная завихренность течения превышает интегральную завихренность вихря, то воздействие течения на вихрь будет сильным

Таблица. Зависимость от K , абсцисс точек пересечения границы серой зоны с прямыми $\gamma/e = 0$ и $\gamma/e = -1$, а также зависимость от K сопутствующих характеристик границы серой зоны



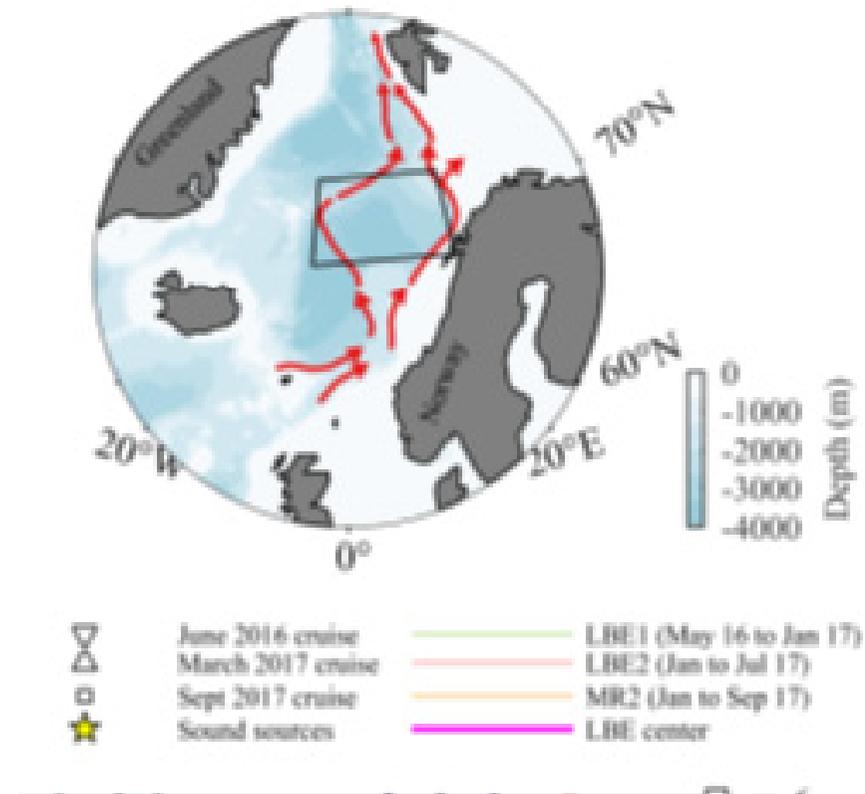
Только очень интенсивный вихрь с $\sigma/\gamma < 0$ выживает в неоднородном течении с $|\gamma/e| \leq 1$. Слабые вихри $\sigma/\gamma > 0$ течения с $|\gamma/e| \leq 1$ выживают легче. Слабые течения с $|\gamma/e| \leq 1$ способны вытянуть вихрь в нить при $\sigma/\gamma < 0$.

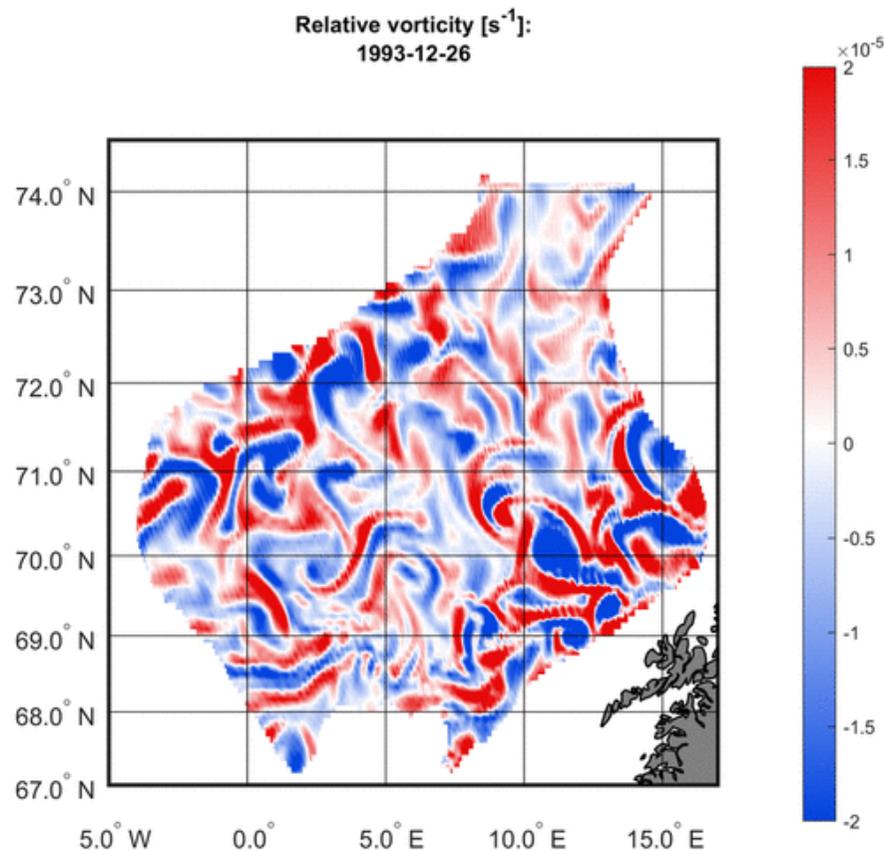
K	Координата $(\frac{\sigma}{e})_1$ границы серой зоны для $\frac{\gamma}{e} = 0$	$(\frac{rot_z \bar{u}}{e})_1$	Координата $(\frac{\sigma}{e})_2$ границы серой зоны для $\frac{\gamma}{e} = -1$	$(\frac{rot_z \bar{u}}{e})_2$	$(\frac{rot_z \bar{u}}{rot_z \bar{u}_b})_2$
0.1	88,9	12,4	154	21,4	10.7
0.2	45,8	11,4	79,3	19,8	9.9
0.3	31,8	10,8	54,9	18,6	9.3
0.4	24,8	10,2	43	17,7	8.6
0.6	18,1	9,5	31,4	16,5	8.3
0.8	14,9	9,0	25,7	15,6	7.8
1	13	8,7	22,4	14,9	7.5
1.5	10,5	8,1	18,2	14,0	7.0
2	9,4	7,8	16,2	13,4	6.7
2.5	8,7	7,5	15,1	13,1	6.6
3	8,3	7,4	14,4	12,8	6.4
4	7,8	7,2	13,5	12,5	6.3
5	7,5	7,1	13	12,3	6.2
6	7,3	7,0	12,7	12,2	6.1
8	7,1	6,9	12,3	12,0	6.0
10	7	6,9	12,1	11,9	6.0
15	6,8	6,7	11,9	11,8	5.9
100	6,7	6,7	11,7	11,7	5.9

О реальной возможности вихря по характеристикам попасть в серую зону.

Ограничение на интенсивность вихря не является серьезным препятствием . На первый план выходит ограничение на параметры течения $\left| \frac{\gamma}{e} \right| \leq 1$. Оценим долю площади Мирового океана , попадающей в полосу $-1 \leq \frac{\gamma}{e} \leq 1$.

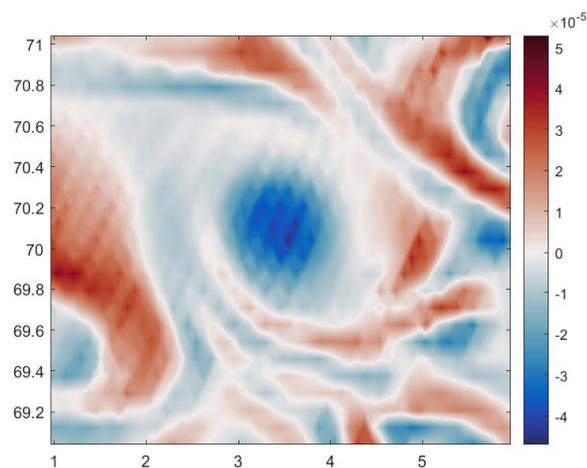
Вихри Лофотенской котловины



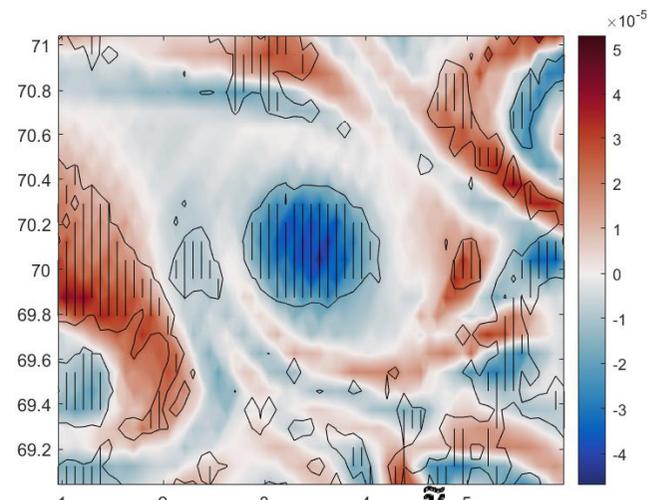


Для основных расчётов использовались данные океанического реанализа Glorys12, доступные по ссылке [https://resources.marine.copernicus.eu/product - detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_026/INFORMATION](https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_026/INFORMATION). Данные имеют суточную и месячную дискретность и 1-градусное разрешение.

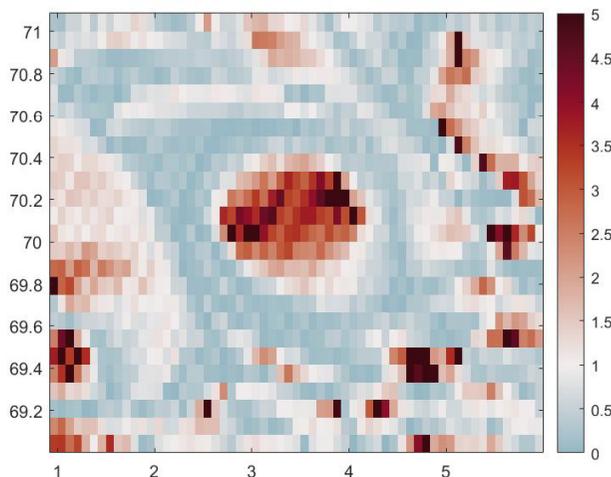
Лофотенский антициклон



Поле относительной завихренности.
Число Россби не превышает 0.25



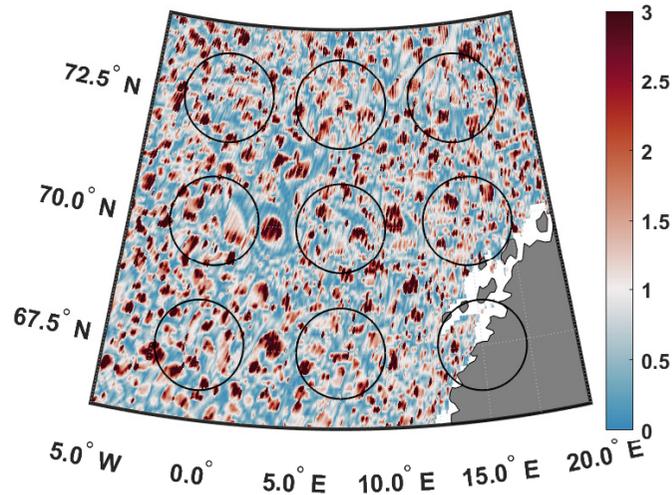
Значение параметра $\frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}}$ на фоне ротора скорости.
Чёрной линией нанесена изолиния $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| = 1$,
заштрихованы области, где $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$. Результаты
приведены для поверхностного слоя – 0,5 метров.



Поле параметра $\frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}}$, осредненное по толщине ядра вихря.
Светло-голубые тона – зоны, способные вытягивать вихри.
Коричневые тона – зоны с запретом к вытягиванию вихрей.

Лофотенская котловина.

Среднесуточные значения за 10 июня 2010 г. Пространственное разрешение $0.083^\circ \times 0.083^\circ$. Приведены значения для осреднённых по глубине полей от 0 до 200 метров. Показаны окружности с радиусом 100 км. https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024/INFORMATION



Соотношение площадей:

Площадь областей $\left| \frac{\tilde{y}}{\tilde{e}} \right| > 1$ $2.9 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$

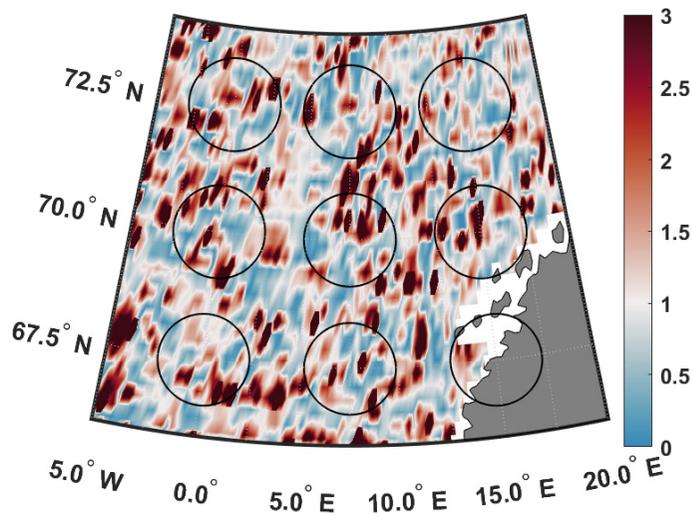
Площадь областей $\left| \frac{\tilde{y}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$ $4.6 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$

$$\frac{S_{\leq 1}}{S_{> 1}} \approx 1.7$$

Характерный размер светло-голубых и коричневых областей примерно соответствует локальному радиусу деформации Россби или несколько превышает его.

Лофотенская котловина.

Среднесуточные значения за 10 июня 2010 г. Пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.
Приведены значения для осреднённых по глубине полей от 0 до 200 метров. Окружности с радиусом 100 км.



Соотношение площадей:

$$\text{Площадь областей } \left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{\epsilon}} \right| > 1 \quad 1.3 \cdot 10^{11} \text{ м}^2 .$$

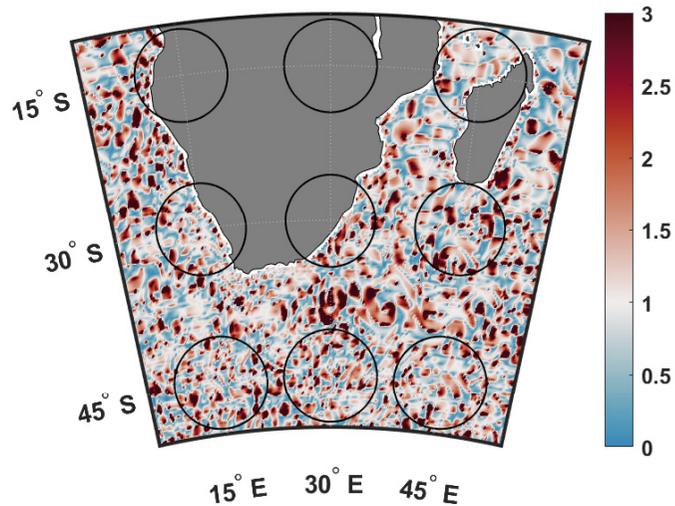
$$\text{Площадь областей } \left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{\epsilon}} \right| \leq 1 \quad 1.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$$

$$\frac{S_{\leq 1}}{S_{> 1}} \approx 1,1$$

Характерный размер светло-голубых и коричневых областей увеличился и соответствует большему масштабу, чем локальный радиус деформации Россби.

Течение Агульяс.

Среднесуточные значения за 10 июня 2010 г. Пространственное разрешение $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Приведены значения для осреднённых по глубине полей от 0 до 200 метров. Окружности с радиусом 500 км.

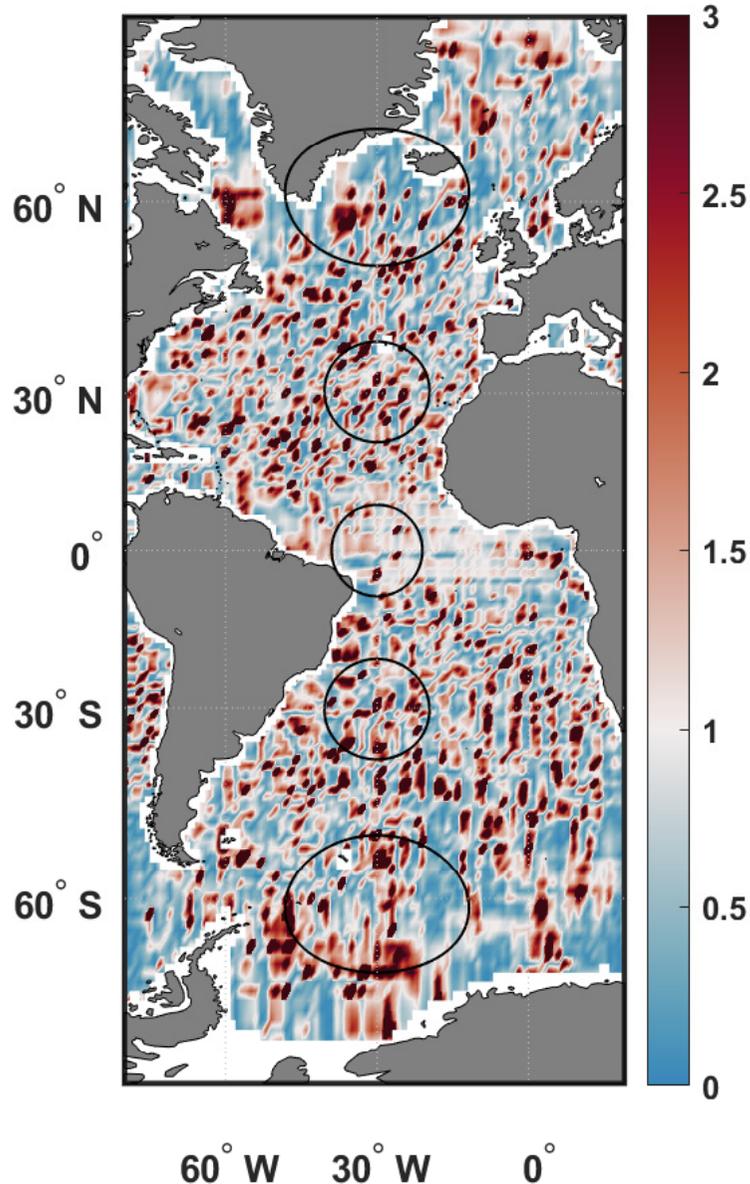


Соотношение площадей:

Площадь областей $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$ $2.4 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$

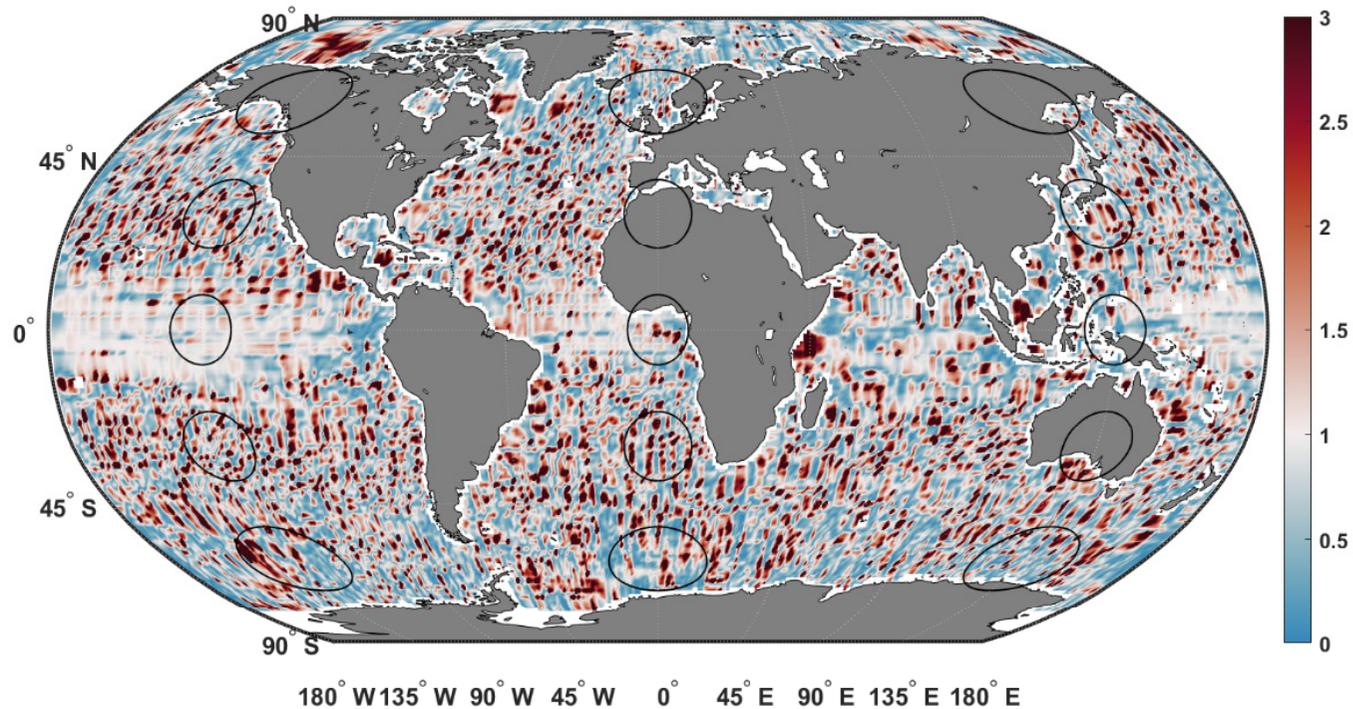
Площадь областей $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$ $2.4 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$

$$\frac{S_{\leq 1}}{S_{> 1}} \approx 1.0$$



Зернистая структура областей светло-голубого и коричневого цветов с характерным горизонтальным размером порядка 200 км. Размер зерен увеличивается при приближении к полярным областям, даже с учетом увеличения масштабов карт в полярных областях. Контрастность цветовых зон наиболее заметна в Циркумполярном течении, на акватории между Исландией и о. Нью Фаудленд, в Лабрадорском море и других энергоактивных местах. Формально по параметру γ/ϵ в зону вытягивания входит и приэкваториальная полоса, однако здесь нарушается геострофический баланс сил, поэтому зона выпадает из рассмотрения.

Исходные данные (1-град сетка)	Сглаженные данные
Площадь областей $\left \frac{\tilde{\gamma}}{\epsilon} \right > 1$ $S_{>1} = 2.96 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$	Скользящее среднее по области 10x10 ячеек.
Площадь областей $\left \frac{\tilde{\gamma}}{\epsilon} \right \leq 1$ $S_{\leq 1} = 6.21 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$	Площадь областей $\left \frac{\tilde{\gamma}}{\epsilon} \right > 1$ $S_{>1} = 3.73 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$
	Площадь областей $\left \frac{\tilde{\gamma}}{\epsilon} \right \leq 1$ $S_{\leq 1} = 6.21 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$
$\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}} \approx 2.10$	$\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}} \approx 1.46$
$\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1} + S_{\leq 1}} \approx 0.68$	$\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1} + S_{\leq 1}} \approx 0.62$



Среднемесячные значения за июнь 2010 г. Приведены значения для осреднённых по глубине полей от 0 до 200 метров. Окружностями нанесены эллипсы с радиусом 1000 км. Окружности нарисованы на широтах 0, 30, 60 и на долготах 0, 135. На линии диаметра эллипсов наблюдается в среднем 9–11 «пятен». Расчет в окружностях на 30° с.ш. и ю.ш., показал характерный размер пятна около 200 км (2000 км / 10 пятен).

Соотношение площадей мирового океана, для которых $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$ и $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$

Исходные данные (1-град сетка)

Площадь областей $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$ $S_{>1} = 1.17 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$

Площадь областей $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$ $S_{\leq 1} = 2.26 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$

$$\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}} \approx 1.93 \approx 1.9 \quad \frac{S_{\leq 1}}{S} = 0.66$$

В области $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$ 66% площади (вихрей)

В области $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$ 34% площади (вихрей)

Сглаженные данные

Скользящее среднее по области 10x10 ячеек.

Площадь областей $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$ $S_{>1} = 1.38 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$

Площадь областей $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$ $S_{\leq 1} = 2.05 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$

$$\frac{S_{\leq 1}}{S_{>1}} \approx 1.48 \approx 1.5 \quad \frac{S_{\leq 1}}{S} = 0.60$$

В области $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| \leq 1$ 60% площади (вихрей)

В области $\left| \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{e}} \right| > 1$ 40% площади (вихрей)

Сезонная и межгодовая изменчивость течений Мирового океана по параметру $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$

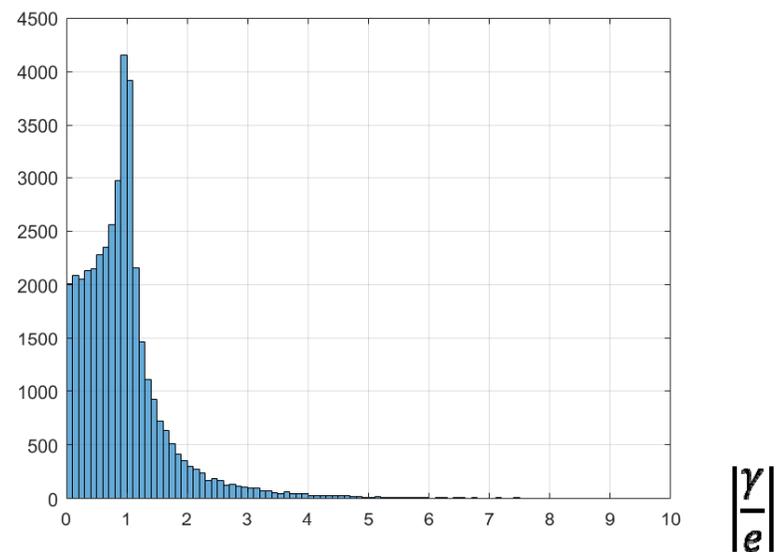
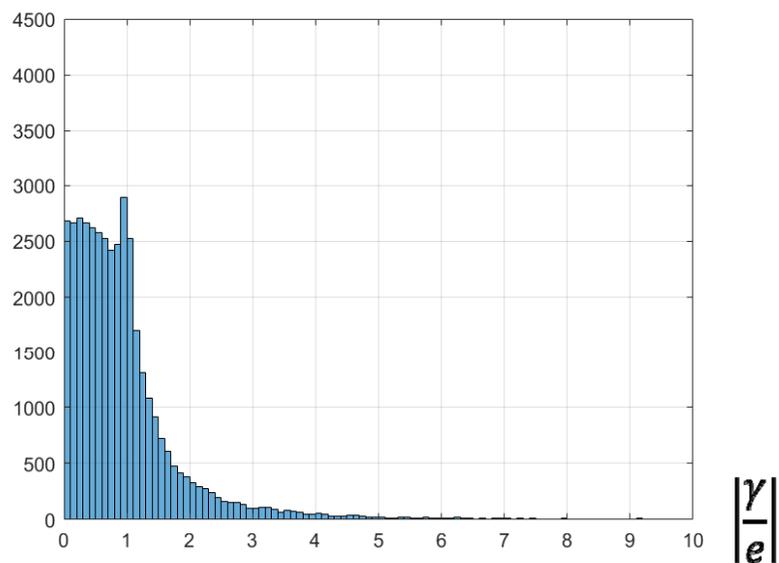
Для расчётов использовались данные океанического реанализа Glorys12, доступные по ссылке https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_026/INFORMATION. Использовались данные, имеющие месячную дискретность и 1-градусное разрешение за 1993-2019 годы.

Строились гистограммы течений Мирового океана по параметру $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ с осреднением по сезонам и годам за период 1993-2019 г. Одновременно построились те же гистораммы по осредненным по 10x10 клеток методом скользящего среднего.

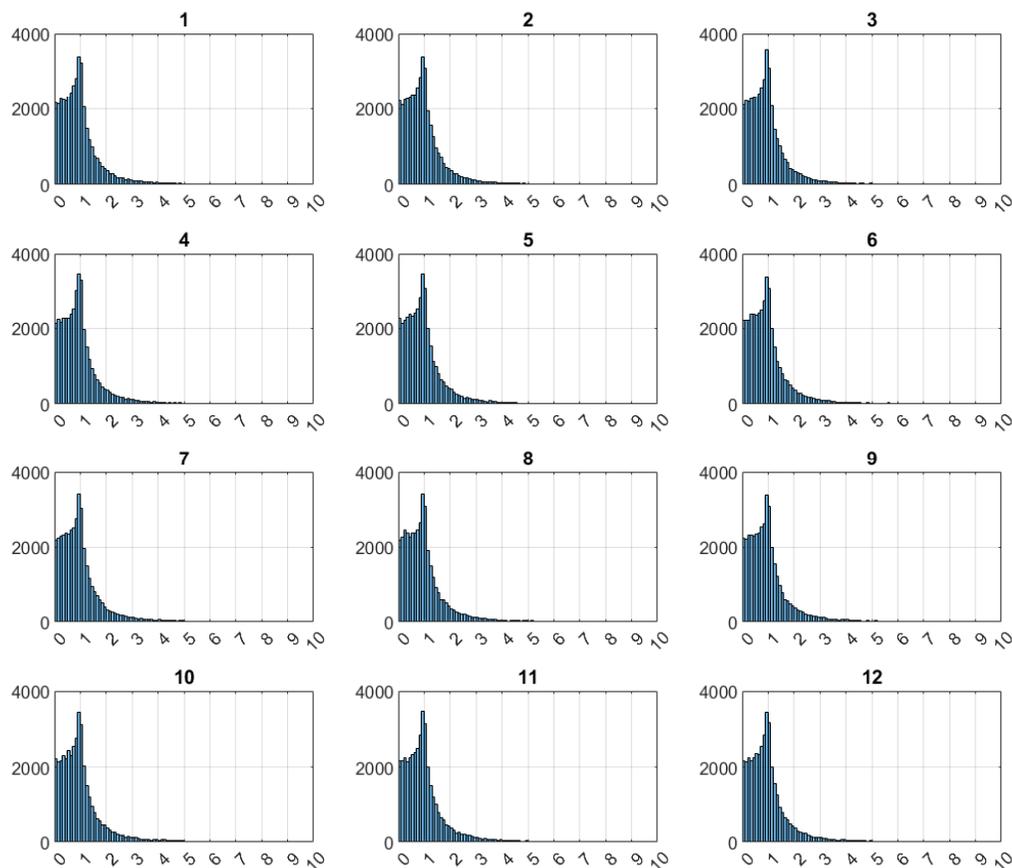
В каждом расчете определялась относительная интегральная площадь зон (доменов) с $\left| \frac{\gamma}{e} \right| \leq 1$ и $\left| \frac{\gamma}{e} \right| > 1$.

Все расчёты проведены для осреднённого поверхностного 200-метрового слоя. В таблицах добавила ещё один критерий – отношение площади темных и светлых «пятен» к общей площади водной поверхности.

Гистограммы распределений течений Мирового океана по параметру $\left| \frac{\gamma}{e} \right|$ за весь период 1993-2019 г. , вычисленных по исходным одноградусным данным (слева) и по сглаженным 10x10 клеток (справа) данным (метод скользящего среднего).



Далее приводятся результаты по сглаженным 10x10 клеток данным.

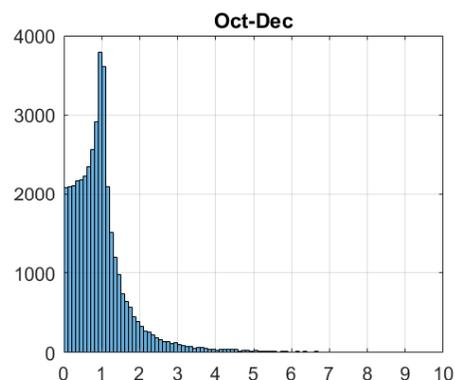
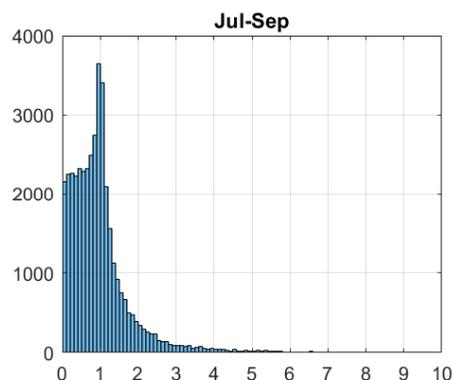
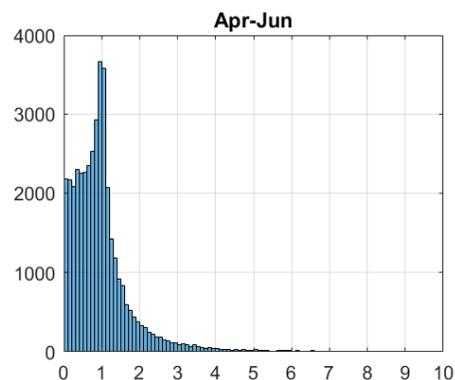
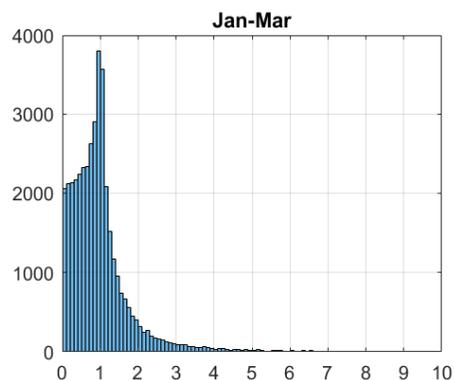


Месяц	$S_{\leq 1}/S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$
Январь	1.47	0.60
Февраль	1.49	0.60
Март	1.51	0.60
Апрель	1.50	0.60
Май	1.51	0.60
Июнь	1.51	0.60
Июль	1.51	0.60
Август	1.49	0.60
Сентябрь	1.45	0.59
Октябрь	1.45	0.59
Ноябрь	1.44	0.59
Декабрь	1.44	0.59

$S_{\leq 1}$ – интегральная площадь доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| \leq 1$, $S_{>1}$ – интегральная площадь доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| > 1$

S – площадь Мирового океана

Среднемесячные гистограммы за период 1993-2019 г. 1-январь, 2-февраль и т.д.



Сезон	$S_{\leq 1}/S_{>1}$	$S_{\leq 1}/S$
Зима	1.49	0.60
Весна	1.49	0.60
Лето	1.48	0.60
Осень	1.44	0.59

$S_{\leq 1}$ – интегральная площадь доменов с $\left|\frac{\gamma}{e}\right| \leq 1$
 $S_{>1}$ – интегральная площадь доменов с $\left|\frac{\gamma}{e}\right| > 1$
 S – площадь Мирового океана

Среднесезонные гистограммы течений Мирового океана по параметру $\left|\frac{\gamma}{e}\right|$ за период 1993-2019 г. (26 лет)

Межгодовая изменчивость интегральных площадей доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| \leq 1$ и $\left|\frac{y}{e}\right| > 1$

$S_{\leq 1}$ – интегральная площадь доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| \leq 1$

$S_{> 1}$ – интегральная площадь доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| > 1$

S – площадь Мирового океана

С большой точностью сохраняется относительная интегральная площадь доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| \leq 1$:

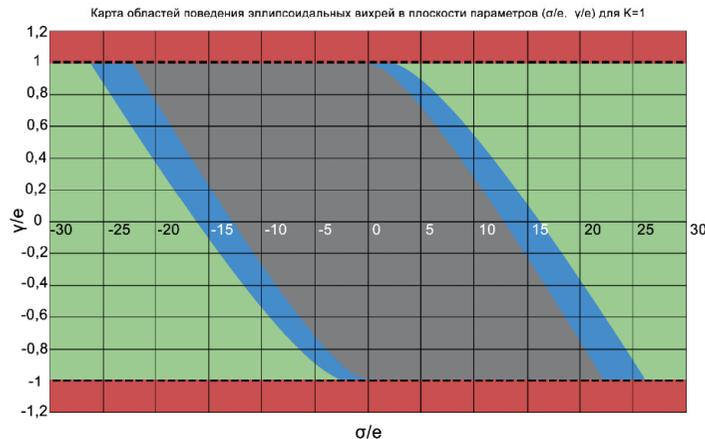
$$S_{\leq 1}/S = 0.60$$

И отношение интегральных площадей доменов с $\left|\frac{y}{e}\right| \leq 1$ и $\left|\frac{y}{e}\right| > 1$:

$$S_{\leq 1}/S_{> 1} = 1.50$$

Год	$S_{\leq 1}/S$	$S_{> 1}/S$
1993	1.51	0.60
1994	1.49	0.60
1995	1.52	0.60
1996	1.48	0.60
1997	1.50	0.60
1998	1.54	0.61
1999	1.47	0.60
2000	1.48	0.60
2001	1.48	0.60
2002	1.49	0.60
2003	1.49	0.60
2004	1.49	0.60
2005	1.51	0.60
2006	1.49	0.60
2007	1.51	0.60
2008	1.50	0.60
2009	1.49	0.60
2010	1.48	0.60
2011	1.51	0.60
2012	1.50	0.60
2013	1.51	0.60
2014	1.48	0.60
2015	1.49	0.60
2016	1.50	0.60
2017	1.56	0.61
2018	1.50	0.60
2019	1.50	0.60

Сколько же вихрей, рожденных в океане, в конечном итоге вытянутся в нити?



В полосу $|\frac{\gamma}{e}| \leq 1$ попадает 60-65% всех вихрей океана, из них в нити вытянутся 75%. Из общего количества вихрей океана вытянутся в нити $0.75 \cdot (0.60 \div 0.65) = 0.45 \div 0.50$ вихрей.

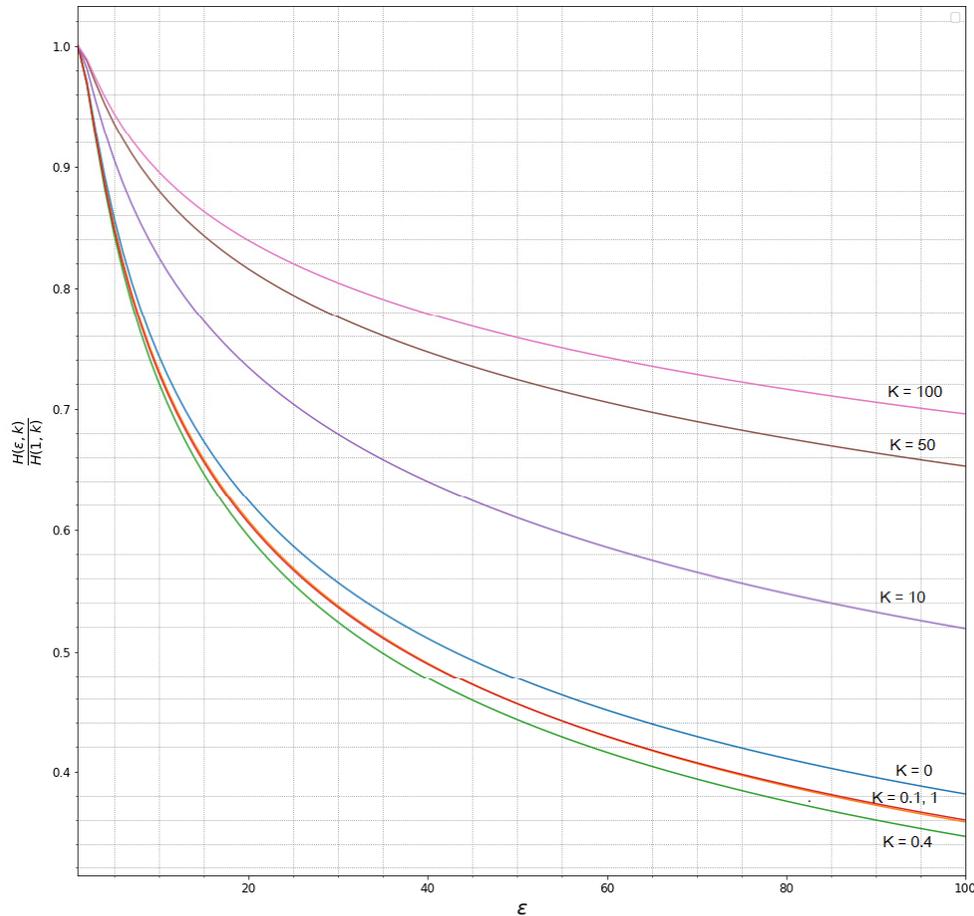
Вывод: 1). В зону разрешенного вытягивания попадает 60-65% площади Мирового океана или 60-65% вихрей Мирового океана.

2). По всему океану порядка 45 ÷ 50% вихрей вытягиваются в нити, остальные выживают в виде локализованных вихревых образований. Соответственно 45 ÷ 50% энергии, поступившей в вихри мезомасштаба, перекачивается в субмезомасштаб в виде энергии вихревых нитей.

Вопрос: вся ли энергия ушедшая из мезомасштаба в нити окончательно доходит до субмезомасштаба? **Ответ – нет, не вся!**

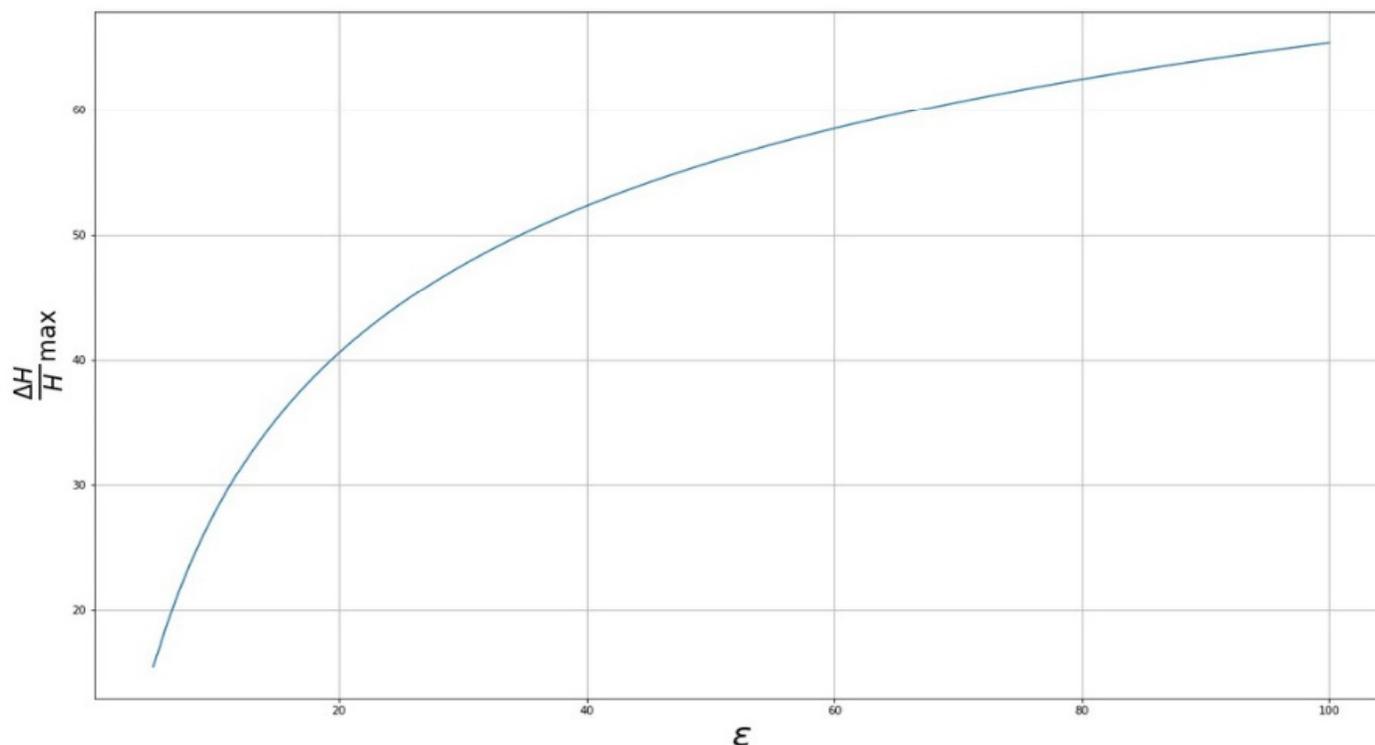
$$\frac{H(\varepsilon, K)}{H(1, K)}$$

График зависимости $\frac{H(\varepsilon, K)}{H(1, K)}$ от ε



ε

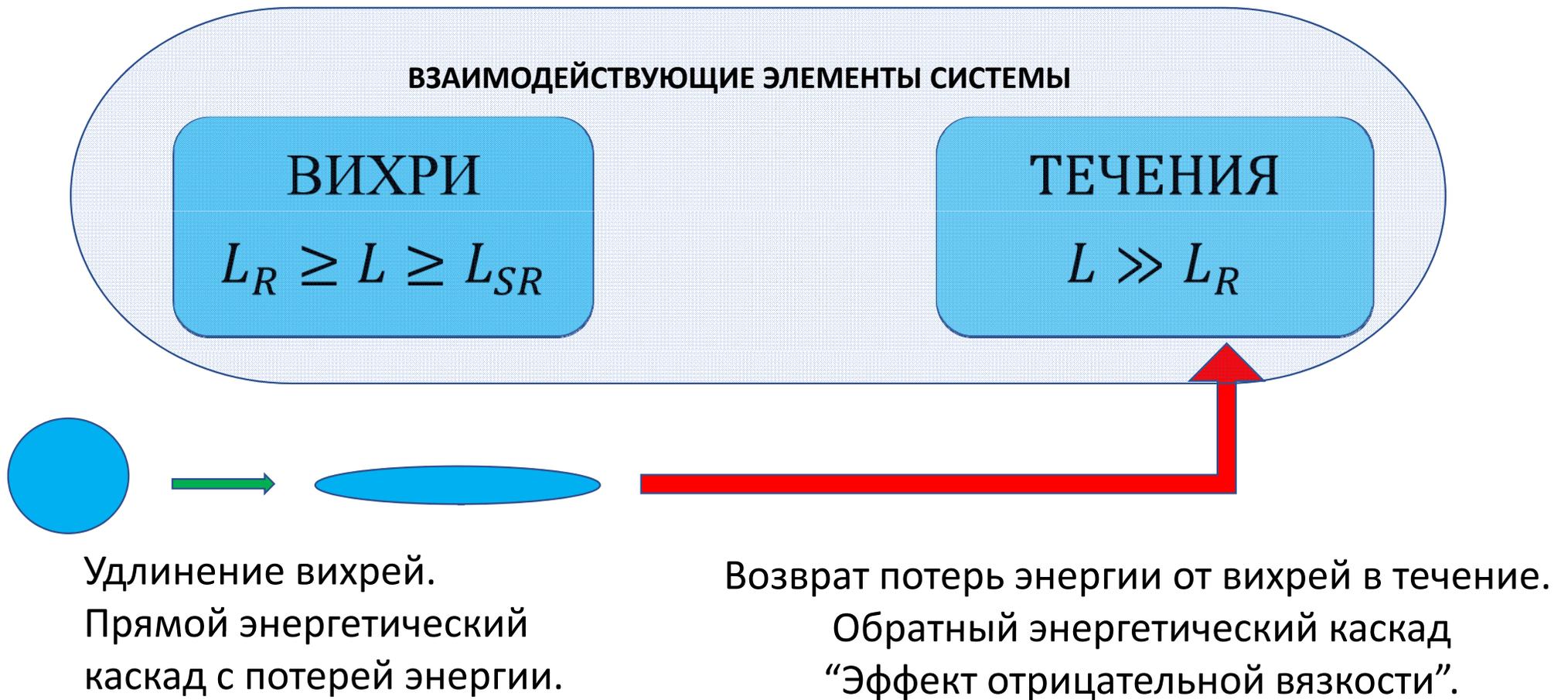
Зависимость полной механической энергии вихря $H(\varepsilon, K)$ от параметра горизонтального вытягивания ε при различных вертикальных параметрах K . Энергия нормирована на значение $H(1, K)$. При любом фиксированном K энергия монотонно убывает с ростом ε .



Зависимость максимальной относительной потери энергии вихря от параметра горизонтальной вытянутости ядра ε . Параметр вертикальной сплюснутости $K \approx 0.4$ взят из набора расчетов для предыдущих графиков. Основные потери энергии происходят на тонких вихрях (малых K) при сильном вытягивании вихрей.

Схема энергопотоков

L_R - мезомасштаб, L_{SR} - субмезомасштаб



Элементы теории турбулентности на “пальцах”. Что такое отрицательная вязкость.

$\overline{\varepsilon_0}$ энергия осредненного движения; $\overline{\varepsilon'}$ энергия пульсационного движения

$$\frac{\partial \overline{\varepsilon_0}}{\partial t} = \dots - \left[\begin{array}{c} \text{вязкие потери} \\ \text{осредненного движения} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{взаимодействие осредненного движения с} \\ \text{пульсационными движениями} \end{array} \right]$$

$$\frac{\partial \overline{\varepsilon'}}{\partial t} = \dots - \left[\begin{array}{c} \text{вязкие потери} \\ \text{пульсационного движения} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{взаимодействие осредненного движения с} \\ \text{пульсационными движениями} \end{array} \right]$$

$$\frac{\partial \overline{\varepsilon_0}}{\partial t} = \dots - \int_{\tau} \Phi_0 d\tau - \int_{\tau} \Phi d\tau$$

$$\frac{\partial \overline{\varepsilon'}}{\partial t} = \dots - \int_{\tau} \overline{\Phi'} d\tau + \int_{\tau} \Phi d\tau$$

Φ_0 и $\overline{\Phi'}$ – плотности вязкостных потерь
 Φ – взаимодействие.

Вопрос: Каков знак Φ ?

$\Phi > 0$ поток энергии от среднего движения к пульсационному. Прямой энергетический каскад.

$\Phi < 0$ поток энергии от пульсационного движения к среднему. Обратный энергетический каскад. Явление отрицательной вязкости.

Важные результаты работы. Впервые предложен аналитическо-графический способ определения режимов поведения 3D эллипсоидальных вихрей в неоднородных баротропных потоках, стыкующийся с исследованиями 2D эллиптических вихрей Кирхгофа. Доказано, что существует три режима поведения вихрей. Основное внимание уделено условиям неминуемого вытягивания вихрей в вихревые нити.

Интерпретация результатов

1. Вытягивание вихрей в вихревые нити проявляется пятнами (доменами) на **60-65% территории Мирового океана. Характерные размеры пятен порядка 200 км.**
2. **В вихревые нити вытягивается 45-50% от общего количества мезомасштабных вихрей** Мирового океана, что обеспечивает “перекачку” энергии с мезомасштаба на субмезомасштаб.
3. По мере вытягивая вихрей их собственная энергия уменьшается (теряется).

Провокационные заявления:

А). Энергия в ансамбле вихрей, теряемая вихрями при растяжении, возвращается в течение. **Обратный энергетический каскад** или **Явление отрицательной вязкости!**

Б). В доменах с $\left| \frac{\gamma}{e} \right| \leq 1$ нарушается изотропность пространства? **Закон $-5/3$ теряет силу?**

Спасибо !

