

УДК 551.465.4

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЕЗОНОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С УСВОЕНИЕМ ДАННЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЪЕМОК 2016 г.

© 2023 г. С. Г. Демьшев^{а, *}, Н. А. Евстигнеева^{а, **}

^аМорской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: demyshev@gmail.com

**e-mail: naevstigneeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 20.05.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

В работе проведен анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции вод в северной части Черного моря на основе усвоения в численной модели данных трех гидрологических съемок 2016 г., выполненных в экспедициях 87, 89 и 91 рейсов НИС “Профессор Водяницкий” (летний, осенний и осенне-зимний сезоны). В расчетах использовалось высокое пространственное разрешение (~1.6 км по горизонтали и 27 горизонтов по вертикали) и атмосферное воздействие, близкое к реальному. Процедура ассимиляции данных наблюдений основана на фильтре Калмана с учетом неоднородности и неизотропности ошибок оценок полей температуры и солёности. Оценены интегральные энергетические слагаемые в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергии для трех сезонов. В **летний сезон** наблюдалось некоторое ослабление ОЧТ и основным механизмом формирования антициклонических вихрей вблизи г. Севастополь и у юго-восточных берегов Крыма являлась бароклинная неустойчивость течения (о чем свидетельствовали увеличения наклона изопикнических поверхностей и отрицательные значения работы силы плавучести). Антициклонический вихрь вблизи г. Ялта с радиусом около 25 км генерировался вследствие развития сдвиговой неустойчивости течения. В **осенний сезон** струя ОЧТ была прижата к берегу и отмечалось снижение количества вихрей по сравнению с летним сезоном. Образование антициклонических вихрей с радиусами около 35–40 км в западной части области было обусловлено баротропной неустойчивостью течения, формирование вихрей вдоль Крымского побережья – бароклинной неустойчивостью. В **осенне-зимний сезон** ОЧТ имело ярко выраженный струйный характер и при ослаблении ветрового воздействия наблюдалось усиление процессов бароклинной неустойчивости с генерацией вихрей разных масштабов между берегом и ОЧТ, а также в области, расположенной между 31.5 и 33° в.д. В течение всех сезонов вдоль западного и восточного побережья Крыма при действии слабых ветров могли генерироваться антициклонические и циклонические вихри малых масштабов в верхнем слое при обтекании береговой линии и неоднородностей рельефа дна.

Ключевые слова: Черное море, численное моделирование, высокое пространственное разрешение, ассимиляция данных наблюдений, мезомасштабные и субмезомасштабные вихри

DOI: 10.31857/S0002351523050048, EDN: UERKYY

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Морской гидрофизический институт (МГИ) РАН активно продолжает выполнять экспедиционные наблюдения за термохалинной структурой вод Черного моря, которые позволяют пополнять базу гидрологических данных моря, выявлять и уточнять ряд особенностей сезонной и синоптической изменчивости гидрофизических полей. Также накапливаются данные инструментальных измерений течений с помощью акустического измерителя ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) и результаты

геострофических расчетов по данным гидрологических съемок.

В [Артамонов и др., 2017] представлены результаты исследования динамики и структуры вод северо-западной части Черного моря в сентябре 2013 г. в период аномального осеннего охлаждения поверхностных вод. Показано, что температура в поверхностном слое была примерно на 1.5–2.5°C ниже среднемесячной климатической нормы. Основное Черноморское течение (ОЧТ) меандрировало и по мере продвижения на запад разворачивалось в юго-западном направлении,

зафиксирована северо-восточная периферия Севастопольского антициклона. В [Артамонов и др., 2016] изучены гидрологические условия в западной части Черного моря в ноябре 2015 г. Высокие положительные аномалии температуры прослеживались у берегов Крыма в области максимальных межгодовых вариаций и в южной части — в области повышения синоптической изменчивости. ОЧТ было представлено прибрежной ветвью над свалом глубин и южной ветвью, проходящей через центральную часть полигона. В [Артамонов, Скрипалева и др., 2018] и [Артамонов, Алексеев и др., 2018] по данным трех съемок, проведенных в северной части Черного моря в июле, октябре и в ноябре—декабре 2016 г., показано, что сезонный сигнал проявлялся в последовательном понижении средней температуры верхнего квазиоднородного слоя, увеличении температуры в ядре холодного промежуточного слоя и увеличении глубин залегания нижней границы верхнего квазиоднородного слоя. Стрежень ОЧТ располагался над свалом глубин, максимальные скорости имели место у юго-западных берегов Крыма, проявление Севастопольского антициклона (наиболее четко выраженного в октябре) фиксировалось в распределениях гидрологических характеристик. В [Артамонов и др., 2019] представлены результаты исследования структуры вод в зоне ОЧТ в апреле—мае и в июне—июле 2017 г. Сезонные изменения наблюдались в ослаблении скорости ОЧТ, повышении поверхностной температуры, понижении поверхностной солёности, уменьшении глубины нижней границы верхнего квазиоднородного слоя. Синоптическая изменчивость проявилась в меандрировании ОЧТ и в образовании вихрей. Некоторые особенности проявления синоптических круговоротов в термохалинных полях и на глубинах залегания различных изоперхностей были уточнены с помощью данных экспедиционных измерений (например, [Артамонов и др., 2019] и [Артамонов и др., 2020]).

Важно также отметить систематические инструментальные исследования и анализ спутниковой информации, проводимые на гидрофизическом полигоне (Полигон “Геленджик”, <http://polygon.ocean.ru/index.php>) в прибрежной зоне Черного моря в районе г. Геленджик на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [Зацепин и др., 2017, 2018; Сильвестрова и др., 2016]. Основу полигона составляют автономные заякоренные и донные станции, измеряющие профили гидрофизических параметров с высоким пространственно-временным разрешением. В настоящее время одной из актуальных задач является использование Полигона “Геленджик” для разработки и опробования технологии оперативной океанографии прибрежных зон морей России на основе применения высокоразрешающих гидродинамических

моделей с усвоением данных береговой радиолокации и автономных гидрофизических станций с передачей данных в режиме реального времени.

Проведенные ранее численные эксперименты по расчету гидрофизических полей показали эффективность использования гидродинамических моделей с блоком усвоения данных контактных наблюдений. Анализ реконструированных непрерывных по пространству и времени полей течений, температуры, солёности продемонстрировал возможность изучать закономерности эволюции вихрей и течений на различных масштабах, а также особенности формирования термохалинных полей. В [Agoshkov et al., 2007] сформулирована и исследована проблема вариационной ассимиляции данных функции уровня моря в модели гидротермодинамики океана. Было получено, что при таком способе ассимиляции модель быстро “забывает” усвоенный уровень, так как он не успевает переформировывать термохалинные данные. При усвоении спутниковых альтиметрических данных успешно применяется алгоритм, описанный в [Дорофеев и др., 2004] и развиваемый в МГИ РАН. Аномалии уровня сразу же пересчитываются в аномалии термохалинного состояния верхнего слоя моря, оказывая больший вклад изменений уровня в изменение циркуляции моря и лучше отражающий гидрофизику. В [Кныш и др., 2012] рассмотрено использование данных измерений температуры, солёности и скорости течений при их усвоении на основе фильтра Калмана в гидродинамической модели в приэкваториальной области западной Атлантики. В [Oke et al., 2010] описана система прогнозов *BlueLink* с использованием ансамблевой оптимальной интерполяции (*EnOI*) для ассимиляции океанических данных. В [Беляев и др., 2012] рассмотрены несколько методов ассимиляции данных (расширенный фильтр Калмана, метод оптимальной интерполяции и метод, основанный на приложениях уравнения Фоккера-Планка). Эксперименты проведены на основе модели *HYCOM* (Университет Майами, США) с использованием данных с дрейфтеров *ARGO*. В [Агошков и др., 2013] сформулирована и численно исследована задача вариационной ассимиляции данных о температуре поверхности моря для модели динамики Черного моря с целью восстановления потоков тепла на поверхности. В [Зеленько и др., 2016] представлена система усвоения океанографических данных, развиваемая в Гидрометцентре России. Входными для анализа данными служили результаты измерений температуры и солёности воды в верхнем 1400-метровом слое океана с различных наблюдательных платформ. Усвоение осуществлялось в рамках последовательной циклической схемы анализ—прогноз—анализ. В [Kaurkin et al., 2018] реализована параллельная реализация метода ансамблевой интерполяции для усвоения

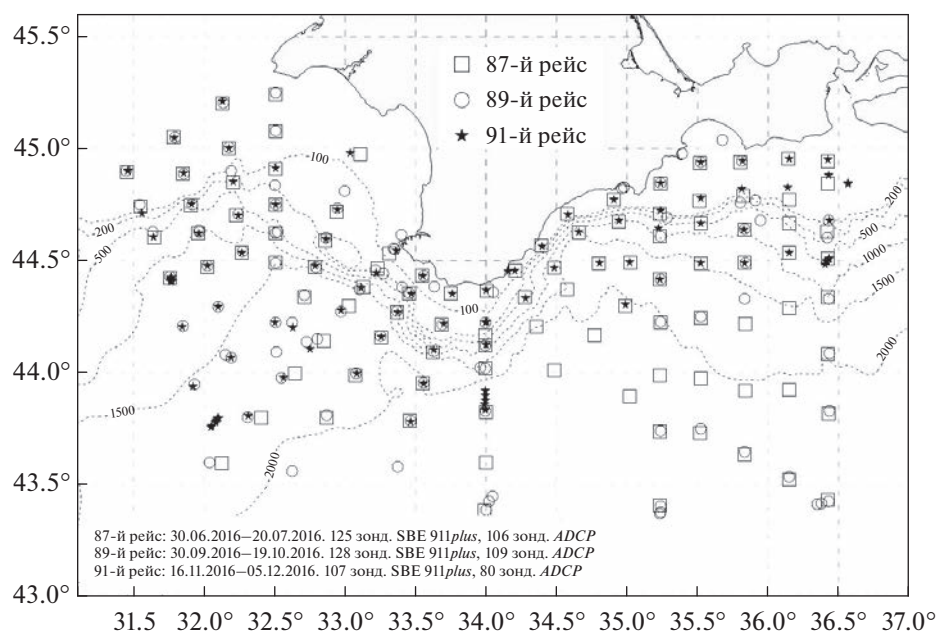


Рис. 1. Схема станций 87, 89 и 91 рейсов НИС “Профессор Водяницкий” [Артамонов и др., 2018]

данных наблюдений в модели динамики океана и проанализированы результаты численных экспериментов в Северной Атлантике с использованием данных спутниковой альтиметрии AVISO со спутника Jason-1. В [Agoshkov et al., 2018] на основе математической модели динамики Балтийского моря сформулирована и исследована задача вариационного усвоения среднесуточных данных о температуре поверхности моря с использованием ковариационных матриц ошибок данных наблюдений. В [Fomin et al., 2020] продемонстрирована возможность использования морской системы оперативного диагноза и прогноза, разработанной в Государственном океанографическом институте им. Зубова, для краткосрочного прогнозирования гидрометеорологических характеристик Каспийского моря. В [Дианский и др., 2020] представлена комплексная Система Морских Ретроспективных расчетов и Прогнозов (СМРП) гидрометеорологических и ледовых характеристик на примере её реализаций для акватории Азовского моря и Керченского пролива. В [Zakharova et al., 2021] представлены результаты экспериментов по ассимиляции данных наблюдений в численной модели гидротермодинамики Черного и Азовского морей с различными версиями данных наблюдений ЦКП “ИКИ-Мониторинг” (<http://ckp.geosmis.ru/>). Анализу результатов расчета гидрофизических полей Черного, Азовского и Мраморного морей по модели циркуляции INMOM, реализованной с пространственным разрешением 4 км, с различными алгоритмами усвоения данных о температуре поверхности моря с сенсора SEVIRI, установленного на спутники MSG, посвящена статья [Фомин и др., 2023].

В [Демышев и др., 2021] процедура усвоения данных наблюдений, развитая в работах [Кныш и др., 1988] и [Коротаев и др., 2018], использовалась для анализа гидрологической съемки в сентябре 2007 г. у западного побережья Крыма и в районе г. Севастополь, в которой были восстановлены антициклонический вихрь в Каламитском заливе в верхнем слое воды, антициклонический вихрь с радиусом около 15 км между 32.2 и 32.6° в.д. во всем слое воды, интенсивное течение вблизи г. Севастополь и вдоль западного берега Крыма, вихри с радиусом менее 10 км различного знака вращения в верхнем слое вдоль побережья.

В 2016 г. было выполнено несколько последовательных гидрологических съемок (экспедиции 87, 89 и 91-го рейсов НИС “Профессор Водяницкий”), что дало возможность провести подробный анализ гидрофизических полей и сравнить полученные особенности циркуляции в зависимости от времени года. На рис. 1 представлены станции, на которых были получены данные по температуре и солёности Черного моря.

Целью данной работы являлось изучение закономерностей формирования особенностей циркуляции в северной части Черного моря в зависимости от сезона на основе четырехмерного анализа гидрофизических полей, восстановленных с помощью модели МГИ, и данных гидрологических измерений 87, 89 и 91-го рейсов НИС “Профессор Водяницкий” (летний, осенний и зимний сезоны 2016 г.). Для изучения полученных особенностей динамики течений рассчитывались энергетические характеристики циркуляции и анализировались вертикальные разрезы в поле плотно-

сти. В отличие от работы [Демышев и др., 2021], гидрофизические поля рассчитывались для всего Черного моря и использовался более обширный набор данных по времени и пространству.

ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ, ОПИСАНИЕ ИСПОЛЪЗУЕМЫХ НАТУРНЫХ ДАННЫХ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕННЫХ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Используемая численная модель динамики Черного моря, разработанная в МГИ и основанная на полных уравнениях термогидродинамики океана в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды, краевые условия на поверхности, на дне и на твердых боковых стенках подробно описаны в работе [Демышев, 2021]. Система уравнений модели была дополнена уравнениями изменения плотности кинетической и потенциальной энергии [Демышев, 2004], на основе которых были рассчитаны энергетические характеристики циркуляции.

Символьная запись уравнения бюджета кинетической энергии (КЭ) имела вид:

$$E_t + Adv(P + E) = \Pi \leftrightarrow E + F_{Bfr}^{\tau}(E) - Diss_{Ver}(E) - Diss_{Hor}(E) + D_{Fic}(E),$$

где $Adv(P)$ — работа силы давления, $Adv(E)$ — адвекция кинетической энергии, $\Pi \leftrightarrow E$ — работа силы плавучести, $F_{Bfr}^{\tau}(E)$ — изменение КЭ за счет работы силы ветра и за счет трения о дно, $Diss_{Ver}(E)$ и $Diss_{Hor}(E)$ — диссипация энергии вследствие вертикального и горизонтального внутреннего трения, $D_{Fic}(E)$ — перераспределение кинетической энергии в бассейне и ее потеря за счет трения о боковые стенки.

Для усвоения данных трех гидрологических съемок 2016 г. использовалась процедура четырехмерного анализа [Кныш и др., 1988] и [Коротаев и др., 2018], основанная на фильтре Калмана, с учетом неоднородности и неизотропности ошибок оценок полей температуры и солёности. В начальный момент времени в качестве дисперсии ошибок оценок полей температуры, солёности задавались типичные дисперсии ошибок прогноза температуры и солёности, рассчитанные в [Коротаев и др., 2018]. На всех границах в качестве первого приближения предполагалось задание условий $\partial D_T^2 / \partial n = 0$, $\partial D_S^2 / \partial n = 0$, где D_T , D_S — поля среднеквадратических ошибок оценок полей T и S .

Численные расчеты по модели Черного моря проведены на горизонтальной сетке 1.64×1.64 км, по вертикали использовалось 27 горизонтов (z -уровней). Шаг по времени выбран 96 с. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5

[Mellor et al., 1982]. Влияние рек на циркуляцию учитывалось с помощью точечных источников воды с заданными скоростями. Для задания температуры, солёности и скорости в устьях рек и проливах использовались климатические данные [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991]. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали, а также коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии дисперсии ошибок были выбраны по результатам вспомогательных экспериментов.

Анализ полей проводился для **летнего, осеннего и осенне-зимнего** сезонов. Расчетные периоды времени 2016 г. — с 28 июня по 18 июля, с 29 сентября по 20 октября и с 15 ноября по 5 декабря (включены дни проведения экспедиционных рейсов, 125, 128 и 107 станций соответственно).

В работе использовались данные гидрологических съемок в 2016 г. на НИС “Профессор Водяницкий” о вертикальном и пространственном распределении температуры и солёности, взятые из банка данных МГИ [Суворов и др., 2003]. Максимальная глубина, до которой проводились зондирования, изменялась от 30 до 1900 м. Гидрологические измерения на каждой станции проводились с помощью комплекса SBE 911plus.

На поверхности моря задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, коротковолновой радиации, осадков и испарения, полученные по данным греческого центра атмосферных прогнозов SKIRON ($1/10^\circ$). Временной шаг для данных составлял 2 ч. Турбулентные потоки тепла на поверхности моря задавались из данных [NonHydrostatic SKIRON/Eta Modelling System] и не корректировались с использованием балк-формулы. Из-за особенностей географического положения в Черном море испарение преобладает над осадками [Иванов и др., 2011], поэтому осадки не корректировались в модели. Сохранение массы в модели обеспечивалось путем задания расхода воды через нижнебосфорское течение, рассчитанного таким образом, что в среднем за год сумма расходов рек и проливов и разницы между осадками и испарением была равна нулю.

Из анализа полей ветра в летний период отмечено, что с 28 июня по 11 июля преобладали ветры западного направления с максимальной скоростью до 12 м/с, с 12 июля — северо-восточные ветры с максимальной скоростью до 8 м/с. В осенний период с 29 сентября по 15 октября наблюдались ветры различного направления с максимальной скоростью до 10 м/с, с 16 октября — северо-восточные ветры с максимальной скоростью около 15 м/с. Из анализа полей ветра в осенне-зимний период отмечено, что с 15 по 17 ноября действовал северо-восточный ветер с максимальной скоростью до 10 м/с, с 18 ноября по 3 декабря преобладали

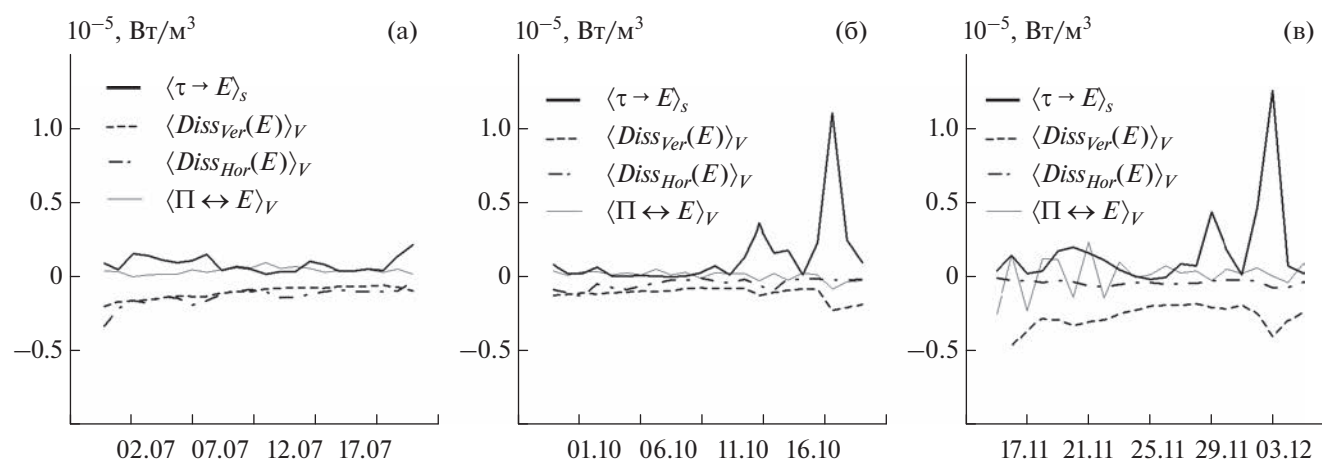


Рис. 2. Изменение со временем нормированных на объем расчетной области интегральных компонентов уравнения бюджета КЭ в летний (а), осенний (б) и осенне-зимний (в) сезоны

западные, северо-западные и юго-западные ветры с максимальной скоростью до 17 м/с.

В результате численных экспериментов были получены трехмерные поля гидродинамических и энергетических характеристик циркуляции на каждые сутки периодов интегрирования для акватории всего Черного моря. Область, расположенная между меридианами 31 и 37° в. д. и параллелями 43 и 45.5° с. ш. (рис. 1), была выбрана для анализа в следующих разделах.

АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛЯЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ, РАССЧИТАННЫХ ДЛЯ ТРЕХ СЕЗОНОВ 2016 г.

Проанализируем изменение со временем интегральных компонентов уравнения бюджета КЭ для рассматриваемых периодов времени (рис. 2). Угловыми скобками обозначена операция интегрирования.

В летний период времени максимальный приток в кинетическую энергию (рис. 2а) был от ветра и только при уменьшении скорости ветра работа силы плавучести оказывала преобладающее влияние. Потеря энергии происходила за счет горизонтального и вертикального внутреннего трения.

В осенний и осенне-зимний периоды времени (рис. 2б и 2в) основной вклад в кинетическую энергию также, как и летом, вносила работа силы ветра, но и достигались более высокие значения из-за усиления ветрового воздействия до максимальных значений около 15–17 м/с. Значения диссипации энергии вследствие вертикального и горизонтального внутреннего трения отрицательны. При увеличении притока от ветра также увеличивались модули $Diss_{Ver}(E)$ и $Diss_{Hor}(E)$.

Изменение потенциальной энергии для всех расчетных периодов определялось, в основном, вертикальной турбулентной диффузией и адвекцией потенциальной энергии.

Отметим, что при расчете энергетических характеристик в рассматриваемой области не учитывался приток энергии через жидкие границы. Возможно поэтому на рис. 2 при слабых ветрах диссипация превышала накачку энергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА 1 (ЛЕТНИЙ СЕЗОН)

В начальном поле течений (28 июня) наблюдались в верхнем слое антициклонический вихрь у юго-восточных берегов Крыма и циклонический вихрь у юго-западных берегов Крыма с радиусами около 25 км, а также два антициклонических вихря с радиусами около 25–30 км в западной части рассматриваемой области и циклонический вихрь с радиусом около 40 км в восточной глубоководной части (прослеживались до глубины 300 м). На рис. 3 представлены рассчитанные поля течений на горизонте 5 м для 29 июня, 10 и 17 июля. В течение расчетного периода крупные вихри различного знака вращения сохранялись. Антициклонический вихрь вблизи г. Ялта (например, рис. 3в) генерировался квазипериодически и мог перемещаться в том же направлении, что и ОЧТ, время существования 5–6 дней. Одним из возможным механизмом формирования могла быть сдвиговая неустойчивость (течение на шельфе направлено на северо-восток, а в глубоководной части моря — на юго-запад).

Со 2 по 10 июля отчетливо прослеживался поток ОЧТ вдоль Крымского побережья, максимальная скорость которого составляла до 44 см/с на верхних горизонтах (например, рис. 3б). В во-

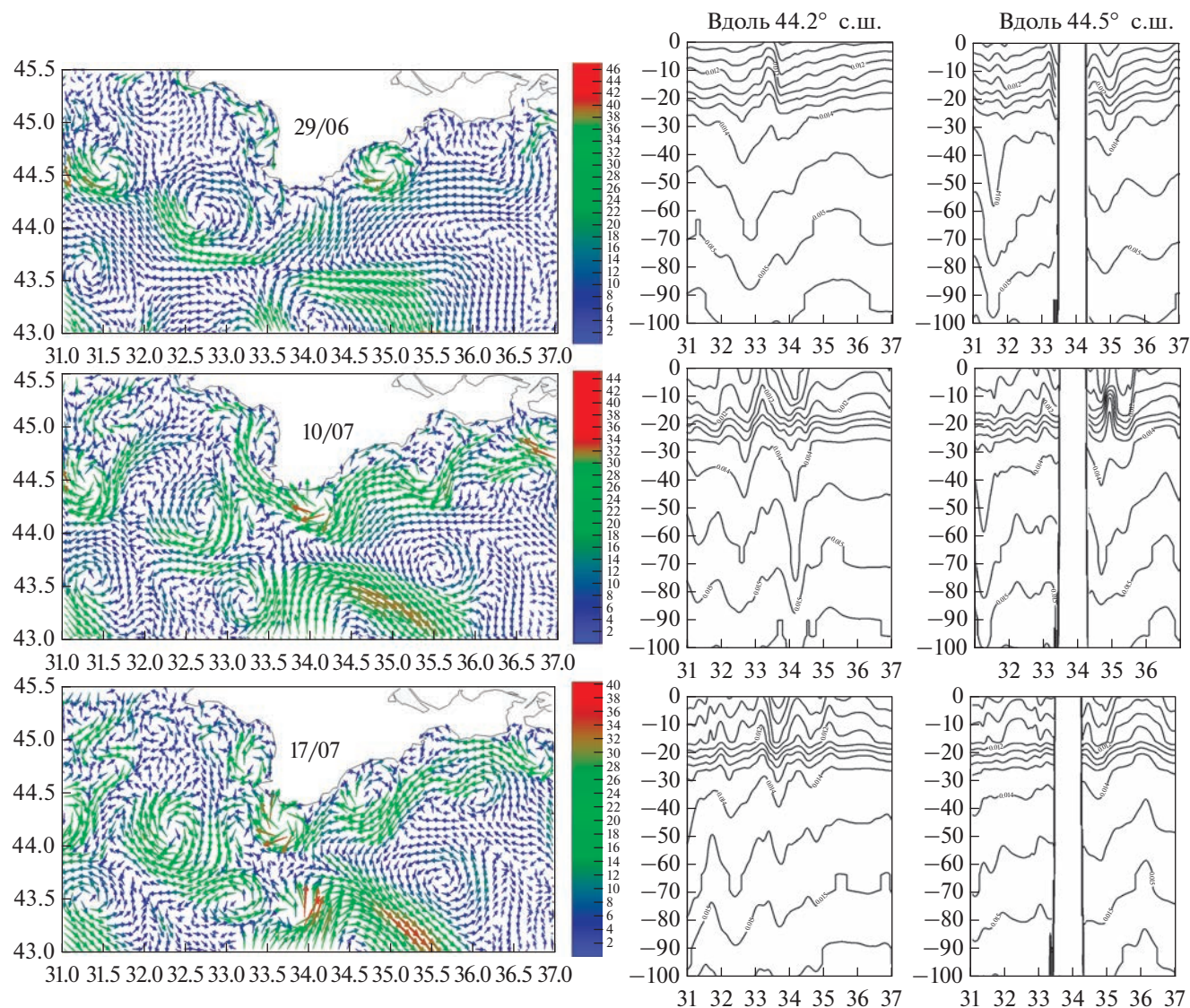


Рис. 3. Поля течений (10^{-2} м/с) на горизонте 5 м 29 июня (а), 10 июля (б) и 17 июля (в), а также вертикальные разрезы в поле плотности вдоль 44.2° и 44.5° с.ш.

сточной части области наблюдались две динамические зоны: прибрежная зона с антициклонической завихренностью течений и область циклонической завихренности в глубоководной части моря (например, рис. 3б и в).

В связи с некоторым ослаблением ветрового воздействия с 10 июля скорость ОЧТ на верхних горизонтах уменьшалась до 30 см/с (например, рис. 3в). Под влиянием ветра и особенностей рельефа дна наблюдалось меандрирование ОЧТ и формирование вихрей различных знаков с обеих сторон от стрежня течения. В Каламитском заливе и вдоль побережья наблюдались антициклонические вихри с радиусом около 15 км, в восточной глубоководной части области — циклонические вихри с радиусом 25–30 км.

Также отметим, что в течение всего расчета вдоль побережья Крыма генерировались вихри малых масштабов различного знака вращения в верхнем слое (со скоростями, не превышающими 20 см/с и временем жизни 2–3 дней). Возможный механизм формирования — набегание течения на неровности береговой линии и рельефа дна.

Далее были проанализированы распределения плотности по вертикали для различных разрезов и поля энергетических характеристик циркуляции, рассчитанные на каждые сутки периода интегрирования.

В центральной части у берега между 33.5 и 34.5° в.д. в период с 28 июня по 10 июля (например, на разрезе вдоль 44.2° с.ш. 10 июля) заглубление изопикн увеличилось. С 10 по 17 июля между

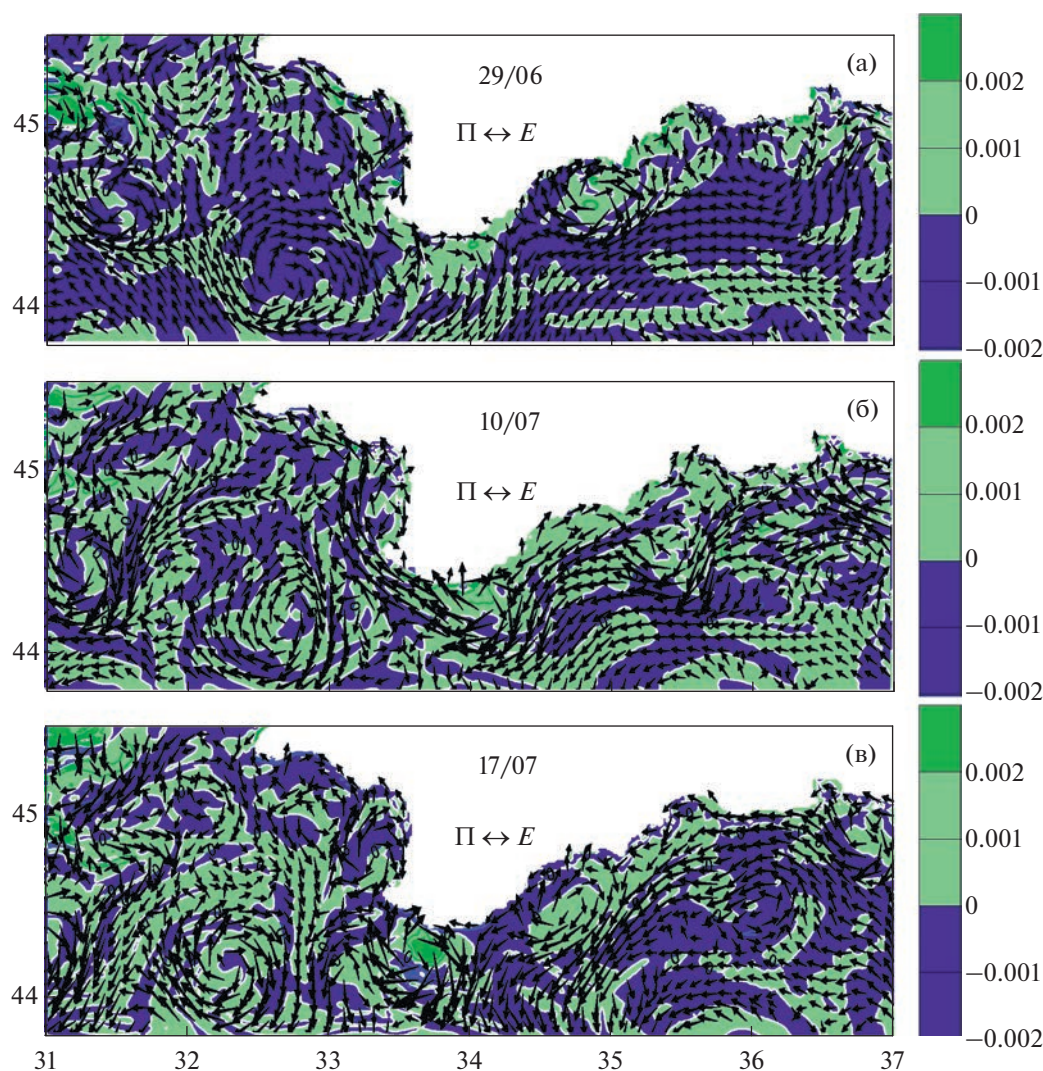


Рис. 4. Поля $P \leftrightarrow E$ (10^{-1} Вт/м³) на горизонте 5 м 29 июня (а), 10 июля (б), 17 июля (в).

35.5° и 37° в.д. (например, на разрезе вдоль 44.5° 17 октября) и в западной части области между 32 и 33° в.д. (например, 17 июля на вертикальном разрезе вдоль 44.2° с.ш.) также наблюдались увеличения наклона изопикнических поверхностей, и следовательно, росла доступная потенциальная энергия. Это является предпосылкой для генерации мезомасштабных структур в поле скорости.

Поля $P \leftrightarrow E$ (работа силы плавучести) имели сложную и изменчивую со временем пространственную структуру. Положительное значение $P \leftrightarrow E$ означает переход из ПЭ в КЭ, отрицательное значение $P \leftrightarrow E$ — переход из КЭ в ПЭ. Можно отметить преобладание отрицательных значений $P \leftrightarrow E$ в зонах формирования вихревых образований (например, рис. 4а–4в).

Данное обстоятельство и анализ вертикальных разрезов в поле плотности позволили нам пред-

положить, что возможной причиной образования антициклонических вихрей с радиусами около 25–30 км в западной части и вихрей вдоль юго-восточных берегов Крыма являлась, преимущественно, бароклинная неустойчивость.

Рассчитанные модельные поля течений не противоречат данным измерений, полученных в [Артамонов, Скрипалева и др., 2018], согласно которым циркуляция вод была представлена в основном потоками западного направления, ОЧТ представляло собой меандрирующий поток, при этом формирование вихрей и меандров наиболее интенсивно происходило в западной части съемки. Антициклонические вихри вблизи г. Севастополь и у юго-восточных берегов Крыма были заметны в распределении термохалинных характеристик.

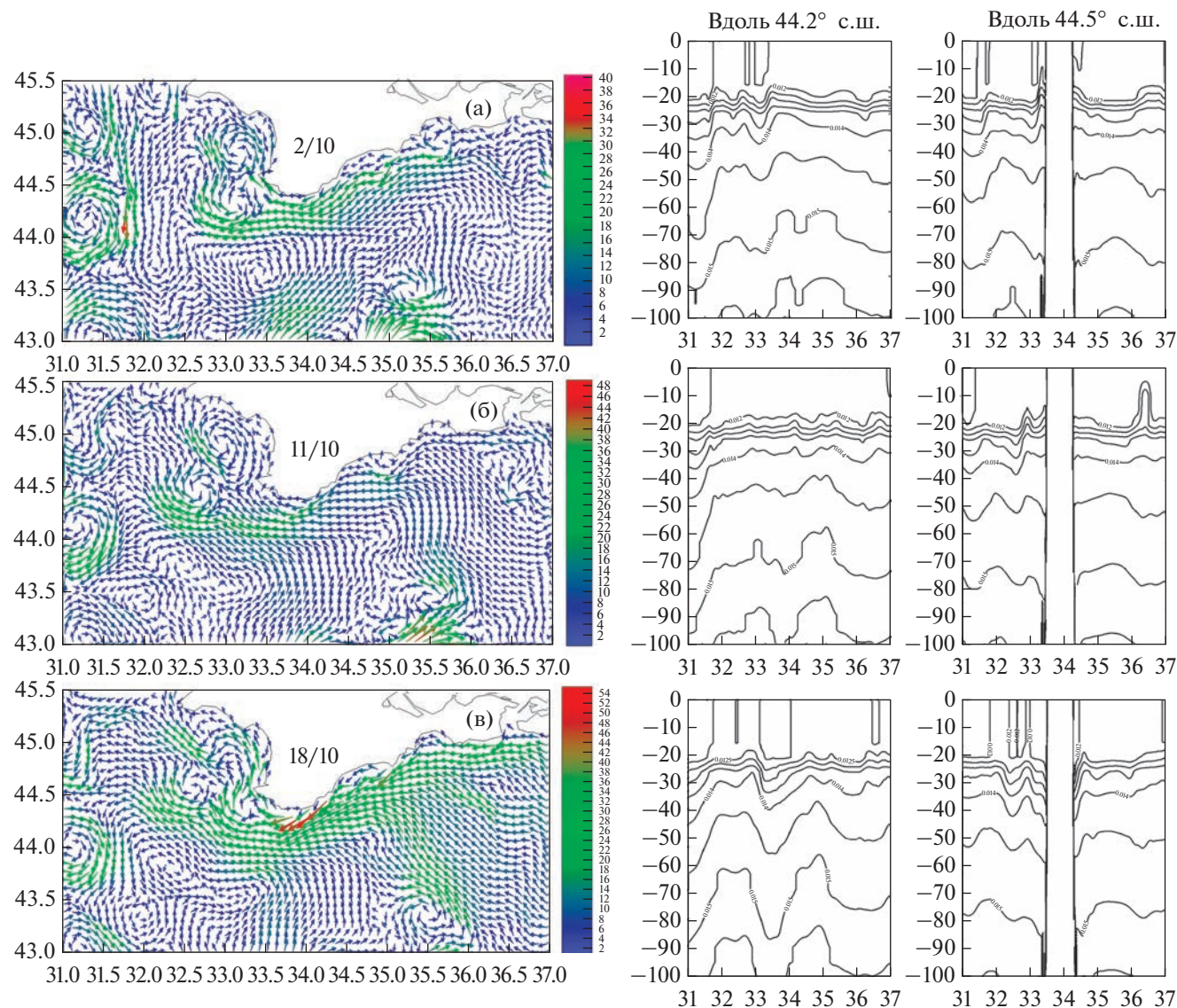


Рис. 5. Поля течений (10^{-2} м/с) на горизонте 5 м 2, 11 и 18 октября (а, б, в), а также вертикальные разрезы в поле плотности вдоль 44.2° и 44.5° с.ш.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА 2 (ОСЕННИЙ СЕЗОН)

В начальном поле течений (29 сентября) были отмечены следующие элементы циркуляции: два антициклонических вихря вблизи г. Севастополь и два антициклонических вихря в западной части области (прослеживались до глубины 300 м, с радиусами около 30 км), два антициклонических вихря с радиусами около 20 км в верхнем слое воды у юго-восточных берегов Крыма, один антициклонический и два циклонических вихря с радиусами около 35–40 км в центральной глубоководной части области (наблюдались до глубины 300 м). На рис. 5 представлены рассчитанные поля течений на горизонте 5 м для 2, 11 и 18 октября. В течение расчетного периода антициклони-

ческие вихри вблизи г. Севастополь и в западной части области (например, рис. 5а), а также циклонический вихрь между 35 и 36° в.д. сохранялись.

С 1 октября ОЧТ имело вид узкой, прижатой к Крымскому побережью, струи с максимальной скоростью до 54 см/с (17–18 октября) на верхних горизонтах (рис. 5в).

С 29 сентября по 15 октября вдоль восточного берега Крыма в верхнем слое при набегании течения на неровности береговой линии и рельефа дна формировались циклонические и антициклонические вихри малого масштаба (скорости не превышали 20 см/с, время жизни составляло 2–3 дня). Например, 2 октября у береговой черты проявилось вихревое образование с радиусом около 15 км между 35.5 и 36° в.д. (рис. 5а), 11 октября – циклони-

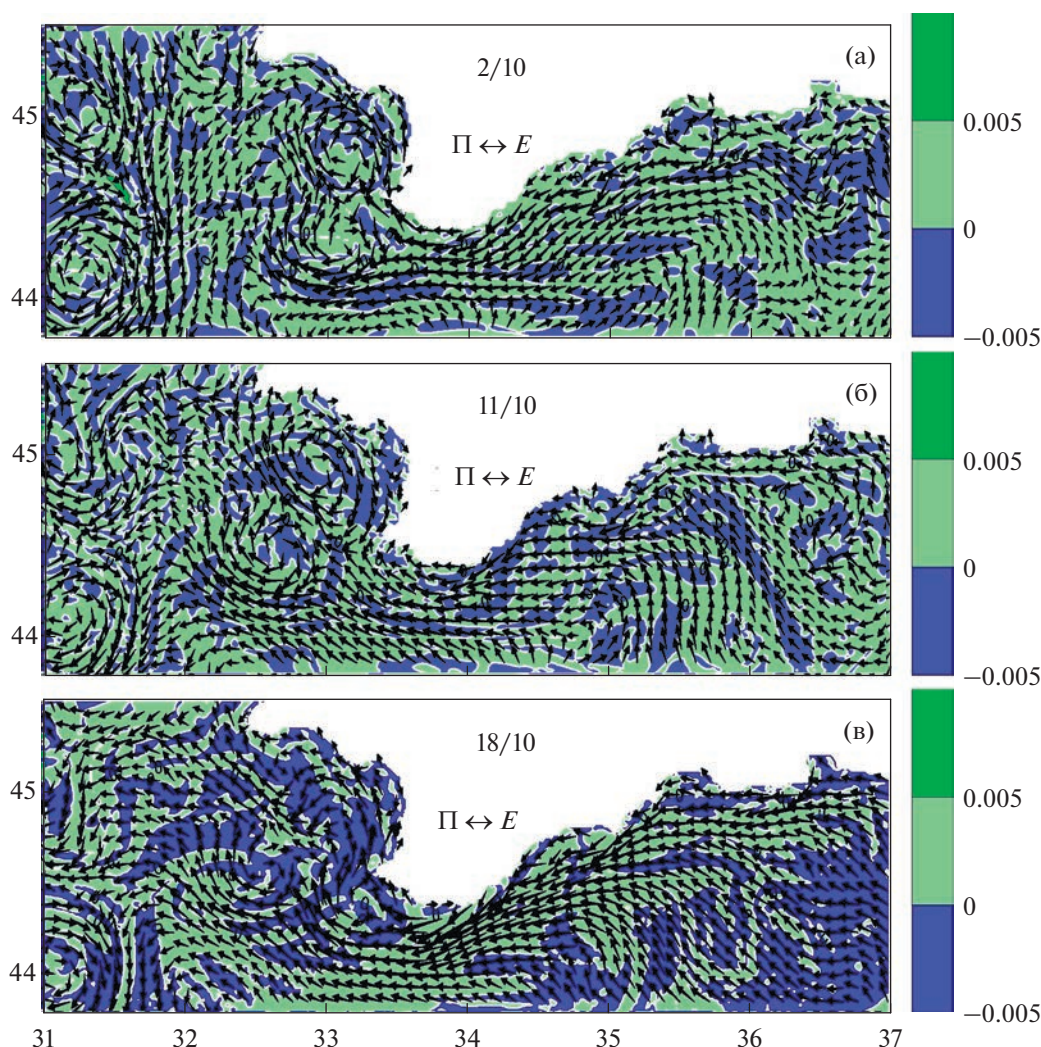


Рис. 6. Поля $\Pi \leftrightarrow E$ (10^{-1} Вт/м³) на горизонте 5 м 2, 11 и 18 октября (а, б, в).

ческий вихрь с радиусом около 30 км между 36 и 37° в.д. (рис. 5б).

В период с 16 октября ветровое воздействие усилилось до 15 м/с и в результате развивались интенсивные течения, вихревые образования в этот период вдоль восточного берега Крыма в верхнем слое воды не наблюдались (рис. 5в).

Из анализа распределений плотности по вертикали для различных разрезов в осенний сезон отмечено следующее. В начальный момент времени и нескольких последующих расчетных дней антициклоническим вихрям между 32.5 и 33.5° в.д. (например, разрез вдоль 44.2° с.ш. 2 октября) соответствовали заглупления изопикнических поверхностей. С течением времени из-за усиления процессов вертикального перемешивания и охлаждения вод верхнего квазиоднородного слоя наблюдалось уменьшение вертикального градиента плотности (например, разрез вдоль 44.2° с.ш.

11 октября), что может приводить к баротропизации течений.

В восточной части между 36 и 37° в.д. в период с 29 сентября по 11 октября (например, на разрезе вдоль 44.5° с.ш. 11 октября), а также в центральной части у берега между 33 и 34° в.д. в период с 11 по 18 октября (например, на разрезе вдоль 44.2° с.ш. 18 октября) были отмечены увеличения наклона изопикнических поверхностей. Таким образом, в указанных областях в результате увеличения горизонтального градиента плотности развивались процессы бароклинной неустойчивости.

Также были проанализированы поля энергетических характеристик циркуляции, рассчитанные на каждые сутки периода интегрирования. На рис. 6 в качестве иллюстрации приведены поля $\Pi \leftrightarrow E$ для 2, 11 и 18 октября.

В течение расчетного периода в полях работы силы плавучести преобладали отрицательные

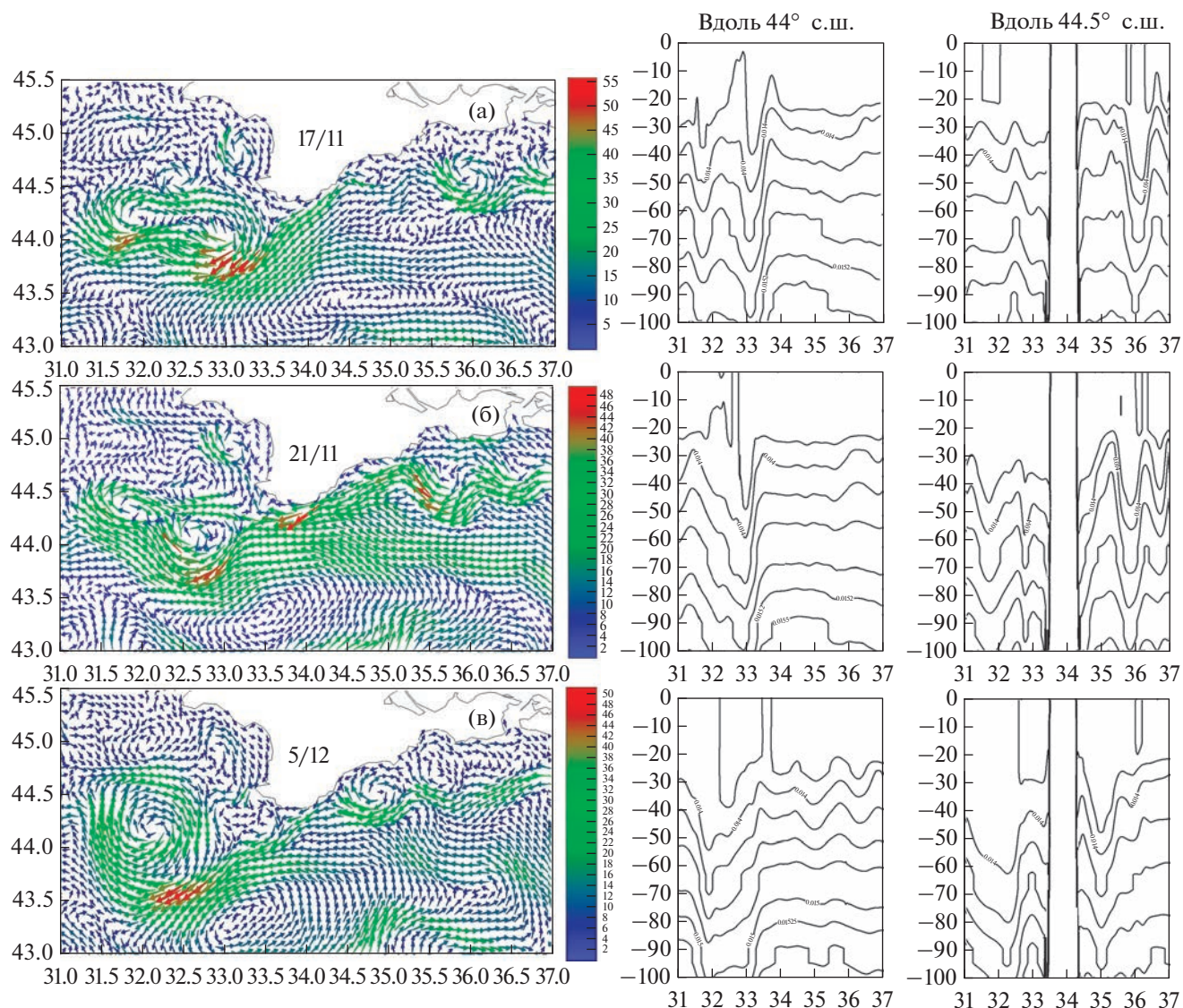


Рис. 7. Поля течений (10^{-2} м/с) на горизонте 5 м 17 ноября (а), 21 ноября (б), 5 декабря (в), а также вертикальные разрезы в поле плотности вдоль 44° и 44.5° с.ш.

значения $\Pi \leftrightarrow E$ в зонах формирования вихревых образований (например, 2 октября в восточной части, 18 октября у западных берегов). По сравнению с летним сезоном отмечено увеличение зон с положительными значениями $\Pi \leftrightarrow E$.

Полученные модельные поля течений не противоречили результатам обработки этой гидрологической съемки гидрологами [Артамонов, Скрипалева и др., 2018]: стрежень ОЧТ располагался над свалом глубин, максимальные скорости наблюдались у юго-западных берегов Крыма, в западной части прослеживался Севастопольский антициклон, на востоке съемки — антициклонический круговорот, в западной и юго-восточной частях съемки — циклонические меандры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА 3 (ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ СЕЗОН)

В начальном поле течений (15 ноября) были отмечены следующие элементы циркуляции: два антициклонических вихря вблизи г. Севастополь (прослеживались до глубины 300 м, с радиусами около 30 км), вихри различного знака вращений в верхнем слое воды у юго-восточных берегов Крыма и в западной части с радиусами менее 20 км.

На рис. 7 представлены рассчитанные поля течений на горизонте 5 м 17, 21 ноября и 5 декабря. В течение всего расчета ОЧТ имело ярко выраженный струйный характер (наблюдалось до глубины 100 м), было направленно на запад и юго-за-

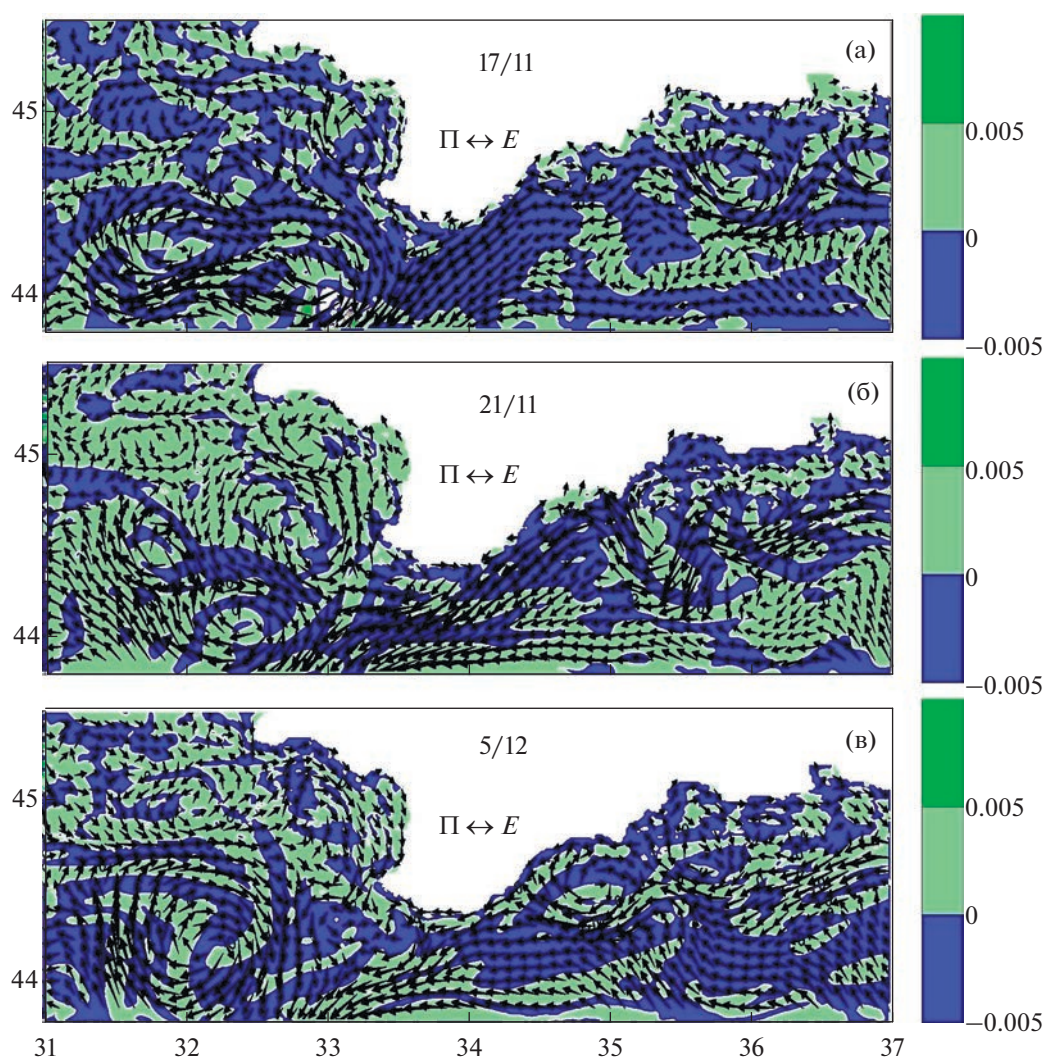


Рис. 8. Поля $P \leftrightarrow E$ (10^{-1} Вт/м³) на горизонте 5 м 17 ноября (а), 21 ноября (б) и 5 декабря (в).

пад вдоль Крымского побережья, максимальная скорость достигала 52 см/с на верхнем горизонте.

Под влиянием изменчивого поля ветра и особенностей береговой черты наблюдалось меандрирование ОЧТ и формирование вихрей различных знаков с обеих сторон от стрежня течения. В западной части генерировались и развивались циклонических и антициклонических вихрей малого масштаба.

Крупные вихри в западной части области (рис. 7а и 7б) сохранялись с 15 по 28 ноября, а далее в течение нескольких последующих дней они слились в один, например, как на рис. 7в (5 декабря). Антициклонический вихрь с радиусом около 25 км вблизи г. Ялта (прослеживался до глубины 100 м) наблюдался с 30 ноября по 5 декабря (рис. 7в).

Анализируя распределения плотности по вертикали для различных разрезов отметим, что в течение всего расчета в области 31.5 и 33° в.д. фиксировалось увеличение кривизны изопикнических поверхностей, что свидетельствует в пользу

предположения о генерации антициклонических вихрей в этом районе (например, на разрезе вдоль 44° с.ш.) за счет бароклинной неустойчивости. Увеличение наклона изопикнических поверхностей (увеличение кривизны изопикнических поверхностей) в период с 15 по 21 ноября также наблюдалось и в восточной области вдоль берега (например, на разрезе вдоль 44.5° с.ш. между 35.5 и 36.5° в.д.).

В полях работы силы плавучести можно отметить преобладание отрицательных значений $P \leftrightarrow E$ (переход из кинетической энергии в потенциальную) в зонах формирования вихревых образований, в частности, вдоль восточного побережья Крыма (например, рис. 8а–8в).

Рассчитанные поля течений не противоречат данным измерений, полученных в [Артамонов, Скрипалева и др., 2018], согласно которым фиксировалось увеличение кривизны изопикнических поверхностей, что свидетельствует в пользу

сировалось усиление ОЧТ в юго-западной части полигона, наличие циклонического меандра ОЧТ и Севастопольского антициклона на шельфе к западу от Каламитского залива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе гидродинамической модели и данных наблюдений по температуре и солёности, полученных в ходе трех гидрологических съёмок на НИС “Профессор Водяницкий”, рассчитаны динамические, энергетические характеристики циркуляции и вертикальные разрезы в поле плотности в северной части Черного моря с высоким пространственным разрешением (~1.6 км по горизонтали и 27 горизонтов по вертикали) в периоды проведения экспедиций в 2016 г. (летний, осенний и осенне-зимний сезоны).

По результатам расчетов для всех периодов получено, что максимальный приток в кинетическую энергию был от ветра (в осенний и осенне-зимний периоды времени достигались более высокие значения, чем в летний), а также от работы силы плавучести (при уменьшении скорости ветра). Потеря энергии происходила за счет горизонтального и вертикального внутреннего трения.

В летний сезон (рис. 3) отчетливо наблюдался поток струи ОЧТ вдоль Крымского побережья (с максимальной скоростью до 40 см/с). В западной части и вдоль юго-восточных берегов Крыма в результате увеличения наклона изопикнических поверхностей (и, как следствие, развитии процессов бароклинной неустойчивости) формировались антициклонические вихри с радиусами около 25–30 км. Также возможным механизмом генерации антициклонического вихря вблизи г. Ялта могла быть сдвиговая неустойчивость течений. В верхнем слое вдоль западного и восточного побережья Крыма генерировались вихри малых масштабов различного знака вращения как следствие влияния орографических особенностей береговой черты на течение.

В осенний сезон (рис. 5) наблюдалась узкая, прижатая к Крымскому побережью, струя ОЧТ. Формирование антициклонических вихрей с радиусами около 35–40 км в западной части области было связано с баротропной неустойчивостью, формирование антициклонического вихря у Крымского побережья и циклонического вихря между 36 и 37° в.д. — с бароклинной неустойчивостью. В верхнем слое вдоль восточного побережья Крыма при некотором ослаблении ветрового воздействия при обтекании ОЧТ неровностей рельефа дна генерировались вихри малых масштабов.

В осенне-зимний сезон (рис. 7) ОЧТ имело ярко выраженный струйный характер (с максимальной скоростью до 52 см/с при ветровом воздействии до 17 м/с). Возможным механизмом форми-

рования антициклонических вихрей около 30 км, расположенных между 31.5 и 33° в.д. являлась бароклинная неустойчивость, которая развивалась в результате увеличения наклона изопикнических поверхностей. При уменьшении ветрового воздействия между берегом и ОЧТ генерировались вихри разных масштабов также в связи с усилением процессов бароклинной неустойчивости. Вдоль западного берега наблюдались циклонические и антициклонические вихри малого масштаба при обтекании течения неровностей береговой линии и рельефа дна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 23-27-00141.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агошков В.И., Пармузин Е.И., Шутяев В.П. Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 643–654.
- Артамонов Ю.В., Алексеев Д.В., Шутков С.А. и др. Динамика и структура вод северо-западной части Черного моря в сентябре 2013 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2017. № 1. С. 4–14.
- Артамонов Ю.В., Алексеев Д.В., Кондратьев С.И. и др. Гидрологические условия в западной части Черного моря в ноябре 2015 года (по материалам 81-го рейса НИС “Профессор Водяницкий”) // Морской гидрофизический журн. 2016. № 4. С. 64–78.
- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Алексеев Д.В. и др. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС “Профессор Водяницкий”) // Морской гидрофизический журн. 2018. Т. 34. № 3. С. 247–253.
- Артамонов Ю.В., Алексеев Д.В., Скрипалева Е.А. и др. Особенности сезонной и синоптической изменчивости структуры вод в зоне Основного Черноморского течения в осенне-зимний период 2016 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2018. № 1. С. 32–43.
- Артамонов Ю.В., Федирко А.В., Скрипалева Е.А. и др. Структура вод в зоне Основного Черноморского течения весной и летом 2017 г. (94-й, 95-й рейсы НИС “Профессор Водяницкий”) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2019. № 1. С. 16–28.
- Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Федирко А.В. и др. Циркуляция вод в северной части Черного моря летом — зимой 2018 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2020. № 1. С. 69–90.

- Беляев К.П., Танажур К.А.С., Тучкова Н.П. Сравнение методов усвоения данных буев “АРГО” в гидродинамической модели океана // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 643–653.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1991. 428 с.
- Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. С. 137–137.
- Демьшев С.Г. Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч.I. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 9. С. 65–80.
- Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А., Алексеев Д.В. и др. Анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции вод у берегов Западного Крыма на основе ассимиляции данных наблюдений в численной модели динамики Черного моря // *Морской гидрофизический журн.* 2021. Т. 37. № 1(217). С. 23–40.
- Дианский Н.А., Фомин В.В., Коршенко Е.А., Кабатченко И.М. Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов гидрометеорологических характеристик Азовского моря и Керченского пролива // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг*. 2020. Т. 2. С. 131–140.
- Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // *Морской гидрофизический журн.* 2004. № 1. С. 52–68.
- Зацепин А.Г., Баранов В.И., Горбачкий В.В. и др. Черноморский полигон ИО РАН и перспектива его использования для решения задач прибрежной оперативной океанографии // *Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП–2018*. 2018. С. 139–142.
- Зацепин А.Г., Горбачкий В.В., Мысленков С.А. и др. Сравнение характеристик течений, измеренных КВ и СВЧ радиолокаторами на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море, с данными ADCP и дрейфтеров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 7. С. 250–266.
- Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2011. 212 с.
- Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д. и др. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 4. С. 501–513.
- Кныш В.В., Коротаев Г.К., Мизюк А.И., Саркисян А.С. Усвоение гидрологических наблюдений для расчета течений в морях и океанах // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 1. С. 67–85.
- Кныш В.В., Моисеенко В.А., Чернов В.В. Некоторые результаты четырехмерного анализа гидрофизических полей в Тропической Атлантике // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1988. Т. 24. № 7. С. 744–752.
- Коротаев Г.К., Кныш В.В., Лишаев П.В. и др. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели // *Морской гидрофизический журн.* Т. 34. № 1. С. 40–56.
- Сильвестрова К.П., Мысленков С.А., Зацепин А.Г. и др. Возможности использования GPS-дрейфтеров для исследования течений на шельфе Черного моря // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 159–166.
- Суворов А.М., Андриющенко Е.Г., Годин Е.А. и др. Банк океанологических данных МГИ НАНУ: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // *Системы контроля окружающей среды*. 2003. С. 130–137.
- Фомин В.В., Дианский Н.А. Влияние способов усвоения спутниковых данных о температуре поверхности моря на воспроизведение гидрофизических полей Черного, Азовского и Мраморного морей в модели INMOM // *Метеорология и Гидрология*. 2023. Т. 48. № 2. С. 15–30.
- Agoshkov V.I., Gusev A.V., Diansky N.A. and Oleinikov R.V. An algorithm for the solution of the ocean hydrothermodynamics problem with variational assimilation of the sea level function data // *Russian J. Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2007. V. 22. № 2. P. 133–161.
- Agoshkov V.I., Parmuzin E.I., Zakharova N.B., Shutyaev V.P. Variational assimilation with covariance matrices of observation data errors for the model of the Baltic Sea dynamics // *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2018. V.33. № 3. P. 146–160.
- Fomin V.V., Diansky N.A., Korshenko E.A. et al. The Marine Hindcast and Forecast System for Diagnosis and Prediction of Hydrometeorological Characteristics of the Caspian Sea and Forecast Verification Based on Field Measurements // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2020. № 45. P. 639–649.
- Kaurkin M.N., Ibrayev R.A., Belyaev K.P. Assimilation of the AVISO altimetry data into the ocean dynamics model with a high spatial resolution using ensemble optimal interpolation (EnOI) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 1. V. 56–64.
- Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. V. 20. № 4. P. 851–875.
- NonHydrostatic SKIRON/Eta Modelling System. URL: <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php>
- Oke P.R., Brassington G.B., Griffin D.A., Schiller A. Ocean data assimilation: A case for ensemble optimal interpolation // *Aust. Meteorol. Oceanogr.* 2010. V. 59. P. 67–76.
- Zakharova N.B., Sheloput T.O., Lezina N.R. et al. Processing and assimilation of observation data for the hydrodynamics model of the Black Sea and the Sea of Azov // *J. Physics: Conference Series*. 2021. V. 2131. 022010.

Analysis of the Features of Water Circulation in the Northern Part of the Black Sea for Different Seasons on the Basis of the Results of Numerical Modeling with the Assimilation of the Data of Hydrological Surveys in 2016

S. G. Demyshev^{1, *} and N. A. Evstigneeva^{1, **}

¹*Marine Hydrophysical Institute RAS, Kapitanskaya str., 2, Sevastopol, 299011 Russia*

**e-mail: demyshev@gmail.com*

***e-mail: naevstigneeva@yandex.ru*

The analysis of the dynamic and energy characteristics of water circulation in the northern part of the Black Sea was performed on the basis of the assimilation in the numerical model of the data of three hydrological surveys in 2016, carried out on expeditions of 87, 89 and 91 cruises of the R/V Professor Vodyanitsky (summer, autumn and autumn-winter seasons). Numerical experiments were implemented on a horizontal grid ($\sim 1.6 \text{ km} \times \sim 1.6 \text{ km}$) with 27 vertical horizons and an atmospheric effect close to the real one was used. A procedure of assimilation of the observational data was based on the Kalman filter, taking into account the heterogeneity and nonisotropy of the errors of the estimates of the temperature and salinity fields. The integral energy terms in the kinetic and potential energy budget equations for three seasons were estimated. In the summer season, there was a slight weakening of the RC and the main mechanism for the formation of anticyclonic eddies near Sevastopol and near the southeastern shores of Crimea was baroclinic instability of the current (as evidenced by the increase in the slope of isopycnical surfaces and negative values of the work of the buoyancy force). An anticyclonic eddy near Yalta with a radius of about 25 km was generated due to the development of shear instability of the current. In the autumn season, the RC jet was pressed to the shore and there was a decrease in the number of eddies in comparison to the summer season. The formation of anticyclonic eddies with a radius of about 35–40 km in the western part of the region was caused by barotropic instability of the current, the formation of eddies along the Crimean coast – by baroclinic instability. In the autumn-winter season, the RC had a pronounced jet character and there was an increase in the processes of baroclinic instability with the generation of eddies of different scales between the coast and the RC, as well as in the area, located between 31.5° and 33° E, with the weakening of the wind effect. During all seasons, small-scale anticyclonic and cyclonic eddies could be generated along the western and eastern coast of Crimea in the upper layer when current flowed around the coastline and inhomogeneities of the bottom topography under the action of weak winds.

Keywords: Black Sea, numerical modeling, high spatial resolution, observational data assimilation, meso-scale and submesoscale eddies