

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ОБМЕН В ВЕРХНЕМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ МОРЯ И КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ

Чухарев А.М., Павленко О.И., Коржуев В.А.

V Всероссийская конференция
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»

Москва

2024

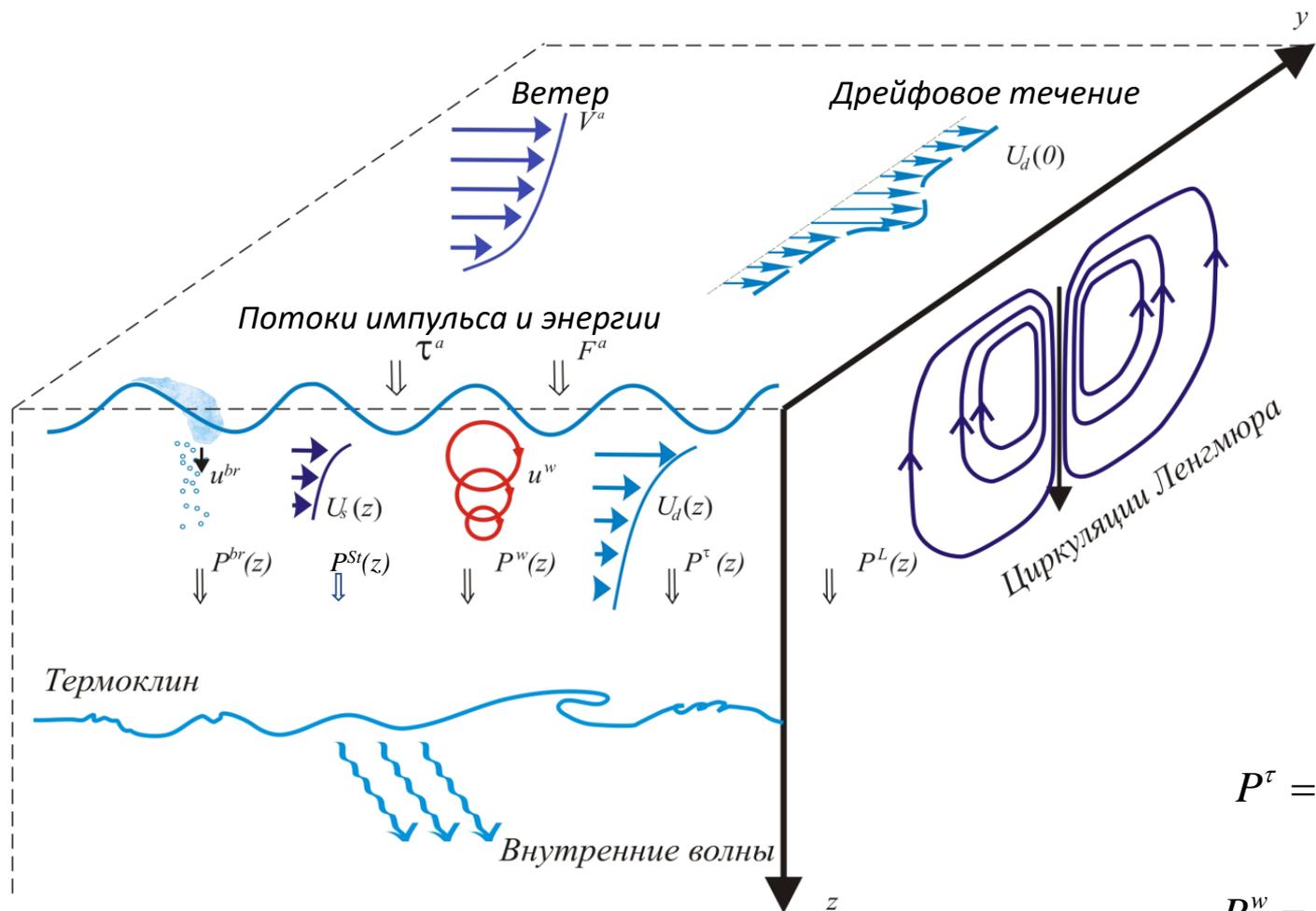
Актуальность

- Развитые на сегодняшний день модели часто показывают значительное расхождение расчетов и фактических данных, таких например, как температура поверхности океана и толщина перемешанного слоя [Belcher et al., 2012]. Составная часть этой проблемы – достоверное описание интенсивности вертикального турбулентного обмена в верхнем пограничном слое моря
- При моделировании интенсивности вертикального турбулентного обмена в приповерхностном слое моря неплохо параметризованы случаи умеренных ветров и развитого ветрового волнения, тогда как штормовые и штилевые условия моделями описываются неудовлетворительно.
- В наших экспериментах самое значительное расхождение между наблюдаемыми и измеренными значениями скорости диссипации турбулентной энергии наблюдалось при слабых ветрах и неразвитом волнении. В этих случаях экспериментальные значения могли превышать расчетные на 2 порядка и больше.

«Имеется два пробела в наших знаниях о водно-воздушной поверхности раздела: теория неадекватна и мало данных» [Brown, 1990]

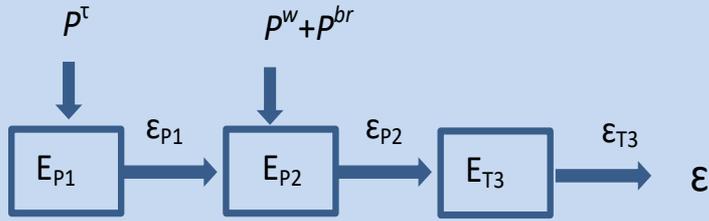
Цель

Развитие модельного описания вертикального турбулентного обмена в верхнем пограничном слое моря в различных гидрометеорологических условиях с учетом вкладов основных механизмов генерации турбулентности. Оценка роли когерентных структур.



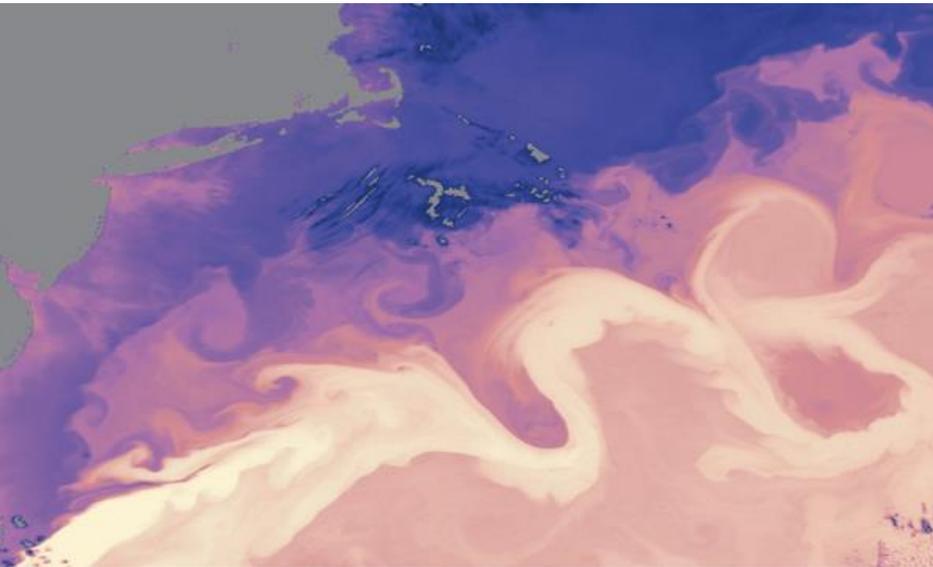
$$P^\tau = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial U_i}{\partial z}$$

$$P^w = -\frac{d}{dz} \left(\overline{w' E^w} \right)$$

Авторы	Расчетные формулы	Механизмы генерации турбулентности
<p>Craig&Banner, 1994</p>	$\varepsilon = \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{wv} = \frac{u_*^3}{B\kappa(z+z_0)} \left[\left(\frac{B}{S_M} \right)^{\frac{3}{4}} + \alpha \left(\frac{3B}{S_q} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{z}{z+z_0} \right)^n \right]$	<p>1) Сдвиг скорости 2) Обрушивающиеся поверхностные волны</p>
<p>Kudryavtsev et al., 2008</p>	<p>Пренебрегается диффузией</p> $\hat{q}(z) = \left\{ \left[\hat{\tau}(\hat{\tau} - \hat{\tau}^{wb}) \right]^{3/4} + \kappa z \lambda \hat{P}^{wb} \right\}^{1/3}$ $\varepsilon = q^3 / (\kappa z \lambda) \qquad \hat{q} = \frac{q}{v_*}$	<p>1) Обрушение поверхностных волн 2) Сдвиг скорости дрейфового течения</p>
<p>Чухарев, 2013</p>	<p>Многомасштабная численная модель</p>  <pre> graph TD P1[p^tau] --> E1[E_p1] E1 -- epsilon_p1 --> E2[E_p2] P2[p^w + p^br] --> E2 E2 -- epsilon_p2 --> E3[E_t3] E3 -- epsilon --> E_out[epsilon] </pre>	<p>1) Сдвиг скорости 2) Нелинейность поверхностных волн 3) Обрушение поверхностных волн</p>

[Haller, 2015. Annu. Rev. Fluid Mech.]

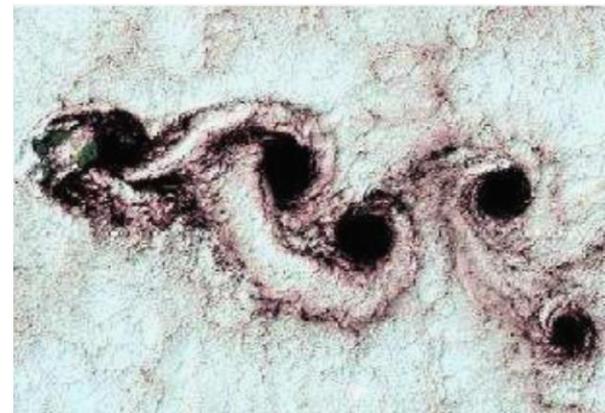
Перенос теплых вод, выявленный по распределению температуры поверхности моря в районе Гольфстрима, 2005 г.



Спиральные вихри в Средиземном море, 1984 г.

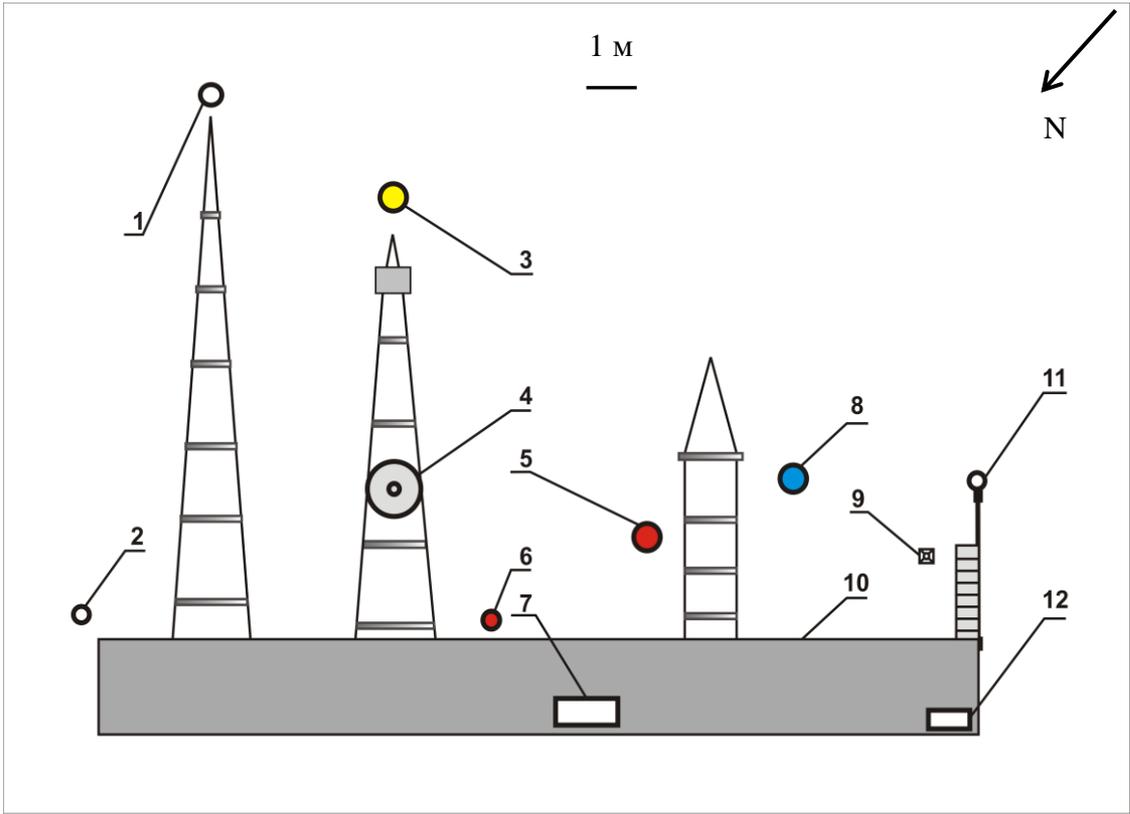


След острова в океане



Теоретическое моделирование строится на основе экспериментальных исследований

Схема расположения измерительных комплексов на стационарной океанографической платформе (СОП) во время экспериментов. Отрезок прямой соответствует масштабу 1 м, стрелка указывает направление на север.



№	Наименование прибора
1	6-ти струнный волнограф
2	Струнный волнограф
3	Акустический доплеровский профилограф DVS-6000
4	Измерительный комплекс «Сигма-1»
5	Измеритель скорости течения комплекс «Восток-М»
6	Измерители течения МГИ-1308 (4 шт.)
7	Метеокомплекс
8	Акустический доплеровский профилограф "Work Horse Monitor"
9	Температурный зонд
10	Океанографическая платформа
11	Струнный волнограф
12	Метеокомплекс

Измерение скорости течения и турбулентных пульсаций

Измерительные комплексы для регистрации скорости течения и турбулентных пульсаций.
Океанографическая платформа, эксперимент 2021 г.

Восток-М



DVS6000



Work Horse Monitor



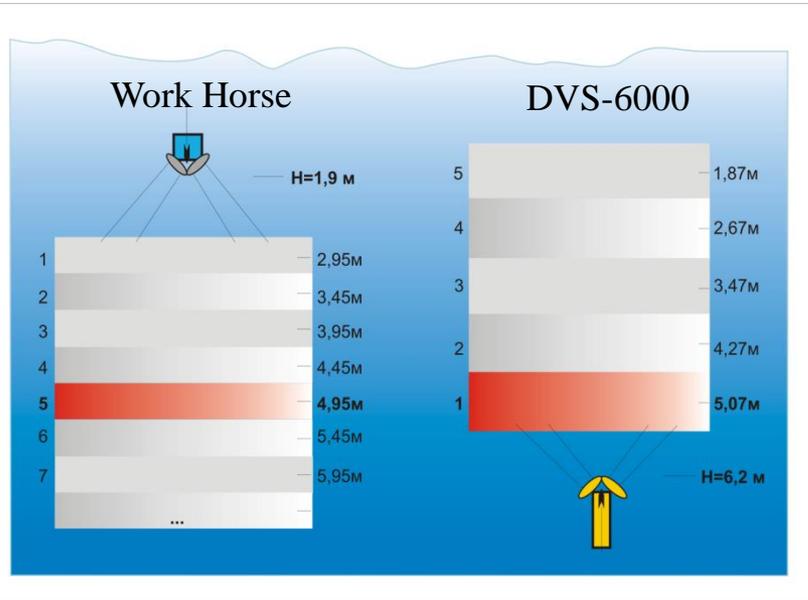
Турбулиметр «Сигма-1»



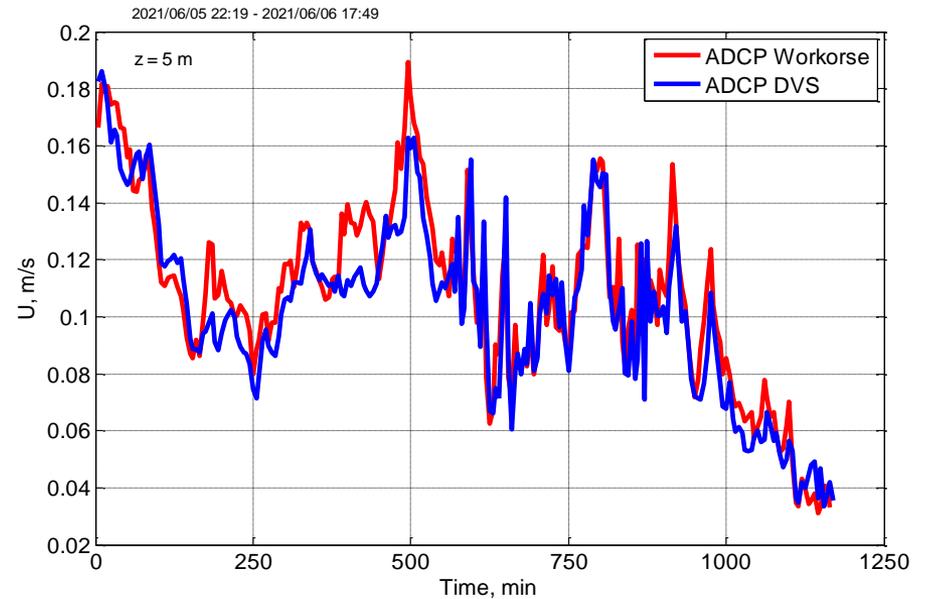
МГИ-1308



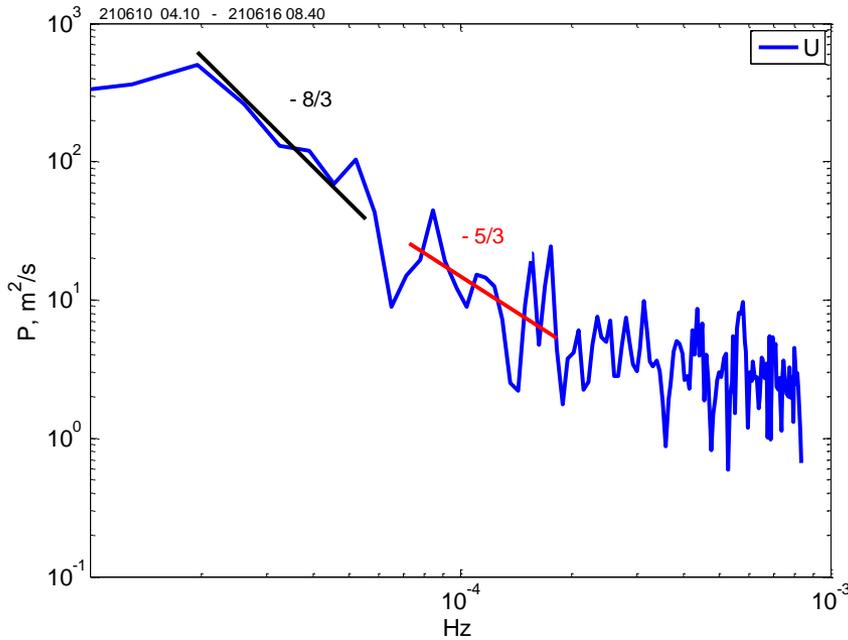
Постановка измерительных комплексов ADCP Work Horse и DVS-6000, красным цветом выделен горизонт для сопоставления данных



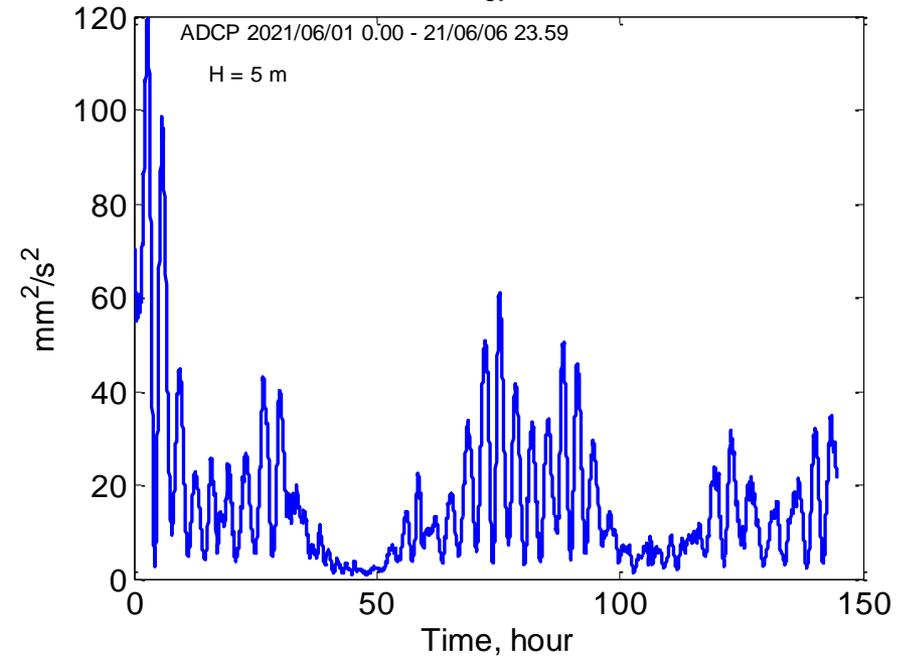
Скорость течения на горизонте 5 м по данным 2-х ADCP



Фурье-спектр модуля скорости течения
10 – 16 июня 2021 г.

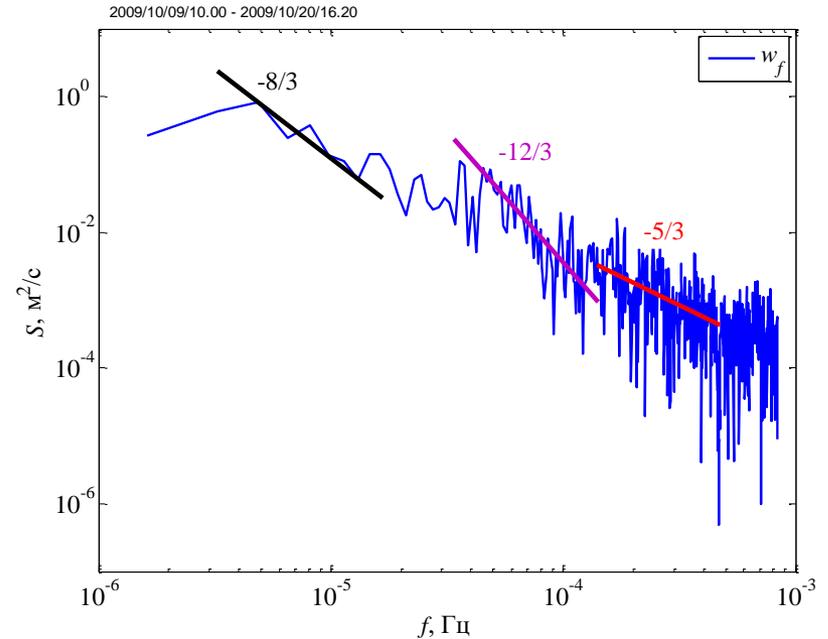
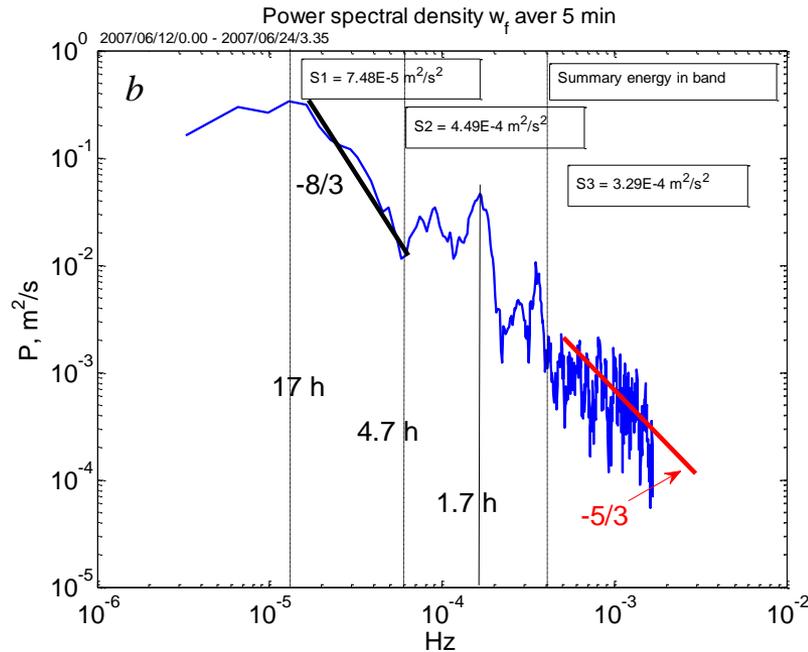


Полная энергия пульсаций средней скорости течения,
рассчитанная по вейвлет-коэффициентам за 1 – 6 июня 2024
Total energy meanV2



- ❖ **Когерентная структура** – это связанная турбулентная масса жидкости с мгновенно коррелированной по фазе завихренностью во всей ее пространственной области [Hussain, 1982].

Фурье-спектры вертикальных турбулентных пульсаций в воде на глубине 2 м. Длительность записи 12 дней.



➤ Обнаружено много схожих черт в морской и атмосферной турбулентности

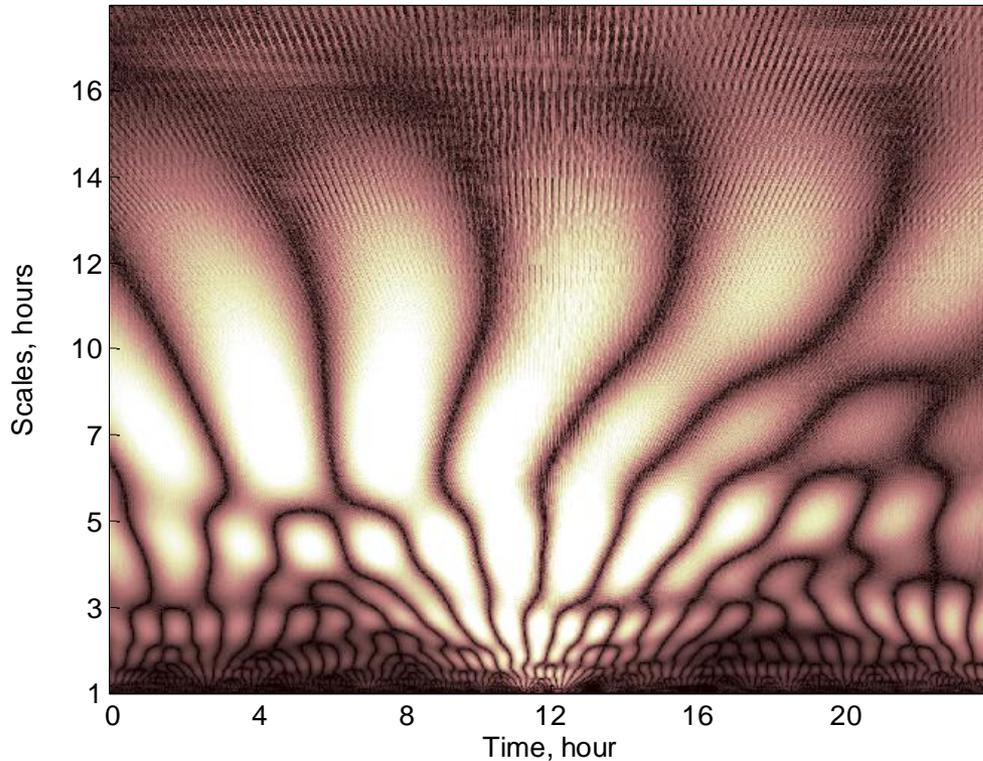
По исследованиям когерентных структур в атмосфере [Лукин и др., 2014]:

- «Когерентная турбулентность отличается от колмогоровской турбулентности более быстрым убыванием спектра, причем эргонесущая часть спектра убывает по закону $-8/3$, в более высокочастотной области $-12/3$ »

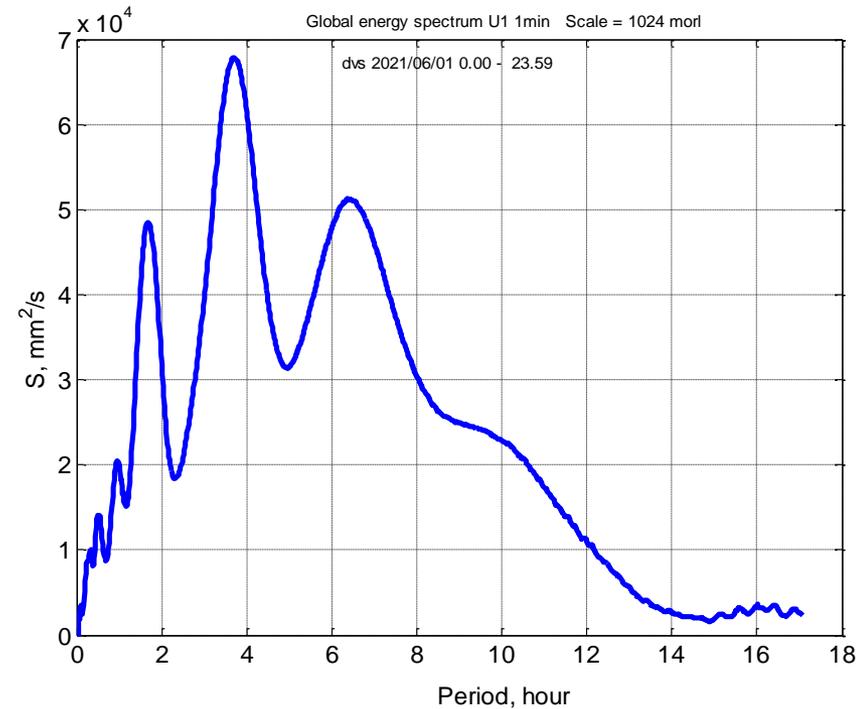
Вейвлет-коэффициенты модуля скорости течения 01.06.2021

dvs 2021/06/01 0.00 - 23.59

Cont Transform morl abs coefs u1 1min



Глобальный спектр модуля скорости течения 01.06.2021

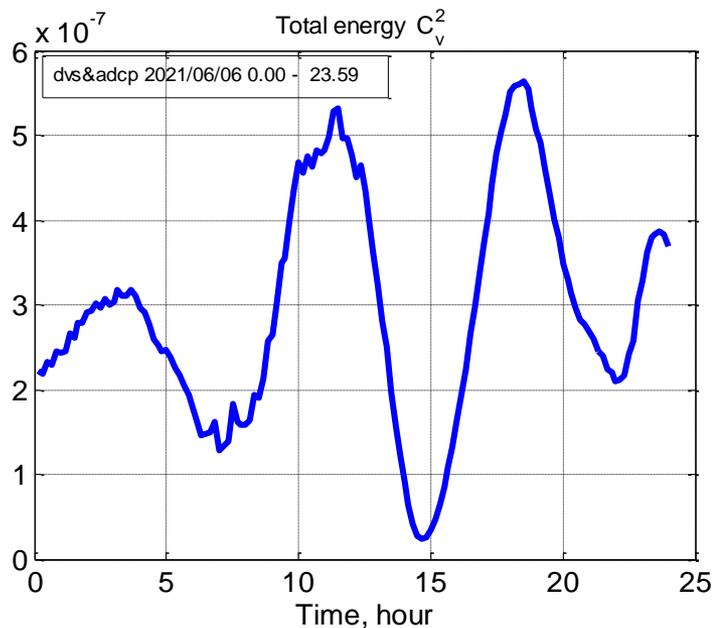


- Субмезомасштабные структуры с внутрисуточными периодами регистрируются по всем измеряемым параметрам

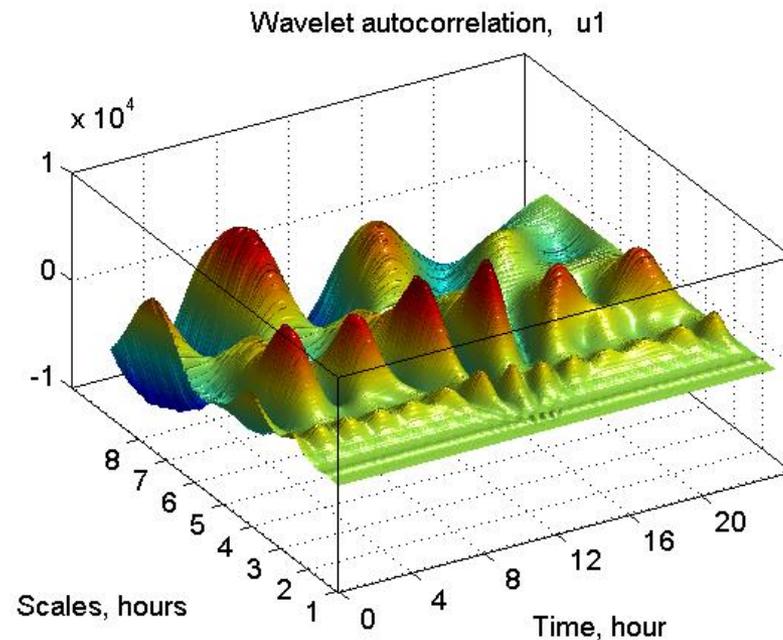
Структуры с внутрисуточными временными масштабами в море

Структуры с внутрисуточными временными масштабами в море

Эволюция энергии структурного параметра 6 июня 2021 г



Автокорреляционная функция 1 июня 2021 г
скорость течения по DVS, дискретность 1 мин



$$Wc(a, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} W^*(a, b) W(a, b + \tau) db$$

$$W(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Роль когерентных структур в турбулентном обмене

Продольная структурная функция пульсаций скорости [Колмогоров, 1941]

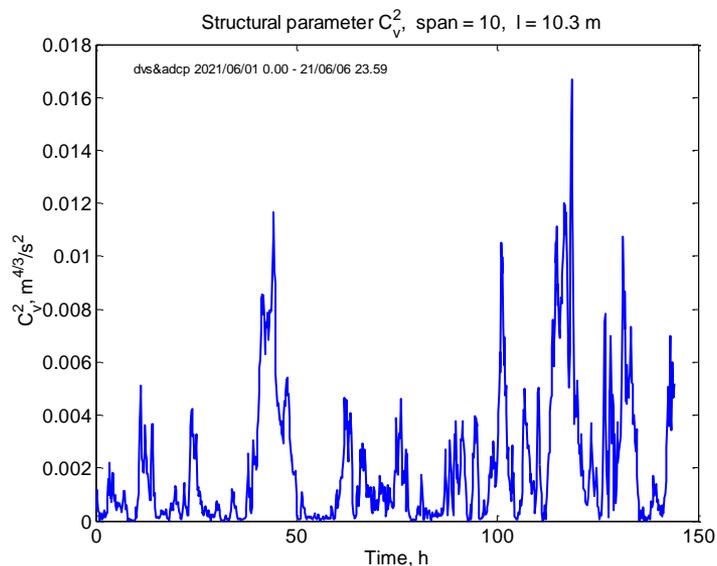
$$D_{ll} = \overline{[u_l(r) - u_l(r+l)]^2} = C_v^2 l^{2/3}$$

l – расстояние между двумя точками измерений

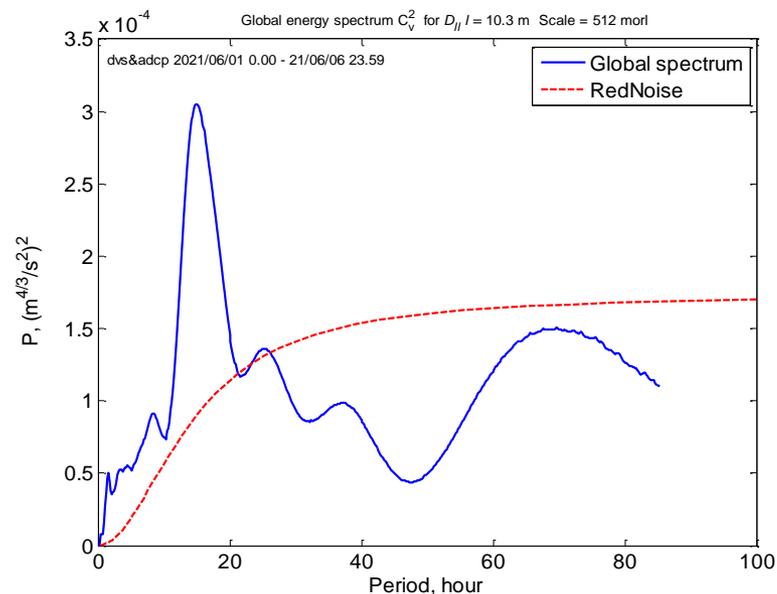
C_v^2 – структурный параметр, характеризующий скорость трансформации энергии вихря на единицу массы

- Количественное определение структурной функции и структурного параметра базируется на синхронном измерении скорости течения с помощью акустических измерителей в разнесенных по горизонтали точках.

Продольный структурный параметр пульсаций скорости течения с осреднением по 10 мин на глубине 5 м в районе океанографической платформы 1 – 6 июня 2021 г. $l = 10,3$ м



Глобальный спектр структурного параметра за период 1 – 6 июня 2021 г.



Усовершенствование нестационарной модели вертикального турбулентного обмена

Модель, учитывающая нестационарность динамических процессов взаимодействия сопряженных слоев моря и атмосферы.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = fV - \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -fU - \frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial z}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\left(\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} + \overline{v'w'} \frac{\partial V}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'E} + \overline{w'E^w} + \frac{1}{\rho_0} \overline{w'p'} \right) + \frac{\partial D_{ll}}{\partial t} - \varepsilon$$

Здесь U и V – средние горизонтальные компоненты скорости вдоль осей x и y соответственно, f – параметр Кориолиса, u' , v' , w' – пульсационные компоненты скорости, E – турбулентная кинетическая энергия, E^w – энергия поверхностного волнения, p' – пульсации давления, ε – скорость диссипации.

Турбулентная кинетическая энергия

$$E = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) / 2 = q^2 / 2$$

В уравнение баланса турбулентной энергии в обновленной модели добавлен член, описывающий генерацию турбулентности локальными сдвигами скорости в среднем течении

$$\frac{\partial D_{ll}}{\partial t}$$

Усовершенствование нестационарной модели вертикального турбулентного обмена

Для замыкания системы используются соотношения, выражающие турбулентные потоки импульса через коэффициент турбулентной вязкости:

$$\overline{u'w'} = -\nu_t \frac{\partial U}{\partial z} \quad \overline{v'w'} = -\nu_t \frac{\partial V}{\partial z} \quad \nu_t = S_m l q$$

где ν_t – коэффициент турбулентной вязкости, S_m – константа, l – турбулентный масштаб длины. Для l принимается зависимость $l = \kappa(z + z_b)$, z – глубина, z_b – обратное волновое число самых коротких обрушивающихся волн [Kudryavtsev et al, 2008], используемое вместо параметра шероховатости z_0 , κ – постоянная Кармана.

Поскольку мелкомасштабная турбулентность считается хорошо развитой, изотропной, пульсациями давления пренебрегаем, т.к. они в этом случае играют незначительную роль

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'E} + \frac{1}{\rho_0} \overline{p'w'} \right) = -c_1 \frac{q^2}{\varepsilon} \left(\overline{w'^2} \frac{\partial E}{\partial z} \right) \quad \overline{w'^2} = \frac{1}{4} q^2$$

[Craig, Banner, 1994]:

$$\varepsilon = \frac{q^3}{Bl} \quad B = 16.6 \quad - \text{const}$$

$$S_m = 0.39$$

Начальные и граничные условия, на верхней границе

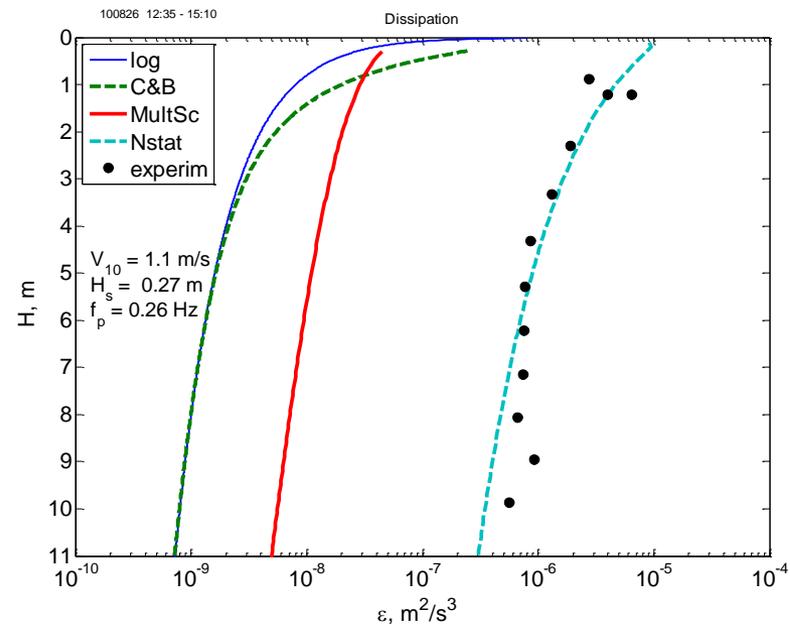
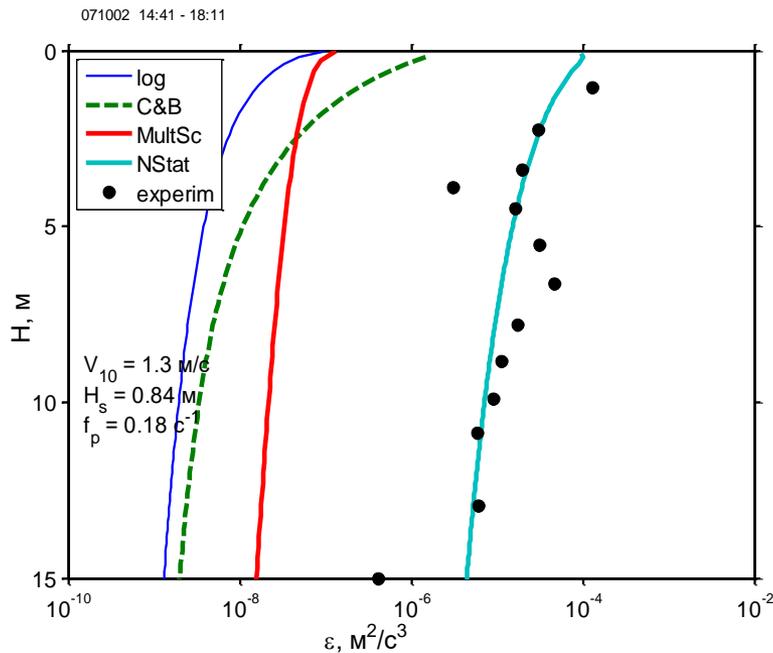
$$E_0 = \alpha_1 u_*^{w2} \quad v_t \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\tau_0}{\rho^w} \quad \tau_0 = \rho^w u_*^{w2} \quad v_t \frac{\partial V}{\partial z} = 0$$

На нижней границе

$$V = 0 \quad U = 0 \quad \frac{\partial E}{\partial z} = 0$$

- Экспериментальные данные о временной изменчивости структурной функции параметризованы простой гармонической функцией, которая была встроена в модель.

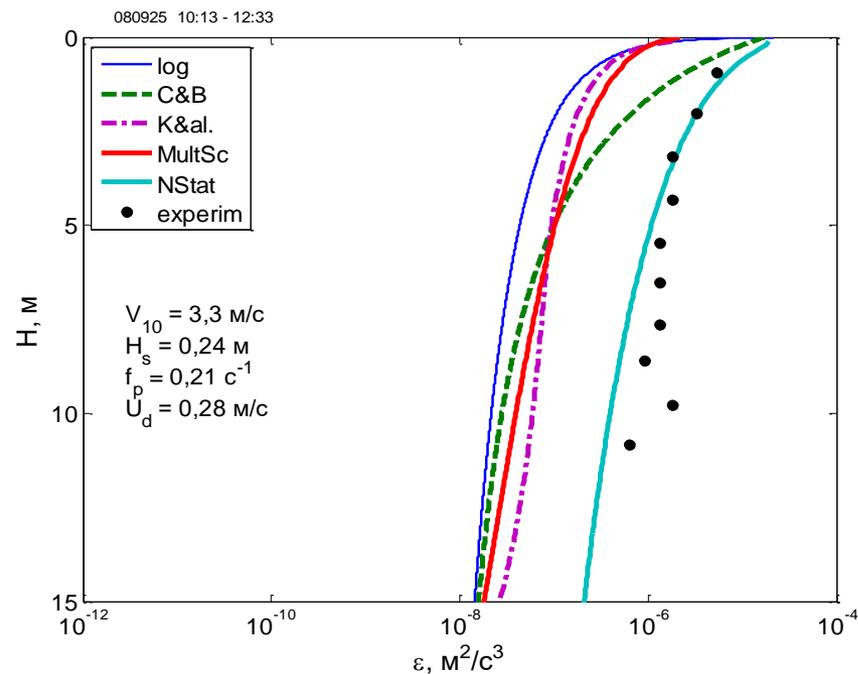
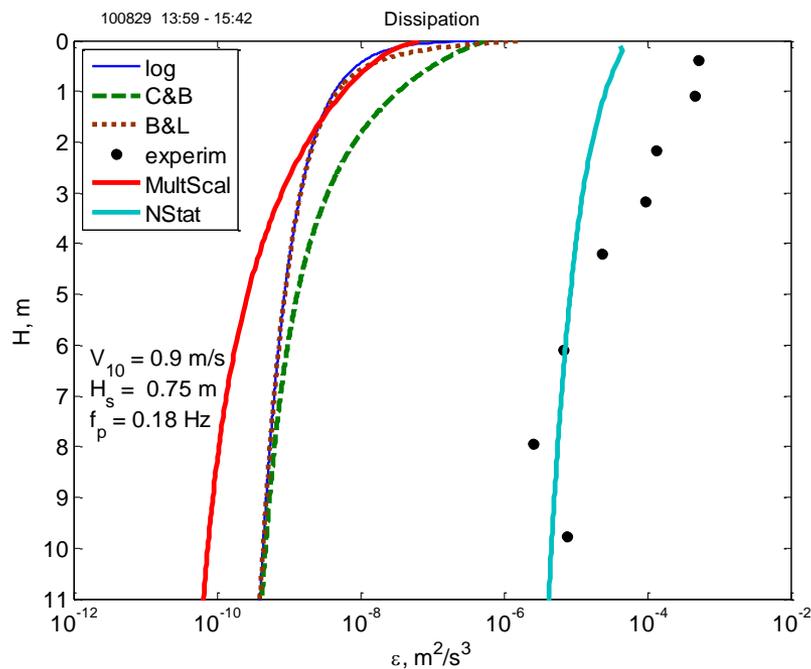
Модельные и экспериментальные значения скорости диссипации турбулентной энергии при слабом ветре



Обозначения: *log* – модель пристеночной турбулентности, *C&B* – модель [Craig&Banner, 1994], *K&al.* – модель [Kudryavtsev et al., 2008]; *MultSc* – многомасштабная модель [Chukharev, 2013]; *NStat* – нестационарная модель с когерентными структурами, точки – экспериментальные данные, V_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, H_s – высота значительных волн, f_p – частота спектрального пика волнения

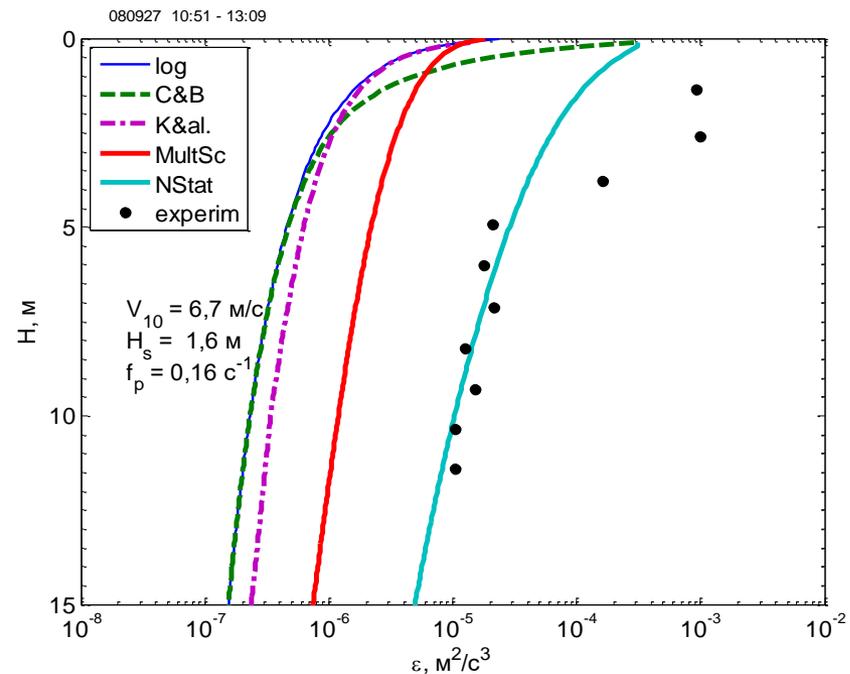
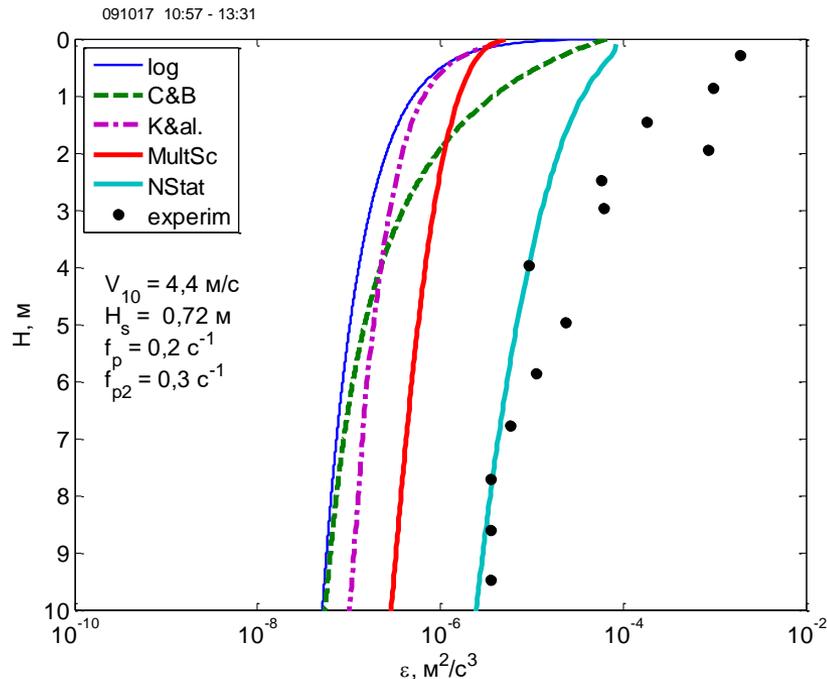
- Расчеты по предложенной модели показали кардинальное улучшение соответствия расчетов с экспериментами при слабых ветрах

Модельные и экспериментальные значения скорости диссипации турбулентной энергии при слабом ветре



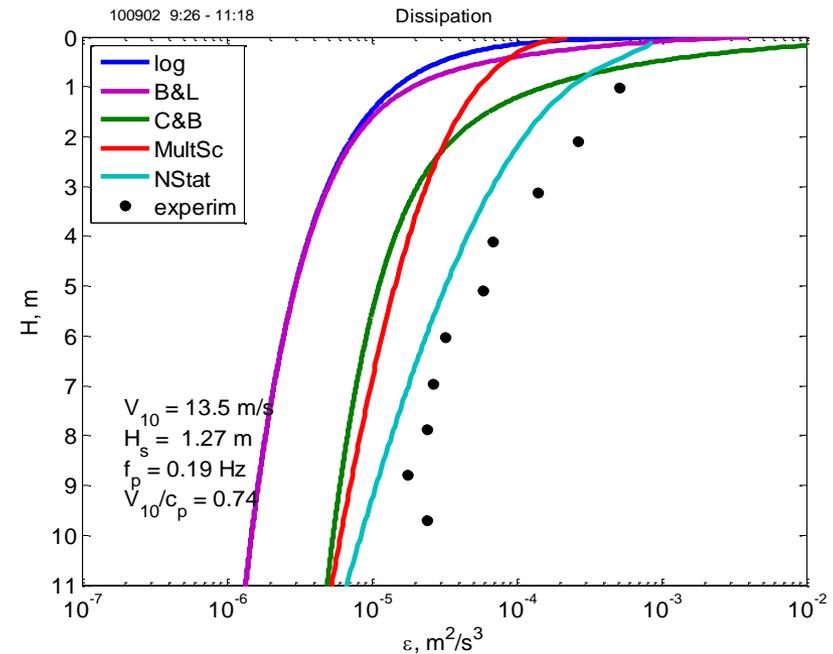
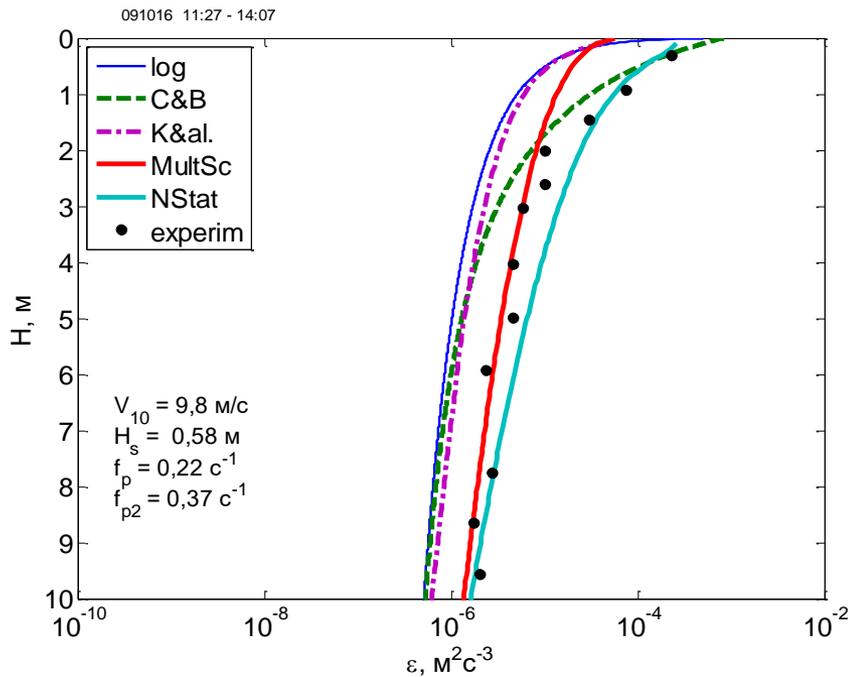
Обозначения: log – модель пристеночной турбулентности, C&B – модель [Craig&Banner, 1994], K&al. – модель [Kudryavtsev et al., 2008]; *MultSc* – многомасштабная модель [Chukharev, 2013]; *NStat* – нестационарная модель с когерентными структурами, точки – экспериментальные данные, V_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, H_s – высота значительных волн, f_p – частота спектрального пика волнения

Модельные и экспериментальные значения скорости диссипации турбулентной энергии при умеренном и сильном ветре



Обозначения: *log* – модель пристеночной турбулентности, *C&B* – модель [Craig&Banner, 1994], *K&al.* – модель [Kudryavtsev et al., 2008]; *MultSc* – многомасштабная модель [Chukharev, 2013]; *NStat* – усовершенствованная нестационарная модель с учетом когерентных структур, точки – экспериментальные данные, V_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, H_s – высота значительных волн, f_p – частота спектрального пика волнения

Модельные и экспериментальные значения скорости диссипации турбулентной энергии при умеренном и сильном ветре



Обозначения: log – модель пристеночной турбулентности, B&L – модель Benilov&Ly, 2002; C&B – модель [Craig&Banner, 1994], K&al. – модель [Kudryavtsev et al., 2008]; *MultSc* – многомасштабная модель [Chukharev, 2013]; *NStat* – нестационарная модель с когерентными структурами, точки – экспериментальные данные, V_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, H_s – высота значительных волн, f_p – частота спектрального пика волнения

1. В используемых в настоящее время климатических моделях рассматривается ограниченное число механизмов генерации турбулентности, определяющих интенсивность вертикального перемешивания, что нередко приводит к ощутимым отличиям расчетов и измерений, особенно при слабом ветре и в штормовых условиях.
2. Энергетические спектры морской и атмосферной турбулентности схожи. В приповерхностном слое моря спектры показывают наличие когерентных структур, причем энергонесущая часть спектра обычно убывает по закону $-8/3$.
3. По синхронным измерениям скорости течения в разнесенных по горизонтали точках рассчитаны структурные функции пульсаций скорости, вызванных субмезомасштабными когерентными структурами.
4. Предложен усовершенствованный подход к описанию баланса турбулентной кинетической энергии в приповерхностном слое моря с введением в модель члена, описывающего генерацию турбулентности когерентными структурами и определена соответствующая модельная константа.
5. Расчеты по усовершенствованной нестационарной модели турбулентности для приповерхностного слоя моря показывают, что учет влияния когерентных структур кардинально улучшает соответствие расчетов и экспериментальных данных при слабых ветрах, когда генерация турбулентности сдвигом скорости течения и поверхностным волнением незначительны. При умеренных и сильных ветрах модель также вполне удовлетворительно согласуется с натурными измерениями.
6. Структурная функция достаточно объективно характеризует интенсивность турбулентности, обусловленную локальными неустойчивостями в морских течениях в прибрежной зоне.
7. Дальнейшее исследование предполагает уточнение роли когерентных структур в различных гидрометеорологических условиях.

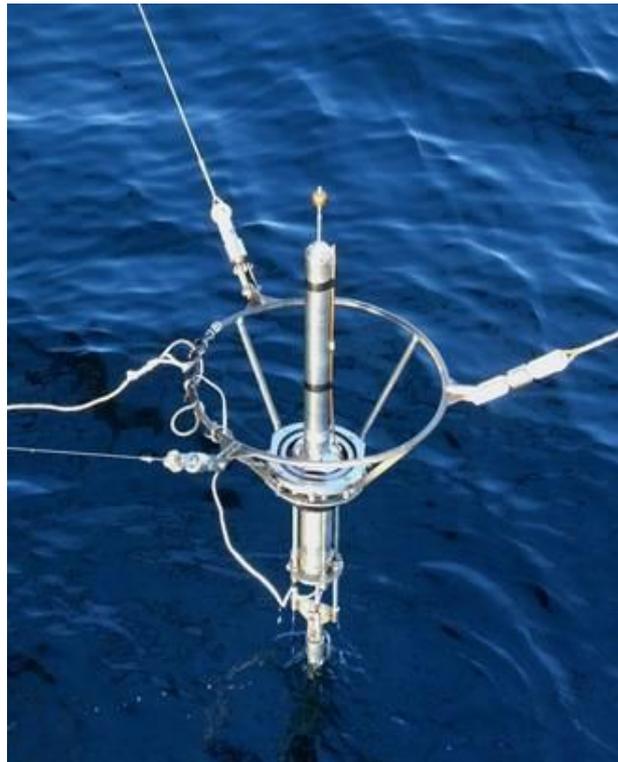
An aerial photograph of a vast, turbulent sea with dark, churning waves and white foam. A bright sun flare is visible in the center of the image, creating a vertical streak of light. The sky is overcast with grey clouds. The text "СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!" is overlaid in large, bold, red capital letters in the center of the image.

**СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ!**

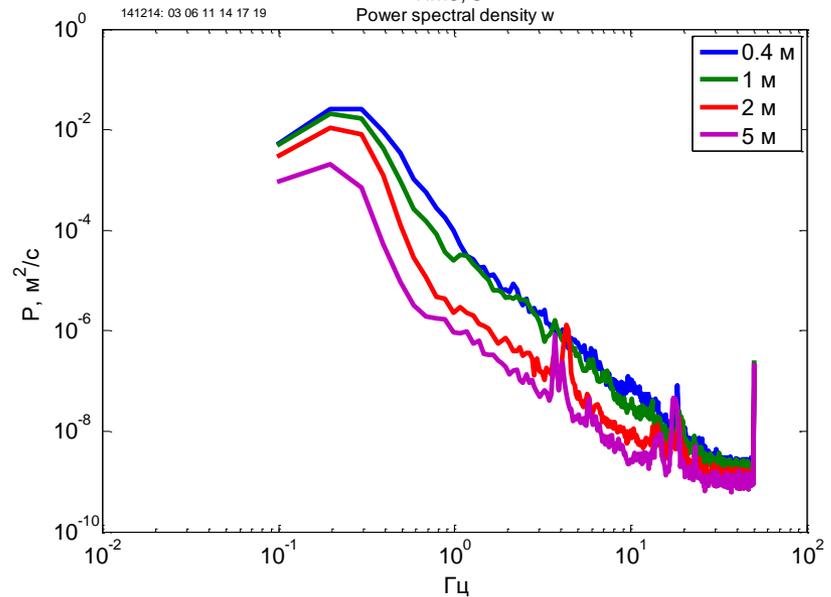
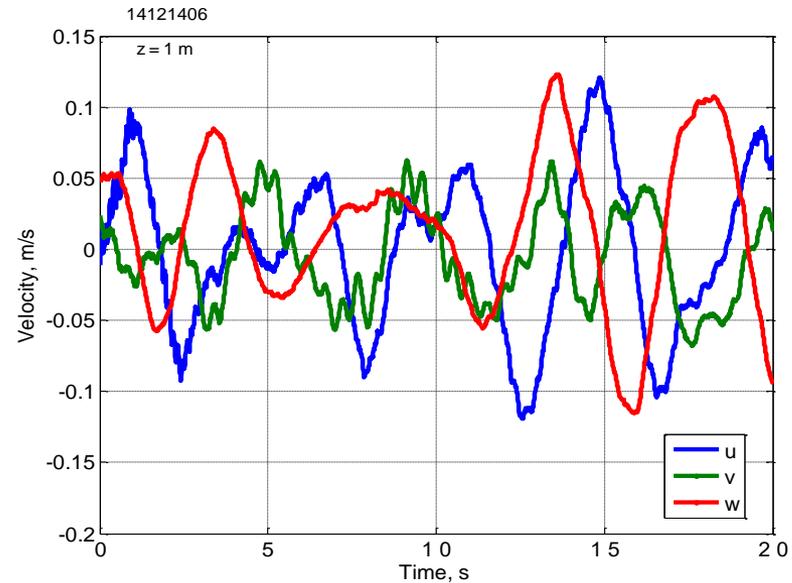
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №22-17-00150

1. Brown, R. A. (1990). Surface fluxes and remote sensing of air-sea interactions. Surface Waves and Fluxes, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 7-28.
2. Колмогоров А.Н. Доклады АН СССР, 1941. Т. 30. №4. С. 299 – 303.

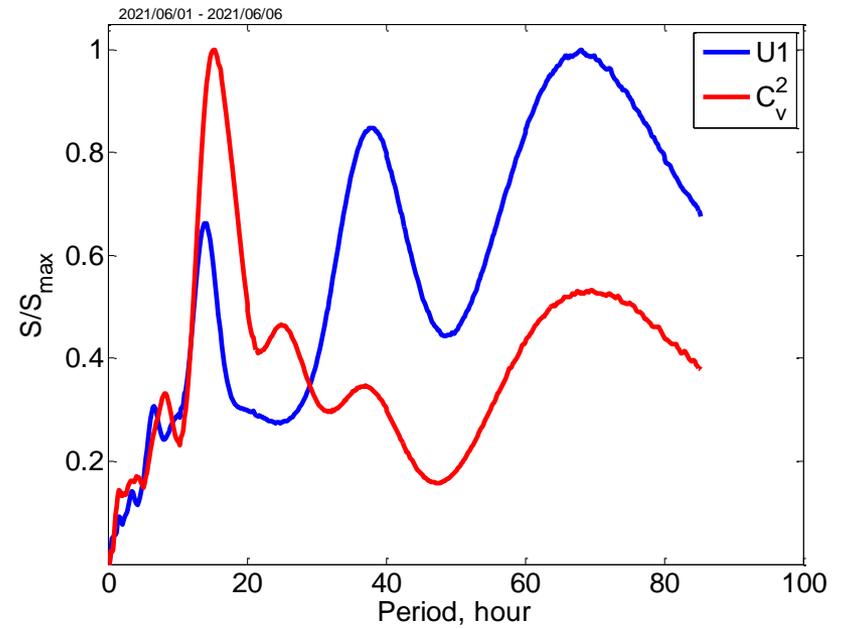
Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабной турбулентности в приповерхностном слое моря



Три компоненты пульсаций скорости и спектры на разных глубинах



Нормированные глобальные спектры модуля скорости течения и структурного параметра за период 1 – 6 июня 2021 г.



Авторы	Модельные формулы
Babanin, 2006	$\text{Re} = \frac{aV}{\nu} = \frac{a^2\omega}{\nu} \qquad \text{Re} = \frac{\omega}{\nu} a_0^2 \exp(-2kz)$
Qiao et al., 2004	$B_V = \langle l_z^w u_z'^w \rangle \quad B_V = \alpha A^3 k \omega \exp(-3kz) \quad K_m = K_{mc} + B_V$
Pleskachevsky et al., 2011	Symmetric Motion (SM) + Asymmetric Motion (AM) $v_t = v_{curr} + v_{wave} \qquad P_{wave} = v_t \left(M_{wave}^{AM} \right)^2$

Турбулентный перенос волновой кинетической энергии (Kitaigorodskii&Lumley, 1983):

$$P^w = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{(\mathbf{u}^w)^2 w'} \right)$$



Приток энергии к турбулентности от необрушивающихся волн

$$P^w(z) = -\frac{d}{dz} \left(\overline{w' E^w} \right) \quad \longrightarrow \quad P^w(z) \approx C_w u_* \left| \frac{dE^w}{dz} \right|$$

Энергия волнения E^w рассчитывается по модельному спектру (Donelan et al., 1985)