VI Всероссийская конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата»,
посвященная памяти академика А. М. Обухова · Москва, 18 ноября 2026 г.

Каскадная перемежаемость поля скорости диссипации по взаимной ковариации двух датчиков сдвига

Коржуев В. А., Чухарев А. М., Козлов И. Е.
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

Коротко о работе

Показатель μ уточненной гипотезы Колмогорова – Обухова измерен по взаимной ковариации двух датчиков сдвига одного зонда на разносах меньше масштаба Озмидова, в четырех районах.

0,14

μ в проливе Карские Ворота
95 %-й интервал [0,12; 0,16]

0,13–0,17

μ в четырех районах
два зонда, 2023 и 2025 гг.

$\approx 6\, L_0$

масштаб вертикальной связности
растет вместе с L_o

Отличие от атмосферного значения $\mu \approx 0{,}20$ этим материалом не выявляется: порог разрешения около 0,1. Точность измерения задает число Рейнольдса плавучести.

η — колмогоровский масштаб

L_o — масштаб Озмидова

μ — показатель перемежаемости

Актуальность

Уточненная гипотеза подобия

Колмогоров [1], Обухов [2], 1962 г.: логарифм скорости диссипации ε_r, осредненной по объему размера r, распределен нормально, и его дисперсия растет с уменьшением r

$$\sigma^2(\ln \varepsilon_r) = A + \mu \ln(L/r), \quad \eta \ll r \ll L$$

Для ковариации ln ε в двух точках на разносе s та же зависимость принимает вид

$$C(s) = \mu \ln(L/s), \quad \eta \ll s \ll L$$

- μ — показатель перемежаемости, L — внешний масштаб, A зависит от крупномасштабного движения
- в атмосферном пограничном слое $\mu \approx 0{,}20$ [5]

Почему в море это трудно

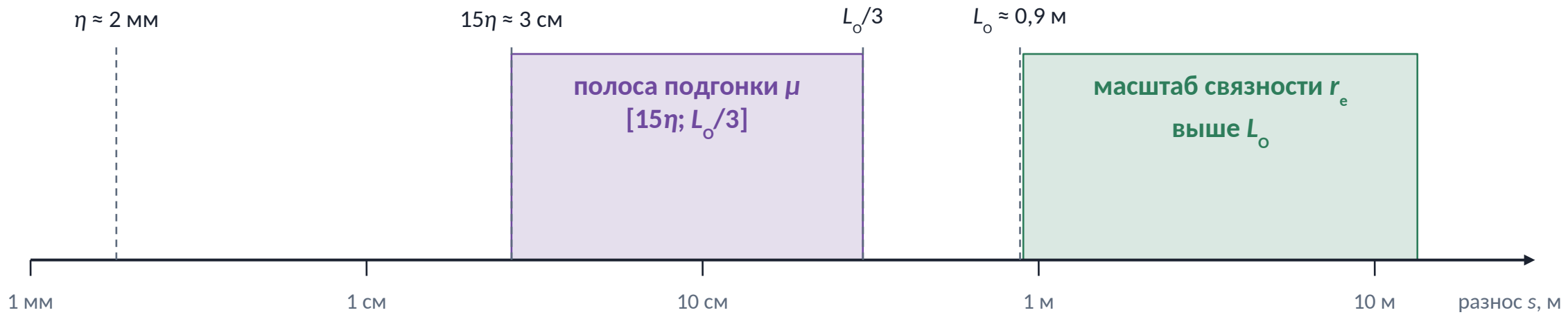
1. Инерционный интервал в стратифицированной толще ограничен сверху масштабом Озмидова $L_O = (\varepsilon/N^3)^{1/2}$, обычно дециметровым.

2. Спектральная оценка ε по датчику сдвига дает одно значение на окно 1–2 м, и каскадная часть изменчивости остается внутри окна.

3. Прямые оценки μ по полю ε в стратифицированной толще редки, и в оценку по одному датчику его погрешность входит наравне с полем.

Цель работы

Измерить показатель μ ниже масштаба Озмидова и масштаб вертикальной связности поля выше него по натурным измерениям в стратифицированной толще.



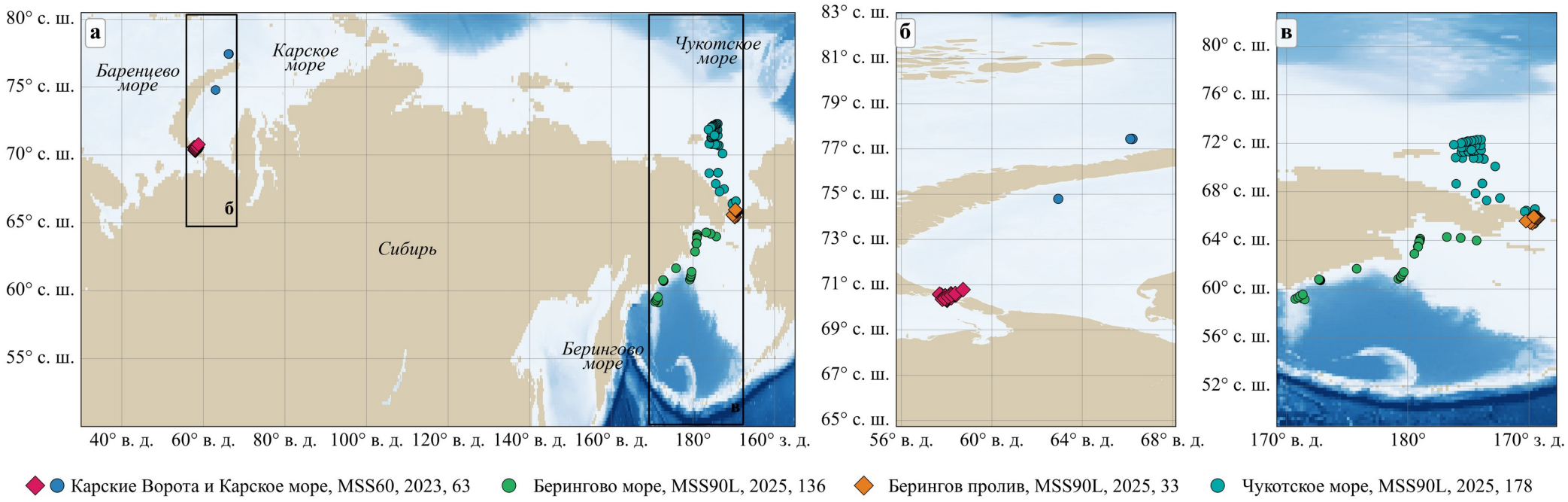
Типичные значения для пролива Карские Ворота, масштаб связности r_e = 2,6–13,4 м

окно спектральной оценки 1–2 м

Ниже L_o: наклон взаимной ковариации ln ε по ln s дает μ

Выше L_o: расстояние спада ковариации в e раз дает масштаб связности r_e

Материал: четыре района, два зонда



Карские Ворота, Карское море
MSS60, июль 2023 г.
63 зондирования (56 в проливе)

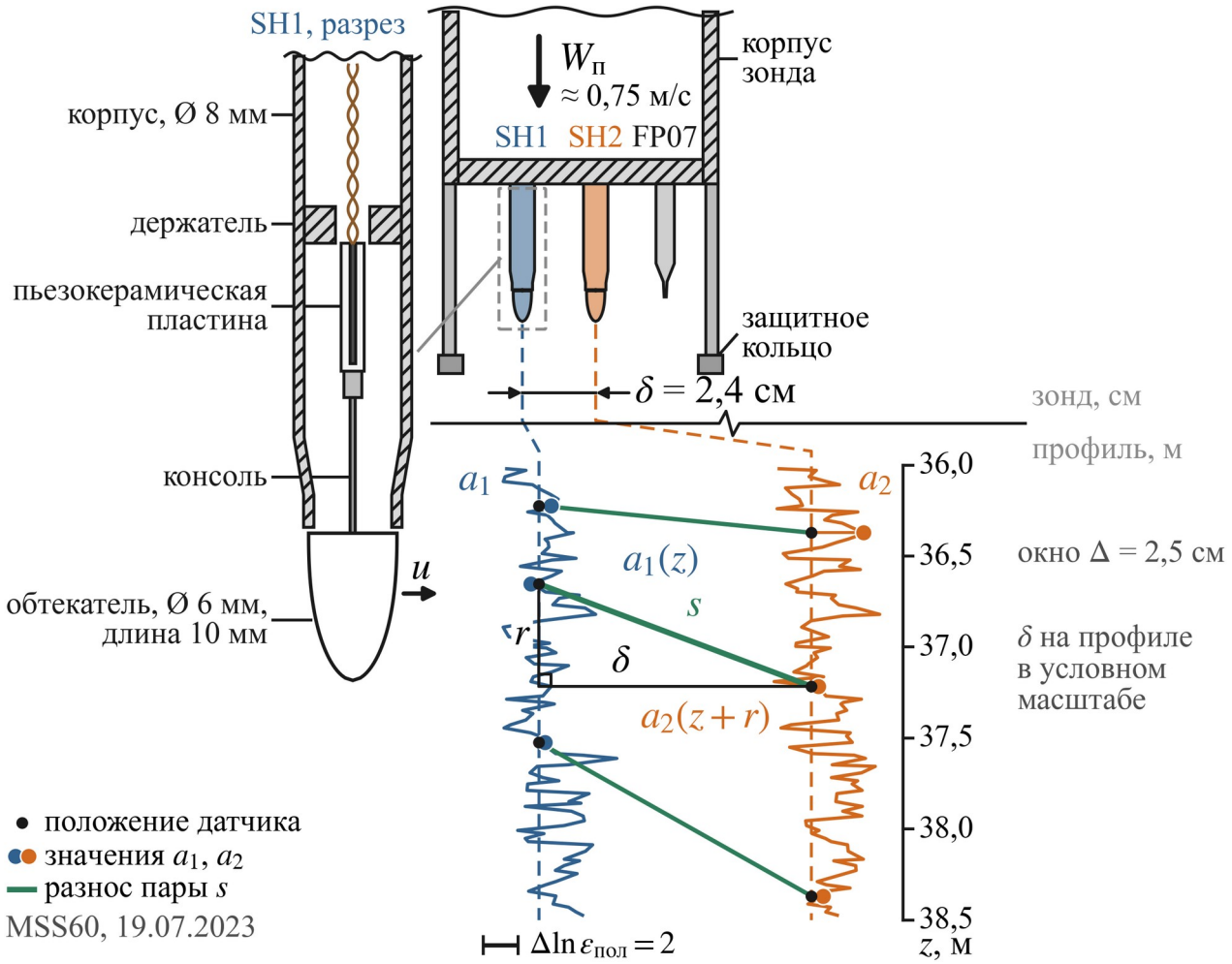
Берингово море
MSS90L, 2025 г.
136 зондирований

Берингов пролив
MSS90L, 2025 г.
33 зондирования

Чукотское море
MSS90L, 2025 г.
178 зондирований

Способ расчета для всех районов один и тот же, параметры не менялись.

Два датчика сдвига одного зонда

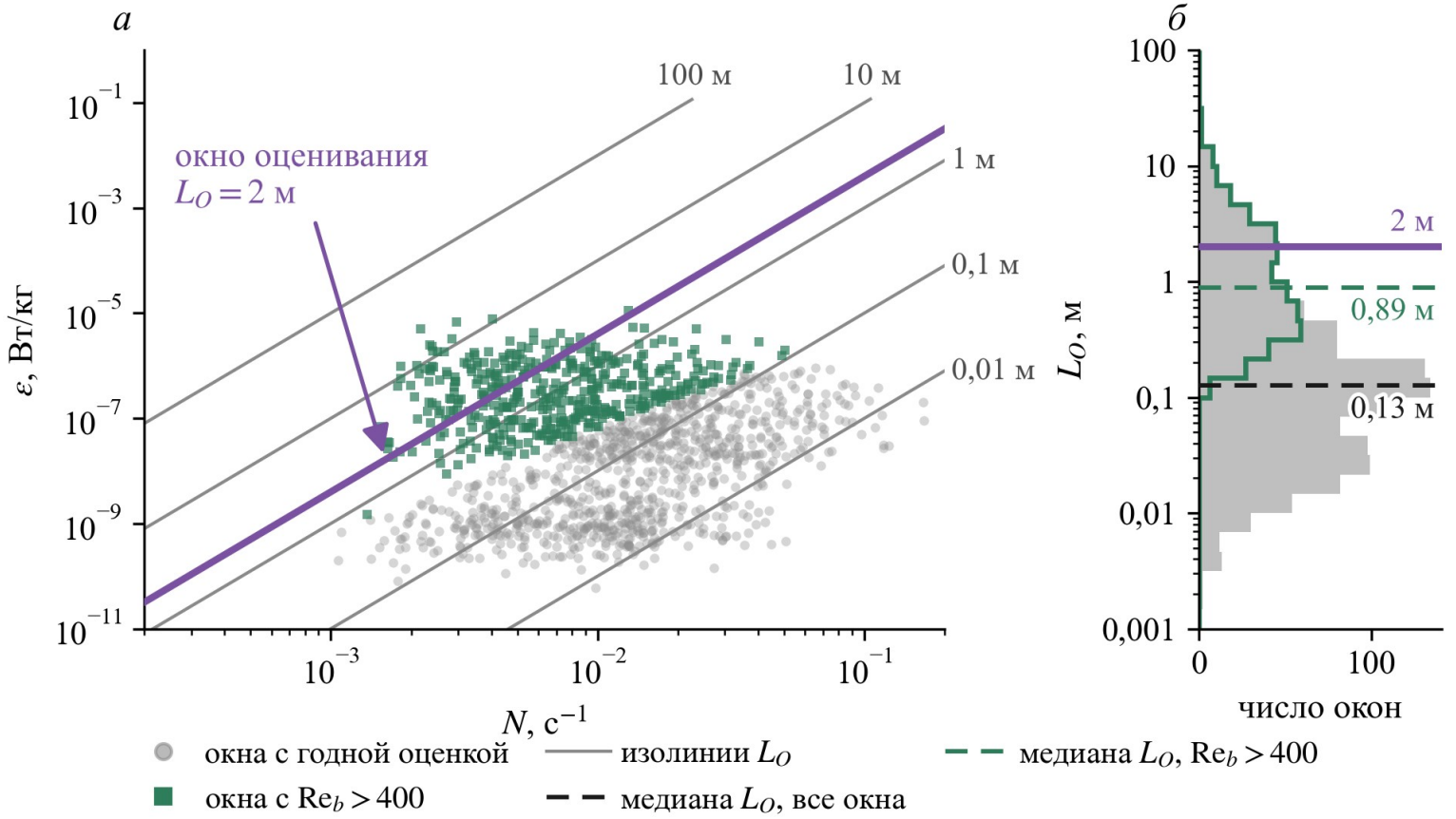


- Зонд свободного падения опускается со скоростью около 0,7 м/с
- Датчики SH1 и SH2 разнесены по горизонтали на δ = 2,4 см
- Погрешность двух каналов независима и во взаимную ковариацию не входит
- Пара точек на разных датчиках с разносом по глубине r разделена расстоянием $s = (r^2 + \delta^2)^{1/2}$

Шум одного датчика не попадает в оценку μ

Головная часть зонда MSS60 и разрез датчика сдвига. Справа аномалии a_1, a_2 полосовой оценки двух каналов и пары точек с разносом s, 19.07.2023.

Окно оценивания и масштаб Озмидова



0,13 м

медиана L_O по всем 1313 окнам

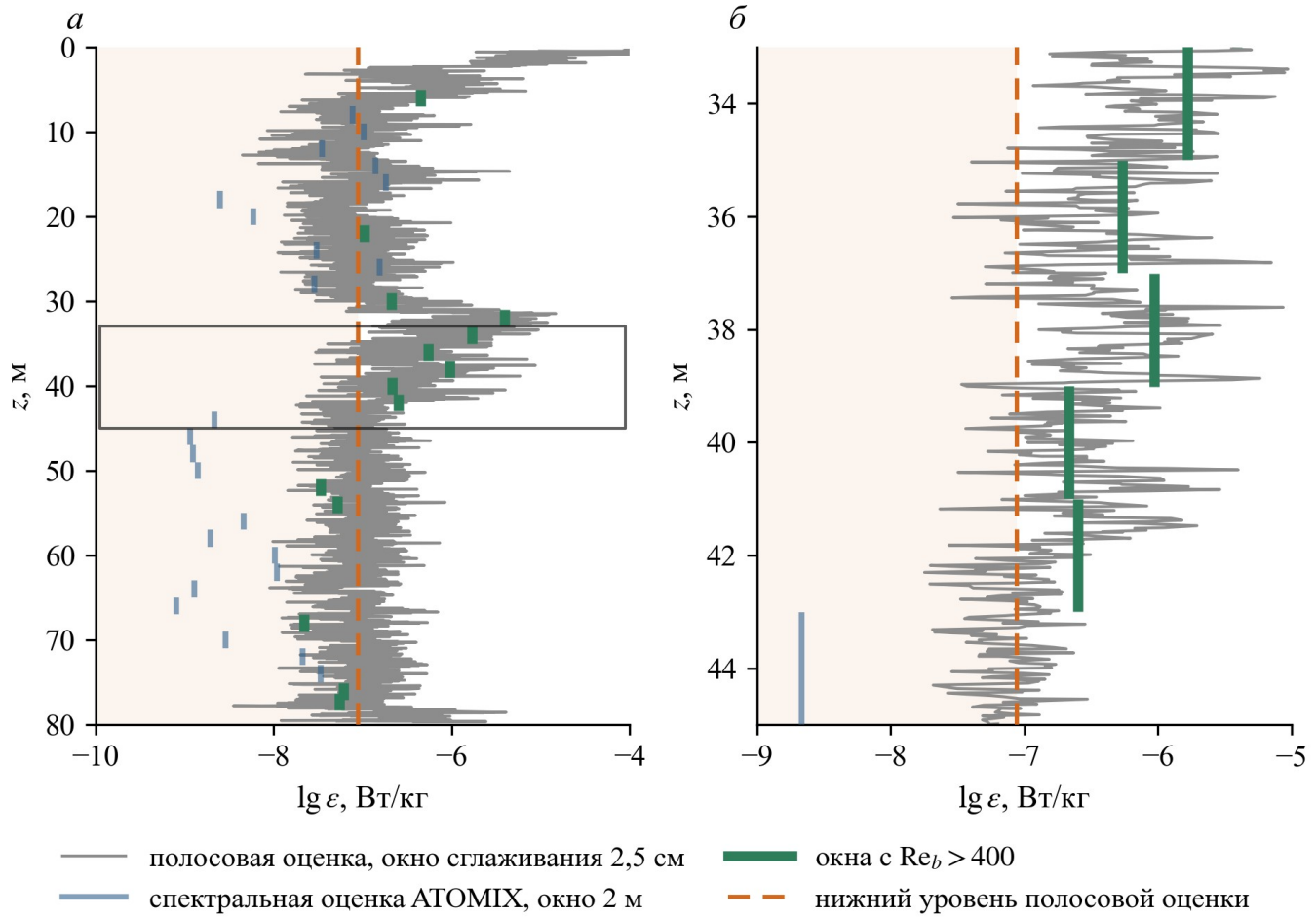
0,89 м

медиана L_O при $\mathrm{Re}_b > 400$

- Окно 2 м больше типичного L_O и каскад не разрешает
- Отсюда переход к оценке внутри окна с разрешением 2,5 см

Окна оценивания 2 м зонда MSS60 на плоскости N–ε: 1313 окон с годной оценкой, из них 438 с $\mathrm{Re}_b > 400$. Фиолетовая линия — $L_O = 2$ м. Справа распределение L_O.

Полосовая оценка диссипации



$$\varepsilon_{\text{пол}} = 7{,}5\,\nu\,\langle (\partial u/\partial z)^2{}_{\text{пол}} \rangle_{\Delta}$$

локальная дисперсия на окне Δ = 2,5 см

- Сдвиг фильтруется в полосу от 2 цикл/м до наименьшего из трех: минимум спектра, 1,5 волнового числа Колмогорова, 50 Гц
- Внутри окна 2 м оценка меняется на полтора–два порядка величины
- Оценка ниже спектральной (медианное отношение 0,60) и служит местным указателем уровня диссипации. Абсолютные значения ε по ней не берутся

Полосовая оценка на окне 2,5 см (серая) и спектральная оценка ATOMIX на окнах 2 м, пролив Карские Ворота, 19.07.2023: *а* — профиль, *б* — фрагмент 33–45 м.

Ход анализа

1. Отбор окон 1 м по $Re_b = \varepsilon/(\nu N^2) > 400$. Полоса подгонки $[15\eta; L_O/3]$ занимает ¾ lg Re_b − lg 45 порядков величины, при $Re_b > 400$ больше трети порядка. В Карских Воротах 679 окон

2. Полосовая оценка $\varepsilon_{пол}$ в каждом канале и аномалия ln $\varepsilon_{пол}$ по записи зондирования

3. Пары точек двух каналов с разносом s: произведения аномалий осредняются по всем зондированиям, получается $C_{12}(s)$

4. μ равен наклону C_{12} по ln s в полосе подгонки. Интервалы 95 % по повторным выборкам зондирований

5. Проверка: при сдвиге каналов по глубине на 10 м и больше наклон пропадает. Расчет повторен в трех районах MSS90L

$$a_j = \ln \varepsilon_{пол,\,j} - \langle \ln \varepsilon_{пол} \rangle$$

аномалия канала j, ⟨ ⟩ — среднее по записи зондирования

$$s = (r^2 + \delta^2)^{1/2}, \quad \delta = 2{,}4 \text{ см}$$

r — разнос по глубине, δ — расстояние между датчиками

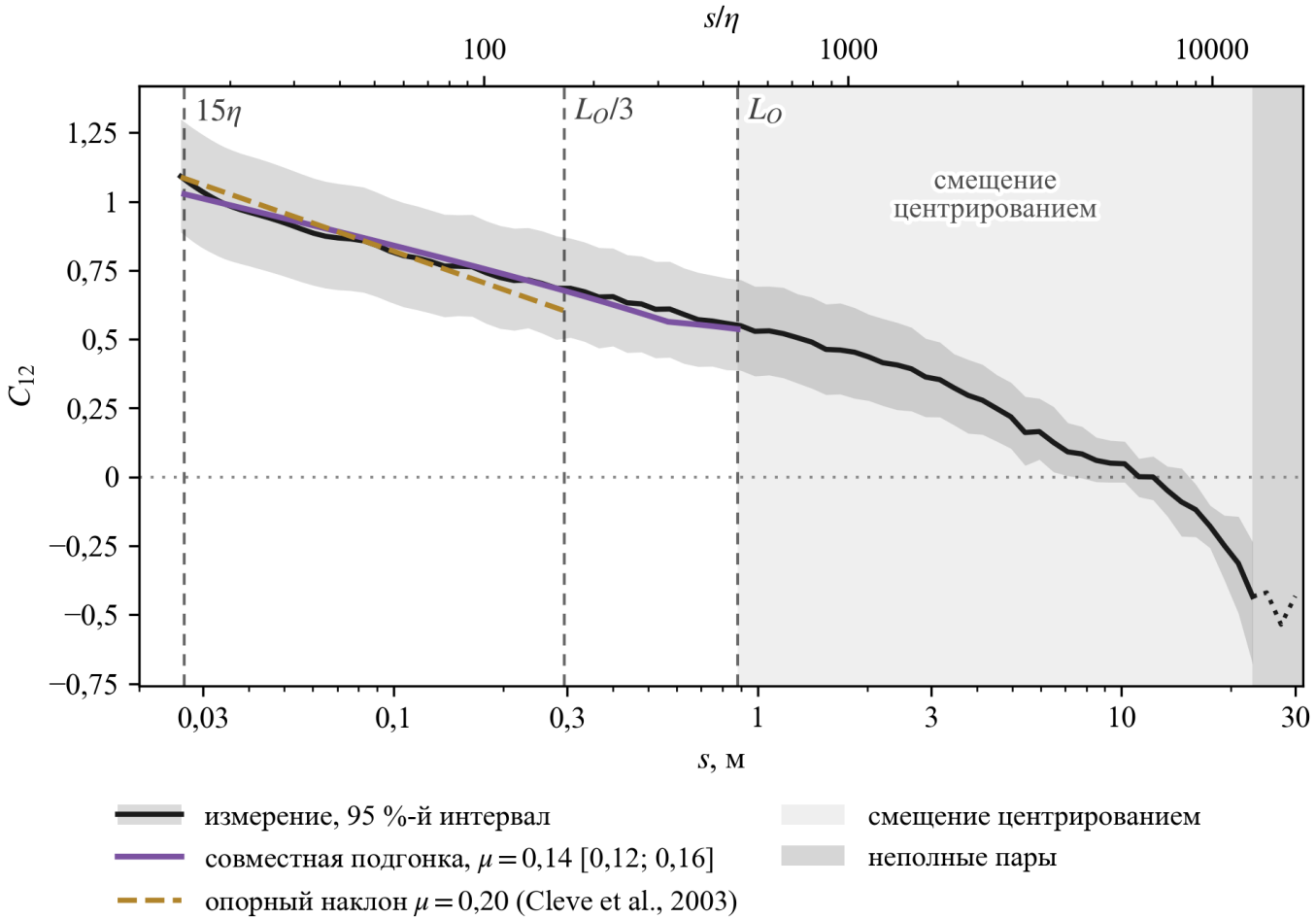
$$C_{12}(s) = \langle ½[a_1(z)\, a_2(z+r) + a_2(z)\, a_1(z+r)] \rangle$$

среднее по парам точек всех зондирований, независимая погрешность каналов в C_{12} не входит

$$\mu = -\mathrm{d}C_{12} \,/\, \mathrm{d}\ln s$$

в полосе $15\eta \le s \le L_O/3$

Результат: пролив Карские Ворота



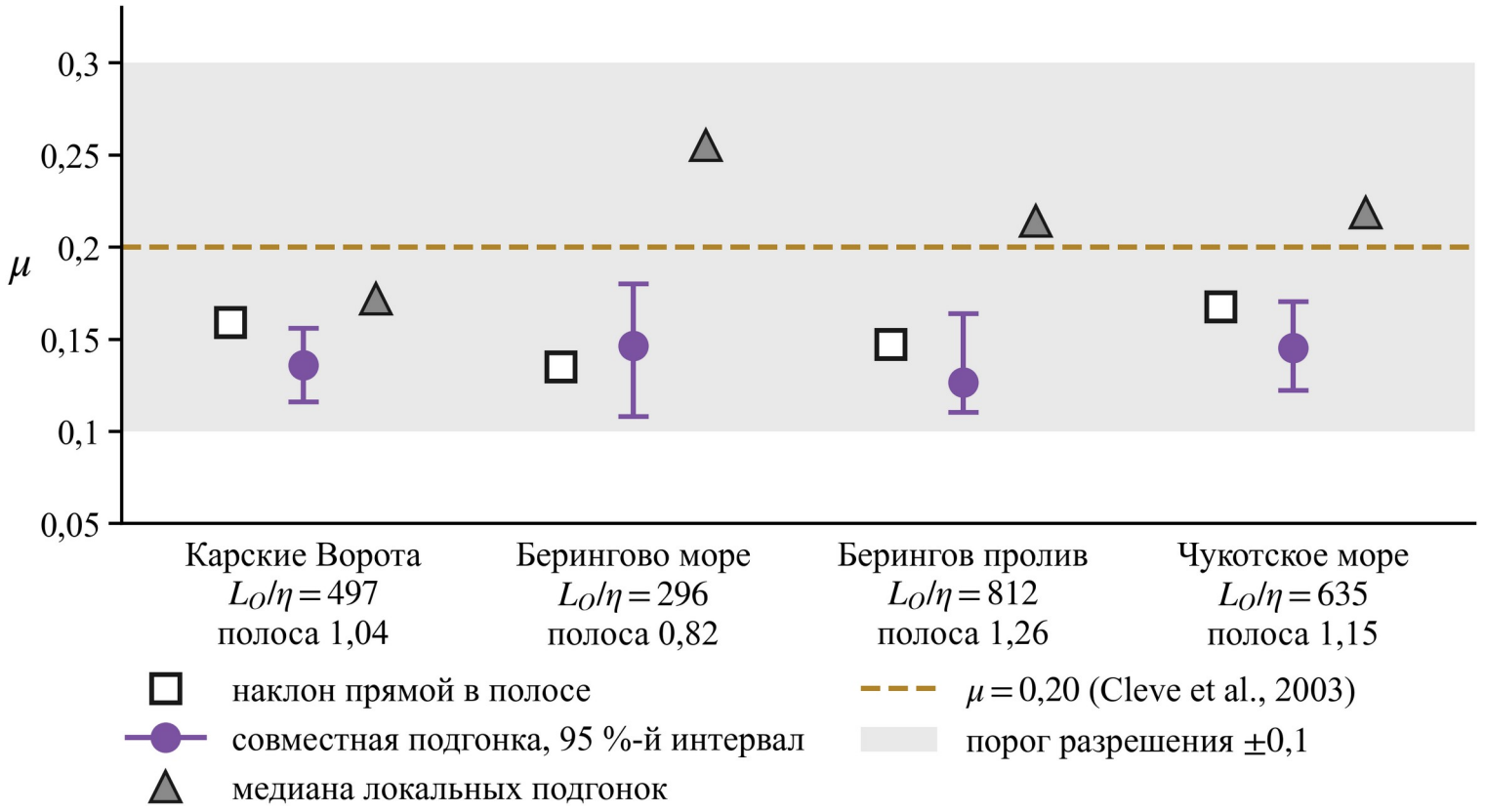
Взаимная ковариация $C_{12}(s)$, 63 зондирования, 679 окон 1 м с $Re_b > 400$, заливка — 95 %-й интервал. Штрих — опорный наклон 0,20 [5].

$\mu = 0{,}14$

95 %-й интервал [0,12; 0,16]

- Ниже L_O ковариация убывает линейно по ln s, как требует гипотеза
- Три способа сводки дают 0,14, 0,16 и 0,17
- При разрыве связи каналов наклон 0,001
- Выше L_O кривая смещена центрированием по записи и для μ не используется

Результат: четыре района



Показатель μ в четырех районах. Под названием района L_o/η и ширина полосы подгонки в порядках величины, серая полоса — порог разрешения ±0,1 около 0,20.

0,13–0,17

μ во всех районах и всеми способами сводки

- L_o/η от 296 до 812, полоса подгонки 0,82–1,26 порядка величины
- Инерционный интервал во всех спектрах появляется при $L_o/\eta \geq 3000$ [3]
- Собственный сдвиг способа 0,03, порог разрешения около 0,1
- Отличие от 0,20 этим материалом не выявляется

Масштаб вертикальной связности

Выше масштаба Озмидова ковариация ln ε по вертикали спадает медленнее и описывает протяженность турбулентного события. Масштаб связности r_e — расстояние спада ковариации в e раз.

группа 1, L_O = 0,48 м

r_e = 2,6 м

группа 2, L_O = 0,87 м

r_e = 5,9 м

группа 3, L_O = 2,02 м

r_e = 13,4 м

$$r_e \propto L_O^{\,p}$$

p = 1,12 [0,44; 1,66]

r_e/L_O от 5,5 до 6,8

- 53 зондирования разбиты на три группы по L_O, для каждой группы указана медиана
- Синтетические поля на геометрии тех же записей отвергают постоянный масштаб в метрах
- Длина записей позволяет указать только нижнюю границу масштаба, 3,2–8,6 м

Выводы

1. Ниже масштаба Озмидова ковариация ln ε в четырех районах убывает линейно по ln s, как требует уточненная гипотеза подобия. μ = 0,13–0,17, в проливе Карские Ворота 0,14 [0,12; 0,16].

2. Полоса подгонки занимает около порядка величины (L_O/η = 296–812), порог разрешения μ около 0,1. Отличие от опорного значения 0,20 этим материалом не выявляется.

3. Масштаб вертикальной связности растет вместе с L_O. Его нижняя граница составляет от нескольких до десяти масштабов Озмидова.

4. При окне 1 м каскад дает не больше 4 % дисперсии ln ε. Изменчивость оценки определяется пятнистостью генерации турбулентности.

Литература и благодарности

1. Kolmogorov A. N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence // J. Fluid Mech. 1962. V. 13. P. 82–85.

2. Obukhov A. M. Some specific features of atmospheric turbulence // J. Fluid Mech. 1962. V. 13. P. 77–81.

3. Gargett A. E., Osborn T. R., Nasmyth P. W. Local isotropy and the decay of turbulence in a stratified fluid // J. Fluid Mech. 1984. V. 144. P. 231–280.

4. Lueck R. G., Fer I., Bluteau C. E. et al. Best practices recommendations for estimating dissipation rates from shear probes // Front. Mar. Sci. 2024. V. 11. 1334327.

5. Cleve J., Greiner M., Sreenivasan K. R. On the effects of surrogacy of energy dissipation in determining the intermittency exponent in fully developed turbulence // Europhys. Lett. 2003. V. 61. P. 756–761.

Работа выполнена в рамках государственного задания FNNN-2024-0001 и при поддержке гранта РНФ № 25-17-00309.