

А.Е.Погребной

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА
ПОВЕРХНОСТНЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ЧЕРНОМ МОРЕ**

Анализируются пространственные распределения характеристик поля поверхностных и глубоководных течений в Черном море. Для этого использованы кинематические характеристики дрейфа дрейфтеров и автономных всплывающих буев-профилемеров по данным Глобального центра данных Международной программы «ARGO». Получены зависимости от глубины модуля скорости течений, меридионального K_v и зонального K_u коэффициентов турбулентного обмена и показателя анизотропии обмена K_u/K_v . Показано, что с ростом глубины от поверхности до 1500 м наблюдается уменьшение кинетической энергии поля течений, которое сопровождается уменьшением меридионального ($1,1 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с} > K_v > 0,04 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}$) и зонального ($1,9 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с} > K_u > 0,12 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{с}$) коэффициентов обмена, при этом анизотропия обмена ($K_u > K_v$) сохраняется.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, турбулентный обмен, дрейфтеры, автономные буй-профилемеры*

Введение. Горизонтальный турбулентный обмен играет существенную роль в формировании термохалинной структуры Черного моря. Распределение значений коэффициентов горизонтального обмена по пространству и по времени может быть неоднородным.

Для оценки интенсивности горизонтального обмена в поверхностном слое Черного моря можно использовать данные широкомасштабного международного дрейфтерного эксперимента. Дрейфтер представляет собой поверхностный поплавок и связанный с ним подводный парус. Парус находится на глубине 15 м, его гидродинамическое сопротивление в 40 раз превышает сопротивление поплавка. Таким образом, влияние поверхностного волнения и ветровых дрейфовых течений на горизонтальное перемещение дрейфтера не является существенным.

Структуру течений и эффективность обменных процессов в глубинных слоях Черного моря можно анализировать, используя данные автономных всплывающих буев-профилемеров. Каждый цикл измерений индивидуального буя состоит из нескольких фаз и длится около недели. Самой продолжительной (5 – 6 суток) является фаза глубоководного дрейфа на заданной глубине. Предполагается, что именно эта фаза определяет горизонтальные перемещения буя.

Известные способы расчета коэффициентов горизонтального турбулентного обмена. Наиболее известным методом расчета коэффициента обмена по статистическим характеристикам лагранжевой частицы является теория Тэйлора [1], согласно которой коэффициент обмена выражается формулой:

$$K = \langle u'^2 \rangle \cdot T_u, \quad T_u = \int_0^{\infty} R_u(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\langle u'^2 \rangle$ – дисперсия (средний квадрат) пульсаций лагранжевой скорости частицы, τ – сдвиг автокорреляционной функции, T_u и $R_u(\tau)$ – соответственно лагранжев интегральный масштаб времени и нормированная автокорреляционная функция, определяемая по формуле:

$$R_u(\tau) = \frac{\langle u'(t) \cdot u'(t + \tau) \rangle}{\langle u'^2 \rangle}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) выписаны для компонента скорости $u(t)$; для компонента $v(t)$ они аналогичны.

Для оценки интенсивности горизонтального обмена в Черном море можно использовать данные широкомасштабного международного дрейфтерного эксперимента в Черном море, начатого в 1999 г. Дрейфтер является пассивным поплавком и может рассматриваться как лагранжевая частица водной массы (на глубине залегания плавучего паруса 15 м).

Для расчета коэффициентов обмена в [2] предполагалась квазистационарность процессов, обуславливающих перемещения дрейфтеров на временных масштабах, сравнимых с T_u . В этом случае в качестве оценки $T_u(t)$ можно использовать статистически осредненное значение интеграла автокорреляционной функции взятого при различных моментах начала отсчета времени:

$$T_u(t) = \left\langle \int_0^t R_u(\tau) d\tau \right\rangle, \quad (3)$$

а лагранжев масштаб времени рассматривать как асимптотический предел

$$T_u^* = \lim_{t \rightarrow \infty} T_u(t). \quad (4)$$

Анализ по всем дрейфтерам [2] показал, что полученные таким образом оценки лагранжевого масштаба времени действительно быстро стремятся к своему асимптотическому значению с увеличением верхнего предела интегрирования, достигая его уже при длинах временных интервалов $\sim (5 - 6) \cdot T_u^*$.

Оценки [2] значений коэффициентов горизонтального обмена $K_u = 0,19 \cdot 10^4$ м²/с и $K_v = 0,11 \cdot 10^4$ м²/с отличаются от оценок [3]. Поэтому для проверки числовых значений целесообразно произвести оценки указанных коэффициентов обмена по какой-либо альтернативной методике.

В качестве такой методики можно использовать подход Эйнштейна, согласно которому коэффициент горизонтального обмена определяется выражением:

$$K_u = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle, \quad (5)$$

где $\frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle$ – производная по времени от среднего квадрата смещения лагранжевой частицы вдоль направления, по которому рассчитывается коэффициент обмена K_u . Оказалось, что значения коэффициентов горизонталь-

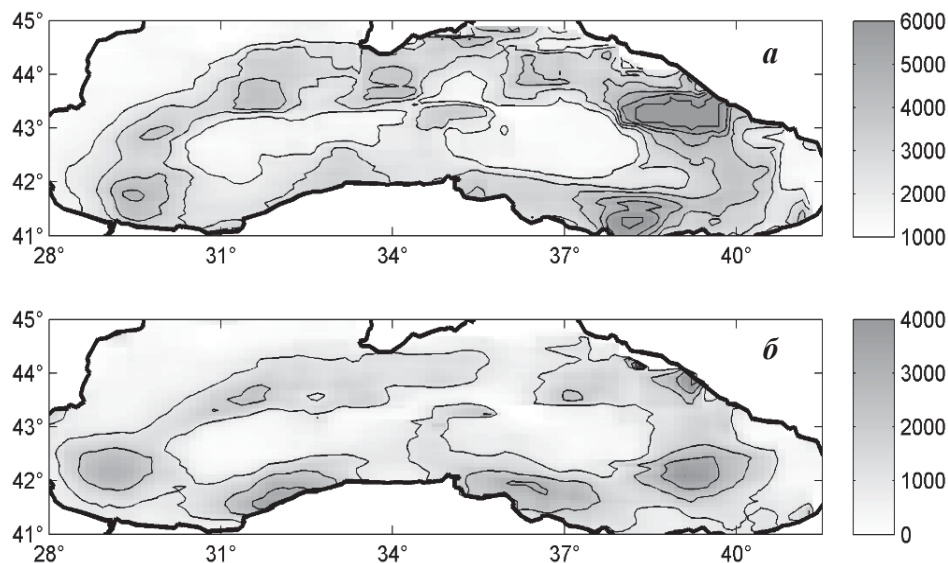
ного обмена, выполненные по соотношению (5), совпадают с оценками, полученными по методике Тэйлора (1).

Характеристики горизонтального турбулентного обмена в поверхностном слое Черного моря. Пространственные структуры распределений зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена представлены на рис.1. В расчете участвовали только те пространственные участки, где плотность данных в прямоугольнике $1^\circ \times 40'$ по широте и долготе соответственно была не ниже 50 суток, что при расчете коэффициентов горизонтального обмена по пятисуточным интервалам дает статистическую обеспеченность получаемых оценок не хуже 10.

У зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена отмечаются пониженные значения оценок в центральных частях восточного и западного циклонических круговоротов, а также в области северо-западного шельфа моря. Локализация областей с повышенными значениями коэффициентов обмена в целом соответствует локализации зон с повышенными значениями кинетической энергии среднего течения и кинетической энергии поля пульсаций скорости. Связано это с тем, что горизонтальный обмен формируется, главным образом, полем горизонтальных течений Черного моря.

Основываясь на анализе данных дрейферного эксперимента, для дрейфовых течений в Черном море были сформулированы следующие выводы:

– вероятность безразмерной продолжительности пребывания дрейфера в вихревых движениях различных частотных диапазонов (для частот меньших инерционной) практически не зависит от частоты, что может свидетельствовать о том, что механизмы возникновения и каскадной трансформации вихревых движений в Черном море близки к автомодельным [4];



Р и с . 1 . Пространственные распределения значений коэффициентов горизонтального обмена в $\text{м}^2/\text{с}$ для зонального K_u (а) и меридионального K_v (б) направлений. Дискретность изолиний $1000 \text{ м}^2/\text{с}$.

- наиболее вероятный масштаб вихревых движений дрейфтеров в Черном море соответствует радиусу деформации Россби (~ 25 км) [4];
- наиболее вероятный пространственный масштаб круговых движений с квазиинерционными периодами (диапазон периодов от 15 до 19 ч) в Черном море составляет ~ 600 – 900 м [4];
- корреляционные свойства поля скорости статистически не зависят от энергетики процесса (среднее от произведения квадрата флуктуаций скорости на лагранжев масштаб времени равно произведению их средних значений) [2];
- значения зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена в Черном море отличаются и составляют $0,19 \cdot 10^4$ м²/с и $0,11 \cdot 10^4$ м²/с соответственно [2];
- процессам горизонтального перемешивания в Черном море присуща географическая анизотропия;
- весной и осенью в Черном море происходит активизация обменных процессов – в марте и ноябре текущие значения коэффициентов обмена более, чем в 2 раза превосходят свой средний уровень;
- текущие среднегодовые значения коэффициентов обмена в 2002 и 2003 гг. в 2 раза превышают соответствующие значения в 2004 г., анизотропия горизонтального обмена в 2002 и 2003 гг. тоже оказалась выше, чем в 2004 г.;
- у зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена отмечаются пониженные значения оценок в центральных частях восточного и западного циклонических круговоротов, а также в области северо-западного шельфа моря. Локализация областей с повышенными значениями коэффициентов обмена в целом соответствует локализации зон с повышенными значениями кинетической энергии среднего течения и кинетической энергии поля пульсаций скорости.

Изменчивость характеристик горизонтального турбулентного обмена с глубиной. Открытым остается вопрос о структуре течений и характеристиках обменных процессов в глубинных слоях моря. Для экспериментального исследования указанных проблем можно воспользоваться данными автономных всплывающих буев-профилемеров, разработанных и функционирующих в Черном море в рамках международной программы «ARGO». Каждый цикл измерений для индивидуального буя состоит из нескольких фаз и длится около недели. Самой продолжительной (5 – 6 суток) является фаза глубоководного дрейфа на заданной глубине. Фаза всплытия сопровождается измерениями профилей температуры, солености и давления. В процессе поверхностного дрейфа (1 – 1,5 суток) производится определение координат буя и передача информации на спутник. Завершается измерительный цикл фазой заныривания буя на требуемую глубину.

В настоящей работе для анализа использовались только кинематические характеристики дрейфа. Считалось, что с момента начала фазы заныривания и до момента всплытия буя основное смещение определяется глубоководным дрейфом. В процессе поверхностного дрейфа производится неоднократное определение координат, при этом доверительные интервалы этих измерений могут быть различными (зависит от количества спутников,

задействованных для рекогносцировки). Поэтому с целью повышения точности и достоверности определения граничных точек дрейфа в каждом измерительном цикле использовался регрессионный анализ с весовыми коэффициентами, соответствующими дисперсиям индивидуальных обсерваций. Данная процедура также минимизирует вклад инерционных колебаний.

Так как во время глубоководного дрейфа промежуточных определений координат нет, использование соотношения (1) для оценок характеристик обмена невозможно из-за неопределенности автокорреляционной функции (2). Отсутствие промежуточных данных также делает невозможным прямое определение асимптотического предела в (5).

Чтобы косвенно определить коэффициенты горизонтального обмена воспользуемся следующими рассуждениями. Весь период t глубоководного дрейфа разобьем на n равных по времени интервалов Δt . Пусть x_n – полное смещение дрейфера, d_i – смещение дрейфера в течение i -го интервала, b – среднеквадратическое значение смещения за время Δt , $\alpha = b^2/\Delta t$. Тогда средний квадрат смещения

$$\langle x_n^2 \rangle = \left\langle \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 \right\rangle.$$

Разобьем сумму в последнем выражении на две (по повторяющимся и неповторяющимся индексам):

$$\langle x_n^2 \rangle = \left\langle \left(\sum_{i=1}^n d_i^2 \right) \right\rangle + \left\langle \sum_i \sum_{j \neq i} d_i d_j \right\rangle = nb^2 + \left\langle \sum_i \sum_{j \neq i} d_i d_j \right\rangle. \quad (6)$$

Обратим внимание на то, что параболический закон диффузии

$$\frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = const$$

будет выполняться при условии стремления к нулю второго слагаемого в выражении (6). Так как среднее смещение дрейфера за время Δt равно 0, это возможно, если смещения d_i и d_j для различных интервалов Δt в основном не коррелируют между собой. Другими словами, полное время наблюдения t должно существенно превышать период когерентности рассматриваемого процесса, т.е. лагранжев масштаб времени. В этом случае для оценки значений коэффициента обмена по соответствующей пространственной координате можно использовать упрощенное соотношение

$$K_u = \frac{1}{2} \left\langle \frac{(\Delta x)^2}{\tau} \right\rangle, \quad (7)$$

где Δx – перемещение буя вдоль оси x за период дрейфа τ . Критерием применимости соотношения (7) для оценки коэффициента обмена при этом выступает требование малости лагранжевого времени T_u по отношению к средней продолжительности дрейфа $\langle \tau \rangle$. Лагранжев масштаб времени T_u можно оценить по соотношению:

$$T_u = \frac{K_u}{\langle u^2 \rangle},$$

где $\langle u^2 \rangle$ – среднее значение соответствующей скорости дрейфа буя.

Т а б л и ц а 1. Данные об анализируемых глубоководных буях.

№ буя	начало дрейфа	окончание дрейфа	глубина исследуемого горизонта (м)	количество измерительных циклов
4900489	14 марта 2005 г.	18 января 2009 г.	500	132
4900540	14 марта 2005 г.	2 октября 2008 г.	1000	175
4900541	25 июля 2006 г.	1 марта 2009 г.	1530	126
4900542	25 июля 2006 г.	27 мая 2009 г.	1550	89

Т а б л и ц а 2. Характеристики обменных процессов глубоководных течений.

№ буя	$ V $, см/с	K_u , м ² /с	K_v , м ² /с	K_u/K_v
4900489	2,9	170	76	2,2
4900540	2,6	140	56	2,5
4900541	2,4	120	45	2,7
4900542				

Данные об анализируемых буях приведены в табл.1. Из рассмотрения изъяты циклы продолжительностью более 10 суток и циклы с отклонениями глубины дрейфа от заданного горизонта более 30 м.

В табл.2 для этих данных приведены значения среднеквадратичной скорости течений $|V|$, меридионального K_u и зонального K_v коэффициентов обмена, а также показатель анизотропии бокового обмена K_u/K_v .

Отметим, что оценочные значения лагранжевого масштаба времени для анализируемых буев-профилемеров не превышает 3 суток, а продолжительность их дрейфа несколько лет. Таким образом, критерий применимости методики, используемой для оценки коэффициентов обмена, выполняется.

С учетом значений коэффициентов меридионального ($K_u = 1900$ м²/с) и зонального ($K_v = 1100$ м²/с) обмена, полученных ранее для поверхностных дрейфовых течений по дрейфтерным данным, можно отметить следующие тенденции: с ростом глубины от поверхности до 1500 м наблюдается уменьшение кинетической энергии течений, которое сопровождается уменьшением меридионального и зонального коэффициентов обмена, при этом анизотропия обмена ($K_u > K_v$) сохраняется.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию систем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor G.I.* Diffusion by continuous movements // Proc. London Math. Soc.– 1921.– 20.– P.196-212.
2. *Погребной А.Е.* Модификация методики Тэйлора для оценки горизонтального (бокового) обмена в Черном море по данным дрейфтерного эксперимента //

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2008.– вып.16.– С.136-144.

3. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжев С.В., Поярков С.Г., Пулейн П.-М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным // Океанология.– 2003.– 43(6).– С.1-15.
4. Погребной А.Е. Характеристики вихревых движений в Черном море по данным дрейфтерного эксперимента // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: 2008.– вып.16.– С.124 -135.

Материал поступил в редакцию 31.07.2017 г.
После доработки 31.08.2017 г.

A.E.Pogrebnoy

PARAMETERS OF TURBULENT EXCHANGE OF SURFACE AND DEEP-WATER CURRENTS IN THE BLACK SEA

The spatial distributions of surface and deep-water currents in the Black Sea are analyzed. Thereto the kinematic parameters of the drifters and the self-contained floating buoy-profilers according to the Global Data Center of the International Program "ARGO" were used. Dependences on the depth of the current velocity modulus, meridional K_v and zonal K_u coefficients of turbulent exchange, and K_u/K_v exchange anisotropy index are obtained. It is shown that as the depth increases from the surface to 1500 m, the kinetic energy of current field decreases, which is accompanied by a decrease in the meridional ($1,1 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s} > K_v > 0,04 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$) and zonal ($1,9 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s} > K_u > 0,12 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$) exchange coefficients, while the exchange anisotropy ($K_u > K_v$) is conserved.

KEYWORDS: the Black Sea, turbulent exchange, drifters, self-contained buoy-profilers