

А.Е. Погребной

Оценка коэффициентов горизонтального обмена в Черном море по данным дрейферного эксперимента

Проведено обобщение методики расчета коэффициентов горизонтальной диффузии для броуновских частиц на нестационарный случай применительно к дрейферному эксперименту. Выявлены границы применимости предлагаемой методики. Проводится расчет коэффициентов горизонтального обмена с целью сравнения с оценками, полученными ранее по обобщенной теории Тейлора. Подтверждено взаимное соответствие этих оценок. Показано, что различие в значениях зонального ($0,19 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$) и меридионального ($0,11 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$) коэффициентов обмена в Черном море не может быть обусловлено эффектом увеличения продольной составляющей пульсаций скорости за счет ее поперечного сдвига относительно среднего течения. Сделан вывод о географической анизотропии процессов горизонтального обмена в Черном море.

Ключевые слова: коэффициент горизонтального обмена, дрейфер.

Анализ изображений, полученных с искусственных спутников Земли в инфракрасной и видимой частях спектра, указывает на то, что в Черном море циркуляция поверхностных вод представляет собой совокупность движений различных пространственных и временных масштабов. К макромасштабным движениям в первую очередь следует отнести Основное Черноморское течение (ОЧТ) [1], распространяющееся вдоль берега над континентальным склоном в циклоническом направлении, а также восточный и западный циклонические круговороты, расположенные в глубоководной части моря. Кроме вышперечисленных макромасштабных течений, также присутствуют мезомасштабные движения в виде вихрей. Направление вращения этих вихрей, как правило, антициклоническое. По-видимому, они могут играть немаловажную роль в формировании и трансформации вертикальной стратификации гидрофизических полей в верхнем слое моря и осуществлять эффективный горизонтальный (боковой) обмен.

Для оценки интенсивности горизонтального обмена можно использовать данные широкомасштабного международного дрейферного эксперимента в Черном море, начатого в 1999 г. Дрейфер представляет собой поверхностный поплавок и связанный с ним подводный парус. Парус находится на глубине 15 м, а его гидродинамическое сопротивление в 40 раз превышает сопротивление поплавка. Таким образом, влияние поверхностного волнения и ветровых дрейфовых течений на горизонтальное перемещение дрейфера не является существенным. При этом положение дрейфера определяется объемом воды, окружающей его парус. Информация о местоположении дрейфера (вместе с дополнительными данными о характеристиках приповерхностного слоя моря) передается с него на спутники и затем регистрируется в центре приема данных. Точность определения географических координат при этом составляет несколько сотен метров, а частота наблюдений колеблется в пределах 4 – 6 раз в сутки.

© А.Е. Погребной, 2011

Наиболее известным методом расчета коэффициента обмена по статистическим характеристикам лагранжевой частицы является теория Тэйлора [2], согласно которой коэффициент обмена выражается формулой

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

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

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

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

В работе [3] по формулам (1), (2) были сделаны оценки коэффициентов горизонтального обмена для Черного моря. Оказалось, что значение зонального коэффициента бокового обмена $K_u = 0,36 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ в 2 раза превышает соответствующее значение для меридиональной составляющей $K_v = 0,19 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$.

Авторы работы [3] не обратили внимание на то, что с увеличением длины реализации (табл. 1 в [3]) наблюдается явный монотонный рост T_u и T_v (табл. 2 в [3]). Поэтому оценки лагранжевых масштабов времени по предложенной в [3] методике вряд ли можно считать корректными. Более того, интеграл от автокорреляционных функций пульсаций скорости для дрейфтеров с увеличением интервала интегрирования t не стремится к своему аппроксимационному значению, что, согласно теории Тэйлора, должно происходить уже при значениях t , в 3 – 5 раз превышающих лагранжев масштаб времени. Это связано с тем, что поверхностный слой Черного моря является энергетически открытой системой с явно нестационарным воздействием на нее атмосферы. Время в таких системах нельзя считать однородным в том смысле, что характер протекания процессов может зависеть от выбора начала отсчета. Например, ясно, что включение в расчет автокорреляционной функции катастрофического шторма в Черном море 11.11.2007 г. существенно изменит сам вид этой функции независимо от того, какой бы продолжительной до и после этого ни была длина реализации.

Поэтому при рассмотрении характеристик обмена в Черном море с использованием данных дрейфтерного эксперимента подход, предложенный Тэйлором [2] для стационарных движений, должен быть модифицирован.

Для расчета коэффициентов обмена в работе [4] 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:

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

а лагранжев масштаб времени рассматривать как асимптотический предел

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

Анализ по всем дрефтерам [4] 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 $\sim (5 - 6) T_u^*$.

Значения коэффициентов горизонтального обмена $K_u = 0,19 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ и $K_v = 0,11 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ [4] отличаются от оценок [3], приведенных выше. Поэтому для их проверки целесообразно получить 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 .

Несмотря на простоту соотношения (5), которое еще называют параболическим законом диффузии [5], применительно к дрефтерному эксперименту оно не использовалось. По-видимому, это связано с тем, что расчет значений K_u для разных временных интервалов осреднения квадрата смещения может приводить к различным оценкам. Поэтому процедура расчета коэффициентов обмена по (5) должна быть адаптирована с учетом специфики дрефтерных данных.

Проанализируем, от чего зависит средний квадрат смещения дрефтера $\langle x^2 \rangle$. Весь период t наблюдения за дрефтером разобьем на n равных по времени интервалов Δt . Пусть x_n – полное смещение дрефтера, d_i – смещение дрефтера 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):

$$\begin{aligned} \langle x_n^2 \rangle &= \left\langle \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 \right\rangle + \langle \sum_i \sum_{j \neq i} d_i d_j \rangle = nb^2 + \langle \sum_i \sum_{j \neq i} d_i d_j \rangle = \\ &= \frac{t}{\Delta t} b^2 + \langle \sum_i \sum_{j \neq i} d_i d_j \rangle = \alpha t + \langle \sum_i \sum_{j \neq i} d_i d_j \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

Обратим внимание на то, что параболический закон диффузии

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

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. Таким образом, оценку горизонтальных коэффициентов бокового обмена следует понимать как асимптотический предел (5) при значениях периодов оценивания квадрата смещения лагранжевой частицы, существенно превышающих лагранжев масштаб времени.

Для оценки интенсивности горизонтального обмена в Черном море использовался массив данных, полученных в ходе международного дрейферного эксперимента. Рассматривались только характеристики перемещений дрейферов. Из анализа были исключены данные о дрейфе буев с термофилирующими линиями, для которых соотношение между площадями паруса и остальных элементов буя менее 40, а также участки траекторий дрейферов после посадки на мель либо утери плавучего паруса. Для этого были привлечены данные [6] о продолжительности продуктивной работы дрейферов, возвращенных в Черном море. Информация об анализируемых дрейферах приведена в таблице. Отметим, что корректность обобщения полученных в настоящей работе оценок на весь бассейн, естественно, ограничена пространственно-временной статистикой используемых данных.

Географические широта и долгота дрейфера пересчитывались в горизонтально изотропную систему координат с размерностью длины. Отбраковка сбойных обсерваций проводилась по методике, описанной в [7]. Обсервация считалась ложной, если модуль скорости перемещения дрейфера от предшествующего момента определения координат дрейфера до текущего превышал 1 м/с. Затем использовалась линейная интерполяция координат для получения эквидистантных по времени данных с интервалом 1 ч.

Помимо участия в процессах, осуществляющих горизонтальный обмен, каждый дрейфер переносится средним течением. Поэтому для расчета коэффициентов обмена по формуле (5) необходима информация о флуктуационных составляющих отклонения дрейфера от траектории среднего течения. Нерекурсивные методы цифровой фильтрации, используемые для разделения

сигнала на среднюю и флуктуационную составляющие, приводят к уменьшению длины анализируемого ряда. Это крайне нежелательно, поскольку для некоторых дрейфтеров полная длина реализации и без того очень короткая. При использовании рекурсивных методов формальная длина ряда сохраняется, однако в отфильтрованном сигнале присутствуют краевые участки с некорректными значениями за счет необходимости введения начальных условий, которые неизвестны. Авторы работы [3] прибегли к полиномиальной фильтрации, когда ряды данных вначале приближались полиномом 5-й степени по методу наименьших квадратов для получения средних характеристик, а флуктуации получались вычитанием аппроксимирующего полинома из исходного сигнала. Отметим, что порядок полинома определяет максимальное количество экстремумов. Поэтому при обработке рядов, длины которых могут отличаться в несколько раз, степень сглаженности получаемых сигналов может существенно меняться.

Паспортные номера и продолжительность информативного дрейфа дрейфтеров

Номер дрейфтера	Продолжительность дрейфа, сут	Номер дрейфтера	Продолжительность дрейфа, сут
40422	40	34830	136
47603	46	34832	139
16335	48	40421	141
47604	53	16337	142
16333	55	47605	145
47608	55	33349	146
33350	55	34833	148
35502	57	17484	154
33347	62	40423	159
47606	70	40420	164
40425	71	16331	165
35500	71	34829	170
40426	83	33352	184
47607	83	34253	184
16336	92	35499	218
40428	92	34834	224
16332	98	17485	261
17487	100	16334	279
33351	100	16330	391
40424	107		

В данной работе для получения характеристик среднего течения использовалась скользящая гармоническая фильтрация, когда каждый последовательный интервал ряда с центром в расчетной точке аппроксимировался набором низкочастотных гармоник с кратными периодами по методу наименьших квадратов. Центральное значение полученной суммы гармоник рассматривалось как среднее значение координаты в текущий момент времени.

Данная процедура гарантирует равномерное сглаживание с заданными частотными характеристиками независимо от длины ряда. Недостатком является то, что на крайних участках ряда расчет приходится проводить с учетом асимметрии интервалов, считая полученные оценки корректными. Пульсационные составляющие течений являются разностью исходного и осредненного рядов. В настоящей работе использовался набор из четырех гармоник с периодами 2^{12} , 2^{11} , 2^{10} , 2^9 ч (что соответствует $\sim 171, 85, 43, 21$ сут). Разность исходного и отфильтрованного сигналов – это флуктуационная составляющая отклонений дрейфера от траектории среднего течения.

Для расчета коэффициентов горизонтального обмена предлагается следующая процедура: временные ряды флуктуационных составляющих отклонений дрейфера от траектории среднего течения разбиваются на равные временные интервалы длиной τ , по ним вычисляется средний квадрат смещений b^2 вдоль интересующего направления, соответствующий коэффициент горизонтального обмена ищется как асимптотический предел

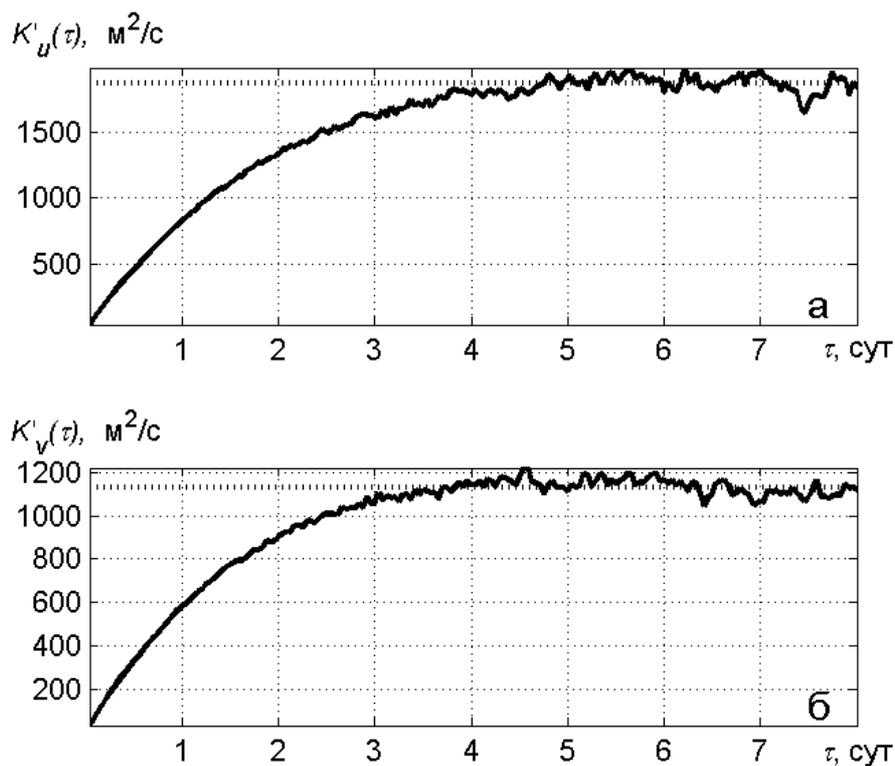
$$K'_u(\tau) = \frac{1}{2} \alpha = \frac{1}{2} \frac{b_u^2}{\tau} \quad (7)$$

при значениях τ , превышающих лагранжев масштаб времени T_u . Так как, согласно [4], для Черного моря T_u и дисперсия пульсационной составляющей скорости $\langle u'^2 \rangle$ статистически независимы, оценив K_u , можно оценить и значение лагранжевого масштаба времени

$$T_u = \frac{K_u}{\langle u'^2 \rangle}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) выписаны для меридиональной составляющей, для зонального компонента они аналогичны. Кроме того, процедура оценок коэффициентов обмена и лагранжевых масштабов времени естественным образом обобщается на всю совокупность дрейферных данных. Для этого в оценку b_u^2 и $\langle u'^2 \rangle$ необходимо включить информацию по всем имеющимся данным.

Не будем останавливаться на примерах расчета коэффициентов горизонтального обмена и лагранжевых масштабов времени для конкретных дрейферов, а сразу перейдем к обсуждению результатов для всей совокупности дрейферных данных. На рис. 1 показаны зависимости $K'_u(\tau)$ и $K'_v(\tau)$ для зонального и меридионального направлений. Видно, что они быстро стремятся к некоторым асимптотическим значениям, достигая их уже при $\tau > 5$ сут. Поэтому в качестве оценок коэффициентов горизонтального обмена использовались средние значения соответствующего параметра $K'(\tau)$ в диапазоне τ 5 – 8 сут. Эти значения коэффициентов обмена показаны на рис. 1 пунктиром, они составили $0,11 \cdot 10^4$ м²/с для меридионального и $0,19 \cdot 10^4$ м²/с – для зонального направлений. Приведенные оценки коэффициентов обмена совпадают со значениями, полученными ранее по модифицированной методике Тейлора [4].



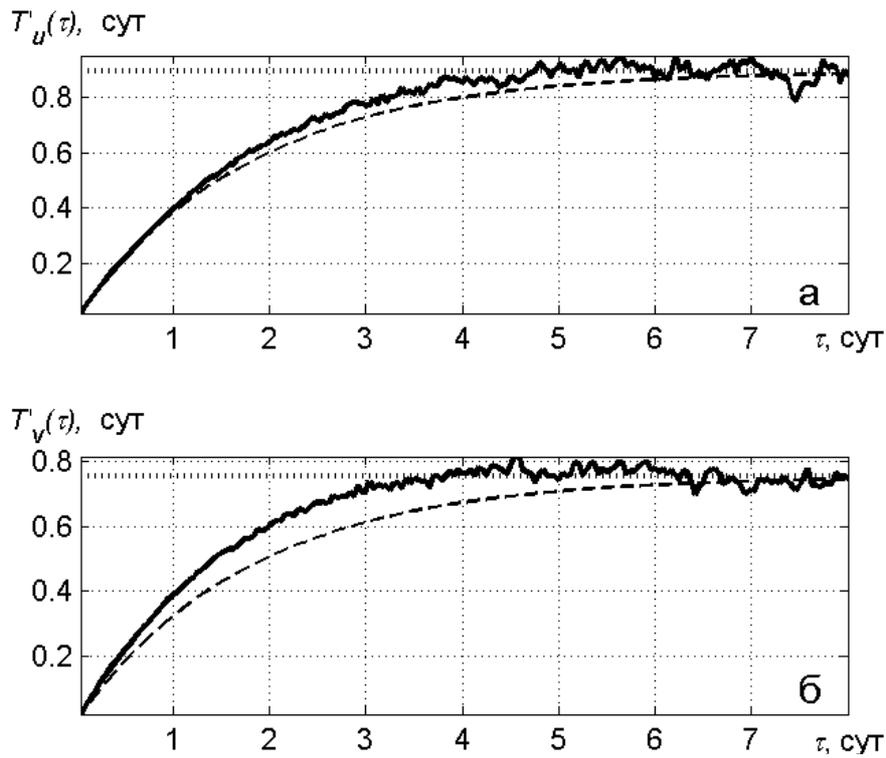
Р и с. 1. Пример расчета коэффициентов горизонтального обмена для зонального (а) и меридионального (б) направлений по всей совокупности данных. Сплошная линия – экспериментальная зависимость параметра K' , определяемого соотношением (7), от временного интервала τ ; пунктир – коэффициент горизонтального обмена (среднее значение K' в интервале τ 5 – 8 сут)

Верхняя граница диапазона оценивания коэффициентов обмена (8 сут) определяется конечностью длин рядов исходных данных, т. к. с увеличением τ статистическая обеспеченность оценок быстро падает. Чтобы понять, как нижняя граница используемого диапазона (5 сут) соотносится с лагранжевыми масштабами времени, рассмотрим зависимости $T'_u = K'_u / \langle u'^2 \rangle$ и $T'_v = K'_v / \langle v'^2 \rangle$ (рис. 2), которые в пределе должны давать значения лагранжевых времен T_u и T_v . Они составили 0,75 сут для меридионального и 0,90 сут – для зонального направлений. На рис. 2 также показаны аналитические зависимости

$$\tilde{T} = T^* \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{2T^*}\right) \right), \quad (9)$$

где в качестве T^* используется соответствующий лагранжев масштаб времени. Видно (рис. 2), что экспериментальные зависимости $T'_u(\tau)$ и $T'_v(\tau)$ достигают своих асимптотических значений T_u^* и T_v^* быстрее, чем аналитические

кривые \tilde{T}_u и \tilde{T}_v (9). Таким образом, в качестве нижнего предела оценивания коэффициентов обмена можно использовать значения $\tau \geq 5T^*$.



Р и с. 2. Пример расчета лагранжевых масштабов времени для зонального (а) и меридионального (б) направлений по всей совокупности данных. Сплошная линия – экспериментальная зависимость параметра T' , определяемого соотношением (8), от временного интервала τ ; пунктир – лагранжев масштаб времени T^* (среднее значение T' в интервале τ 5 – 8 сут); штриховая линия – аналитическая зависимость \tilde{T} (9)

Отметим, что аналитические кривые (9) никакой теоретической нагрузки не несут. Они составлены таким образом, чтобы асимптотический предел при $\tau \rightarrow \infty$ равнялся T^* , а производная по τ при $\tau \rightarrow 0$ была равна $\frac{1}{2}$. Здесь они используются лишь для оценки скорости достижения асимптотических значений в экспериментальных зависимостях $K'(\tau)$ и $T'(\tau)$ и в конечном итоге – для оценки приемлемых значений нижней границы $\tau \geq 5T^*$ при вычислениях коэффициентов обмена и лагранжевых масштабов времени.

Отметим, что значение меридионального коэффициента обмена существенно меньше его зонального аналога. Причину этого неравенства авторы [3] объясняют тем, что среднее течение, обладая поперечным сдвигом, способствует более быстрому возрастанию дисперсии продольного компонента скорости частицы, увеличивая оценку коэффициента обмена в направлении, пер-

пендикулярном среднему течению. Основное Черноморское течение, в котором большую часть времени пребывают дрейфтеры, вытянуто в зональном направлении, что и приводит к более высоким значениям зонального коэффициента обмена. Поэтому в работе [3] в качестве «истинного» коэффициента обмена предлагается использовать значение для меридионального компонента скорости.

Попытаемся проверить, могут ли различия в величинах меридионального K_v и зонального K_u коэффициентов обмена быть обусловлены отличиями в значениях коэффициентов обмена K_{\parallel} и K_{\perp} в продольном и поперечном направлениях относительно среднего течения. Если это действительно так, то продольный коэффициент обмена должен оказаться больше зонального ($K_{\parallel} > K_u$), а поперечный – меньше меридионального ($K_{\perp} < K_v$).

Для проверки ряды отклонений дрейфтеров от траектории среднего течения переведем в текущие отклонения в продольном и поперечном направлениях относительно средней траектории. Затем процедуру расчета коэффициентов горизонтального обмена и лагранжевых масштабов времени повторим, но уже для этих направлений.

В результате расчета получены следующие значения продольных и поперечных характеристик горизонтального обмена: $K_{\parallel} = 0,15 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_{\perp} = 0,12 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, $T_{\parallel} = 0,72 \text{ сут}$, $T_{\perp} = 0,80 \text{ сут}$.

Таким образом, предполагаемая выше тенденция ($K_{\parallel} > K_u$, $K_{\perp} < K_v$) не подтвердилась. Следовательно, различие в оценках зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена нельзя объяснить маскирующим влиянием среднего течения. Поэтому можно сделать вывод, что процессам горизонтального перемешивания в Черном море присуща географическая анизотропия, чем и обусловлено различие в значениях зонального и меридионального коэффициентов обмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Книпович Н.М.* Гидрологические исследования в Черном море // Тр. Азово-Черноморской экспедиции. – М.: ЦНИИРХ, 1932. – Т. 10. – 274 с.
2. *Taylor G.I.* Diffusion by continuous movements // Proc. London Math. Soc. – 1921. – 20. – P. 196 – 212.
3. *Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др.* 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.* Модификация методики Тейлора для оценки горизонтального (бокового) обмена в Черном море по данным дрейфтерного эксперимента // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – Вып. 16. – С. 136 – 144.
5. *Теннеkes Г.* Турбулентность: диффузия, статистика, динамика спектров // Турбулентность. Принципы и применения / Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. – М.: Мир, 1980. – 536 с.

6. *Ратнер Ю.Б., Толстошеев А.П., Холод А.Л., Мотыжев С.В.* Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буев // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 3. – С. 50 – 68.
7. *Hansen D.V., Poulain P.-M.* Quality control and interpolation of WOCE/TOGA drifter data // J. Atmos. Ocean. Technol. – 1996. – 13. – P. 900 – 909.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 21.04.10
После доработки 20.05.10

АНОТАЦІЯ Проведене узагальнення методики розрахунку коефіцієнтів горизонтальної дифузії для броунівських частинок на нестационарний випадок стосовно до дрейферного експерименту. Виявлені границі застосовності пропонованої методики. Проводиться розрахунок коефіцієнтів горизонтального обміну з метою порівняння з оцінками, отриманими раніше з узагальною теорією Тейлора. Підтверджена взаємна відповідність цих оцінок. Показано, що відмінність у значеннях зонального ($0,19 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$) і меридіонального ($0,11 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$) коефіцієнтів обміну в Чорному морі не може бути обумовлене ефектом збільшення поздовжньої складової пульсацій швидкості за рахунок її поперечного зсуву відносно середньої течії. Зроблено висновок про географічну анізотропію процесів горизонтального обміну в Чорному морі.

Ключові слова: коефіцієнт горизонтального обміну, дрейфер.

ABSTRACT Method of calculating horizontal diffusion coefficients for Brownian particles is generalized for a non-stationary case with reference to a drifter experiment. Applicability range of the proposed method is revealed. The coefficients of horizontal exchange are calculated with the aim of their comparison with the estimates derived before from the Taylor's generalized theory. Mutual correspondence of these estimates is confirmed. It is shown that difference between the values of zonal ($0.19 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$) and meridian ($0.11 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$) exchange coefficients in the Black Sea can not be stipulated by the effect of increase of the axial component of velocity pulsations due to its transverse shear relative to the mean current. The conclusion on geographic anisotropy of horizontal exchange processes in the Black Sea is drawn.

Keywords: coefficient of horizontal exchange, drifter.