

В.Ю. Чанцев, А.В. Даньшина

**СУБ-МЕЗОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ДИНАМИКИ
ПРИБРЕЖНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ТУАПСЕ**

V.Yu. Chantsev, A.V. Danshina

**SUB-MEZOSCALE STRUCTURE OF COASTLE WATERS
DYNAMICS IN TUAPSE REGOIN**

На основании натуральных наблюдений, проведенных в августе 2009 г., рассматривается структура динамики прибрежных вод в районе Туапсе. Выявлено существование субмезомасштабных неоднородностей в поле течений. Причем такие неоднородности обнаруживаются не только в горизонтальных структурах, но и в вертикальных.

Ключевые слова: динамика прибрежных вод, структура течения, динамические неоднородности.

The structure of the dynamics of coastal waters in the Tuapse region is considered on the basis of natural observations made in August 2009. The existence of sub-mesoscale irregularities in the currents field is identified. Moreover, such heterogeneity are found not only in horizontal structures, but also in the vertical.

Key words: dynamics of coastal waters, the currents structure, the dynamic heterogeneities.

Введение

Краснодарское причерноморье в последние годы играет все большую роль в развитии инфраструктур в прибрежной зоне Черного моря. От Новороссийска до Сочи идет интенсивное освоение береговой полосы как со стороны суши, так и со стороны моря. На побережье развиваются туристические комплексы, создаются новые и расширяются уже существующие транспортные предприятия по перевалке различных грузов морским путем и другие промышленные структуры, что влечет за собой увеличение антропогенного прессинга на прибрежные морские воды. Дополнительные нагрузки на прибрежные морские экосистемы оказывает и интенсификация использования прибрежных морских ресурсов. Немаловажную роль в увеличивающемся давлении на прибрежные воды оказывает и прокладка различных нефте- и газопроводов.

В этой связи возникают вопросы о роли самоочищения прибрежных вод под действием гидродинамических процессов. Возможно ли возникновение ситуаций, когда сформировавшееся движение прибрежных вод начинает препятствовать свободному водообмену прибрежной зоны с открытым морем. Могут ли гидродинамические неоднородности, формирующиеся в мелководной части морского шельфа и имеющие пространственно-временной масштаб меньше масштаба Россби, блокировать или, наоборот, прорывать блокаду прибрежных вод, вызванную интенсификацией струйного прибрежного черноморского течения.

Динамика вод над шельфом Черного моря, по данным проведенных исследований (см. [Зацепин А.Г. и др., 2002, Титов В.Б., 2002]), поддерживается процессами с масштабами, не превышающими масштаб Россби. Такие процессы вызываются крупномасштабной циркуляцией вод, ветровым воздействием и зависят от топографии континентального склона. В Черном море прибрежное вихреобразование связано с меандрированием Основного черноморского течения (ОЧТ). Мезомасштабные вихри в виде антициклонических круговоротов на периферии ОЧТ известны давно [Блинков В.А. и др., 2002]. В последние годы с использованием специальных дистанционных и контактных методов на периферии таких вихрей с пространственными размерами порядка 50–100 км обнаруживается развитие вихрей меньших масштабов [Гинзбург А.И. и др., 2008, Митягина М.И. и др., 2008, 2009]. Основным механизмом формирования малых вихрей по мнению отдельных исследователей [Каменкович В.М. и др., 1987, Монин А.С. и др., 1979] является гидродинамическая неустойчивость среднего состояния вод. Обычно в качестве благоприятных для развития динамической неустойчивости параметров выделяют пространственную неоднородность течений, плотностную стратификацию, наклон дна, рельеф берега и многое другое. Чаще всего наблюдается совокупная роль всех этих характеристик при формировании вихревых структур, но иногда удается выделить доминирующие факторы.

Для выявления механизмов формирования динамических неоднородностей малого масштаба необходимо сначала детализировать основные характеристики вихревых структур. В первую очередь, целесообразно определить пространственные масштабы наблюдаемых неоднородностей и продолжительность их жизни, что вызвано интересами экологического контроля вод прибрежной мелководной зоны Краснодарского причерноморья.

Материалы наблюдений и результаты исследования

В качестве исходных материалов для исследования использовались данные наблюдений за течениями в прибрежной зоне Черного моря возле Туапсе в августе 2009 г.

В состав натуральных наблюдений вошли данные вертикального распределения составляющих скорости течения, полученных с помощью доплеровского профилографа течений ADCP. Наблюдения проводились на сети станций, расположенных на семи равноудаленных разрезах, направленных по нормали к берегу до границы, по которой проходила 100 м изогипса. На каждом разрезе располагалось по 8 станций. Общие размеры полигона составили 12×10 км. Размеры полигона, частота расположения станций и наличие скоростного маломерного судна позволили проводить полный объем наблюдений в течение светлой части суток (10–12 ч). Для оценки временной изменчивости общего характера движения прибрежных вод в районе исследования устанавливались два измерителя течения марки «Вектор-2». Приборы размещались на притопленных буйковых станциях на глубине 10 м от поверхности в центральной части поли-

гона и на его границе. В результате экспедиционных исследований были получены последовательные данные для нескольких дней.

Накопленная информация позволила описать структуру и локальные особенности динамики вод шельфа в районе Туапсе [Карлин Л.Н. и др., 2010]. Важным элементом описания динамической структуры вод является оценка пространственной и временной изменчивости. В первую очередь возникает необходимость оценки временной изменчивости динамических процессов в прибрежной зоне моря. Опираясь на такую оценку, можно получить информацию, необходимую для проведения осреднения данных наблюдения по времени.

Как было отмечено выше, период суточных наблюдений за течениями на прибрежном полигоне не превосходил 10–12 ч. При анализе результатов наблюдений нужно хорошо понимать насколько правдоподобной будет динамическая картина, которую мы представляем как мгновенное наблюдение. Для обеспечения наиболее реального представления о динамической структуре прибрежных вод время выполнения наблюдений на одной станции вместе с межстанционным переходом не превышал 15 мин. Этому способствовало использование скоростного судна. В результате появилась возможность оценить степень достоверности проводимых оценок.

Наблюдения за скоростью и направлением течения с помощью «Вектор-2» проводились в фиксированной точке полигона на глубине, где течения, как и на морской поверхности, обладали максимальной изменчивостью. Интервал времени, с которым проводилось приборное осреднение параметров течения, составлял 30 с. Такая частота фиксирования данных позволяет рассмотреть влияние периода осреднения на характер фиксируемой изменчивости параметров течения.

Для оценки временной изменчивости параметров течения рассмотрим повторяемость степени изменчивости скорости (ΔV) и направления ($\Delta\theta$) течения для различных временных сдвигов (Δt) при 2- и 10-минутном осреднении исходных данных. Изменчивость направления течения бралась с 10° интервалом, а изменчивость скорости рассматривалась как: < 2 см/с, > 2 см/с, > 5 см/с, > 10 см/с, > 15 см/с и > 20 см/с. Необходимо отметить, что скорость течения по данным «Вектор-2» достигала 50 см/с, и это хорошо согласовывалось с данными доплеровского профилографа течений.

Характер повторяемости изменчивости скорости и направления течения при 2-минутном осреднении данных представлен на рис. 1. Причем, все изменения лежат в близкой от нуля области. Так, изменения скорости на периодах до 4 ч не превышают 10 см/с, а изменения направления не превосходят 30° . Наибольшая повторяемость изменчивости течения наблюдается для $\Delta V < 2$ см/с (рис. 1, а). Снижение повторяемости имеет плавный ход при временных сдвигах Δt , лежащих в диапазоне от 2 до 300 мин. При этом изменчивость направления течения $\Delta\theta$ не превышает 20° .

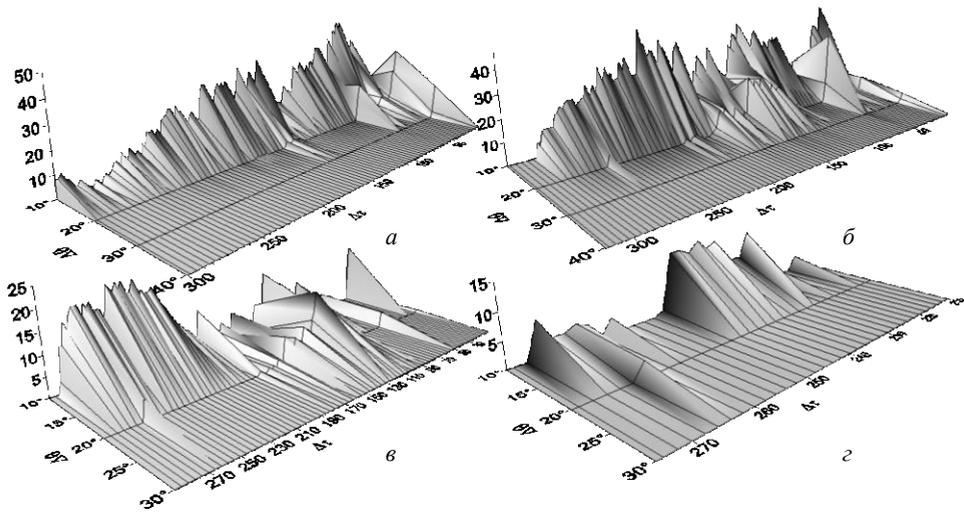


Рис. 1. Повторяемость распределения изменчивости течения при $\Delta V < 2$ см/с (а), $\Delta V > 2$ см/с (б), $\Delta V > 5$ см/с (в) и $\Delta V > 10$ см/с (г) для 2-минутного осреднения данных

Локальная длиннопериодная изменчивость характера течения ($3 \text{ ч} < \Delta t < 5 \text{ ч}$) проявляется только для $\Delta V > 5$ см/с, и изменчивость направления течения не превосходит 20° . На этих частотах повторяемость изменений течения не превышает 50 % от изменчивости для $\Delta V < 2$ см/с (рис. 1, в). На частотах $1\text{--}1,5 \cdot 10^{-4}$ Гц изменчивость течения прослеживается для $\Delta\theta \leq 30^\circ$, и повторяемость не превышает 10. Изменчивость скорости $\Delta V > 10$ см/с имеет небольшую повторяемость, не превосходящую 10 и не выходящую за $\Delta\theta = 20^\circ$ на частотах $1\text{--}1,5 \cdot 10^{-4}$ Гц (рис. 1, г).

Из рис. 1 видно, что течение на рассмотренных периодах Δt практически имеет слабую изменчивость по направлению, и основная изменчивость по скорости наблюдается только в интервале от 0 до 2 см/с. Эта изменчивость при 10-часовой работе на полигоне характерна для пространственных масштабов, не превышающих 100 м.

Изменчивость параметров течения при 10-минутном осреднении исходных данных представлена на рис. 2.

Такое осреднение данных наблюдений в совокупности со скоростью проведения наблюдений позволяет говорить о возможности получения практически одновременного отображения динамической структуры прибрежных вод в районе Туапсе. Повторяемость изменений параметров течения не превышает 10, да и только при $\Delta V < 2$ см/с (рис. 2, а). Изменчивость $\Delta V > 5$ см/с прослеживается только на частотах $5,5\text{--}9,0 \cdot 10^{-5}$ Гц (рис. 2, в), и повторяемость этой изменчивости можно считать незначительной. При таком осреднении исходных данных изменчивость $\Delta V > 10$ см/с полностью отсутствует.

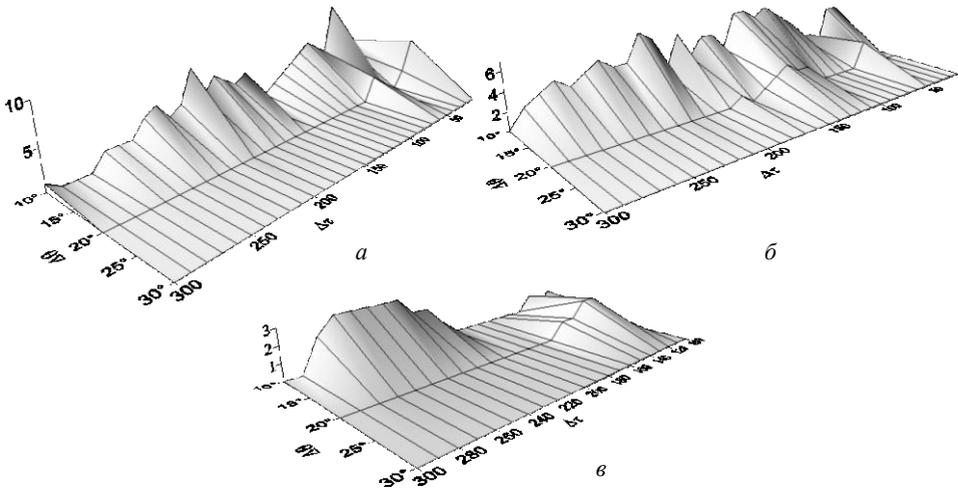


Рис. 2. Повторяемость распределения изменчивости течения при $\Delta V < 2$ см/с (а), $\Delta V > 2$ см/с (б) и $\Delta V > 5$ см/с (в) для 10-минутного осреднения данных

Проведенный анализ позволяет говорить о том, что 10-минутное осреднение данных наблюдений профилей скорости течения дает возможность оценивать пространственные масштабы динамических неоднородностей, возникающих в поле течения, и говорить о времени существования этих образований.

Построенные поля течений, основанные на данных наблюдений, проведенных с помощью доплеровского профилографа скорости, позволяют судить о характере динамической структуры вод прибрежной зоны Туапсе и оценить пространственно-временные масштабы формирующихся неоднородностей. Характер и масштабы динамических неоднородностей в поле течения практически не изменяются на протяжении всего периода наблюдений. Поэтому для анализа динамических образований представляются данные наблюдений, полученные 14.08.2009 при выполнении половины исследуемой площади прибрежной зоны. Эти наблюдения проводились в течение 4 ч, что позволяет рассматривать данные с 10-минутным осреднением как полученные на один момент времени.

Вдольбереговой разрез № 1 со средней глубиной 40 м удален от берега на 4 км (рис. 3, а). Вдольбереговая компонента скорости (u) до глубины 25 м направлена на северо-запад, увеличивая интенсивность к поверхности до 30 см/с. При этом в районе ст. 12м09 на глубине 15 м и ст. 3м09 на глубине 20 м прослеживаются аномалии скорости до 40 см/с. Вертикальные размеры этих аномалий составляют 5 м, а их горизонтальная протяженность варьирует от 1 до 2 км. В слое от 25 до 38 м наблюдается слабое обратное вдольбереговое движение со скоростью до 12 см/с. А в придонном слое движение опять имеет северо-западное направление.

На разрезе № 2, удаленном от берега на 7 км (рис. 3, б), в верхнем 20 м слое характер движения повторяется, как и на разрезе № 1. В слое от 25–30 м до 60 м

наблюдается обратный знак составляющей u . Причем в этом промежуточном слое в районе ст. 22m09 прослеживается ядро обратного вдольберегового движения, а на северной окраине разреза составляющая u имеет положительный знак, как и во всем придонном слое. Вертикальное разделение составляющей u по знаку в пределах данного разреза свидетельствует о присутствии завихренности с вертикальным расположением оси.

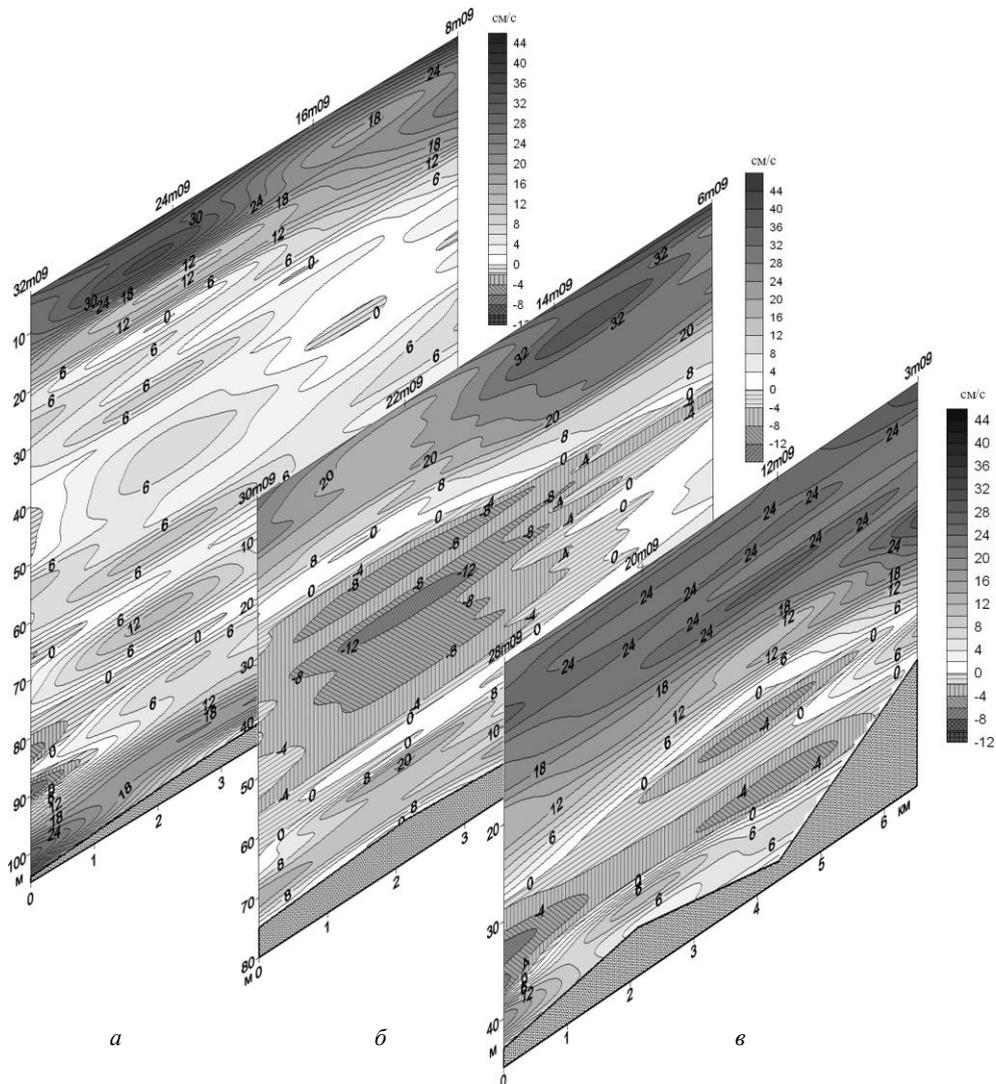


Рис. 3. Распределение компоненты течения u на вдольбереговых разрезах: № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

При удалении от берега на расстояние 10 км (разрез № 3) по всей глубине прослеживается только положительный знак вдольбереговой составляющей те-

чения (u), свидетельствующий о наличии внешней границы вихревого образования с горизонтальным масштабом менее 10 км (рис. 3, в).

Отмеченная неоднородность в структуре течений наиболее явно выявляется в распределении ортогональной составляющей течения (v). Из рис. 4, а видно, что глубже 20 м практически на всем разрезе № 1 движение воды направлено в сторону берега, и центром такого движения является ст. 12м09, где движение к берегу прослеживается и до поверхности моря.

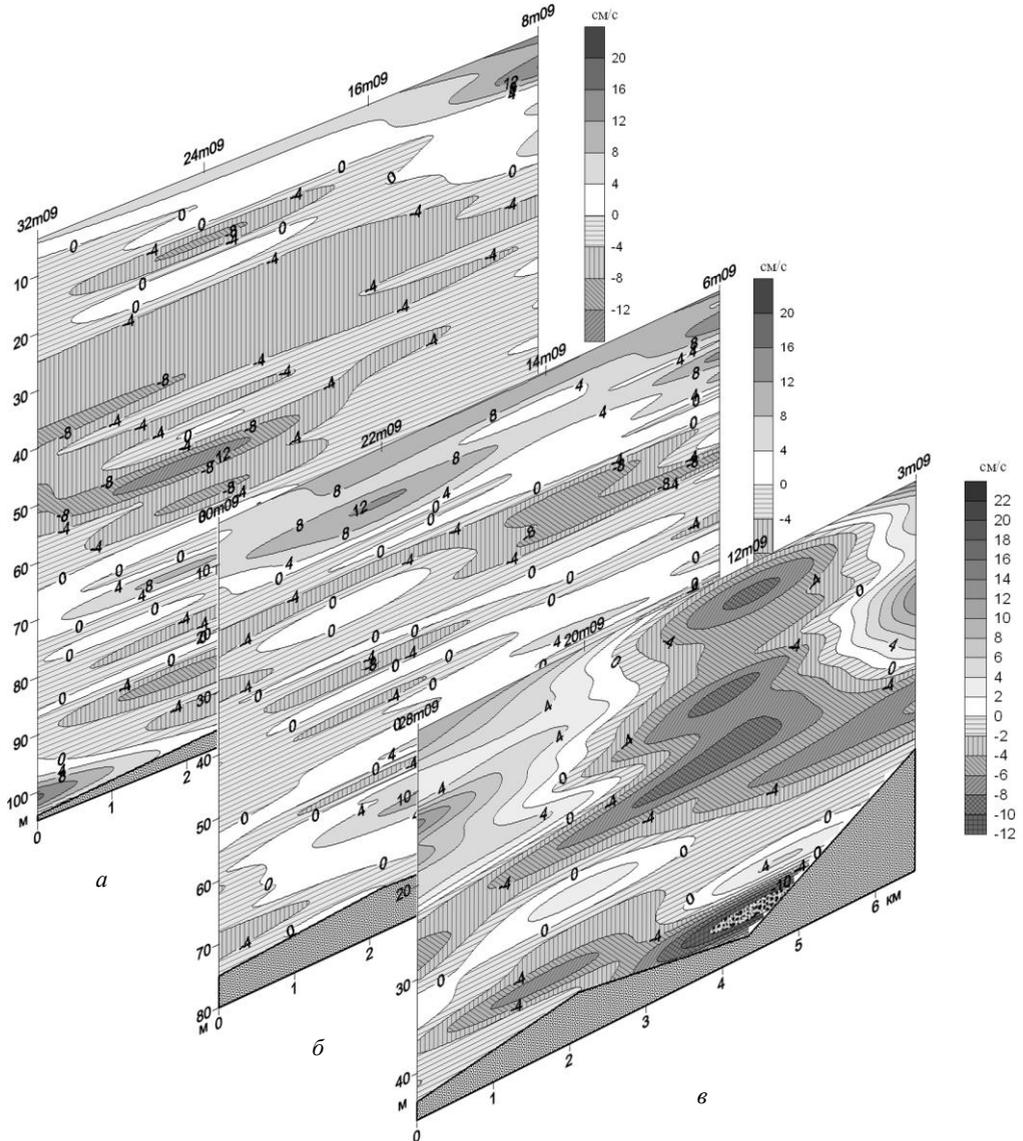


Рис. 4. Распределение компоненты течения v на вдольбереговых разрезях: № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в)

Именно в районе этой станции наблюдается интенсификация v -компоненты течения до 10 см/с, а у дна – до 15 см/с. В поверхностном слое до глубины 20 м в районах ст. 28m09 и ст. 3m09 компонента v имеет обратный знак и достигает величины 20–25 см/с. При удалении от берега, в пределах 10 км прибрежной зоны, характер движения вод свидетельствует о преимуществе движения в сторону берега. Только в тонком поверхностном слое, который на внешней границе исследуемой области уменьшается до 3–5 м, компонента v имеет положительный знак. На общем фоне движения вод в ту или иную сторону формируются более мелкие динамические неоднородности с горизонтальными масштабами 2–4 км и вертикальным развитием не более 20 м.

Вертикальные масштабы динамических образований в водах прибрежной зоны Туапсе оценивались с помощью расчета повторяемостей вертикального сдвига скорости течения (ΔV) для слоев различной толщины (Δz). Расчет повторяемостей $P(\Delta V, \Delta z)$ проводился интегрально для всех станций полигона и всех дней проведения исследований по формуле

$$P(\Delta V, \Delta z) = \frac{\Delta z}{MN(H - z_0)} \sum_{i=1}^M \sum_{\Delta z=1}^N \sum_{z_0}^{H-\Delta z} \delta_i(\Delta V_i, \Delta z) 100\%, \quad (1)$$

где M – количество интервалов ΔV_i ; N – количество интервалов Δz ; H – глубина места; z_0 – начальная глубина определения составляющих скорости течения. Величина $\delta_i(\Delta V_i, \Delta z)$ определялась с помощью выражения

$$\delta_i(\Delta V_i, \Delta z) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta V_i < |v(z + \Delta z) - v(z)| \leq \Delta V_{i+1} \\ 0, & \text{если } \Delta V_i \geq |v(z + \Delta z) - v(z)| > \Delta V_{i+1} \end{cases}. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет оценить только степень изменчивости составляющих течения по вертикали. В то же время оно не дает информации о присутствии завихренностей. Для выявления наличия вихревых структур различного масштаба необходимо определить меняется ли знак в вертикальном сдвиге компонент скорости течения. Для этого величина $\delta_i(\Delta V_i, \Delta z)$ должна зависеть не только от величины сдвига скорости ΔV , но и от смены знака соответствующей составляющей скорости течения. В этом случае $\delta_i(\Delta V_i, \Delta z)$ должна определяться по формуле

$$\delta_i(\Delta V_i, \Delta z) = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta V_i < |v(z + \Delta z) - v(z)| \leq \Delta V_{i+1} \text{ и} \\ & \text{sign}(v(z + \Delta z)) \neq \text{sign}(v(z)) \\ 0, & \text{если } \text{sign}(v(z + \Delta z)) = \text{sign}(v(z)) \end{cases})$$

Результаты расчета повторяемостей $P(\Delta V, \Delta z)$ для составляющих скорости течения u и v представлены на рис. 5. Распределение $P(\Delta V, \Delta z)$ демонстрирует практически одинаковую изменчивость вертикального сдвига скорости течения как для компоненты u , так и для компоненты v . Наиболее часто повторяющийся сдвиг скорости наблюдается в диапазоне от 5 до 20 см/с (рис. 5, а, в). Такой

сдвиг прослеживается в слоях толщиной от 1 до 10 м, не меняя своей повторяемости. Если говорить о вертикальных масштабах вихревых неоднородностей, формируемых в поле течений, то большинство динамических образований имеют вертикальное развитие в пределах до 4 м, хотя часть вихрей имеют развитие и до 10 м (рис. 5, б, з). Пока трудно судить о времени их жизни, но интенсивность движения в этих неоднородностях характеризуется существенным перепадом скорости, лежащим в диапазоне от 5 до 30 см/с. Наибольший перепад скорости прослеживается исключительно для вихрей малого вертикального развития. При увеличении вертикального масштаба таких динамических образований перепад скорости располагается в диапазоне от 5 до 20 см/с (рис. 5, б).

Пространственная неоднородность в поле течений прибрежной зоны в районе Туапсе обнаруживается и в распределении касательных и нормальных составляющих скорости течения на разрезах, расположенных по нормали к береговой линии (рис. 6). На таких разрезах более наглядно проявляется вертикальная дифференциация динамических неоднородностей при удалении от берега.

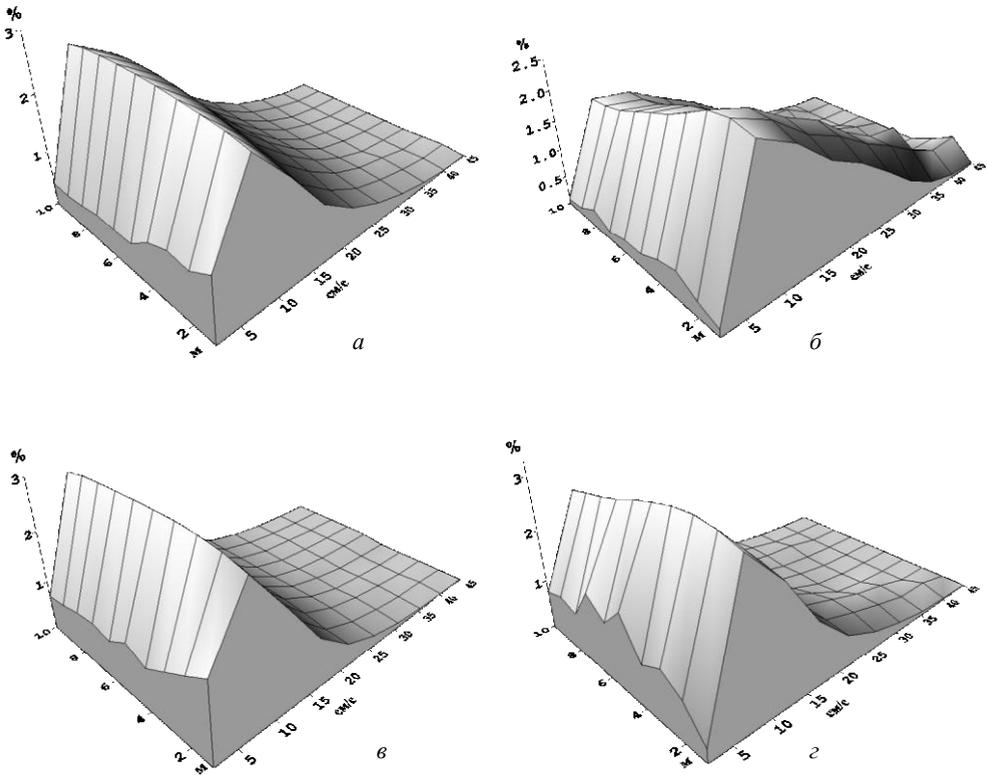


Рис. 5. Распределение повторяемостей $P(\Delta V, \Delta z)$ для компоненты течения u без учета знака (а) и с учетом знака (б), и для компоненты течения v без учета знака (в) и с учетом знака (з)

В распределении компоненты скорости течения u на нормальных к берегу разрезах наблюдается хорошо выраженная фоновая расслоенность. Верхние два слоя 0–20 м и 20–50 м характеризуются противоположной направленностью движения водных масс. На севере рассматриваемой области максимальные скорости проявляются на глубинах 10 и 35 м на удалении 7 км от берега. При смещении на юг на расстояние 4 км ядра максимальной скорости смещаются в сторону берега на 5 км, как в верхнем 20-метровом слое, так и в слое от 20 до 50 м, сохраняя свою интенсивность.

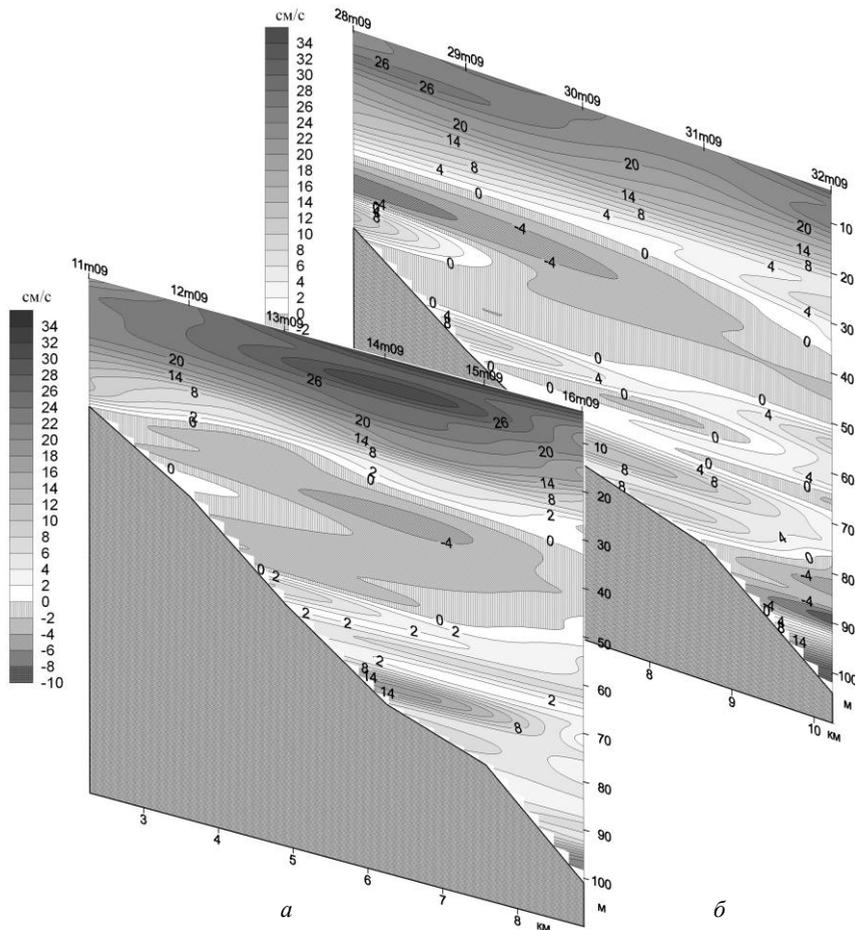


Рис. 6. Распределение компоненты течения u на нормальных к береговой линии разрезах: № 1 (а) и № 2 (б)

В придонном 50-метровом слое прослеживается более частая вертикальная перемежаемость знака вдольбереговой составляющей скорости течения. Горизонтальная протяженность выявленных динамических неоднородностей в слое от 50 до 100 м несколько меньше, чем в верхних слоях, и не превышает 2 км.

Выводы

Полученная информация о распределении течений позволила описать структуру и локальные особенности динамики вод шельфа в районе Туапсе. Для описания динамической структуры вод проведена оценка пространственной и временной изменчивости прибрежных течений. Выполнен анализ временной изменчивости динамических процессов в прибрежной зоне моря. На основе полученной оценки проведено осреднение данных наблюдения по времени. Осреднение вертикальных профилей скорости течения с 10-минутным периодом позволило рассматривать пространственное распределение течений, полученное в течение 4-5 ч наблюдений как одномоментное поле динамической структуры одного из районов прибрежной зоны вблизи Туапсе.

В поле прибрежных течений была выявлена пространственная неоднородность. По глубине прибрежные воды четко разделялись по характеру и направлению движения водных масс на три слоя. Верхний 20-метровый слой и слой от 20 до 50 м характеризовались противоположной направленностью фонового движения, а придонный 50-метровый слой обладал более мелкой дифференциацией.

Оценки повторяемости вертикального сдвига скорости течения в рассматриваемой области показали, что основные вертикальные масштабы динамических неоднородностей лежат в пределах 10 м. Причем наибольший сдвиг скорости прослеживался в вихревых образованиях с вертикальной протяженностью менее 5 м.

Выявленная структура динамических неоднородностей свидетельствует о том, что в данном районе прибрежной зоны формируются вихри разного знака с горизонтальной протяженностью 2–4 км и вертикальным развитием до 20 м.

Литература

1. Блинков В.А., Дулов В.А., Станичный С.В. Грибовидные течения под свалом глубин северо-западной части Черного моря: дистанционные и контактные измерения / Системы контроля окружающей среды. – Севастополь, 2002, с. 406-412.
2. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В., Пиотух В.Б. Мезомасштабная динамика вод Черного моря / В кн.: Океанология на старте XXI века. – М.: Наука, 2008, с. 11-42.
3. Зацепин А.Г., Гинзбург А.И., Евдошенко М.А. Вихревые структуры и горизонтальный обмен в Черном море. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. – М.: Наука, 2002, с. 55-81.
4. Каменкович В.М., Кошляков М.И., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 509 с.
5. Карлин Л.Н., Чанцев В.Ю., Хаймина О.В., Данышина А.В., Исаев А.В. Особенности динамической структуры вод прибрежной зоны Туапсе // Уч. зап., 2010, № 11, с. 23-31.
6. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008, вып. 5, т. 2, с. 155-164.
7. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследования Земли из космоса, 2009, № 5, с. 72-79.
8. Монин А.С., Кошляков М.И. Синоптические вихри и волны Россби в океане // Нелинейные волны. – М.: Наука, 1979, с. 258-291.
9. Титов В.Б. Характеристики Основного черноморского течения и прибрежных антициклонических вихрей в Российском секторе Черного моря // Океанология, 2002, т. 42, № 5, с. 668-676.

Работа выполнена по госзаданию вузам (Рег. № НИР 5.924.2011).