

Член-корреспондент НАН Украины А. Б. Полонский,
Г. Ф. Джиганшин

Структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения у побережья Крыма

На підставі унікальних інструментальних даних, отриманих у вересні 2008 р. поблизу узбережжя Криму, описано структуру Основної Чорноморської течії у верхньому 100-метровому шарі з високим просторовим розділенням. Виділено мезомасштабні вихори з типовим горизонтальним масштабом у кілька кілометрів та проаналізовано їхні характеристики. Показано, що в період спостережень кінетична енергія мезомасштабних течій перевищувала кінетичну енергію Основної Чорноморської течії.

В формировании и изменчивости океанографических характеристик Черного моря определяющую роль играет главное звено циркуляции его вод — Основное Черноморское течение (ОЧТ). Схема поверхностных течений моря впервые была опубликована Н. М. Книповичем еще в 30-х годах прошедшего столетия [1]. Последующие публикации (например, в [2–6]) подтвердили предложенную в работе [1] генеральную схему циркуляции поверхностных вод Черного моря. Они показали, что ОЧТ со скоростями 20–100 см/с выделяется в виде струи с циклоническим обращением вод, опоясывающей все море в зоне материкового склона. ОЧТ — как достаточно интенсивное квазигеострофическое течение — проникает до глубины ~100 м. По современным представлениям, его максимальная интенсивность приходится на конец зимы — начало весны, а минимальная — на конец лета — начало осени [3, 6].

Вихреволновые процессы синоптических масштабов (с типичными пространственными размерами от десяти до нескольких десятков километров и временными масштабами от недель до месяцев) выделяются в верхнем 100-метровом слое круглый год, но характеризуются существенной пространственно-временной перемежаемостью [3, 7–9]. Изменчивость ОЧТ в подповерхностном слое на более мелких пространственно-временных масштабах практически не изучена. Причина заключается в отсутствие достоверной информации о четырехмерной структуре ОЧТ достаточного пространственно-временного разрешения. Особый интерес представляет исследование мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости ОЧТ с типичными пространственными масштабами до нескольких километров и временными — порядка нескольких суток. Такой интерес обусловлен двумя обстоятельствами: во-первых, интенсивная изменчивость соответствующего масштаба неоднократно описывалась по данным, полученным в отдельных регионах Мирового океана [10]. Проявления интенсивных мезомасштабных вихрей отмечались и в поверхностном слое Черного моря, причем еще в 1964 г. [7], что подтвердилось позднее спутниковыми данными [8]. И, во-вторых, если достаточно интенсивная (суб)мезомасштабная изменчивость течений действительно охватывает весь верхний слой Черного моря, то это приводит к необходимости их явного описания (или, как минимум, адекватной параметризации) в моделях циркуляции моря. К сожалению, из-за крайней ограниченности данных инструментальных измерений профилей течений (суб)мезомасштабная изменчивость ОЧТ в подповерхностном слое не исследовалась. Первые результаты такого исследования представлены в настоящем сообщении.

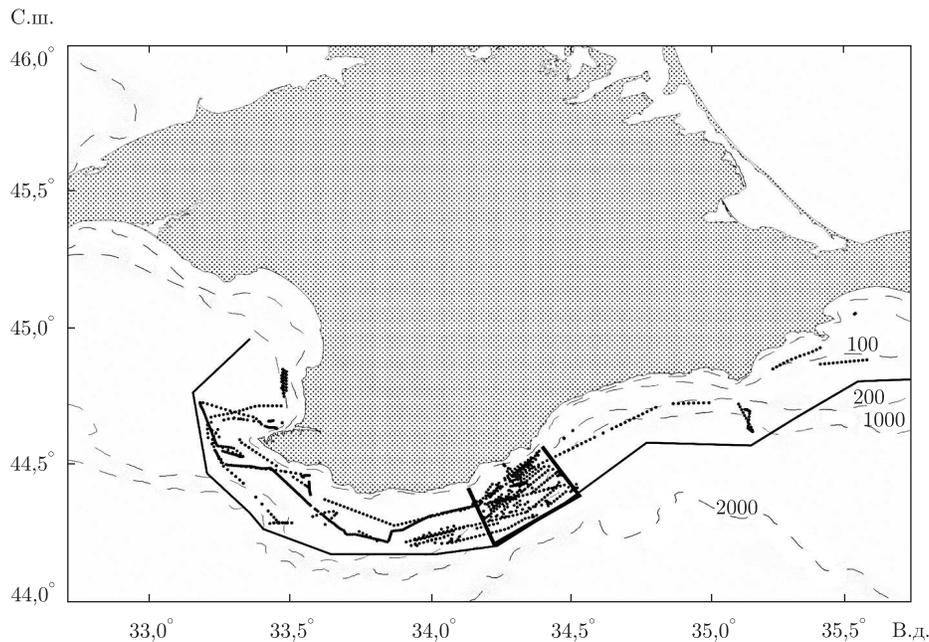


Рис. 1. Положение точек, в которых выполнялись измерения компонент вектора течений на гидрографическом судне “PATHFINDER” в период с 6 по 16 сентября 2008 г. Граница 12-мильной зоны Украины — сплошная толстая линия; изобаты — штриховые линии. Район с наибольшим количеством данных измерений, для которого исследовалась мезомасштабная изменчивость течений, выделен на схеме тремя жирными линиями.

Исходные данные и методика исследования. В период с 6 по 16 сентября 2008 г. в пределах 12-мильной зоны, примыкающей к побережью Крыма, на гидрографическом судне США “PATHFINDER” были выполнены уникальные (по пространственно-временному разрешению и количеству полученных результатов) измерения характеристик течений с помощью акустического доплеровского комплекса ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). По ходу движения судна с пятиминутным интервалом регистрировались профили компонент вектора течения. Измерения выполнялись в слое от 17–20 м до 100–110 м. В нескольких точках верхний горизонт измерений составлял 13 м. Всего было выполнено 1165 зондирований (рис. 1).

Наиболее обеспеченным данными измерений оказался район, выделенный на рис. 1. Это было вызвано тем обстоятельством, что экспедиция была организована Департаментом подводного наследия Института археологии НАН Украины в район предполагаемой гибели теплохода “Армения”, затопленного во время Великой Отечественной войны, в указанном районе Черного моря. Тем не менее в этом же районе наблюдалась интенсивная мезомасштабная изменчивость ОЧТ. Поэтому по ADCP-данным с очень высоким пространственным разрешением удалось получить статистически обеспеченную кинематическую структуру генерального переноса вод, а также охарактеризовать мезомасштабную изменчивость ОЧТ. Для этого в каждом узле сетки в районе работ были вычислены осредненные по пространству составляющие вектора течений на отдельных горизонтах и осредненные по вертикали профили, а также оценена статистика мезомасштабных флуктуаций векторов течений. Причем для района, наиболее обеспеченного данными измерений, шаг сетки изменялся от 1,5 до 4,5 миль, а пространственное сглаживание — от 1 до 10 миль.

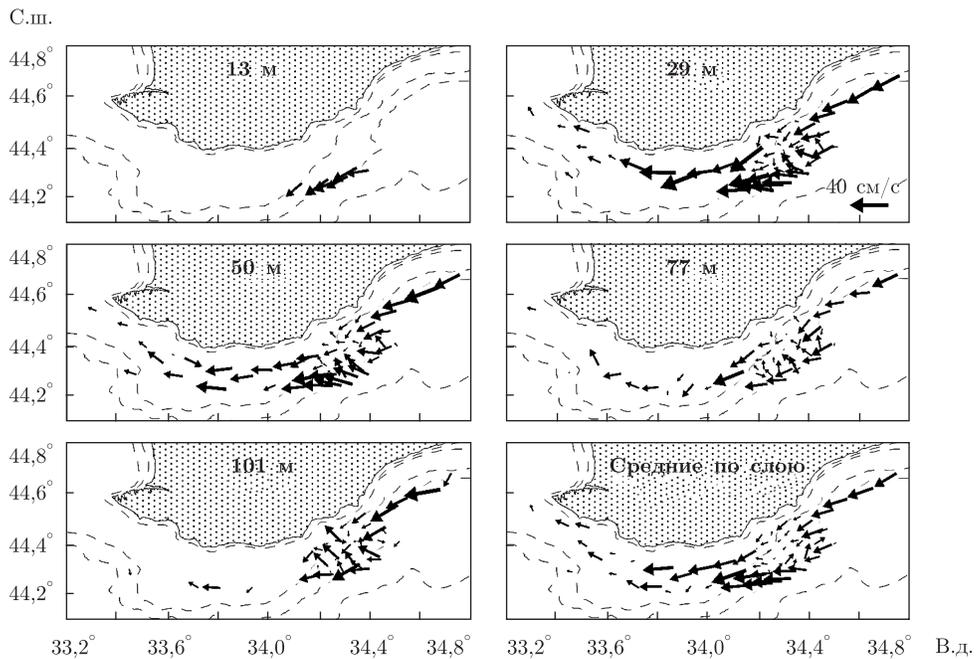


Рис. 2. Пространственная структура осредненных в узлах сетки течений вблизи побережья Крыма в сентябре 2008 г. при $a = 1,5$ миль

Поскольку в окрестности ОЧТ поле течений анизотропно, то каждый узел сетки рассматривался как центр зонально-ориентированного эллипса влияния. Данные зондирований для каждого горизонта, попадавшие в пределы эллипса влияния, усреднялись с весами, уменьшающимися по косинусоидальному закону от единицы в центре эллипса влияния до нуля на его границе. Размеры полуосей эллипсов влияния изменялись для зональной оси от 0,5 до 5,0 миль при постоянном соотношении осей $b/a = 0,5$ (где a и b — зональная и меридиональная полуоси эллипса соответственно). Такая процедура объективного анализа очень близка к процедуре оптимальной интерполяции [9]. Затем для каждого горизонта при различных эллипсах влияния и в среднем для всего слоя, охваченного наблюдениями, вычислялись следующие величины:

- компоненты (U, V) осредненных векторов течения;
- модули осредненной скорости $(|V| = \sqrt{U^2 + V^2})$;
- дисперсии и среднеквадратические отклонения (СКО) составляющих вектора течений (σ_U, σ_V) и модуля скорости $(\sigma = \sqrt{\sigma_U^2 + \sigma_V^2})$;
- коэффициенты вариации модуля скорости $(C_V = \sigma/|V|)$.

Некоторые результаты вычислений представлены на рис. 2 и 3.

Результаты, их краткий анализ. Поле проинтерполированных в узлы сетки векторов течения во всем анализируемом слое показывает, что в пределах рассматриваемой акватории при всех использованных параметрах фильтра стрежень ОЧТ в основном наблюдался на расстоянии 5–10 миль от береговой черты. Максимум скорости (до 40 см/с) отмечался на горизонтах 30–40 м. Глубже — скорости течения уменьшались. Однако пространственная структура ОЧТ на всех горизонтах в слое от 17 до 101 м принципиально не менялась. Генеральное направление ОЧТ — вдольбереговое (см. рис. 2). Из рисунка видно,

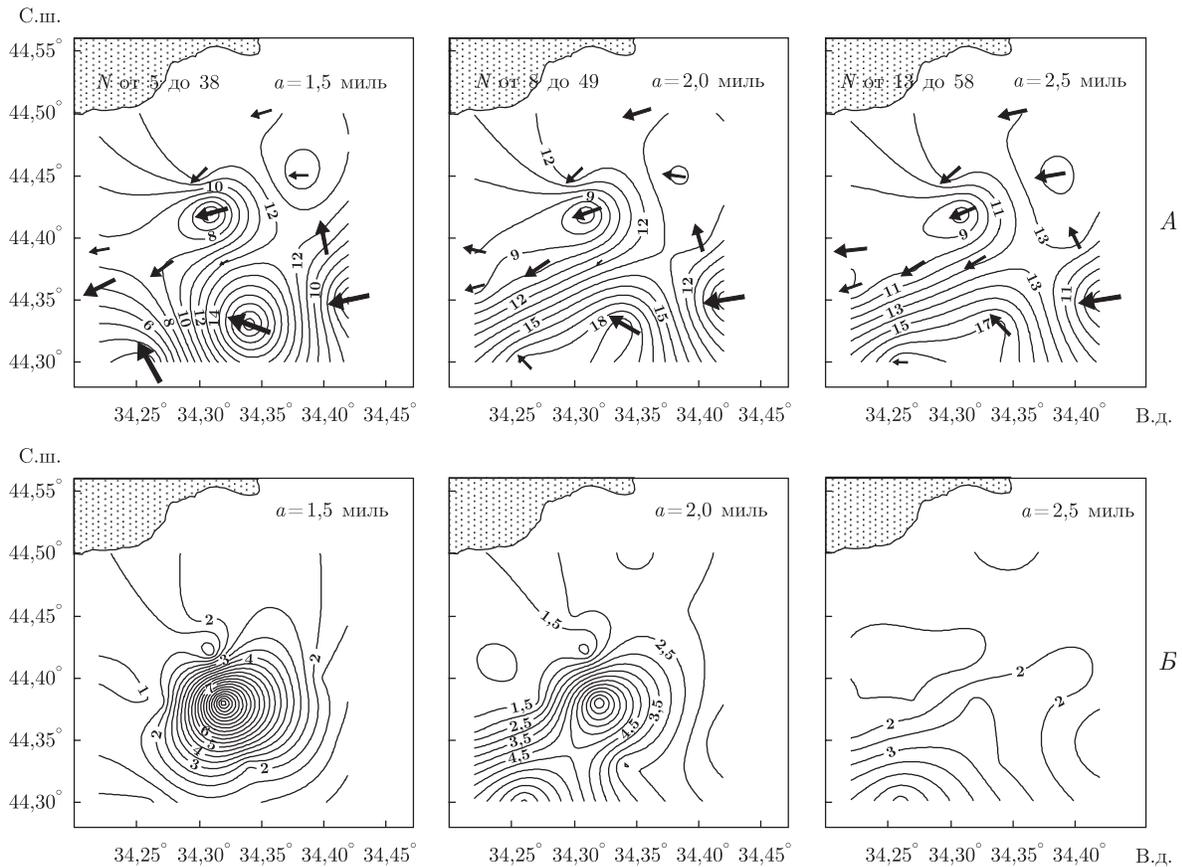


Рис. 3. Векторы течений, осредненные в слое 17–101 м, и поле среднеквадратических отклонений ($\sigma = \sqrt{\sigma_U^2 + \sigma_V^2}$), характеризующее мезомасштабную изменчивость модуля вектора (А); поле коэффициентов вариации модуля вектора течений на горизонте 37 м (Б) для трех вариантов интерполяции. В левом верхнем углу указано количество профилей (N) в каждом расчетном узле, участвующее в интерполяционной процедуре, в правом — характеристики пространственного сглаживания

что на кинематическую структуру ОЧТ влияет рельеф дна. На подходе к траверсу м. Аюдаг, там, где изобаты 200 и 1000 м удаляются от берега, основная ветвь ОЧТ также отодвигается на расстояние до 12 миль от берега. Именно на этом участке ОЧТ зарегистрированы максимальные скорости переноса вод (до 35–40 см/с в подповерхностном слое). Средние (по всему 100-метровому слою, охваченному наблюдениями) скорости достигают 30 см/с в окрестности стрежня ОЧТ (см. рис. 2).

Отметим, что экспедиция проводилась в период года, когда средние скорости ОЧТ уменьшаются до минимума типичного сезонного хода, а синоптическая изменчивость поля течений интенсифицируется [3, 6, 9]. Результаты, приведенные на рис. 3, демонстрируют наличие высокоамплитудных мезомасштабных возмущений в поле течений во всем анализируемом слое. Типичные величины СКО модуля скорости составляют 10–20 см/с. На их мезомасштабный характер указывает быстрое уменьшение коэффициентов вариации скорости течений при увеличении масштаба сглаживания. При $a = 1.5$ миль максимальная величина C_V превышает 10, а при $a = 2.5$ миль она уменьшается вдвое. При этом меняется и пространственная структура полей C_V и $\sigma = \sqrt{\sigma_U^2 + \sigma_V^2}$. При меньшем масштабе про-

пространственного сглаживания явно выделяется мезомасштабное динамическое образование с типичным пространственным масштабом в несколько километров, которое практически исчезает уже при $a = 2,5$ миль (см. рис. 3).

Необходимо подчеркнуть, что максимальные СКО модуля скорости отмечаются в окрестности стрежня ОЧТ, а максимальные C_V — за пределами струи ОЧТ, там, где осредненные скорости составляют около 1–2 см/с. За пределами стрежня ОЧТ наблюдается также сильная зависимость векторов среднего течения от размеров эллипса влияния. Однако и в окрестности стрежня ОЧТ, и за его пределами СКО модуля скорости, характеризующее мезомасштабную изменчивость, остается достаточно большим. Даже осредненная (по всему 100-метровому слою) величина СКО редко была меньше 10 см/с, а для отдельных горизонтов подповерхностного слоя она оказалась существенно большей (при $a = 1,5$ миль, см. рис. 3). Типичные значения коэффициента вариации модуля скорости превышали 1, а максимальные — 10.

Приведенные факты означают, что мезомасштабная изменчивость поля течений, во-первых, носит явно выраженный агеострофический (нелинейный) характер, а, во-вторых, существенно влияет на структуру циркуляции в окрестности ОЧТ (по крайней мере, в период сезонного ослабления ОЧТ, на который пришлось экспедиционные работы). Отсюда следует необходимость явного описания мезомасштабных процессов (или, как минимум, их адекватной параметризации) в моделях циркуляции вод Черного моря. Эти выводы могут показаться достаточно очевидными, поскольку для некоторых регионов Мирового океана они были установлены более 25 лет тому назад [10]. Однако их прямое экспериментальное подтверждение для подповерхностного слоя в районе свала глубин у Крымского побережья до сих пор отсутствовало. Учитывая сильную пространственно-временную перемежаемость мезомасштабных процессов в морях и океанах, такое экспериментальное подтверждение представляется особенно ценным.

Что касается субмезомасштабной изменчивости поля течений с характерными пространственными масштабами порядка 1 км, то выполненные измерения не позволили получить статистически значимые оценки ее интенсивности. Если при $a = 1,5$ миль в пределы эллипса влияния попадало как минимум 5 измеренных профилей, то при уменьшении a до 0,5 миль — не больше 1–4, что не позволяет достоверно выделить субмезомасштабные процессы.

1. *Книпович Н. М.* Гидрологические исследования в Черном море // Тр. Азово-Черномор. науч.-промышл. экспедиции. — 1933. — Вып. 10. — С. 1–272.
2. *Блатов А. С., Булаков Н. П., Иванов В. А., Косарев А. Н., Туржылжин В. С.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Под ред. Б. А. Нелепо. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. — 239 с.
3. *Кныш В. В., Кортаев Г. К., Демьшев С. Г., Белокопытов В. Н.* Долговременные изменения термохалинных и динамических характеристик Черного моря по климатическим данным температуры и солености и их ассимиляция в модели // Мор. гидрофиз. журн. — 2005. — № 3. — С. 11–30.
4. *Богатко О. Н., Богуславский С. Г., Беляков Ю. М., Иванов Р. И.* Поверхностные течения Черного моря // Комплексные исследования Черного моря. — Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 1979. — С. 26–33.
5. *Филиппов Д. М.* Циркуляция и структура вод Черного моря. — Москва: Наука, 1968. — 319 с.
6. *Шокурова И. Г.* Сезонная и межгодовая изменчивость геострофической циркуляции вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т НАН Украины, 2008. — С. 329–332.
7. *Зац В. И.* Динамика вод и процессы горизонтальной турбулентной диффузии в прибрежной зоне Черного моря: Дис. ... канд. геогр. наук. — Москва, 1964. — 96 с.

8. *Zatsepin, A. G., Ginzburg A. I., Kostianoy A. G. et al.* Observations of Black Sea Mesoscale Eddies and Associated Horizontal Mixing // *J. Geophys. Res.* – 2003. – **108**, No. C8. – P. 3246–3273.
9. *Полонский А. Б., Шокурова И. Г.* Статистическая структура крупномасштабных полей температуры и солёности в Чёрном море // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2008. – № 1. – С. 51–65.
10. *Полонский А. Б.* Горизонтально-неоднородный деятельный слой океана и его моделирование. – Севастополь; Обнинск: ВНИИГМИ – МЦД, 1989. – 234 с.

*Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь*

Поступило в редакцию 12.10.2009

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky, G. F. Dzhiganshin**

Structure and mesoscale variability of the Rim current in the coastal zone of the Crimea

Using unique instrumental data obtained in September of 2008 in the vicinity of the Crimean coast, the high-resolved structure of the Rim current in the upper 100-m layer has been described. Mesoscale eddies with a typical horizontal size of a few km have been revealed, and their characteristics have been analyzed. It is shown that, for the observational period, the kinetic energy of mesoscale eddies exceeded the kinetic energy of the Rim current.