

А.Е. Погребной

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь***АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
СВОЙСТВ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧЕРНОМ МОРЕ
ПО ДАННЫМ ДРИФТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Показано, что процессам горизонтального обмена 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. 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.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *горизонтальный обмен, коэффициент обмена, дрейфтер.*

Анализ изображений, полученных с помощью искусственных спутников Земли в ИК- 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 вышеперечисленных 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 анализа особенностей пространственно-временных характеристик поля скорости поверхностных течений в Черном море можно использовать данные широкомасштабного международного дрейфтерного эксперимента в Черном море, начатого в 1999 г. Известно (см., например, [2]), что дрейфтер является пассивным поплавком и может рассматриваться, как лагранжевая частица водной массы (на глубине залегания плавучего паруса ~ 15 м).

Ранее было показано, что наиболее вероятный масштаб вихревых движений в Черном море соответствует радиусу деформации Россби (~ 25 км), а пространственный масштаб круговых движений с квазиинерционными периодами $\hat{O}_E(k)$ (диапазон периодов от 15 до 19 час) в Черном море составляет ~ 600 – 900 м [3]. При этом вероятность безразмерной продолжи-

тельности пребывания дрейфера в вихревых движениях различных частотных диапазонов (для частот меньших инерционной) практически не зависит от частоты, следовательно, механизмы возникновения и каскадной трансформации вихревых движений в Черном море близки к автомодельным [3].

Данные дрейферного эксперимента также можно использовать для оценки интенсивности горизонтального обмена в море. Наиболее известным методом расчета коэффициента обмена по статистическим характеристикам лагранжевой частицы является теория Тэйлора [4], 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 ¹:

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

В работе [5] с использованием формул (1, 2) получены оценки коэффициентов горизонтального обмена для Черного моря. Оказалось, что значение зонального коэффициента бокового обмена $K_u = 0,36 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ в 2 раза превышает соответствующее значение для меридиональной составляющей $K_v = 0,19 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$.

Авторы работы [5] не обратили внимание на то, что с увеличением длины реализации (см. табл. 1 в цитируемой работе [5]) наблюдается явный монотонный рост T_u и T_v (см. табл. 2 в работе [5]). Поэтому оценки лагранжевых масштабов времени по предложенной авторами этой работы методике вряд ли можно считать корректными. Более того, интеграл от автокорреляционных функций пульсаций скорости для дрейферов с увеличением интервала интегрирования t не стремится к своему аппроксимационному значению, что по Тэйлору должно происходить уже при значениях t в 3 – 5 раз превышающих лагранжев масштаб времени.

Связано это 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, разразившегося в Черном море 11 ноября 2007 г., существенно изменит сам вид автокорреляционной функции независимо от того, какой бы продолжительной до и после этого ни была длина реализации.

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

Поэтому, при рассмотрении характеристик обмена в Черном море по данным дрейферного эксперимента, подход, предложенный Тэйлором [4] для стационарных движений, должен быть модифицирован.

Для расчета коэффициентов обмена в работе [6] предполагалась квази-стационарность процессов, обуславливающих перемещения дрейферов 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 дрейферам [6] 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 $\sim (5 - 6) \times T_u^*$.

Оценки значений коэффициентов горизонтального обмена $K_u = 0,19 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ и $K_v = 0,11 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, приведенные в работе [6], отличаются от аналогичных оценок, содержащихся в [5]. 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 .

Анализ показывает, что параболический закон диффузии [7]

$$\frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle = \text{const} \quad (6)$$

должен выполняться при условии, когда 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 расчета коэффициентов горизонтального обмена была предложена следующая процедура: временные ряды флуктуационных составляющих отклонений дрефтера 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 определяется 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 [6], для Черного моря 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), то оценив K_u и дисперсию пульсационной составляющей скорости $\langle u'^2 \rangle$, можно оценить и значение лагранжевого масштаба времени²

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

Кроме того, процедура оценок коэффициентов обмена и лагранжевых масштабов времени естественным образом обобщается на всю совокупность дрефтерных 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 дрефтеров, а сразу перейдем к обсуждению результатов для всей совокупности дрефтерных 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 значениях τ более 5 суток. Поэтому, в качестве оценок коэффициентов горизонтального обмена использовались средние значения соответствующего параметра $K'(\tau)$ в диапазоне τ от 5 до 8 суток. Эти значения коэффициентов обмена, показанные на рис. 1 пунктиром, составили $0,11 \times 10^4$ м²/с для меридионального и $0,19 \times 10^4$ м²/с для зонального направлений. Приведенные оценки коэффициентов обмена полностью совпадают со значениями, полученными ранее по модифицированной методике Тейлора [6].

Верхняя граница диапазона оценивания коэффициентов обмена (8 суток) ограничена фактом конечности длин рядов исходных данных, так как с увеличением τ быстро падает статистическая обеспеченность оценок. Чтобы понять как нижняя граница используемого диапазона (5 суток) соотносится с лагранжевыми масштабами времени, были рассмотрены зависимос-

² Выражения (7) и (8) выписаны для меридиональной составляющей, для зональной компоненты они аналогичны – *Авт.*

ти $T_u' = K_u' / \langle u'^2 \rangle$ и $T_v' = K_v' / \langle v'^2 \rangle$, которые в пределе должны давать значения лагранжевых времен по соответствующей компоненте обмена T_u и T_v . Эти значения составили 0,75 суток для меридионального и 0,9 суток для зонального направлений. Оказалось, что экспериментальные зависимости $T_u'(\tau)$ и $T_v'(\tau)$ достигают своих асимптотических значений быстрее, чем аналитические кривые

$$T'' = T \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{2T}} \right),$$

где в качестве T используется соответствующий лагранжев масштаб времени.

Таким образом, в качестве нижнего предела оценивания коэффициентов обмена, можно использовать значения $\tau \geq 5 \cdot T$, где T соответствующий лагранжев масштаб времени.

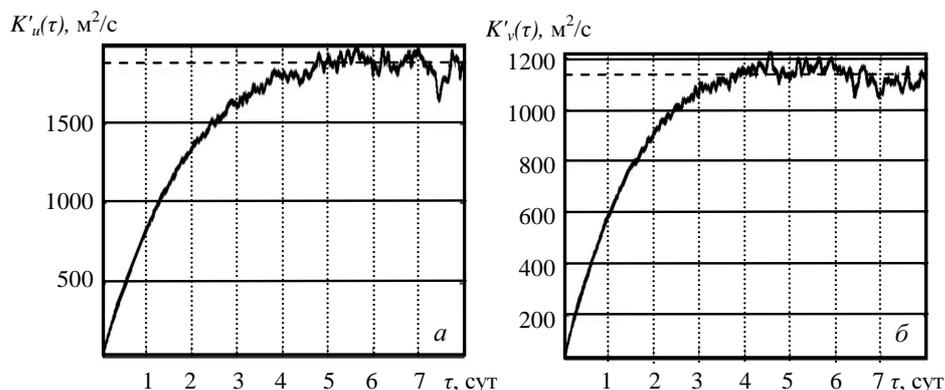


Рис. 1. Пример расчета зонального (а) и меридионального (б) коэффициентов горизонтального обмена. Сплошная линия – экспериментальная зависимость параметра K' , определяемого соотношением (7) от временного интервала τ . Пунктир – коэффициент горизонтального обмена (среднее значение K' в интервале τ от 5 до 8 суток).

Числовое значение меридионального коэффициента обмена существенно меньше его зонального аналога. Причину этого неравенства авторы уже упоминавшейся работы [5] объясняют тем, что среднее течение, обладая поперечным сдвигом, способствует более быстрому возрастанию продольного компонента дисперсии скорости частицы, увеличивая оценку «продольного» коэффициента обмена. ОЧТ, в котором большую часть времени дрейфуют дрейфтеры, вытянуто в зональном направлении, что и приводит к более высоким значениям зонального коэффициента обмена. Поэтому в цитируемой работе [5] в качестве «истинного» коэффициента обмена предлагается использовать значение для меридиональной компоненты 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 большего зонального ($K_{\parallel} > K_u$), а поперечный – меньше меридионального $K_{\perp} < K_v$.

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

В результате расчета были получены следующие значения продольных и поперечных характеристик горизонтального обмена: $K_{\parallel} = 0,15 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, $K_{\perp} = 0,12 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, $T_{\parallel} = 0,72 \text{ сут}$, $T_{\perp} = 0,8 \text{ сут}$. Таким образом, предполагаемая выше тенденция ($K_{\parallel} > K_u, K_{\perp} < K_v$) не подтвердилась. Следовательно, различие в значениях оценок зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена нельзя объяснить маскирующим влиянием среднего течения. Поэтому, можно сделать вывод о том, что процессам горизонтального перемешивания в Черном море присуща географическая анизотропия, чем и обусловлено различие в значениях зонального и меридионального коэффициентов обмена.

К возможным причинам анизотропии горизонтального обмена в Черном море, по-видимому, следует отнести неизотропность воздействия атмосферы и/или особенности орографии рельефа. Для экспериментального ответа на вопрос, какой именно из этих факторов является доминирующим, было бы целесообразно сравнить полученные оценки с аналогичными для другого бассейна. Например, влияние атмосферы на Каспийское и Черное моря с точки зрения анизотропии подобно. При этом, в отличие от Черного, Каспийское море вытянуто в меридиональном, а не в зональном направлении. К сожалению, для Каспия дрейфтерных данных в количестве достаточном для статистических оценок на сегодняшний день нет. Проверить, как соотносятся зональный и меридиональный коэффициенты обмена в Каспийском море не представляется возможным. Поэтому, и вопрос, что же является первопричиной анизотропии горизонтального обмена в Черном море остается открытым.

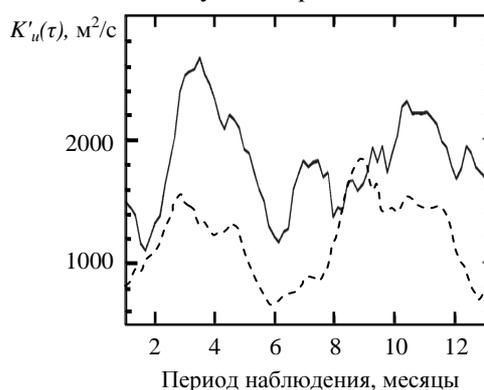


Рис. 2. Сезонная изменчивость коэффициентов горизонтального обмена для зонального (сплошная линия) и меридионального (пунктир) направлений.

На рис. 2 приведены графики изменчивости коэффициентов горизонтального обмена в Черном море. Их анализ показывает, что весной и осенью в Черном море происходит активизация обменных процессов. Для расчета указанных сезонных значений коэффициентов обмена в оценку включались данные, попадающие в 40-суточный интервал около сезонной даты. Оказалось, что в марте и ноябре текущие значения коэффициентов обмена более чем в 2 раза превосходят свой средний уровень.

Также выяснилось, что обмен в Черном море присуща и межгодовая изменчивость – графики изменчивости коэффициентов горизонтального обмена показаны на рис. 3. Текущие среднегодовые значения коэффициентов обмена в 2002 и 2003 гг. в 2 раза превышают соответствующие значения, наблюдавшиеся в 2004 г. Анизотропия горизонтального обмена (отношение коэффициента зонального обмена к его меридиональному аналогу) в 2002 и 2003 гг. тоже оказалась выше, чем в 2004 г. К сожалению, проследить межгодовую изменчивость процессов обмена в Черном море в более широком временном диапазоне по имеющимся данным дрейферного эксперимента не представляется возможным ввиду их полного отсутствия на некоторых продолжительных временных промежутках.

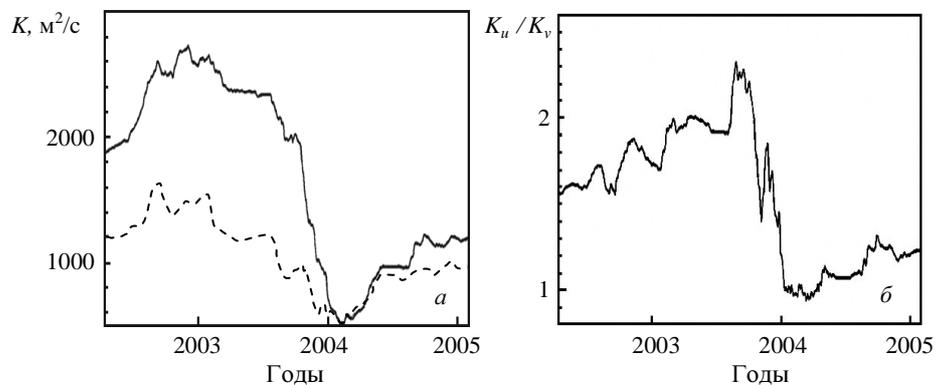


Рис. 3. Межгодовая изменчивость коэффициентов горизонтального обмена для зонального K_u (сплошная линия) и меридионального K_v (пунктир) направлений (а); анизотропия коэффициента обмена K_u / K_v (б).

Нерегулярность дрейферного эксперимента проявляется также и в пространственной неоднородности распределения плотности имеющихся данных σ_d (рис. 4, а).

В области свала глубин у кромки северо-западного шельфа на каждый пространственный участок с размерами $1^\circ \times 40'$ по широте и долготе соответственно приходится до 250 полных суток наблюдений за дрейфом всех дрейферов ($\sigma_d \rightarrow 250$). В центральной глубоководной части моря и в области побережья Кавказа плотность подобных измерений составляет $\sigma_d \approx 50$ суток. В северной части северо-западного шельфа такие данные просто отсутствуют.

Пространственные структуры распределений зонального и меридионального коэффициентов горизонтального обмена представлены на рис. 4, б и рис. 4, в соответственно. В расчете участвовали только те пространственные участки, где плотность данных в прямоугольнике $1^\circ \times 40'$ по широте и долготе 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 вос-

точного и западного циклонических круговоротов, а также в области северо-западного шельфа моря.

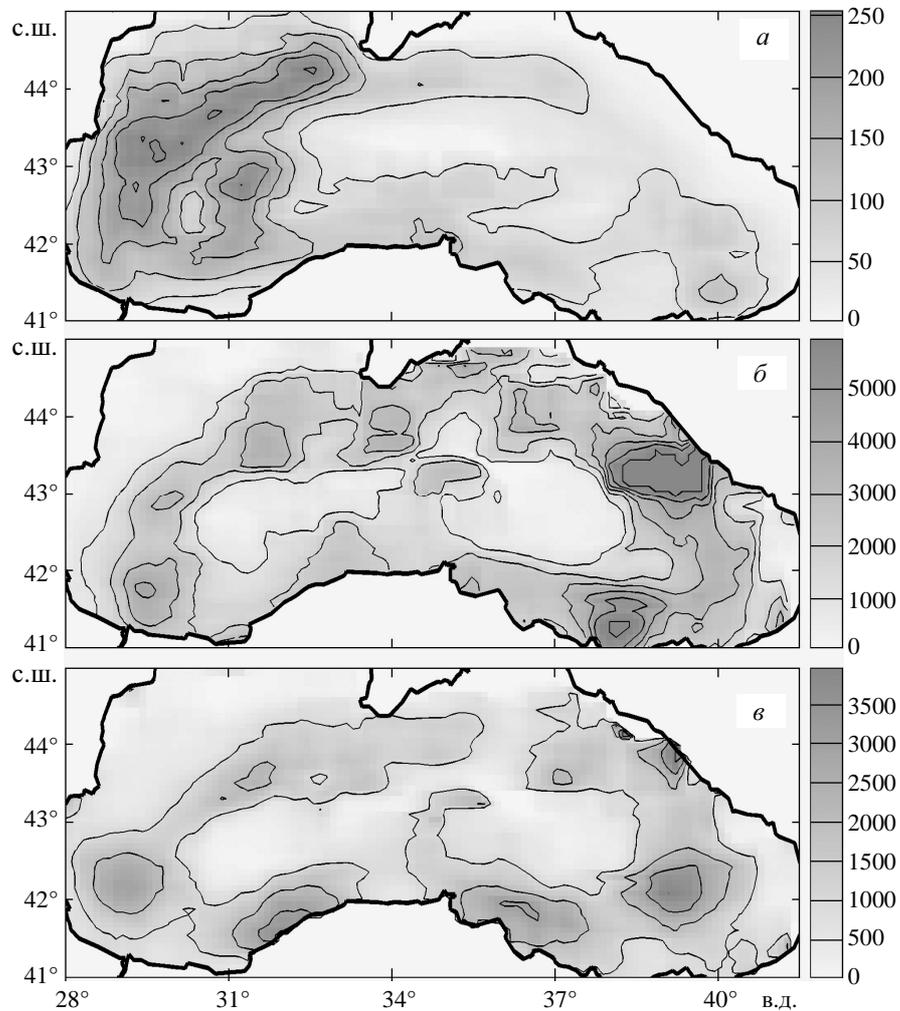


Рис. 4. Пространственные распределения статистической обеспеченности имеющихся дрейферных данных σ_d (а); значений коэффициентов горизонтального обмена в $[m^2/c]$ для зонального K_u (б) и меридионального K_v (в) направлений. Дискретность изолиний 50 суток для σ_d и 1 000 m^2/c для K_u и K_v .

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 можно сформулировать следующие выводы:

– значения зонального ($0,19 \times 10^4 m^2/c$) и меридионального ($0,11 \times 10^4 m^2/c$) коэффициентов горизонтального обмена в Черном море, полученные по соотношению (7), совпадают с полученными ранее [6];

– 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, наблюдавшиеся 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Книпович Н.М.* Гидрологические исследования в Черном море. // Труды Азово-Черноморской экспедиции. – М.: ЦНИИРХ, 1932. – т. 10. – 274 с.
2. *Мотыжев С.В., Еремеев В.Н.* Дрифтерный мониторинг морей и океанов / Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет. (под. общ. ред. Еремеева В.Н.). – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – С. 544-584.
3. *Погребной А.Е.* Характеристики вихревых движений в Черном море по данным дрифтерного эксперимента // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – вып. 16. – С. 124-135
4. *Taylor G.I.* Diffusion by continuous movements // Proc. London Math. Soc. – 1921. – v. 20. – P. 196-212.
5. *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 дрифтерным данным // Океанология. – 2003. – т. 43, № 6. – С. 1-15.
6. *Погребной А.Е.* Модификация методики Тейлора для оценки горизонтального (бокового) обмена в Черном море по данным дрифтерного эксперимента // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – вып. 16. – С. 136-144
7. *Теннекес Г.* Турбулентность: диффузия, статистика, динамика спектров. // Турбулентность. Принципы и применения / Под ред. Фроста У., Моулдена Т. – М.: Мир, 1980. – с. 142 – 163.

Материал поступил в редакцию 01.12.2011 г.

После доработки 14.07.2011 г.