

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ СИНОПТИЧЕСКИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ДВИЖЕНИЙ В ПОЛЕ ОСНОВНОГО ЧЕРНОМОРСКОГО ТЕЧЕНИЯ

Г.Ф. Джиганшин, А.Б. Полонский,
А.П. Толстошеев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

На основе обработки дрейферных данных уточнены характеристики синоптических вихревых структур. Их пространственные масштабы лежат в диапазоне от 10 до 60 км, а периодичность антициклонического обращения вод варьирует от 40 до 110 часов. Коэффициенты бокового обмена, обусловленные синоптическими вихрями, определяются главным образом их горизонтальными размерами и варьируют от $0,1 \cdot 10^4$ до $0,6 \cdot 10^4$ м²/с. Характерные орбитальные скорости инерционных движений составляют 0,1 м/с, а пространственные размеры орбит – от 2 до 3 км.

Введение. Внедрение дрейферных измерений в практику океанологических исследований дало возможность повысить статистическую обеспеченность оценок характеристик вихревых структур. Для Черного моря такие оценки (включая лагранжевые характеристики вихрей и коэффициенты горизонтальной вихревой диффузии по методике [1]) были получены еще в 2003 г. [2]. Несколько позже эти оценки были подвергнуты сомнению [3]. В работе [3] показано, что степень достоверности лагранжевых оценок сильно зависит от длины реализации. По мнению автора упоминаемой работы, им выполнены более обоснованные расчеты коэффициенты горизонтальной вихревой диффузии. Однако эти оценки также требуют дальнейшего уточнения, по крайней мере, по двум причинам.

1. Дрейферные данные содержат два источника погрешности. Одна обусловлена большими и крайне неравномерными (до 6 час) интервалами времени между наблюдениями. Другая погрешность связана с тем, что точность наблюдений определяется условиями измерения. В зависимости от ши-

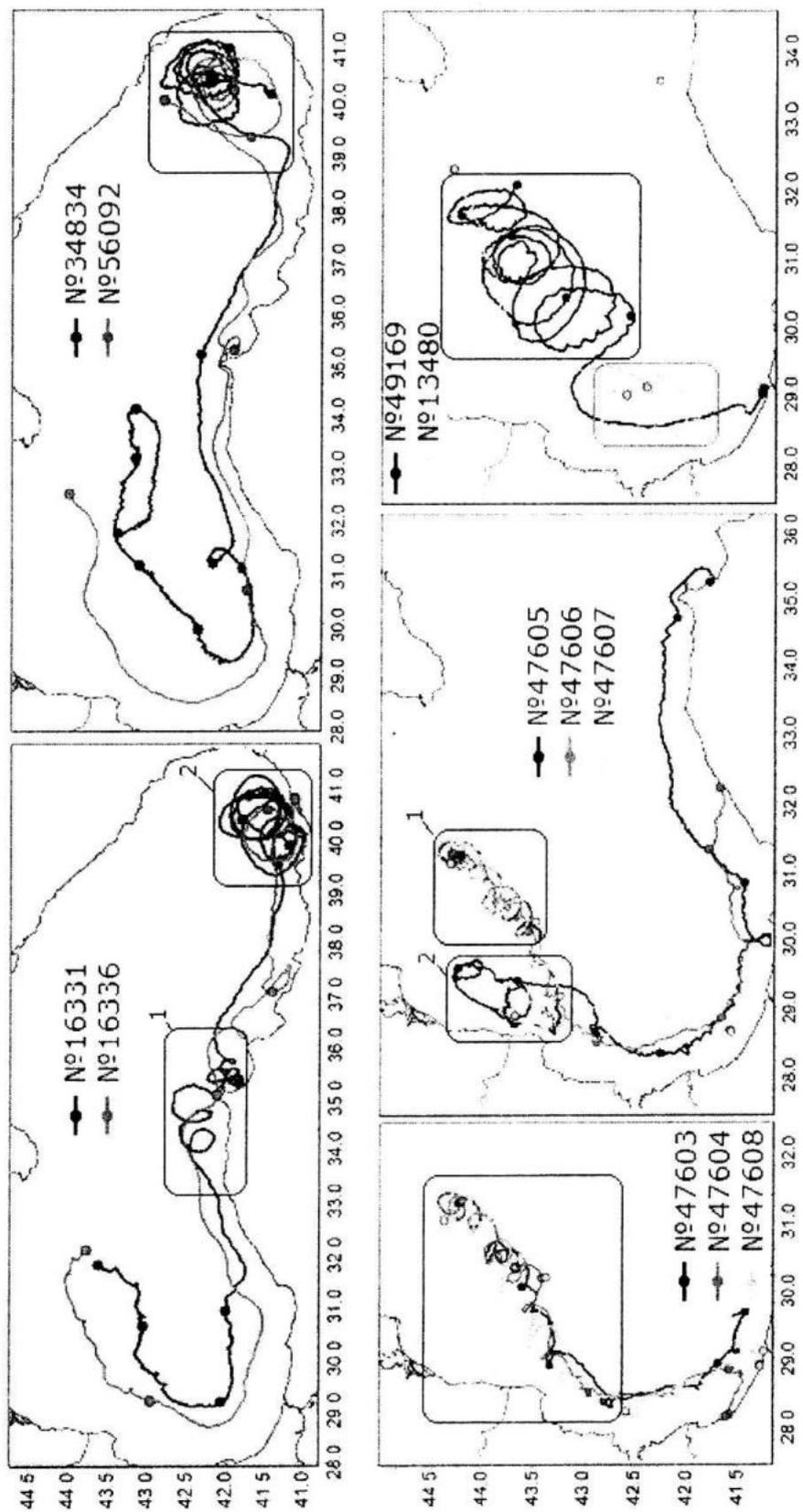
роты места, состояния морской поверхности, количества обслуживающих спутников и ряда других факторов, она может изменяться от 150 до 1000 м. Поэтому, траектории дрейферов, построенные по линейно интерполированным данным (что было сделано в работах [2, 3]) не вполне адекватно отражают реальный дрейф. Вместе с тем, в настоящее время уже разработана методика, позволяющая получить траекторию дрейфера, достаточно близкую к реальной, а, следовательно, и существенно повышающая достоверность лагранжевых оценок.

2. Визуальный анализ траекторий запущенных дрейферов показывает, что далеко не все они фиксировали вихри синоптических масштабов. Большая их часть перемещалась в поле Основного черноморского течения (ОЧТ) без видимых синоптических флюктуаций. В упомянутых же выше работах статистические оценки параметров вихрей были получены на основе треков, включающих, в том числе, и участки с явным отсутствием синоптических вихревых структур.

В настоящей работе делается попытка получить статистически обеспеченные оценки параметров синоптических вихревых структур, а также оценить горизонтальные масштабы инерционных движений, наблюдаемых в поле ОЧТ.

Использованные материалы. Основное внимание в работе было уделено дрейферам, которые зарегистрировали вихревые траектории синоптических масштабов. Это имело место главным образом в западной и восточной частях моря в областях материкового склона, заключенных между изобатами 1000 и 2000 м., с относительно малыми уклонами дна (порядка $0,5^\circ$). Из 88 пусков за период с 2001 по 2007 гг. было отслежено 12 таких траекторий (рис. 1). Для вычисления характеристик инерционных вихрей привлекались и данные нескольких дрейферов, траектории которых характеризовались полным отсутствием вихревых структур синоптического масштаба.

Как следует из табл. 1, точность наблюдений дрейферов (за исключением дрейфера №13480) в среднем относится ко 2-му классу погрешности, интервал которого, в соответствии с паспортными данными дрейферов составляет 150 – 350 м.



Р и с. 1. Траектории дрейфтеров, зафиксировавших вихри синоптического масштаба. Последующий анализ выполнялся по данным, полученным на выделенных фрагментах траекторий

Время запуска и продолжительность наблюдений за перемещением дрейфтеров

Номер дрейфтера	Дата запуска	Дата последней обсервации	Продолжительность дрейфа, часы/сутки	Средний класс обсервации
16331	25. 12. 2001	08. 06. 2002	3914/163	1,8
16336	25. 12. 2001	16. 03. 2002	1961/82	1,8
16337	25. 12. 2001	22. 04. 2002	2818/117	1,6
34833	04. 04. 2002	27. 08. 2002	3378/141	1,7
34834	03. 04. 2002	07. 11. 2002	4941/206	1,4
47603	14. 05. 2004	27. 06. 2004	1047/43	2,0
47604	14. 05. 2004	21. 06. 2004	917/38	1,5
47605	14. 05. 2004	02. 10. 2004	3377/141	1,6
47606	14. 05. 2004	23. 07. 2004	1662/69	2,0
47607	14. 05. 2004	30. 07. 2004	1828/76	2,1
47608	15. 05. 2004	30. 06. 2006	1118/47	1,2
49169	23. 08. 2004	18. 12. 2004	2861/119	1,9
13480	15. 09. 2007	13. 12. 2007	1111/46	погрешность ≤ 50 м

Методика исследования и результаты. Обработка данных заключалась в следующем. Вначале восстанавливались траектории дрейфующих буев по координатам, полученным доплеровским методом в системе спутниковой связи *Argos*. Затем производилось их разделение на компоненты, отражающие средний перенос и флуктуационную составляющую. Наконец, последняя, в свою очередь, разделялась на составляющие, описывающую синоптическую и инерционную компоненты.

Первая задача решалась на основе методики, изложенной в работе [4]. В соответствии с этой методикой интерполяция временных рядов координат автономных лагранжевых дрейфующих буев осуществлялась с применением функции, включающей в себя две составляющие: полиномиальную – для описания среднего переноса дрейфтера (тренд траектории) и синусоидальную – для восстановления участков траектории, обусловленных относительно высокочастотными колебаниями. Полученные таким образом временные ряды координат подвергались последующему сглаживанию по методу взвешенной локальной регрессии. При таком сглаживании для каждого значения данных выбирался интервал, в пределах которого каждому из отсчетов назначался вес в соответствии с

трикубической функцией. Сглаженные значения координат рассчитывались путем квадратичной локальной регрессии взвешенных таким образом данных. В результате интерполяции и сглаживания были получены массивы координат дрейфа $\{\varphi, \lambda\}$ с разрешением в 1 час и среднеквадратическим отклонением на 25% меньше, чем при линейной интерполяции данных. Таким образом, ежечасная погрешность позиционирования дрейфтера не превышала 250 м.

Средний перенос определялся путем полиномиальной аппроксимации массивов $\{\varphi, \lambda\}$, где $i = 1, 2, \dots$ – порядковый номер часа дрейфа. В результате такой операции получались массивы $\{\bar{\varphi}, \bar{\lambda}\}$, отражающие перемещение буя в направлении его генерального дрейфа. Формальным критерием при выборе степени аппроксимирующего полинома служило ее значение, при котором имела место «стабилизация» графика его дисперсии. Далее, на основе рядов $\{\varphi, \lambda\}$ и $\{\bar{\varphi}, \bar{\lambda}\}$ вычислялись ряды составляющих скорости течения $\{U, V\}$ и $\{\bar{U}, \bar{V}\}$, отражающие лагранжевое распределение реально зарегистрированного переноса и переноса в направлении общего сме-

щения буя, соответственно. Затем, вычислив

$$\{U'_i = U_i - \bar{U}_i, V'_i = V_i - \bar{V}_i\},$$

мы получали распределение флуктуационных компонент скорости переноса на каждый i -й час дрейфа.

Спектральный состав флуктуационных компонент U'_i, V'_i для названных дрейфтеров (рисунки не приводятся) характеризуется всплесками в области низких частот от 0,01 до 0,02 цикл/час и вблизи инерционной частоты 0,06 цикл/час. Следовательно, для того, чтобы получить достоверные оценки синоптической компоненты изменчивости их надо выделить из рядов $\{U'_i, V'_i\}$, что и было сделано.

Эта операция выполнялась следующим образом. Вначале, путем те-

кущего сглаживания рядов $\{U'_i, V'_i\}$ получали ряды $\{U'_S, V'_S\}$, описывающие более низкочастотную (синоптическую) компоненту изменчивости, а затем вычислялись ряды инерционных компонент скорости

$$\{U'_{IN} = U'_S - U'_i, V'_{IN} = V'_S - V'_i\}.$$

Спектры, приведенные на рис. 2 убедительно показывает, что, используя описанную выше процедуру, удается получить ежечасные ряды $\{U'_S, V'_S\}$ и $\{U'_{IN}, V'_{IN}\}$, позволяющие анализировать каждую компоненту отдельно. Причем важно отметить, что аналогичный результат получен для всех обработанных дрейфтеров, сведения о которых приведены в табл. 1.

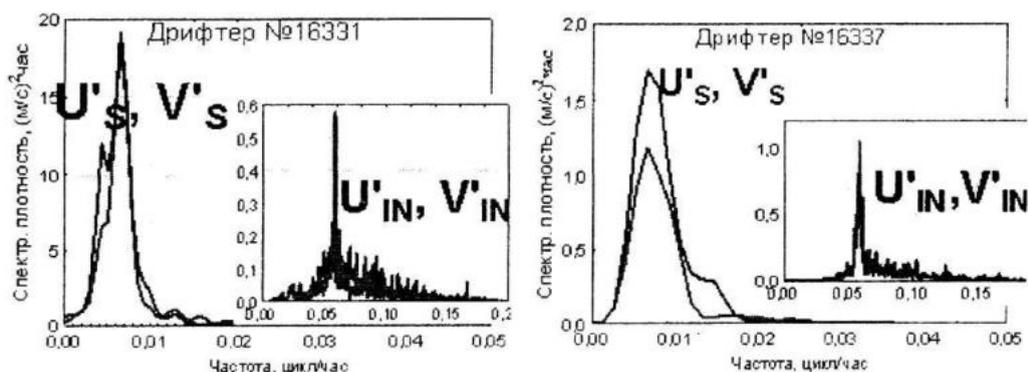


Рис. 2. Спектральный состав флуктуаций разделенных рядов $\{U'_S, V'_S\}$ и $\{U'_{IN}, V'_{IN}\}$ по данным дрейфтеров №16331 и №16337

Для дальнейших вычислений использовались лишь фрагменты рядов, на которых явно выделялись синоптические флуктуации (см. рис. 1) Так, например, из траектории дрейфтера №16331 было выделено два фрагмента: один, – отражающий дрейф, в районе, прилегающем к северному побережью Турции (68 – 88 сутки дрейфа), другой – фрагмент, отражающий антициклоническое обращение буя в юго-восточном секторе моря (последние 60 суток). Для каждого такого

фрагмента последовательно, со сдвигом в 1 час, формировались ряды $\{U'_S, V'_S\}$, длительностью 200 часов, для которых вычислялись лагранжевы характеристики вихревых структур синоптического масштаба изменчивости, а именно, лагранжевы масштабы времени, длины и скорости, а также коэффициенты горизонтального турбулентного обмена. По аналогии с [2] расчет производился в соответствии с соотношениями теории Тэйлора [1]:

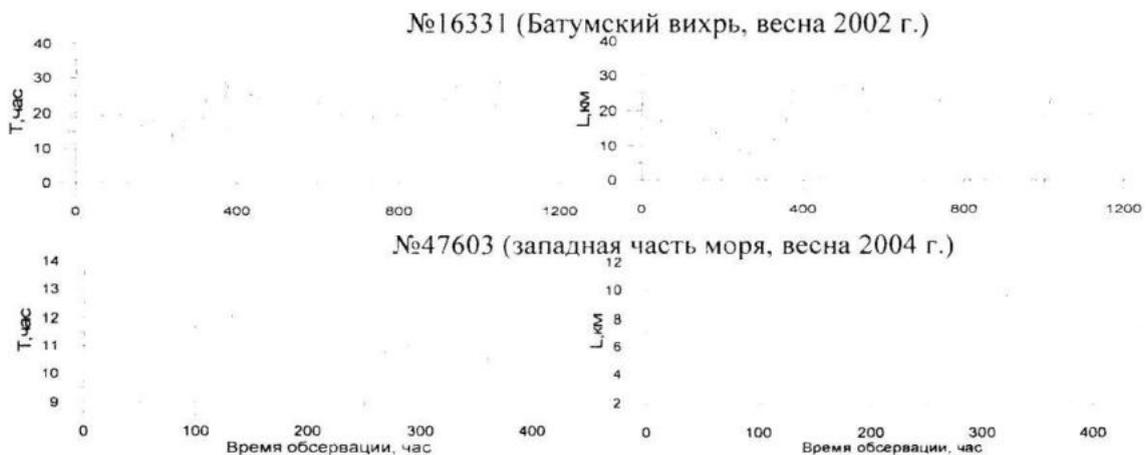
$$\left. \begin{aligned}
 K_{U'_s} &= \overline{U'_s{}^2} T_{U'_s} \\
 T_{U'_s} &= \int_0^{\tau_0} R_{U'_s}(\tau) d\tau \\
 R_{U'_s}(\tau) &= \overline{U'_s(t) U'_s(t+\tau)} / \overline{U'_s{}^2} \\
 \sigma_{U'_s} &= \left(\overline{U'_s{}^2} \right)^{1/2} \\
 L_{U'_s} &= \sigma_{U'_s} T_{U'_s}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где $T_{U'_s}, L_{U'_s}, \sigma_{U'_s}$ – интегральные лагранжевы масштабы времени, длины и скорости, соответственно; $R_{U'_s}(\tau)$ – нормированная автокорреляционная функция; $\overline{U'_s{}^2}$ – дисперсия пульсаций лагранжевой скорости, описываемая синоптической компонентой изменчивости; τ_0 – значение τ , при котором автокорреляционная функция $R_{U'_s}(\tau)$ впервые переходит через ноль. Для компоненты скорости V'_s формулы расчета аналогичны.

Характеристики каждого конкретного синоптического вихря, вычис-

ленные по текущим 200 часовым отрезкам $\{U'_s, V'_s\}$, подвержены существенным вариациям (см., например, рис. 3). Результаты их статистического осреднения, приведенные в табл. 2, показывают, что в некоторых случаях среднеквадратические отклонения флуктуаций лагранжевых масштабов превышают половину значения статистически осредненной величины.

Следовательно, среднестатистические оценки периодов полного обращения по круговой орбите, пространственных масштабов и орбитальных скоростей носят весьма условный характер.



Р и с. 3. Вариации лагранжевых характеристик синоптических вихрей по данным дрейфтеров № 16331 и № 47603

На наш взгляд, этот факт особенно следует учитывать применительно к коэффициенту горизонтального обмена, зависящего, как это следует из формул (1), от лагранжевых масштабов времени и дисперсии флуктуаций ско-

рости. Заметим при этом, что из табл. 2 такая прямая зависимость не усматривается. Для ответа на вопрос, какая же из лагранжевых характеристик наиболее значимо обуславливает величину коэффициента горизонтального обмена

обратимся к корреляционной матрице (табл. 3), вычисленной по данным табл. 2. Высокие значения взаимной корреляции лагранжевых масштабов длины и коэффициентов горизонтального обмена ($0,92$) убедительно показывают, что наиболее значимым фактором, определяющим характер горизонтального обмена, является горизонтальный размер вихря.

Наибольшие значения лагранжевых характеристик получены в юго-восточной части моря, в области Батумского вихря. Здесь статистически осредненные масштабы времени составляли 1 сутки и более; длины – от

14 до 24 км, что соответствует периодам около 100 часов и пространственным масштабам от 30 до 50 км. Орбитальные скорости достигали 27 см/с. Здесь же весной 2002 г. получены максимальные значения коэффициентов горизонтального обмена ($0,64 \cdot 10^4$ м²/с для компоненты U'_S и $0,51 \cdot 10^4$ для компоненты V'_S). В отличие от восточной части моря, вихревые структуры в западном звене ОЧТ отличались заметным разнообразием, что, возможно, объясняется сезонной изменчивостью.

Таблица 2

Статистически осредненные лагранжевы характеристики синоптических структур

№ дрейфера	Масштабы						Коэффициенты горизонтальной турбулентности, м ² /с·10 ⁴	
	времени, час		длины, км		скорости, м/с		$\langle K_{U'_S} \rangle$	$\langle K_{V'_S} \rangle$
	$\langle T_{U'_S} \rangle$	$\langle T_{V'_S} \rangle$	$\langle L_{U'_S} \rangle$	$\langle L_{V'_S} \rangle$	$\langle \sigma_{U'_S} \rangle$	$\langle \sigma_{V'_S} \rangle$		
16331/1	10,2 ±2,1	14,2 ±2,3	7,7 ±2,9	14,4 ±2,7	0,20 ±0,04	0,28 ±0,02	0,17 ±0,1	0,41 ±0,1
16331/2	23,0 ±5,1	22,1 ±5,1	22,6 ±6,7	19,5 ±6,9	0,27 ±0,06	0,24 ±0,08	0,64 ±0,27	0,51 ±0,34
16336	26,9 ±7,8	18,8 ±5,9	17,2 ±7,5	8,4 ±5,8	0,15 ±0,05	0,17 ±0,06	0,34 ±0,22	0,12 ±0,12
34834	24,1 ±6,8	24,2 ±6,5	13,5 ±5,9	17,7 ±6,6	0,15 ±0,05	0,16 ±0,06	0,23 ±0,15	0,29 ±0,19
47603	11,8 ±0,9	11,1 ±0,6	6,9 ±0,7	5,1 ±1,2	0,16 ±0,03	0,13 ±0,03	0,12 ±0,05	0,07 ±0,03
47604	13,3 ±1,1	12,6 ±1,1	9,8 ±0,9	7,0 ±0,7	0,20 ±0,01	0,16 ±0,01	0,20 ±0,03	0,11 ±0,2
47605	14,6 ±3,0	13,4 ±2,4	9,5 ±3,2	6,1 ±2,1	0,18 ±0,05	0,13 ±0,04	0,19 ±0,08	0,09 ±0,05
47607/1	15,2 ±2,6	14,2 ±2,7	11,03 ±1,7	7,2 ±1,1	0,21 ±0,02	0,14 ±0,03	0,24 ±0,04	0,11 ±0,03
47607/2	21,2 ±7,7	22,8 ±7,9	5,4 ±3,8	8,2 ±6,3	0,06 ±0,03	0,09 ±0,05	0,04 ±0,05	0,10 ±0,11
47608	20,0 ±5,0	16,4 ±4,8	16,5 ±5,5	8,2 ±2,0	0,23 ±0,04	0,14 ±0,03	0,39 ±0,16	0,12 ±0,04
49169	26,8 ±7,0	28,3 ±5,7	14,2 ±7,6	16,3 ±6,7	0,14 ±0,05	0,15 ±0,04	0,23 ±0,18	0,28 ±0,17
13480	23,0 ±6,1	24,1 ±5,0	15,6 ±6,3	16,0 ±4,4	0,18 ±0,05	0,19 ±0,04	0,30 ±0,17	0,31 ±0,13

Корреляционные матрицы, вычисленные по данным табл. 2

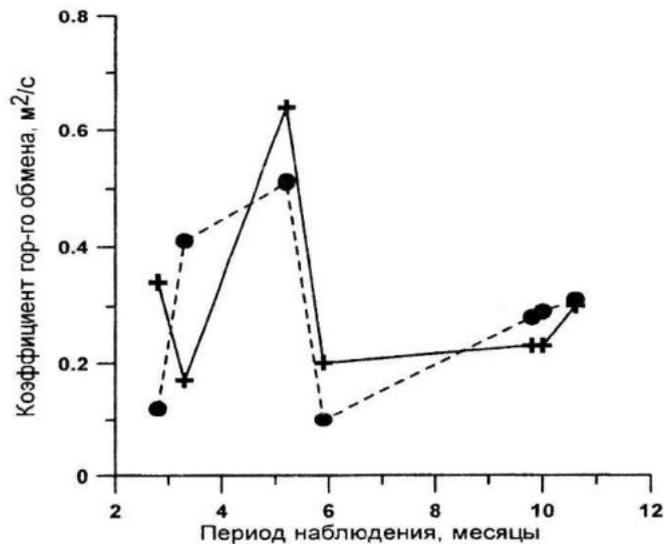
Параметр	$\langle T_{U'_S} \rangle$	$\langle L_{U'_S} \rangle$	$\langle \sigma_{U'_S} \rangle$	$\langle K_{U'_S} \rangle$
$\langle T_{U'_S} \rangle$	1,00	0,70	-0,33	0,37
$\langle L_{U'_S} \rangle$	0,70	1,00	0,43	0,92
$\langle \sigma_{U'_S} \rangle$	-0,33	0,43	1,00	0,74
$\langle K_{U'_S} \rangle$	0,37	0,92	0,74	1,00
Параметр	$\langle T_{V'_S} \rangle$	$\langle L_{V'_S} \rangle$	$\langle \sigma_{V'_S} \rangle$	$\langle K_{V'_S} \rangle$
$\langle T_{V'_S} \rangle$	1,00	0,74	0,01	0,47
$\langle L_{V'_S} \rangle$	0,74	1,00	0,62	0,92
$\langle \sigma_{V'_S} \rangle$	0,02	0,62	1,00	0,83
$\langle K_{V'_S} \rangle$	0,47	0,92	0,83	1,00

Здесь антициклонические вихри различались между собой как по пространственно-временным масштабам, так и по месту их проявления. Так, для вихревой структуры, перемещавшейся в осенне-зимний период 2004 г. зональный и меридиональный масштабы длины составляли 14 и 16 км, соответственно, т.е. были почти такие же, как и в восточной части Черного моря. При этом орбитальные скорости были вдвое меньше, в результате чего зональный и меридиональный масштабы времени составляли соответственно 26,8 и 28,3 часа, что соответствует периодам около 110 часов. Близкие характеристики получены и для вихревой структуры перемещавшейся в осенне-зимний период 2007 г..

Наименьшие значения лагранжевых масштабов длины (от 5 до 10 км), времени (от 11 до 15 часов, что соответствует периодичности от 44 до 60 часов), и коэффициентов горизонтального обмена (от $0,04 \cdot 10^4$ до $0,20 \cdot 10^4$ м²/с) получены для буев, дрейфовавших в западном звене ОЧТ летом 2004 г.

Для суждения о реальных пространственных масштабах описываемых нами синоптических структур можно воспользоваться эмпирическим соотношением, приведенным в работе [5], согласно которому лагранжевы масштабы длины приблизительно равны бароклинным радиусам Россби. В таком случае, судя по данным табл. 2, пространственные размеры вихревых структур, полученные по данным дрейфтеров, обработанных в настоящей работе, лежат в диапазоне от 10 до 60 км.

Обеспеченность наших результатов не позволяет, к сожалению, надежно характеризовать сезонную изменчивость, хотя, в принципе, они согласуются с выводом работы [3], отмечавшим активизацию обменных процессов весной и осенью (рис. 4). Однако коэффициенты, полученные нами для весенних месяцев вдвое выше, что объясняется исключением из наших расчетов участков дрейфа, на которых структуры синоптического масштаба не фиксировались.



Р и с. 4. Сезонная изменчивость коэффициентов горизонтального обмена

Как отмечалось выше, в отличие от синоптических вихревых структур, проявление которых носит эпизодический характер, к одному из постоянно действующих факторов, которые необходимо учитывать в изучении динамики течений (и ОЧТ, в частности) следует отнести вихри инерционного диапазона. Поскольку ряды $\{U'_{IN}, V'_{IN}\}$ надежно отражают флуктуации компонент инерционного масштаба, то это позволяет получить достоверные оценки радиусов инерционных вихрей. Исходя из того, что

что теоретический период инерционного годографа скорости известен и составляет приблизительно 17 часов, логично полагать, что 17-ти часовая сумма инерционных модулей скорости даст нам длину окружности инерционного вихря. Оценку же радиуса инерционного вихря получаем делением последней на 2π . Как видно из табл. 4, характерные орбитальная скорость и радиус инерционных вихрей составляют 10 см/с и от 1 до 1,5 км, соответственно.

Т а б л и ц а 4

Характерные оценки параметров инерционных движений

№ дрефтера	Орбитальные скорости, м/с	Радиусы орбит, км	№ дрефтера	Орбитальные скорости, м/с	Радиусы орбит, км
13480	0,10±0,08	0,96±0,40	47604	0,15±0,09	1,45±0,64
16331	0,09±0,06	0,91±0,40	47605	0,13±0,08	1,25±0,55
16336	0,10±0,06	0,95±0,36	47606	0,13±0,08	1,26±0,62
16337	0,12±0,08	1,11±0,49	47607	0,12±0,06	1,13±0,49
34833	0,10±0,07	1,0±0,45	47608	0,14±0,09	1,43±0,52
34834	0,12±0,09	1,13±0,68	49169	0,12±0,09	0,94±0,50
47603	0,13±0,06	1,22±0,40	—	—	—

Заключение. Проявление синоптических вихрей в поле ОЧТ носит эпизодический характер. Они приурочены к областям материкового склона западной и юго-восточной частей Черного моря. Их пространственные масштабы лежат в диапазоне от 10 до 60 км, а периоды антициклонического обращения вод изменяются от 40 до 110 часов. Коэффициенты бокового обмена, обусловленные синоптическими вихрями, варьируют от $0,1 \cdot 10^4$ до $0,6 \cdot 10^4$ м²/с. Они определяются главным образом горизонтальными размерами вихрей. В отличие от синоптических вихревых структур, инерционные вихри в поле ОЧТ наблюдаются повсеместно. Характерные скорости орбитального переноса составляют 0,1 м/с, а пространственные размеры – от 2 до 3 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor G.I.* Diffusion by continuous movements // Proc. London Math. Soc. 1921. V. 20. – P. 196 – 212.
2. *Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др.* Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейтерным данным // Океанология. – 2003. – Том 43. – № 6. – С. 1 – 15.
3. *Погребной А.Е.* Модификация методики Тэйлора для оценки горизонтального обмена в Черном море по данным дрейтерного эксперимента // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2008. – Вып. 16. – С. 136 – 144.
4. *Толстошеев А.П.* Метод восстановления траекторий автономных дрейфующих буев // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2007. – Вып. 15. – С. 392 – 396.
5. *Oh I.S., Zhurbas V.M., Park W.S.* Estimating horizontal diffusivity in the East Sea (Sea of Japan) and the north-west Pacific from satellite-tracked drifter data // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105 (C3). – P. 6484 – 6492.