

Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана

УДК 551.465+551.46(262.5)

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

Исследование синоптических и инерционных движений в поле Основного Черноморского течения по данным дрейфтерных измерений

На основе дрейфтерных данных, полученных в 2001 – 2007 гг., уточнены характеристики синоптических вихревых образований, формирующихся в результате неустойчивости Основного Черноморского течения, а также параметры инерционных колебаний. Пространственные размеры вихрей синоптического масштаба лежат в диапазонах от 30 – 40 до 80 – 100 км, а периодичность орбитального обращения вод в них варьирует от 4 – 6 до 16 – 20 сут. Показано, что общая продолжительность существования квазистационарной антициклонической циркуляции в области Батумского вихря в период с марта по октябрь 2002 г. составила 240 сут. В осенний период 2004 и 2007 гг. в западной части Черного моря над материковым склоном были зафиксированы антициклонические вихри синоптического масштаба, кинематические характеристики которых близки к характеристикам Батумского вихря. Сходство кинематических характеристик и динамических условий формирования Батумского вихря и вихрей, зафиксированных в осенний период в западной части Черного моря, дает основание классифицировать их как склоновые вихри. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена, обусловленного синоптическими вихрями, определяются главным образом горизонтальными размерами вихрей и изменяются в пределах $(0,15 - 0,45) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$. Характерные орбитальные скорости инерционных движений составляют 0,1 м/с, а радиус окружности, описываемой векторами инерционных течений, изменяется от 1 до 1,5 км.

Ключевые слова: синоптические вихри, инерционные движения, дрейфтерные измерения.

Введение

История изучения синоптической и мезомасштабной изменчивости Основного Черноморского течения (ОЧТ) насчитывает более 50 лет. Первые работы, касающиеся этого вопроса, появились еще в 60-х годах прошлого столетия [1 – 3]. Так, в работе [1] была предложена гипотеза о возбуждении инерционных движений при росте циклонической активности атмосферы над морем, вызывающей усиление ОЧТ. В статье [2] по результатам обработки гидрологических съемок была показана возможность существования вихревой структуры в юго-восточной части Черного моря (ЧМ). В это же время на основании обработки результатов измерения поля течений было установлено,

© Г.Ф. Джиганшин, А.Б. Полонский, А.П. Толстошеев, 2013

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2013, № 2

3

что стрежень ОЧТ испытывает волнообразные колебания, которые при определенных условиях могут трансформироваться в вихри с горизонтальными размерами до 15 миль [3].

Ряд работ, посвященных вопросам вихреобразования в прибрежной зоне ЧМ, был опубликован в следующее десятилетие [4 – 6]. Их авторы рассматривали вихреобразование в шельфовой зоне ЧМ в терминах концепции горизонтального турбулентного обмена. К возможной причине возникновения синоптических вихрей они относили неустойчивость основного потока по отношению к внешним возмущениям. В работе [7] была сделана одна из первых попыток теоретического описания механизма вихреобразования на основе модели резонансного возбуждения вихрей в окрестностях вдольберегового потока.

Изучение процессов вихреобразования получило дальнейшее развитие в результате реализации программы совместных комплексных океанологических исследований ЧМ (СКОИЧ), выполнявшихся силами научно-исследовательских институтов АН УССР, АН СССР, СО ГОИНа, АзЧерНИРО и Гидрографической службой КЧФ [8 – 11]. Было установлено, что в поле крупномасштабной циркуляции регулярно наблюдаются периодические течения, обусловленные воздействием на толщу вод интенсивных барических образований. Авторами упомянутых работ показано, что векторы этих течений совершают полный оборот по часовой стрелке за инерционный период, величина которого зависит от широты места и составляет в среднем 17 – 18 ч (т.е. установлен инерционный характер этих течений). На основе обработки материалов, полученных по программе СКОИЧ, был проверен механизм образования вихрей синоптического масштаба и показано, что в моменты усиления циклонической активности над всей акваторией моря на отдельных участках ОЧТ могут возникать критические вертикальные сдвиги скорости, приводящие к гидродинамической неустойчивости и возникновению меандров и вихрей с пространственными размерами до 150 км и фазовыми скоростями 10 – 15 см/с [10]. По мнению этих же авторов, синоптические вихри являются внешними источниками, которые снабжают энергией инерционные колебания [11].

Следующий этап в изучении пространственно-временной изменчивости течений ЧМ начался с внедрением в практику океанологических исследований спутниковых методов. Так, в статье [12] путем ассимиляции данных альтиметрических измерений за 1992 – 1999 гг. было показано, что «мгновенные» поля течений ЧМ представляют собой суперпозицию ОЧТ, его меандров и вихревых структур различного типа. Этот результат неоднократно подтверждался данными спутниковых снимков. В работе [13] проведена систематизация снимков поверхности ЧМ в оптическом и инфракрасном диапазонах за период 2004 – 2008 гг. и предложена генетическая классификация вихревых образований.

Внедрение дрейферных измерений в практику океанологических исследований дало возможность повысить статистическую обеспеченность оценок характеристик вихревых структур. Для ЧМ такие оценки (включая лагранжевы характеристики вихрей и коэффициенты горизонтального турбулентного обмена) по методике из работы [14] были получены в 2003 – 2005 гг. [15, 16]. Несколько позже эти оценки были подвергнуты сомнению. Так, показав, что степень достоверности

лагранжевых оценок сильно зависит от длины реализации, автор работ [17, 18] выполнил более обоснованные расчеты коэффициентов горизонтального турбулентного обмена [18]. Однако эти оценки также требуют дальнейшего уточнения, по крайней мере по следующим двум причинам.

1. Дрифтерные данные содержат две погрешности. Одна – обусловлена неравномерностью интервалов времени между наблюдениями, другая – является собственно погрешностью метода измерения координат. Рассматриваемые ниже траектории дрейфтеров воспроизведены главным образом по результатам измерений координат доплеровским методом с использованием спутниковой системы определения координат *Argos*. Поскольку погрешности наблюдений, полученные этим методом, зависят от условий измерения, каждый принятый отсчет координат дрейфтера сопровождается информацией о возможном диапазоне неопределенности измерений – классе наблюдения. Первому классу соответствует погрешность ± 1000 м, второму – ± 350 м, третьему – ± 150 м. Указанные факторы являются причиной того, что траектории дрейфтеров, построенные по линейно интерполированным данным (что было сделано в работах [15 – 18]), не вполне адекватно отражают реальный дрейф. Вместе с тем в настоящее время уже разработана методика, позволяющая получить траекторию дрейфтера, достаточно близкую к реальной, а следовательно, и существенно повышающая достоверность лагранжевых оценок [19].

2. Визуальный анализ траекторий запущенных дрейфтеров показывает, что далеко не все они фиксировали вихри синоптических масштабов. Большая их часть перемещалась в поле ОЧТ без видимых синоптических флуктуаций. 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 репрезентативные статистически обеспеченные оценки параметров синоптических вихревых структур, а также инерционных движений, наблюдаемых в поле ОЧТ.

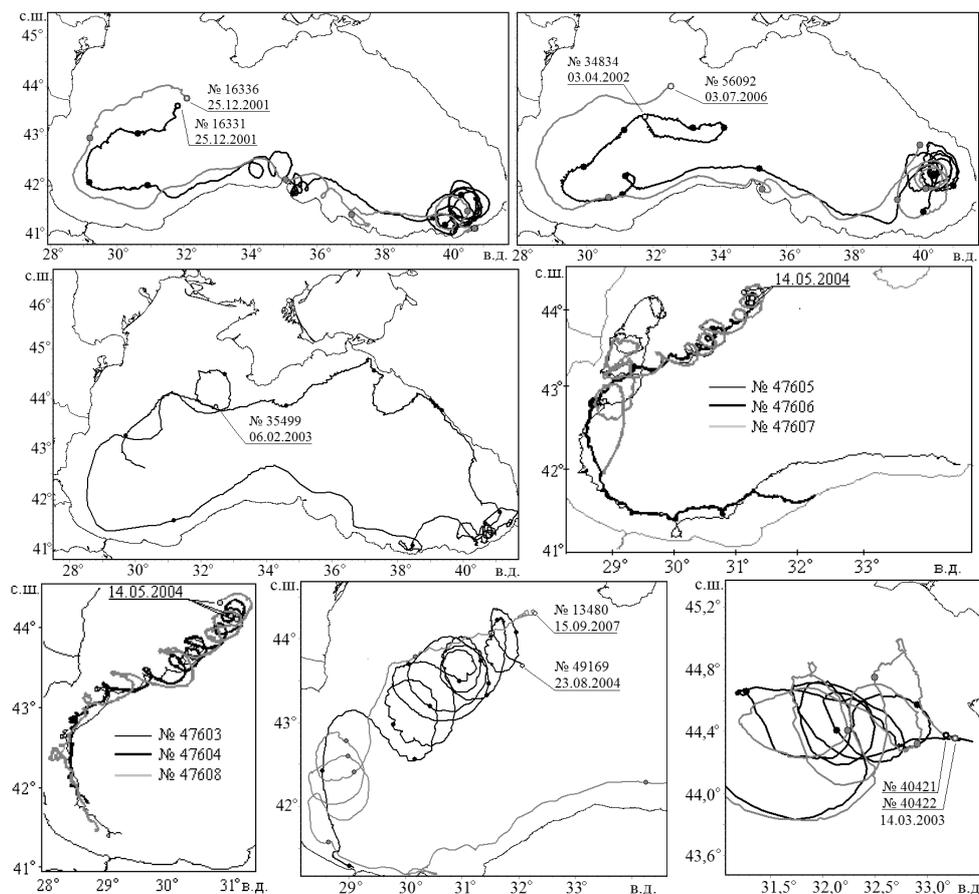
Использованные материалы, методика исследования и результаты

Общая характеристика использованных данных и методика разделения средней и флуктуационной компонент вектора. В работе использованы данные лишь тех дрейфтеров, которые зарегистрировали вихри синоптических масштабов. Это имело место главным образом в западной и восточной частях моря в областях свала глубин, а также материкового склона, заключенного между изобатами 1000 и 2000 м, с уклонами дна порядка $0,5^\circ$. Из 88 пусков дрейфтеров за период с 2001 по 2007 гг. было отслежено 16 таких траекторий (рис. 1).

В соответствии с паспортными данными погрешность наблюдений дрейфтеров, рассматриваемых в настоящей работе (за исключением дрейфтера № 13480), в среднем относится ко второму классу и составляет 150 – 350 м. Погрешность наблюдений дрейфтера № 13480 – ≤ 50 м.

Обработка данных заключалась в следующем. Вначале восстанавливались траектории дрейфующих буев по координатам, полученным доплеровским методом с помощью системы спутниковой связи *Argos*. Затем производилось их разделение на компоненты, отражающие средний перенос и флуктуационную составляющую. Наконец, последняя, в свою оче-

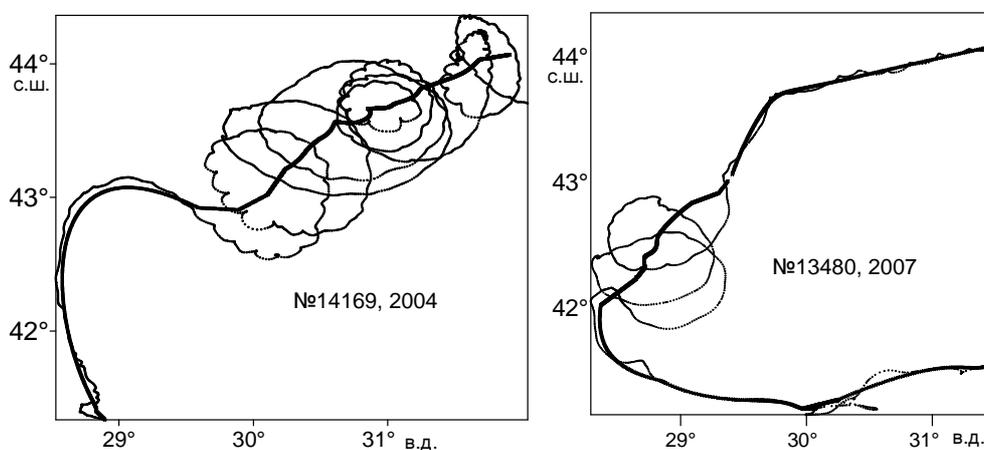
редь, разделялась на составляющие, описывающие синоптическую и инерционную компоненты.



Р и с. 1. Траектории дрейфтеров, зафиксировавших вихри синоптического масштаба

Первая задача решалась на основе методики, изложенной в работе [19]. 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. В результате интерполяции и сглаживания были получены массивы координат дрейфа $\{\varphi_i, \lambda_i\}$ с разрешением в 1 ч и среднеквадратическим отклонением на 25% меньше, чем при линейной интерполяции данных. Таким образом, ежечасная погрешность позиционирования дрейфтера не превышала 250 м.

Для определения среднего переноса использовался комбинированный подход, который заключался в следующем. На тех участках треков, где не наблюдалось очевидного присутствия вихревой компоненты синоптического масштаба, средний перенос определялся путем полиномиальной аппроксимации массивов $\{\varphi_i, \lambda_i\}$, где $i = 1, 2, \dots$ – порядковый номер часа дрейфа. Формальным критерием при выборе степени аппроксимирующего полинома служило его значение, при котором имела место «стабилизация» величины остаточной дисперсии. На участках же треков, где доминировала вихревая компонента синоптического масштаба, для определения среднего переноса соответствующие отрезки рядов $\{\varphi_i, \lambda_i\}$ подвергались текущему осреднению. Причем для каждого такого отрезка параметр осреднения подбирался индивидуально. В результате таких операций получались массивы $\{\bar{\varphi}_i, \bar{\lambda}_i\}$, отражающие перемещение буя в направлении его генерального дрейфа на каждом из обработанных отрезков. Затем эти отрезки «сшивались» с соблюдением требований непрерывности ряда, отражающего генеральный дрейф буя на всем протяжении его перемещения. Типичный пример построения осредненного трека показан на рис. 2.

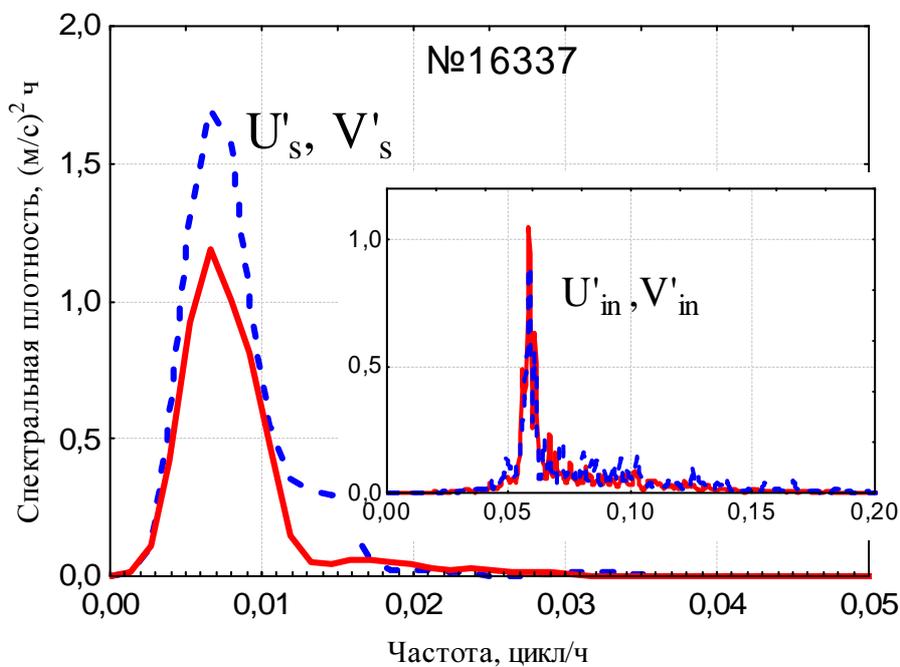
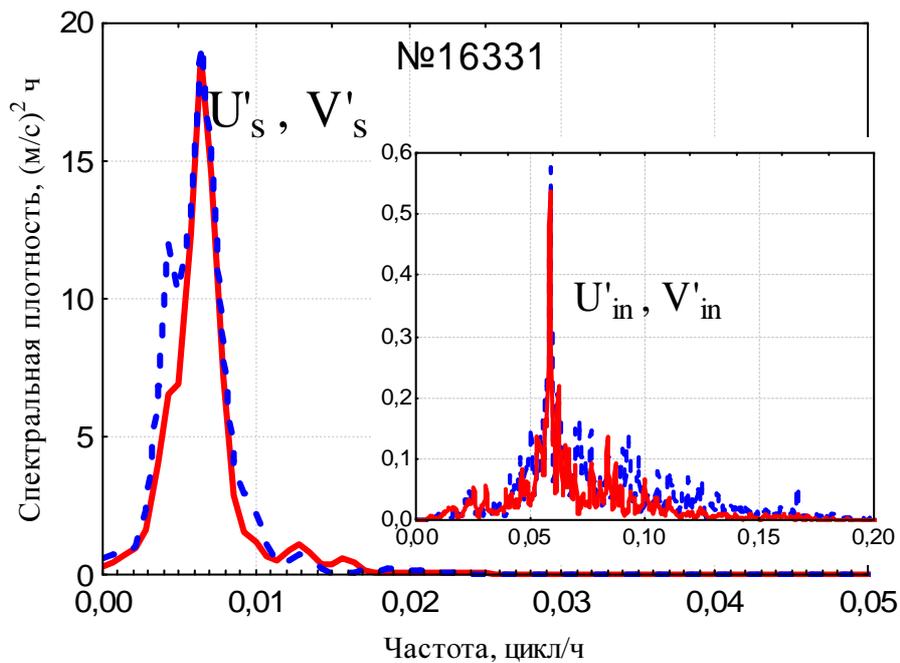


Р и с. 2. Реальные траектории дрейфтеров (тонкие линии) и осредненные треки (утолщенные линии)

Далее на основе рядов $\{\varphi_i, \lambda_i\}$ и $\{\bar{\varphi}_i, \bar{\lambda}_i\}$ рассматривались ряды составляющих скорости течения $\{U_i, V_i\}$ и $\{\bar{U}_i, \bar{V}_i\}$, отражающие лагранжево распределение реально зарегистрированного переноса и переноса в направлении общего смещения буя соответственно. Затем, вычислив

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

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



Р и с. 3. Спектральный состав флуктуаций разделенных рядов $\{U'_s, V'_s\}$ и $\{U'_{in}, V'_{in}\}$ по данным дрейфтеров № 16331 и 16337 (сплошная кривая – зональная компонента скорости, штриховая – меридиональная компонента)

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/ч и вблизи инерционной частоты 0,06 цикл/ч. 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 текущего 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. 3, убедительно показывают, что, используя описанную выше процедуру, удастся 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 траекторий дрейфтеров.

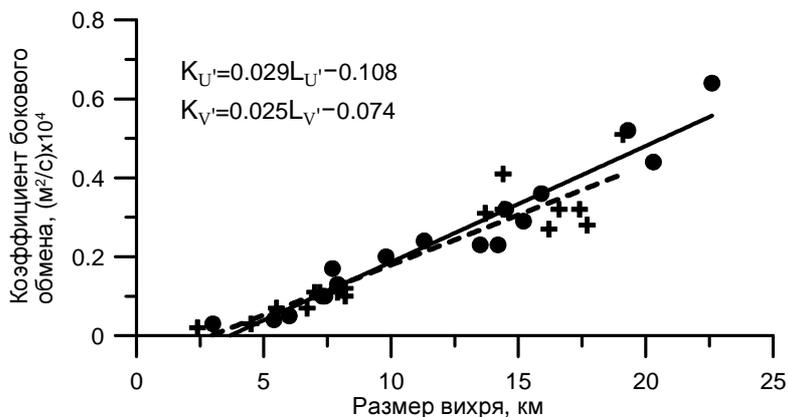
Характеристики синоптических вихрей и оценка коэффициентов горизонтального турбулентного обмена. Для дальнейших вычислений использовались лишь фрагменты рядов, на которых явно выделялись синоптические флуктуации (см. рис. 1). Так, например, из траектории дрейфтера № 16331 было выделено два фрагмента: один – отражающий дрейф в районе, прилегающем к северному побережью Турции (68 – 88-е сут дрейфа), другой – отражающий антициклоническое обращение буя в юго-восточном секторе моря (последние 60 сут). Для каждого такого фрагмента последовательно со сдвигом в 1 ч формировались ряды $\{U'_s, V'_s\}$ длительностью 200 ч, 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 работами [15 – 18], расчет производился в соответствии с соотношениями теории Тэйлора [14], согласно которой коэффициент горизонтального турбулентного обмена выражается формулой

$$K_{U'_s} = \overline{U'^2_s} T_{U'_s},$$

где $\overline{U'^2_s}$ – дисперсия пульсаций лагранжевой скорости, описываемая синоптической компонентой изменчивости, а $T_{U'_s}$ – интегральный лагранжев масштаб времени, вычисляемый по формуле $T_{U'_s} = \int_0^{\tau_0} R_{U'_s}(\tau) d\tau$. Здесь $R_{U'_s}(\tau)$ – нормированная автокорреляционная функция $R_{U'_s}(\tau) = \overline{U'_s(t) U'_s(t + \tau)} / \overline{U'^2_s}$ при сдвиге τ , а τ_0 – значение сдвига, при котором функция $R_{U'_s}(\tau)$ впервые переходит через нуль. Интегральные лагранжевы масштабы скорости и длины рассчитываются по формулам $\sigma_{U'_s} = (\overline{U'^2_s})^{1/2}$, $L_{U'_s} = \sigma_{U'_s} T_{U'_s}$ соответственно.

Для компоненты скорости V'_s формулы расчета аналогичны. Реальные пространственно-временные характеристики вихрей (горизонтальные размеры и периоды полного орбитального обращения) оценивались путем анализа годографов, описываемых синоптической компонентой скорости течений, и соответствующих спектров.

Лагранжевы характеристики, вычисленные для каждого конкретного трека по текущим 200-часовым отрезкам $\{U'_s, V'_s\}$, подвержены существенным вариациям. Причем даже при их осреднении (см. табл. 1) среднеквадратические отклонения флуктуаций зачастую превышают половину значения осредненной величины. Поэтому в случаях, когда один и тот же вихрь описывался более чем двумя дрейфтерами, лагранжевы характеристики подвергались общему статистическому осреднению (табл. 2)*. Необходимо отметить также, что факт значительной изменчивости лагранжевых оценок, получаемых по 200-часовым отрезкам $\{U'_s, V'_s\}$, следует особенно учитывать при расчете коэффициентов горизонтального обмена. Поэтому 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. 1. Высокие значения взаимной корреляции лагранжевых масштабов длины и коэффициентов горизонтального обмена (0,97 и 0,93 для зональной и меридиональной компонент скорости течения соответственно) убедительно показывают, что наиболее значимым фактором, определяющим характер горизонтального обмена, является горизонтальный размер вихря. Регрессионные соотношения, отражающие степень обусловленности коэффициентов бокового обмена горизонтальными размерами вихря, приведены на рис. 4.



Р и с. 4. Зависимость коэффициентов бокового обмена от горизонтальных размеров вихря для зональной (жирные точки и сплошная линия) и меридиональной (крестики и штриховая линия) компонент скорости течения

* В дальнейшем изложении под словосочетанием «лагранжев масштаб времени / длины / и т.д.» следует понимать статистически осредненную величину.

Т а б л и ц а 1

**Статистически осредненные лагранжевы характеристики
синоптических вихревых структур по данным различных дрейфтеров**

Номер дрейфтера, вихрь	Масштабы						Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена, (м ² /с)·10 ⁴	
	времени, ч		длины, км		скорости, м/с			
	$\langle T_{U_s} \rangle$	$\langle T_{V_s} \rangle$	$\langle L_{U_s} \rangle$	$\langle L_{V_s} \rangle$	$\langle \sigma_{U_s} \rangle$	$\langle \sigma_{V_s} \rangle$	$\langle K_{U_s} \rangle$	$\langle K_{V_s} \rangle$
16331, А	10,2± 2,0	14,2± 2,3	7,7± 2,9	14,4± 2,7	0,20± 0,04	0,28± 0,02	0,17± 0,10	0,41± 0,09
16331, Б	23,0± 5,1	22,1± 5,1	22,6± 6,7	19,1± 6,9	0,27± 0,06	0,24± 0,08	0,64± 0,27	0,51± 0,34
16336, Б	26,4± 4,2	26,4± 3,1	20,3± 2,5	17,4± 2,6	0,22± 0,01	0,19± 0,01	0,44± 0,04	0,32± 0,06
34834, Б	24,1± 6,7	24,1± 6,5	13,5± 5,9	17,7± 6,6	0,15± 0,05	0,17± 0,06	0,23± 0,15	0,28± 0,19
35499, Са	19,4± 5,3	18,3± 3,6	14,5± 7,4	14,4± 4,5	0,20± 0,05	0,21± 0,04	0,32± 0,24	0,32± 0,14
40420, Сц	21,9± 1,4	23,4± 5,0	12,0± 0,3	14,9± 2,1	0,15± 0,01	0,18± 0,01	0,19± 0,01	0,27± 0,02
40421, Са	20,4± 4,9	19,0± 4,6	19,3± 5,8	13,7± 2,9	0,26± 0,04	0,21± 0,07	0,52± 0,22	0,31± 0,15
40422, Сц	14,2± 0,8	13,6± 0,8	4,8± 0,4	4,5± 0,2	0,09± 0,01	0,09± 0,004	0,04± 0,006	0,04± 0,003
40422, Са	8,3± 1,4	9,2± 0,7	2,5± 1,2	1,8± 0,3	0,08± 0,03	0,05± 0,005	0,02± 0,01	0,01± 0,002
40426, Сц	16,6± 5,1	16,9± 5,4	7,3± 4,7	8,2± 4,0	0,11± 0,04	0,14± 0,04	0,10± 0,11	0,12± 0,10
40428, Сц	5,1± 0,6	6,7± 0,9	0,4± 0,1	0,6± 0,2	0,02± 0,002	0,02± 0,005	0,001± 0,001	0,001± 0,001
40428, Са	7,2± 0,6	6,0± 1,1	1,8± 0,3	1,5± 0,2	0,07± 0,01	0,07± 0,003	0,01± 0,003	0,01± 0,001
47603, УС	13,2± 2,9	12,5± 3,5	7,9± 2,5	5,5± 1,9	0,16± 0,03	0,12± 0,03	0,13± 0,06	0,07± 0,03
47604, УС	13,3± 1,1	12,6± 1,1	9,8± 0,9	7,0± 0,8	0,20± 0,01	0,15± 0,01	0,20± 0,03	0,11± 0,01
47605, УС	19,0± 7,2	19,0± 6,8	7,4± 3,8	6,7± 2,7	0,11± 0,08	0,10± 0,04	0,10± 0,09	0,07± 0,04
47607, УС	15,2± 2,6	14,2± 2,7	11,3± 1,7	7,2± 1,1	0,21± 0,02	0,14± 0,03	0,24± 0,04	0,11± 0,03
47608, УС	20,1± 5,5	16,4± 4,5	15,9± 5,3	7,9± 2,0	0,22± 0,04	0,14± 0,03	0,36± 0,16	0,11± 0,04
49169, Ск	26,9± 6,8	28,4± 5,7	14,2± 7,4	16,2± 6,6	0,14± 0,05	0,15± 0,04	0,23± 0,18	0,27± 0,17
13480, Ск	24,2± 6,7	25,1± 6,3	15,2± 6,0	16,6± 4,9	0,17± 0,06	0,18± 0,04	0,29± 0,16	0,32± 0,14

П р и м е ч а н и е . Обозначения вихрей: А – Анатолийский, Б – Батумский, Са – Севастопольский антициклонический, Сц – Севастопольский циклонический, УС – условно Севастопольский, Ск – склоновый.
ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2013, № 2

Т а б л и ц а 2

Статистически осредненные лагранжевы характеристики вихрей

Вихрь	Масштабы						Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена, (м ² /с)·10 ⁴		Количество 200-часовых отрезков
	времени, ч		длины, км		скорости, м/с		$\langle K_{U_s} \rangle$	$\langle K_{V_s} \rangle$	
	$\langle T_{U_s} \rangle$	$\langle T_{V_s} \rangle$	$\langle L_{U_s} \rangle$	$\langle L_{V_s} \rangle$	$\langle \sigma_{U_s} \rangle$	$\langle \sigma_{V_s} \rangle$			
Б	23,6	23,2	18,3	17,0	0,21	0,20	0,44	0,39	2469
С	19,4	18,3	14,5	14,4	0,20	0,21	0,32	0,32	281
УС	17,0	16,1	9,6	6,8	0,16	0,12	0,18	0,09	3909
Ск	26,4	27,8	14,4	16,2	0,14	0,16	0,24	0,28	2723
А	13,1	16,1	7,8	12,7	0,18	0,24	0,15	0,33	356

П р и м е ч а н и е . Обозначения вихрей: Б – Батумский, С – Севастопольский, УС – условно Севастопольский, Ск – склоновый, А – Анатолийский.

Т а б л и ц а 3

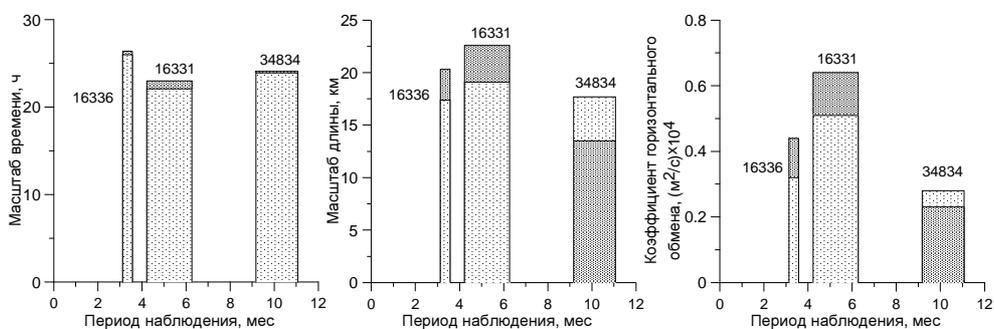
Корреляционные матрицы для зональной и меридиональной компонент скорости, вычисленные по данным табл. 1

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	0,67	0,16	0,49
$\langle L_{U_s} \rangle$	0,67	1,00	0,82	0,97
$\langle \sigma_{U_s} \rangle$	0,16	0,82	1,00	0,89
$\langle K_{U_s} \rangle$	0,49	0,97	0,89	1,00

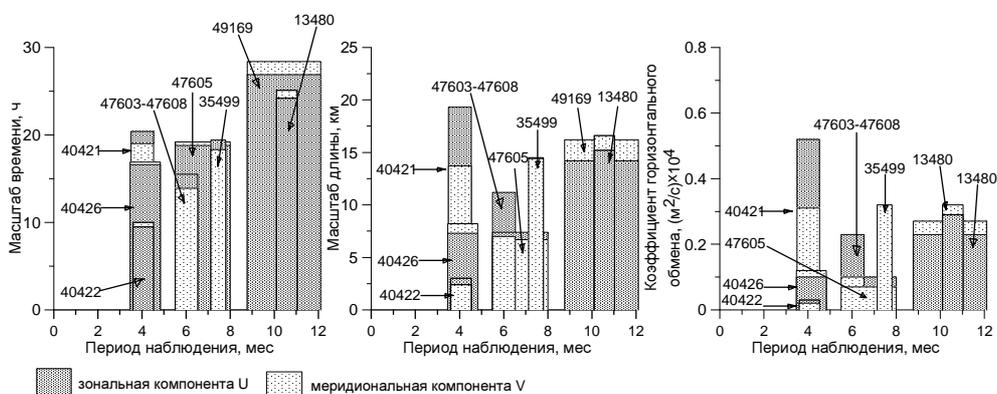
Параметр	$\langle T_{V_s} \rangle$	$\langle L_{V_s} \rangle$	$\langle \sigma_{V_s} \rangle$	$\langle K_{V_s} \rangle$
$\langle T_{V_s} \rangle$	1,00	0,73	0,22	0,49
$\langle L_{V_s} \rangle$	0,73	1,00	0,79	0,93
$\langle \sigma_{V_s} \rangle$	0,22	0,79	1,00	0,91
$\langle K_{V_s} \rangle$	0,49	0,93	0,91	1,00

Наибольшие значения лагранжевых характеристик получены в юго-восточной части ЧМ в области Батумского антициклона (табл. 2, рис. 5, а). Антициклонические вихри синоптического масштаба здесь были зарегистрированы дрефтерами № 16336 (в марте 2002 г.), № 16331 (в апреле – мае 2002 г.) и № 34834 (в сентябре – октябре 2002 г.). Согласно работам [20, 21], в этот период года ОЧТ отворачивает от побережья в открытое море по направлению к м. Пицунда. Имеются основания полагать, что все указанные дрефтеры зафиксировали проявление одного и того же антициклонического вихря (Батумского), действующего здесь обычно в теплый период года и перемещавшегося во время наблюдений от юго-западного сектора региона к северо-восточному. Заметим, что, согласно результатам обработки альтиметрических данных за период 1992 – 1999 гг. [12], общая

продолжительность существования антициклонической циркуляции в области этого вихря составляет ≈ 210 сут. Судя же по нашим результатам (рис. 5, а), время жизни этой динамической структуры составляет не менее 240 сут. Лагранжевы масштабы времени ≈ 1 сут, длины – от 17 до 18 км. Значения коэффициентов горизонтального обмена, вычисленные для этого периода наблюдений, составляли $0,44 \cdot 10^4$ м²/с для компоненты U'_s и $0,39 \cdot 10^4$ м²/с для компоненты V'_s (табл. 2). Представление о периодах полного орбитального обращения вод, а также о реальных пространственных размерах вихря дают рис. 6 – 10. Судя по приведенным на рис. 6 спектрам, время полного орбитального обращения вод в Батумском вихре менялось от ≈ 6 до 16 – 20 сут в начальный и конечный периоды его существования соответственно. Пространственные масштабы круговых петель, описываемых дрейферами, менялись от ≈ 50 до 80 – 100 км. Это, по всей видимости, зависело от того, на каком радиальном расстоянии от центральной части вихря оказывался дрейфер в тот или иной момент дрейфа. Поэтому истинные размеры вихря следует оценивать, очевидно, по максимальным размерам круговых петель.

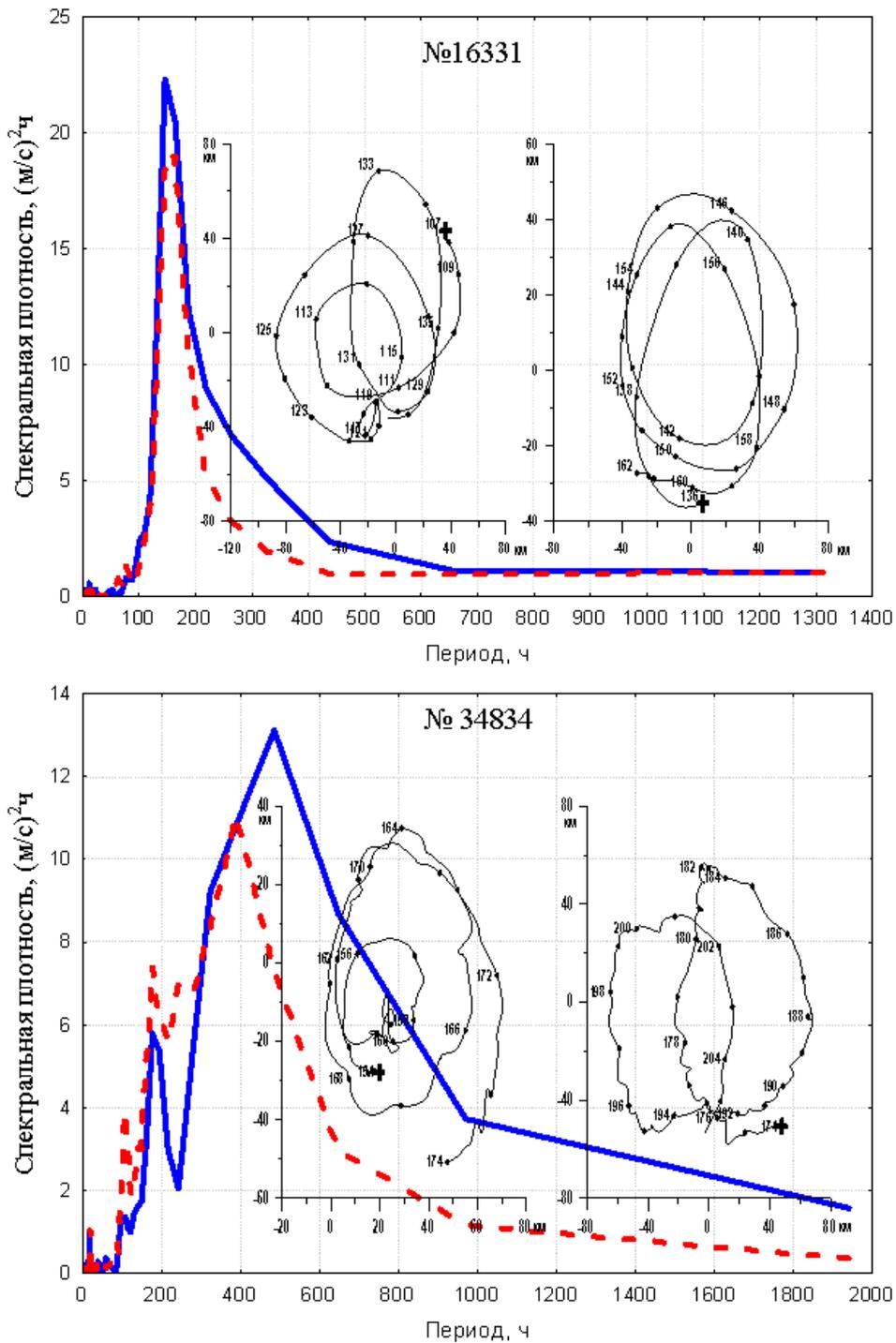


а



б

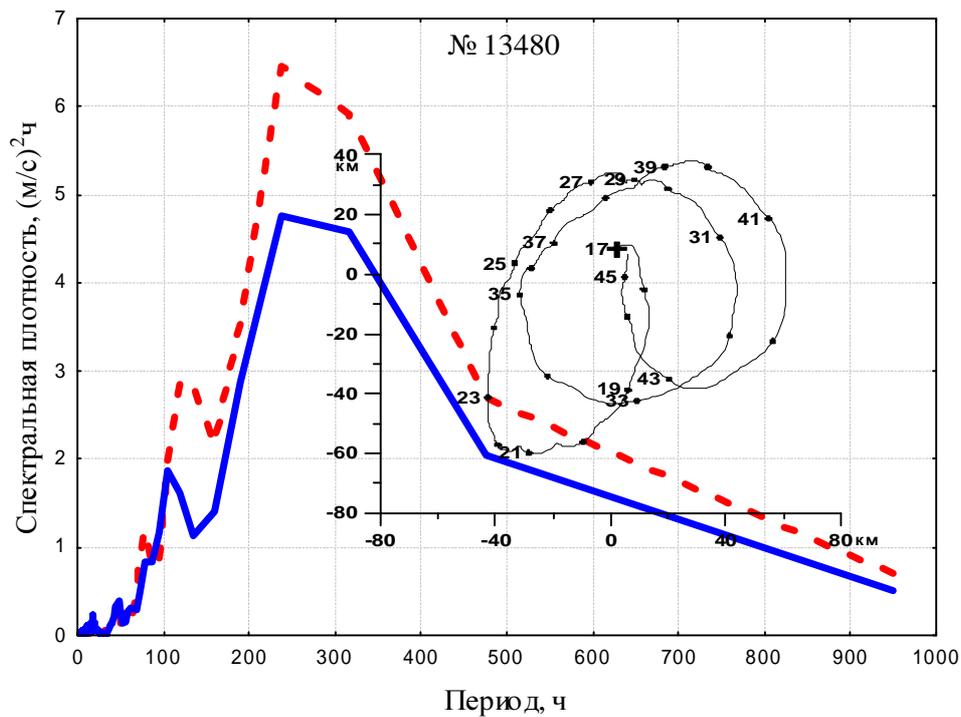
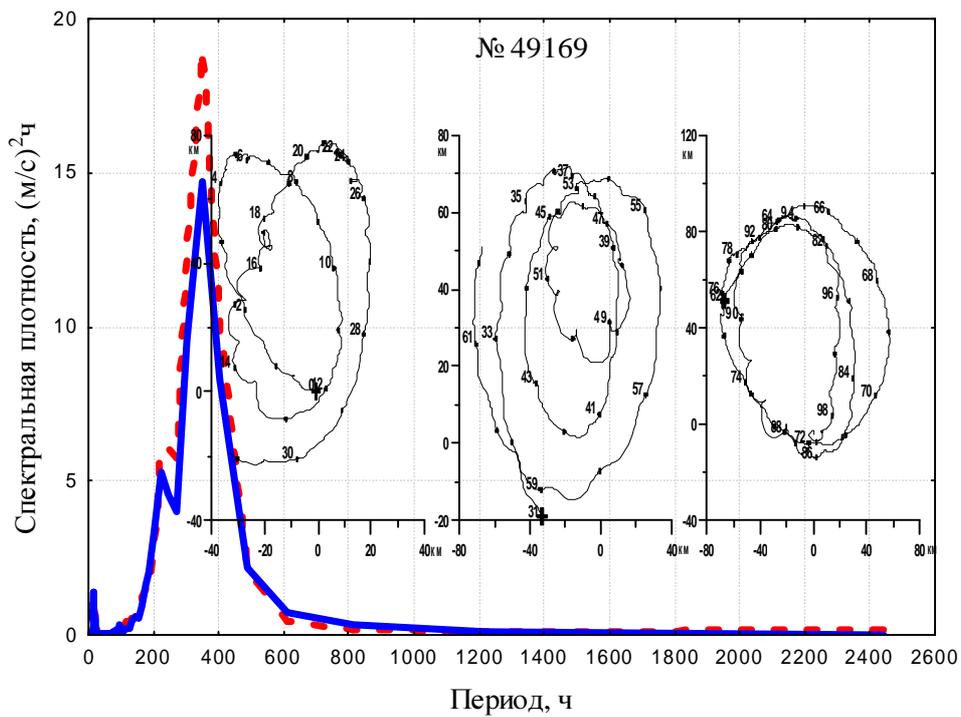
Р и с. 5. Лагранжевы характеристики вихрей в юго-восточном (а) и западном (б) секторах Черного моря (цифры – номера дрейферов)



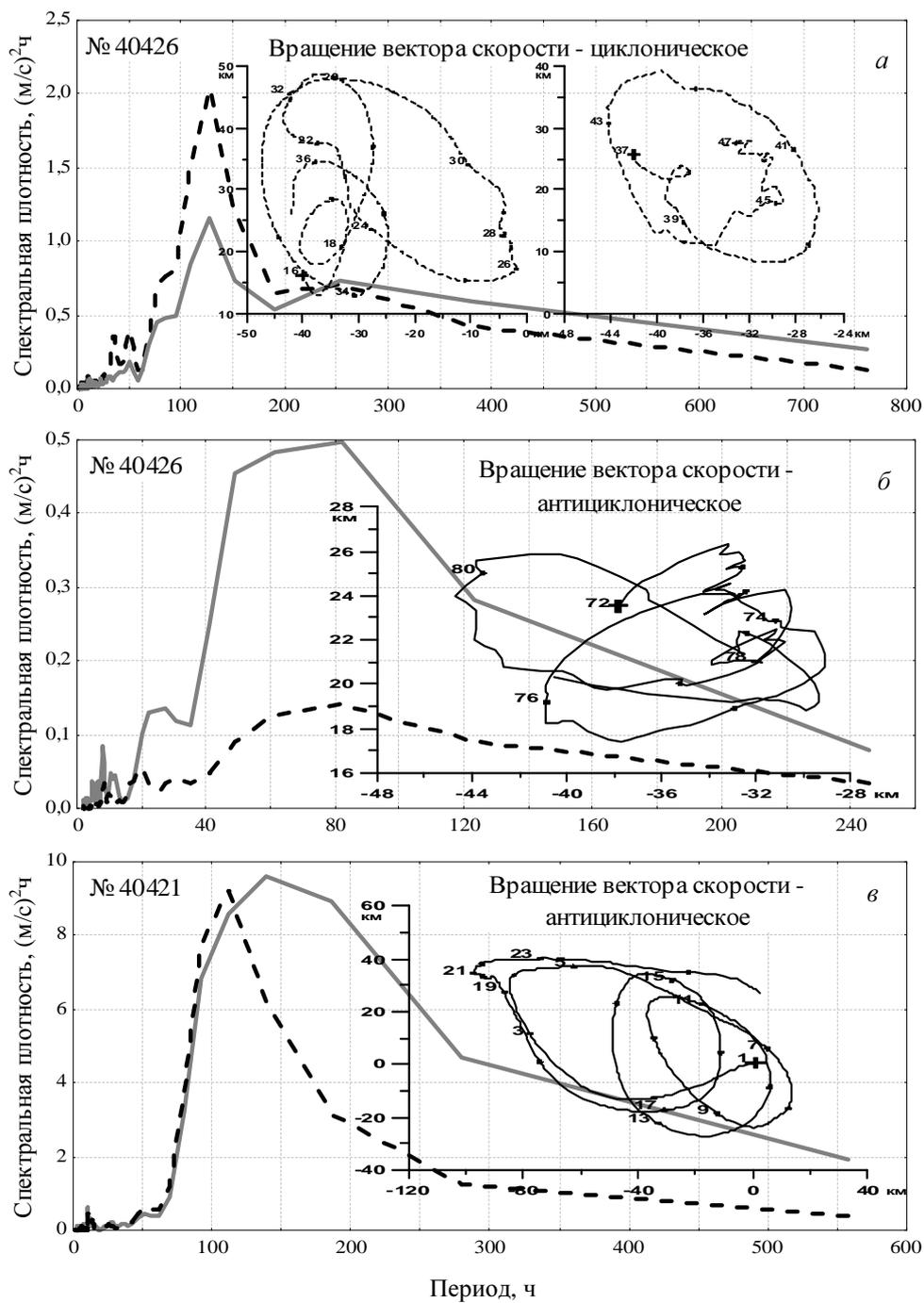
В отличие от восточной части моря, вихревые структуры в западной части характеризовались заметным разнообразием. В осенний период 2004 и 2007 гг. в западной части ЧМ дрейфтерами № 49169 и 13480 были зафиксированы антициклонические вихри синоптического масштаба, наблюдавшиеся в мористой части материкового склона с глубинами 1000 – 2000 м. Лагранжевы характеристики этих вихрей были близки к характеристикам Батумского вихря (табл. 2, рис. 5, б). Зональный и меридиональный лагранжевы масштабы длины составляли 14,4 и 16,2 км, а временной масштаб – 26,4 и 27,8 ч соответственно. Заметим, что ОЧТ в этот период года ослаблено (по сравнению с весной), а его ось сдвинута в сторону открытой части моря [20, 21], что приводит к возникновению антициклонических вихрей значительного пространственного масштаба. В частности, осенью 2004 г. над материковым склоном такой вихрь рельефно выделяется на картах динамической топографии, построенных по данным спутниковой альтиметрии в работе [22]. Судя же по годографам, построенным по данным дрейфтера № 49169, а также по соответствующему спектру (рис. 7), горизонтальные размеры вихря варьировали от 40 – 50 до 100 км, а время полного орбитального обращения вод составляло ≈ 15 сут. Близкие характеристики получены и для вихревой структуры, перемещавшейся над материковым склоном осенью 2007 г. в юго-западном секторе ЧМ (дрейфтер № 13480). Горизонтальный размер вихря колебался от 60 до 80 км, а время полного орбитального обращения вод составляло 10 – 12 сут.

Следует обратить внимание на генетическое сходство динамических условий формирования и близость кинематических характеристик Батумского вихря и вихрей, зарегистрированных дрейфтерами № 49169 и 13480. Во всех случаях имеют место отход основной струи ОЧТ в сторону открытого моря [20 – 22] и расширение пространства между ОЧТ и свалом глубин, что сопровождается возникновением антициклонической циркуляции над материковым склоном. На наш взгляд, это дает основание классифицировать упоминаемые образования как склоновые вихри.

В области так называемого Севастопольского вихря (С) весной 2003 г. практически одновременно была запущена серия дрейфтеров (дрейфтеры № 40420 – 40428). Известно, что эта область характеризуется спорадической гидродинамической неустойчивостью [12], которая проявляется в генерации вихревых структур разного типа (грибовидные течения, вихревые диполи, антициклонические образования синоптического масштаба [13]). В период перемещения дрейфтеров на широте юго-западной оконечности Крымского п-ова их траектории характеризовались сильной зашумленностью. Годографы, описываемые синоптической компонентой вектора скорости, указывают на то, что весной 2003 г. циркуляция в рассматриваемом районе моря характеризовалась действием зонально ориентированного вихревого диполя (рис. 8).



Р и с. 7. Спектры флуктуаций и годографы синоптической компоненты скорости течения для вихрей, наблюдавшихся над материковым склоном в западной части Черного моря (пояснения те же, что для рис. 6)

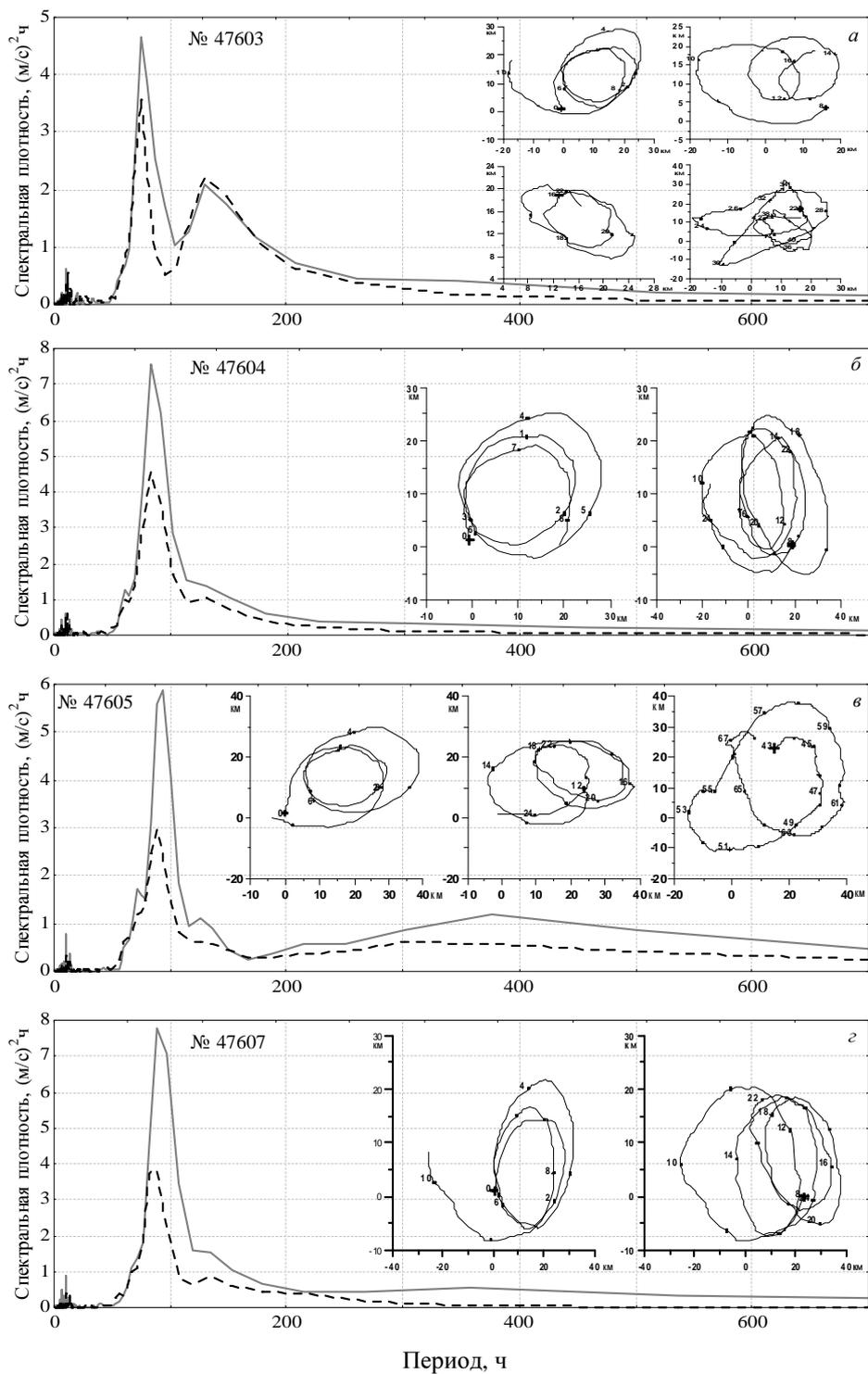


Р и с. 8. Спектры флуктуаций и годографы синоптической компоненты скорости течения, полученные для циклонической и антициклонической частей вихревого диполя вблизи юго-западной оконечности Крымского п-ова (пояснения те же, что для рис. 6)

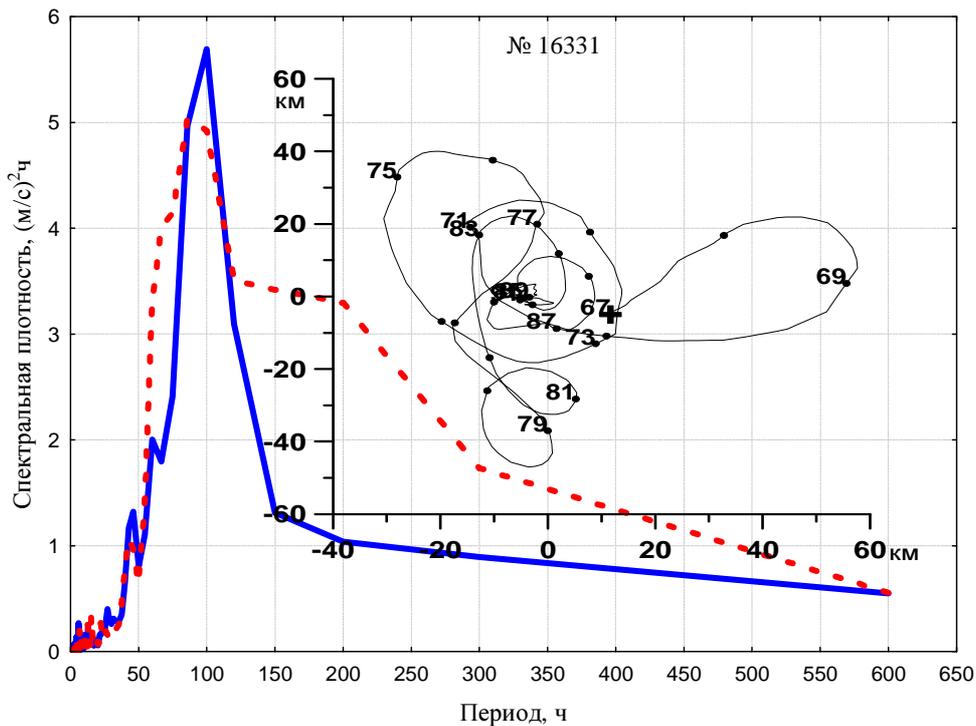
Так, в начале дрейфа некоторыми дрейфтерами в течение нескольких первых суток (от 3 до 10) была зафиксирована лишь восточная (циклоническая) часть диполя. Некоторые же дрейфтеры попеременно захватывались противоположными частями диполя, описывая при этом сложное чередование фаз циклонического и антициклонического обращения вод. Например, на начальных участках дрейфа дрейфтер № 40426 приблизительно в течение 30 сут фиксировал циклоническую циркуляцию с ≈ 5 -суточным орбитальным обращением вод в восточной части диполя (рис. 8, а). Затем он был захвачен противоположной (западной) частью диполя, где фиксировалось уже антициклоническое обращение вод с периодом от 3 до 6 сут (рис. 8, б). Вместе с тем один из дрейфтеров (№ 40421) практически сразу же после запуска был вовлечен в антициклоническую циркуляцию западного сектора диполя (рис. 8, в), в котором находился в течение первых 24 сут дрейфа. Пространственные размеры вихрей, образующих диполь, варьировали от 20 до 40 км. Летом этого же 2003 г. в рассматриваемой области дрейфтером № 35499 был зарегистрирован антициклонический вихрь с пространственными размерами 90 – 100 км и с периодом орбитального обращения вод около 15 сут (рисунок не приводится).

В начале лета 2004 г. серией дрейфтеров (№ 47603 – 47608) был зафиксирован вихрь, смещавшийся в поле ОЧТ в юго-западном направлении вдоль свала глубин. Сообразуясь с местом проявления, мы называем его «условно Севастопольским» (УС). Вихрь характеризовался меньшими размерами по сравнению с размерами вихрей, классифицируемых нами как склоновые. Его лагранжевы характеристики составили 7 – 10 км (для масштаба длины) и 16 – 17 ч (для масштаба времени), а коэффициенты бокового обмена – $(0,09 – 0,18) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ (табл. 2). Пространственные размеры вихря составляли 30 – 40 км, а периоды полного орбитального обращения вод – около 4 сут (рис. 9). Анализ карт динамической топографии, построенных для рассматриваемого периода по данным спутниковой альтиметрии [22], показывает, что своим формированием описываемый вихрь обязан поперечному сдвигу скорости в области стыка основной струи ОЧТ и южной периферии динамической ложбины, наблюдавшейся в юго-восточной части северо-западного шельфа.

Наряду с рассмотренными синоптическими образованиями, номенклатура вихрей ЧМ, принятая на основе спутниковых данных [12, 13], включает антициклонические вихри Анатолийского побережья, возникающие из-за неустойчивости ОЧТ при обтекании им особенностей рельефа со сложной конфигурацией. Цепь таких вихрей была зафиксирована дрейфтерами № 16331 (рис. 10) и № 16336 в марте 2001 г. на участке дрейфа от 34 до 36,5° в.д. (см. рис.1). Лагранжевы характеристики вихрей составили 7,8 – 12,7 км для масштаба длины и 13,6 – 16,1 ч для временного масштаба. Пространственные масштабы вихрей менялись от ≈ 60 км в районе Синопского побережья до 10 – 20 км восточнее Синопа. Период орбитального обращения вод составлял 3 – 4 сут. Коэффициент горизонтального турбулентного обмена оценивается в $(0,15 – 0,33) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$.



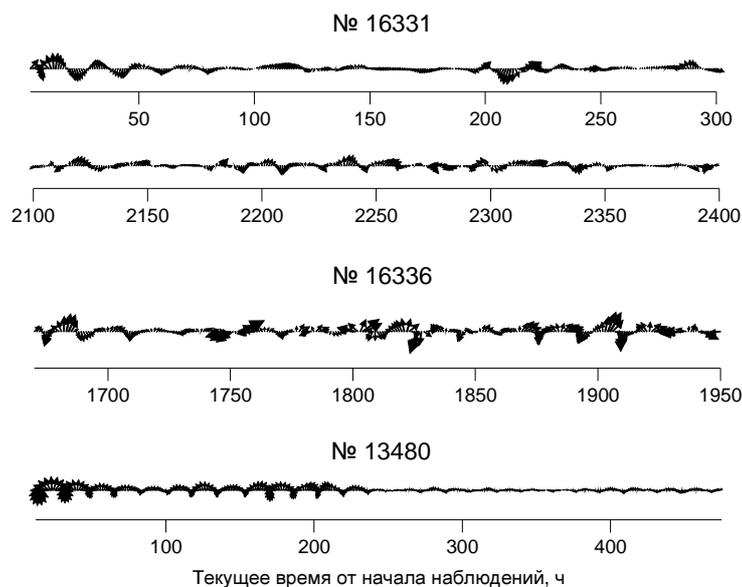
Р и с. 9. Спектры флуктуаций и годографы синоптической компоненты скорости течения для вихрей, наблюдавшихся в западном секторе моря над свалом глубин (пояснения те же, что для рис. 6)



Р и с. 10. Спектры флуктуаций и годографы синоптической компоненты скорости течения для вихрей, наблюдавшихся в районе Анатолийского побережья (пояснения те же, что для рис. 6)

Имеющаяся обеспеченность данными дрейферных наблюдений не позволяет, к сожалению, надежно оценить сезонную изменчивость вихревых характеристик. Вместе с тем полученные данные не противоречат выводам работы [17], указывающим на активизацию обменных процессов весной и осенью (рис. 5). Отметим, что величины коэффициентов горизонтального турбулентного обмена, рассчитанные нами для весенних месяцев, вдвое выше, чем приведенные в работе [17]. Это объясняется исключением из наших расчетов участков дрейфа, на которых структуры синоптического масштаба не фиксировались.

Статистические характеристики инерционных течений. К одному из постоянно действующих факторов, которые необходимо учитывать при изучении динамики течений (и в частности ОЧТ), следует отнести инерционные колебания скорости. Анализ полученных в настоящей работе результатов показывает, что почти из любого фрагмента траектории дрейфа каждого из рассмотренных дрейферов можно выделить ряды $\{U'_{in}, V'_{in}\}$, отражающие флуктуации компонент скорости инерционного масштаба. Это хорошо видно на рис. 11, на котором приведены произвольно выбранные фрагменты анализируемых рядов.



Р и с. 11. Текущие ежечасные векторы инерционной компоненты скорости, вычисленные по данным рядов $\{U'_m, V'_m\}$

Оценку радиусов окружностей, описываемых векторами инерционных течений, можно получить исходя из того, что теоретический период инерционных колебаний составляет приблизительно 17 ч. Как видно из табл. 4, характерные орбитальные скорости и радиусы окружностей составляют 0,1 м/с и 1 – 1,5 км соответственно.

Т а б л и ц а 4

Характерные оценки параметров инерционных движений

Номер дрейфера	Орбитальные скорости, м/с	Радиусы орбит, км	Номер дрейфера	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

На основе дрейферных данных, полученных в 2001 – 2007 гг., в работе уточнены характеристики синоптических вихревых образований, формирующихся в результате неустойчивости ОЧТ, и параметры инерционных колебаний. Синоптические вихри регистрировались по траекториям дрейфа только 16 из 88 запущенных дрейферов и, главным образом, в юго-восточной, западной и южной частях ЧМ. Наибольшие значения осредненных лагранжевых характеристик получены для вихрей синоптического масштаба, наблюдаемых над материковым склоном юго-восточной части ЧМ (в области Батумского антициклона) и в западной части моря. Для них лагранжевы масштабы времени составляли ≈ 1 сут, длины – от 17 до 23 км, типичные величины коэффициентов горизонтального турбулентного обмена для компоненты $U'_s - 0,4 \cdot 10^4$ м²/с, а для компоненты $V'_s - 0,32 \cdot 10^4$ м²/с. Общая продолжительность существования квазистационарной антициклонической циркуляции в области Батумского вихря в период с марта по октябрь 2002 г. достигала 240 сут. Время полного орбитального обращения вод в области Батумского вихря по данным 2004 г. менялось от ≈ 6 до 16 – 20 сут в начальный и конечный периоды его существования соответственно. Пространственные масштабы круговых петель, описываемых дрейферами, варьировали от ≈ 50 до 80 – 100 км.

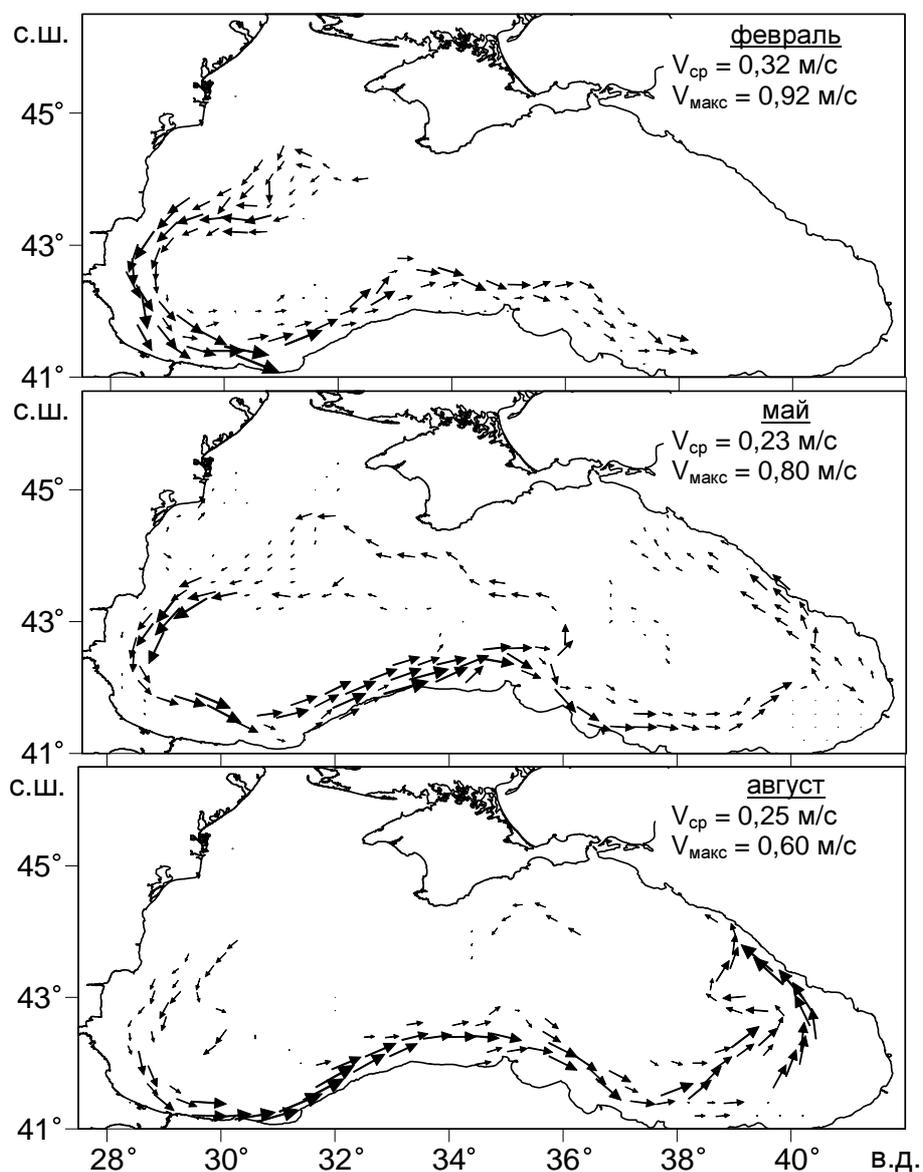
Антициклонический вихрь, наблюдавшийся в западной части ЧМ над кромкой шельфа, а также цепь вихрей у Анатолийского побережья характеризовались меньшими размерами и периодом орбитального обращения вод по сравнению с вихрями склонового происхождения. Пространственные размеры первого составляли 30 – 40 км, а периоды полного орбитального обращения – около 4 сут. Пространственные масштабы вихрей Анатолийского побережья менялись от ≈ 60 км в районе Синопского побережья до 10 – 20 км восточнее Синопа. Период орбитального обращения вод составлял 3 – 4 сут.

В отличие от синоптических вихревых структур, возникающих при определенных гидрофизических условиях в областях моря со специфическим рельефом дна, инерционные колебания в поле ОЧТ наблюдаются практически повсеместно. Характерные скорости орбитального переноса вод составляют 0,1 м/с, а радиус окружности, описываемой векторами инерционных течений, 1 – 1,5 км.

Приложение, добавленное при подготовке верстки

К огромному сожалению, для первого автора настоящей статьи Гафура Файзрахмановича Джиганшина эта публикация стала последней в его жизни. Он не дожидился нескольких месяцев до выхода ее в свет. Однако, несмотря на тяжелое заболевание, он продолжал работать по теме этой статьи до последних дней своей жизни. Главная цель, к достижению которой стремился Г.Ф. Джиганшин, состояла в выделении типичных сезонных и межгодовых вариаций ОЧТ по данным дрейферных измерений за период с 2000 по 2010 гг. На основе этих данных Г.Ф. Джиганшиным проведен анализ кинематической структуры ОЧТ для различных сезонов. Ему удалось подтвердить сложившееся представление об интенсификации ОЧТ в зимний период и его

ослаблении в летний (рисунок). Кинетическая энергия ОЧТ в приповерхностном слое изменяется в течение года больше чем на полпорядка. Вместе с тем из рисунка видно, что данных дрейферных наблюдений явно недостаточно для характеристики осредненного сезонного хода (а тем более межгодовой изменчивости) поля течений на всей акватории Черного моря. Поэтому Г.Ф. Джиганшин выделил два небольших района в окрестности ОЧТ с максимальным количеством данных наблюдений и сконцентрировал свои усилия на изучении изменчивости ОЧТ в этих районах, но не успел завершить анализ полученных результатов.



Среднемесячные поля течений по данным всех дрейферов за 2000 – 2010 гг. (в правом верхнем углу представлены осредненные и максимальные величины скоростей течений по всему полю)

В заключение хотелось бы отметить, что на протяжении почти всей своей научной деятельности Г.Ф. Джиганшин занимался исследованием поля течений в различных районах Мирового океана на основе данных прямых измерений с помощью различных технических средств. Он сам неоднократно принимал участие в экспериментальных работах на научно-исследовательских судах, много раз был начальником отряда течений, заместителем начальника и начальником экспедиций. Последняя статья ярко иллюстрирует высокую требовательность Г.Ф. Джиганшина к качеству получаемых данных и скрупулезность в процессе их обработки и анализа. Таким, по-настоящему преданным своему делу ученым-океанологом, мы и запомним Гафура Файзрахмановича Джиганшина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ямпольский А.Д.* О внутренних волнах в Черном море по наблюдениям на многосуточной якорной станции // Тр. ИО АН СССР. – 1960. – 39. – С. 111 – 126.
2. *Бибик В.А.* Особенности динамики вод юго-восточной части Черного моря и распределение океанографических элементов // Тр. АзЧерНИРО. – 1964. – Вып. 23. – С. 23 – 31.
3. *Зац В.И.* Динамика вод и процессы горизонтальной турбулентной диффузии в прибрежной зоне Черного моря // Дис. ... канд. геогр. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1964. – 96 с.
4. *Коновалова И.З.* Прибрежные течения поверхностного слоя в морях без приливов // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 15 с.
5. *Большаков В.С.* Гидрология материкового склона Черного моря // Материалы Всесоюз. симпозиума по изучению Черного и Средиземного морей, использованию и охране их ресурсов. – Киев: Наукова думка, 1973. – С. 70 – 73.
6. *Зац В.И.* Влияние физико-океанологических факторов на поле примеси в шельфовой зоне моря // Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 31 с.
7. *Иваненков Г.В.* Вопросы динамики инерционных течений вблизи берега моря // Тр. ГОИН. – 1977. – Вып. 141. – С. 46 – 65.
8. *Беляков Ю.М.* Особенности нестационарных течений в открытой части Черного моря // Комплексные исследования Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1979. – С. 34 – 42.
9. *Богатко О.Н., Богуславский С.Г., Беляков Ю.М. и др.* Поверхностные течения Черного моря // Там же. – С. 26 – 33.
10. *Блатов А.С., Иванов В.А.* О вихреобразовании в Черном море // Там же. – С. 43 – 51.
11. *Блатов А.С., Иванов В.А.* К вопросу о мезомасштабной изменчивости океанологических характеристик в Черном море // Там же. – С. 52 – 58.
12. *Korotaev G., Oguz T., Nikiforov A. et al.* Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data // J. Geophys. Res. – 2003. – 108, № С4. – 3122, doi:10.1029/2002JC001508. – P. 19-1 – 19-15.
13. *Karimova S.* Eddy Statistics for the Black Sea by Visible and Infrared Remote Sensing // Remote Sensing of the Changing Oceans / Ed. D. Tang. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – P. 61 – 76.
14. *Taylor G.L.* Diffusion by continuous movements // Proc. London Math. Soc. – 1921. – 20. – P. 196 – 212.
15. *Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В. и др.* Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология. – 2003. – 43, № 6. – С. 1 – 15.

16. *Poulain P.-M., Barbanti R., Motychev S. et al.* Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999 – 2003 // *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic research paper.* – 2005. – 52, № 12. – P. 2250 – 2274.
17. *Погребной А.Е.* Модификация методики Тэйлора для оценки горизонтального обмена в Черном море по данным дрейферного эксперимента // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2008. – Вып. 16. – С. 136 – 144.
18. *Погребной А.Е.* Анализ пространственно-временных свойств обменных процессов в Черном море по данным дрейферного эксперимента // *Там же.* – 2011. – Вып. 24. – С. 279 – 287.
19. *Толстошеев А.П.* Метод восстановления траекторий автономных дрейфующих буев // *Там же.* – 2007. – Вып. 15. – С. 392 – 396.
20. *Полонский А.Б., Шокурова И.Г.* Изменения сезонного хода геострофической циркуляции в Черном море // *Морской гидрофизический журнал.* – 2010. – № 1. – С. 16 – 31.
21. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – 212 с.
22. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V.* Mean dynamic topography of the Black Sea computed from altimetry, drifters measurements and hydrology data // *Ocean Science.* – 2011. – № 7. – P. 745 – 753.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: apolonsky5@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 12.12.11
После доработки 24.02.12

АНОТАЦІЯ На основі дрейферних даних, отриманих в 2001 – 2007 рр., уточнені характеристики синоптичних вихрових утворень, які формуються внаслідок нестійкості Основної Чорноморської течії, а також параметри інерційних коливань. Просторові розміри вихорів синоптичного масштабу лежать в діапазонах від 30 – 40 до 80 – 100 км, а періодичність орбітального обертання вод у них змінюється від 4 – 6 до 16 – 20 діб. Показано, що загальна тривалість існування квазістаціонарної антициклонічної циркуляції в області Батумського вихору в період з березня по жовтень 2002 р. склала 240 діб. В осінній період 2004 і 2007 рр. в західній частині Чорного моря над материковим схилом були зафіксовані антициклонічні вихори синоптичного масштабу, кінематичні характеристики яких близькі до характеристик Батумського вихору. Подібність кінематичних характеристик і динамічних умов формування Батумського вихору і вихорів, зафіксованих в осінній період в західній частині Чорного моря, дає підставу класифікувати їх як схилі вихори. Коефіцієнти горизонтального турбулентного обміну, обумовленого синоптичними вихорами, визначаються головним чином горизонтальними розмірами вихорів і змінюються в межах $(0,15 - 0,45) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$. Характерні орбітальні швидкості інерційних рухів становлять 0,1 м/с, а радіус кола, яке описується векторами інерційних течій, змінюється від 1 до 1,5 км.

Ключові слова: синоптичні вихори, інерційні рухи, дрейферні вимірювання.

ABSTRACT Characteristics of synoptic eddies generated by the Rim current instability and also the parameters of inertial oscillations are specified based on the drifters' data obtained in 2001 – 2007. Spatial dimensions of synoptic-scale eddies are within the range from 30 – 40 to 80 – 100 km, whereas periodicity of water orbital circulation in them varies from 4 – 6 to 16 – 20 days. It is shown that in March – October, 2002, total duration of quasi-stationary anticyclonic circulation in the Batumi eddy area constituted 240 days. In autumn, 2004 and 2007, the synoptic-scale anticyclonic eddies whose kinematic characteristics were close to those of the Batumi eddy were observed in the western Black Sea above the continental slope. Similarity between the kinematic characteristics and the dynamic conditions of formation of the Batumi eddy and those observed in autumn in the western Black Sea provides a reason to classify them as slope eddies. The coefficients of horizontal turbulent mixing conditioned by synoptic eddies are determined mainly by their horizontal dimensions and vary within the range $(0.15 - 0.45) \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$. The characteristic orbital velocities of the inertial motions are 0.1 m/s and the radius of the circle circumscribed by the inertial currents' vectors vary from 1 to 1.5 km.

Keywords: synoptic eddies, inertial motions, drifter measurements.