

**ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЭВОЛЮЦИИ И
АНИЗОТРОПИИ
МЕЛКОМАСШТАБНЫХ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МОРЕ**

В.И. Бабий, М.В. Бабий

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
99011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

На основе результатов инструментальных исследований пространственно-временной структуры мелкомасштабной турбулентности методом полного корреляционного анализа получены оценки важнейших статистических характеристик случайного температурного поля в придонном слое Черного моря.

Необходимость экспериментального исследования таких фундаментальных свойств случайных гидрофизических полей, как «незамороженность» (эволюция) и анизотропия, обусловлена их теоретической и практической значимостью, в частности для приложений в области гидроакустики [1]. В работе [2] опубликованы результаты инструментальных исследований пространственно-временной структуры мелкомасштабной турбулентности в Черном море. Такого рода многоточечные синхронные измерения мелкомасштабных температурных флуктуаций в натуральных условиях с неподвижного основания сами по себе уни-

кальны и очень трудоемки. Их актуальность и ценность сохраняются и в настоящее время. Анализ результатов этих измерений можно проводить с разных точек зрения и по разным методикам. В настоящей работе в рамках модели полного корреляционного анализа [1] дана другая, чем в [2], интерпретация этих результатов и сделаны другие выводы.

Два натуральных эксперимента, изложенных в [2], заключались в синхронных измерениях пульсаций температуры в четырех точках морской среды, разнесенных в одном случае вдоль, а в другом случае поперек потока. Измерения проводились с неподвижного основания на высоте 1,5 м над дном при общей глубине места ~20 м. В рассматриваемой придонной области среднее распределение температуры принималось однородным. Средняя скорость течения на горизонте расположения датчиков измерялась вертушками и составляла $\bar{u} \approx 5 \text{ см/с}$. Использовались термисторные датчики пульсаций температуры с пороговой чувствительностью ~0,002 К. Частотный диапазон измерения пульсаций температуры составлял от 0,01 до 1 Гц, что соответствовало пространственным масштабам $\ell = \bar{u} / f$ от 5 до 500 см или волновым числам $\nu = 2\pi/\ell$ от 0,0125 до 1,25 см^{-1} , где f – частота. По результатам этих измерений были рассчитаны нормированные пространственно-временные корреляционные функции, изображенные на рис. 1.

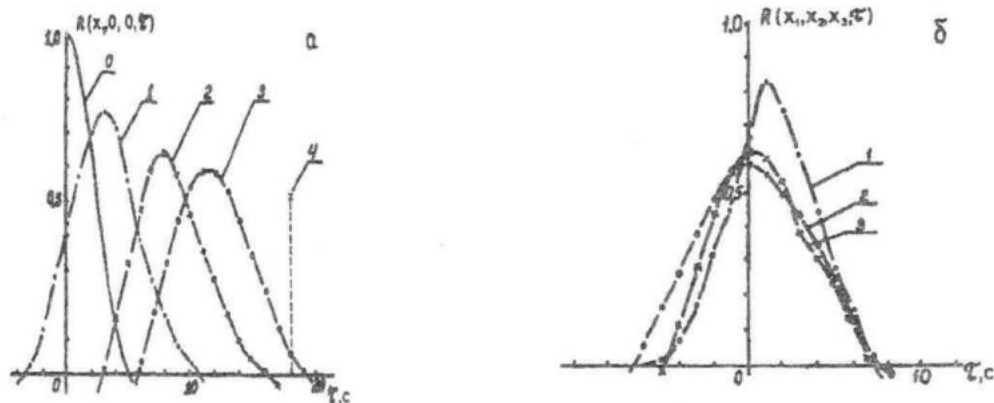


Рис. 1 – Пространственно-временные корреляционные функции пульсаций температуры.
а – для расстояний вдоль потока: 0 – $x_1=0$; 1 – $x_1=20$ см; 2 – $x_1=40$ см; 3 – $x_1=60$ см; 4 – $x_1=90$ см.
б – для расстояний $x_1=x_2=x_3=10$ см: 1 – вдоль потока; 2 – поперек потока в горизонтальной плоскости; 3 – по вертикали.

В первом эксперименте датчики температуры располагались вдоль потока, образуя линейную эквидистантную решетку с шагом 20 см. Полученные в этом эксперименте результаты представлены на рис.1а.

По ним согласно методике, изложенной в [1], ниже определены важнейшие характеристики температурных неоднородностей морской среды, включая и оценки скорости эволюции, которые приведены в табл.1.

Таблица 1 – Характеристики температурных неоднородностей морской среды

№ п/п	x_1 см	R_{max}	τ_L с	τ_E с	τ_L/τ_E	l_1 см	v_1 см ⁻¹	$\langle u \rangle$ см/с	$ v $ см/с	K_T см ² /с	ϵ_T мК ² /с
1	20	0,75	3,14	1,57	2,0	7,9	0,8	6,4	2,5	6,7	320
2	40	0,65	7,7	2,14	3,6	10,5	0,6	5,2	1,4	5,3	130
3	60	0,60	11,4	2,28	5,0	11,4	0,55	5,2	1,0	3,8	90
4	90	0,50	18	2,5	7,2	12,5	0,5	5,0	0,7	2,8	55

Здесь x_1 – пространственный разнос температурных датчиков вдоль потока относительно опорного датчика; R_{max} – максимальное значение двухточечных нормированных пространственно-временных взаимно-корреляционных функций флуктуаций температуры; τ_L и τ_E – лагранжевы и эйлеровы временные масштабы, соответствующие указанным уровням корреляции R_{max} ; τ_L/τ_E – отношение лагранжевых и эйлеровых временных масштабов; l_1 – эйлеров пространственный продольный масштаб неоднородностей для уровней корреляции R_{max} , определенный согласно гипотезе Тейлора (гипотеза «замороженного» поля); $v_1 = 2\pi/l_1$ – продольное волновое число температурных неоднородностей; $\langle u \rangle = x_1/\tau_L$ – средняя скорость переноса температурных неоднородностей вдоль потока, определенная корреляционно-экстремальным методом; $|v| = l_1/\tau_L$ – скорость временной эволюции температурных неоднородностей, характеризующая незамороженность случайного поля; $K_T = a |v| l_1$ – коэффициент турбулентной диффузии (температуропроводности), где для трехмерной диффузии в однородной изотропной среде $a=1/3$, l_1 – эквивалент эффективного пути перемешивания; $\epsilon_T = \sigma_T^2/\tau_L$ – скорость выравнивания температурных неоднородностей, σ_T^2 – дисперсия флуктуаций температуры в заданной полосе частот (в табл.1 значения ϵ_T даны для $\sigma_T^2 = 10^{-3}K^2$ [1]). Заметим, что все приведенные характеристики условны.

Скорость эволюции $|v|$ случайного поля есть отношение пространственных и вре-

менных масштабов неоднородностей по уровням равной корреляции. Она характеризует количественно истинную временную изменчивость («незамороженность») эволюционирующего случайного поля в сопровождающей системе координат. Ее можно рассматривать как некий аналог дисперсионного соотношения $|v| = d\omega/dv$, где $\omega = 2\pi/\tau$ – круговая частота, $v = 2\pi/l$ – волновое число. Для квадратичной формы $|v| = l_1/\tau_L$, где τ_L – среднее время жизни неоднородностей масштаба l_1 . Приведенные в табл.1 значения $|v|$ – это оценки сверху, поскольку всевозможные погрешности измерений приведут только к снижению уровня взаимной корреляции, а, следовательно, лишь к увеличению оценки $|v|$.

Величина $|v|$ существенно влияет на интерпретацию результатов измерений. При $\langle u \rangle^2 \gg |v|^2$ для наблюдателя поле кажется замороженным и в каждой точке регистрируются преимущественно его пространственные характеристики. Если же, напротив, $\langle u \rangle^2 \leq |v|^2$, что возможно в области внутреннего масштаба турбулентности, то в точке наблюдения будет регистрироваться временная изменчивость случайного поля.

Зависимость $|v|$ от масштаба неоднородностей свидетельствует о том, что мелко-масштабные неоднородности, как было показано в [1], разрушаются быстрее, чем крупномасштабные, т.е. при временной эволюции случайного поля мелко-масштабные неоднородности быстрее теряют свою «индивидуальность». Это приводит к тому, что при измерении скорости потока $\langle u \rangle$ корреляционно-экстремальным методом

возникает специфическая систематическая погрешность, обусловленная временной эволюцией поля (см. 9-ый столбец табл.1). Учет этой погрешности возможен на основе обобщенной (модифицированной) формулы Тейлора [1], расширяющей область ее применения и к «незамороженным» случайным полям. Рассчитанные с учетом $|v|$ пространственные характеристики мелкомасштабных температурных неоднородностей приведены в табл.2.

Таблица 2 – Эйлеровы и лагранжевы масштабы температурных неоднородностей

№ п/п	l_2 см	l_1 см	l_2/l_1	x_1/l_2	τ_l/τ_3
1	11	7,9	1,4	1,8	2,0
2	11,5	10,5	1,1	3,5	3,6
3	12	11,4	1,05	5,0	5,0
4	12,5	12,5	1,0	7,2	7,2

Сравнение отношений пространственных (x_1/l_2) и временных (τ_l/τ_3) лагранжевых и эйлеровых масштабов показывает их равенство, что является экспериментальным подтверждением правильности обобщенной формулы Тейлора и корректности перехода от временных масштабов к пространственным согласно выражению из [1]

$$l_2 = \sqrt{\langle u, u \rangle^2 + |v|^2} \cdot \tau_l$$

Анизотропия относится к фундаментальным свойствам случайных гидрофизических полей. Она проявляется в зависимости его статистических характеристик от направления. Эта зависимость, в частности, может описываться набором сложных поверхностей, являющихся геометрическим местом точек конца радиус-вектора различных моментов распределения плотности вероятности при фиксированных значениях модулей аргументов. В предположении локальной однородности среды поверхности, описывающие анизотропию, обладают свойством центральной симметрии. Упрощенной и наглядной формой описания анизотропии является аппроксимация изоповерхностей статистических характеристик трехосными эллипсоидами, как это изображено на рис.2. Сечения этих поверхностей

второго порядка горизонтальной и вертикальной плоскостями, проходящими через центр симметрии, есть эллипсы, параметры которых (эксцентриситет, коэффициент сжатия, отношение полуосей) характеризуют анизотропию количественно.

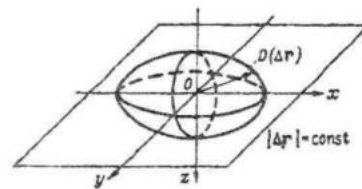


Рис.2 – Трехосный эллипсоид анизотропии пространственных статистических характеристик при фиксированном значении модуля аргумента

Во втором эксперименте в [2] датчики температуры располагались равноудаленно от опорного датчика по вертикали и горизонтали вдоль и поперек потока на расстояниях 10 см. Анизотропию неоднородностей оценим из пространственно-временной корреляционной функции $R(x_1, x_2, x_3, \tau=0)$. В отличие от [2], где утверждается, что неоднородности анизотропны (вытянуты вдоль потока), графики рис.16 показывают, что при $x_1=x_2=x_3=10$ см и $\tau=0$ $R \approx 0,6$ (в пределах погрешности эксперимента) температурные неоднородности изотропны, т.е. эллипсоид вырождается в сферу, и описание поля возможно в рамках модели локально однородной изотропной турбулентности. Эта оценка подтверждает сделанный ранее в [1] вывод об изотропии мелкомасштабных неоднородностей в слабо стратифицированной морской среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.
2. Пивоваров А.А., Шелковников Н.К. Инструментальное исследование структуры мелкомасштабной турбулентности в море // Информационный бюллетень №5 «Турбулентность и диффузия примесей в море» / – М., 1977. – С. 32 – 35.