

УДК 551.465

## ЧЕРНОМОРСКИЕ ВНУТРИПИКНОКЛИННЫЕ ЛИНЗЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ БАССЕЙНА

© 2020 г. А. И. Мизюк<sup>а</sup>, \*, Г. К. Коротаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБУН ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, 2, 299011, Севастополь, Россия

\*e-mail: artem.mizyuk@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 22.05.2019 г.

После доработки 06.09.2019 г.

Принята к публикации 25.09.2019 г.

Точный сценарий распространения высокосолёных мраморноморских вод в бассейне Чёрного моря не ясен. Вместе с речным стоком они формируют преобладающую халинную стратификацию бассейна. Одним из режимов их распространения является формирование линз, аналогичных высокосолёным и тёплым линзам средиземноморской воды в Атлантическом океане. Целью настоящей работы является численное моделирование и последующий анализ таких динамических структур, формирующихся в Чёрном море в результате водообмена через Босфор. Основной сложностью при этом является необходимость высокого пространственного разрешения в проливе. В работе представлено краткое описание используемого комплекса моделирования океана *NEMO* и особенности конфигурации, позволяющей воспроизводить циркуляцию в бассейнах Азовского, Чёрного и Мраморного морей с разрешением 1.16 км. В качестве атмосферного воздействия использовались поля из атмосферного реанализа *ERA5*. Проведенный численный эксперимент позволили воспроизвести типичную картину сезонной изменчивости Основного черноморского течения (ОЧТ), а также особенности вертикальной структуры вод бассейна для периода 2008–2009 гг. Пространственное разрешение результатов численного моделирования позволило довольно качественно реконструировать динамику солёных вод в бассейне и у выхода пролива Босфор. В период 2008–2009 гг. воспроизведено пять линз, которые формируются вблизи пролива и захватываются струей ОЧТ. Они хорошо выражены в поле солёности на протяжении одного–двух месяцев. На примере одной из линз показано, что ядро расположено на глубине около 75 м. Вертикальный размер структуры – около 40 м, а горизонтальный размер составляет 15 км. Результаты моделирования демонстрируют, что события формирования линз связаны с увеличением притока солёных вод после штормов в акватории Мраморного моря. Проверка полученных в работе результатов возможна на основании специализированного полевого эксперимента в прибосфорском районе в периоды наиболее вероятного образования черноморских внутрипикноклиновых линз.

**Ключевые слова:** численные модели циркуляции, внутрипикноклиновые линзы, Чёрное море, Босфор, Мраморное море, *NEMO*, высокое разрешение

**DOI:** 10.31857/S0002351520010101

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Описание процесса поступления мраморноморских вод в Чёрное море является весьма актуальной задачей, сложность которой обусловлена, во-первых, значительным перепадом солёности между водными массами. Во-вторых, водообмен происходит через весьма мелкий (максимум до 70 м) и узкий пролив сложной формы. Очевидно, что в проливе ярко выражена двуслойная структура течений и средиземноморские воды движутся в придонном слое (порядка 20 м). Точный сценарий дальнейшего распространения высокосолёных вод не ясен. Однако, вместе с речным

стоком они формируют преобладающую халинную стратификацию черноморского бассейна.

Детальные экспедиционные наблюдения распространения солёных и тёплых вод Мраморного моря были выполнены турецкими океанологами [1]. Они показали, что, первоначально стекая по шельфовому склону, эти воды взаимодействуют с водами холодного промежуточного слоя (ХПС) и затем попадают в каньон Сакария. В результате перемешивания они быстро трансформируются, уменьшая свою плотность, но все же остаются тяжелее окружающих вод. Трансформированные мраморноморские воды стекают вдоль каньона и, достигнув соответствующей глу-

бины, распространяются вдоль изопикнической поверхности в открытое море в виде интрузий [2, 3].

Недавний анализ наблюдений температуры и солености морской воды, выполненных в Черном море буями-профилемерами [4], показал, что эти интрузии переносятся течениями достаточно далеко от места их формирования и наблюдаются почти по всей глубоководной части Черного моря. В этом отношении распространение мраморноморских вод в Черном море оказывается подобным распространению средиземноморских вод в Атлантическом океане [5]. Наблюдения показали [6], что существует два режима распространения средиземноморских вод в Атлантике, один из которых связан с распространением высокосоленных и теплых линз средиземноморской воды, наблюдающихся на больших расстояниях от места их формирования. Такие линзы получили название “Медди” и, как отмечается в [7], их образование происходит на особенностях топографии в результате отрыва от сползающего по склону языка соленых вод.

В работе [7] отмечалось, что в распределении температуры морской воды на горизонте 50 м, построенных по результатам численного моделирования циркуляции Черного моря с ассимиляцией альтиметрических наблюдений, выделяются линзы теплой и соленой воды. Образование этих линз происходило в прибосфорском районе Черного моря при импульсном вторжении теплых и соленых вод нижнебосфорского течения. Они подхватывались Основным черноморским течением (ОЧТ) и переносились на восток до Кавказского побережья. В этой работе, однако, не была представлена информация о размерах линз, траектории их движения, статистике образования и т.д.

Многочисленные наблюдения теплых линз средиземноморской воды показывают, что они имеют диаметр от 20 до 100 км. В силу особенности плотностной стратификации вод Черного моря первый бароклинный радиус деформации Россби оказывается в два раза меньшим, чем в умеренных широтах Северной Атлантики. Поскольку он определяет характерный масштаб синоптических вихрей, можно предположить, что диаметр линз в Черном море (если они существуют) должен лежать в диапазоне 10–50 км и радиус линзы среднего размера будет равен 15 км. Численная модель, упомянутая в работе [7], имела шаг сетки по горизонтали около 5 км и на радиус линзы приходилось три узла, что недостаточно для хорошего разрешения ее структуры.

Недавно в МГИ была подготовлена конфигурация модели *NEMO* [8], описывающая динамику для региона Черного, Азовского и Мраморного морей (каскада) [9], позволяющая исследовать водообмен через проливы. Ее развитием стала аналогичная конфигурация с разрешением

1.16 км ( $1/96^\circ \times 1/69^\circ$ ), которая дает возможность надежно воспроизводить динамику мезомасштабных образований. Здесь использован простой подход равномерного увеличения разрешения во всей расчетной области, в отличие от метода локального сгущения расчетной сетки для уточнения динамики в проливах [10, 11].

Целью настоящей работы является воспроизведение и исследование структуры и траекторий внутриводных линз в бассейне Черного моря, формирующихся в результате поступления мраморноморских вод, посредством численного моделирования циркуляции на основе приведенной модели. Квазирегулярная расчетная сетка позволяет исследовать эволюцию внутриводных линз, образующихся на выходе из пролива Босфор (согласно работе [7]), вдали от места их формирования.

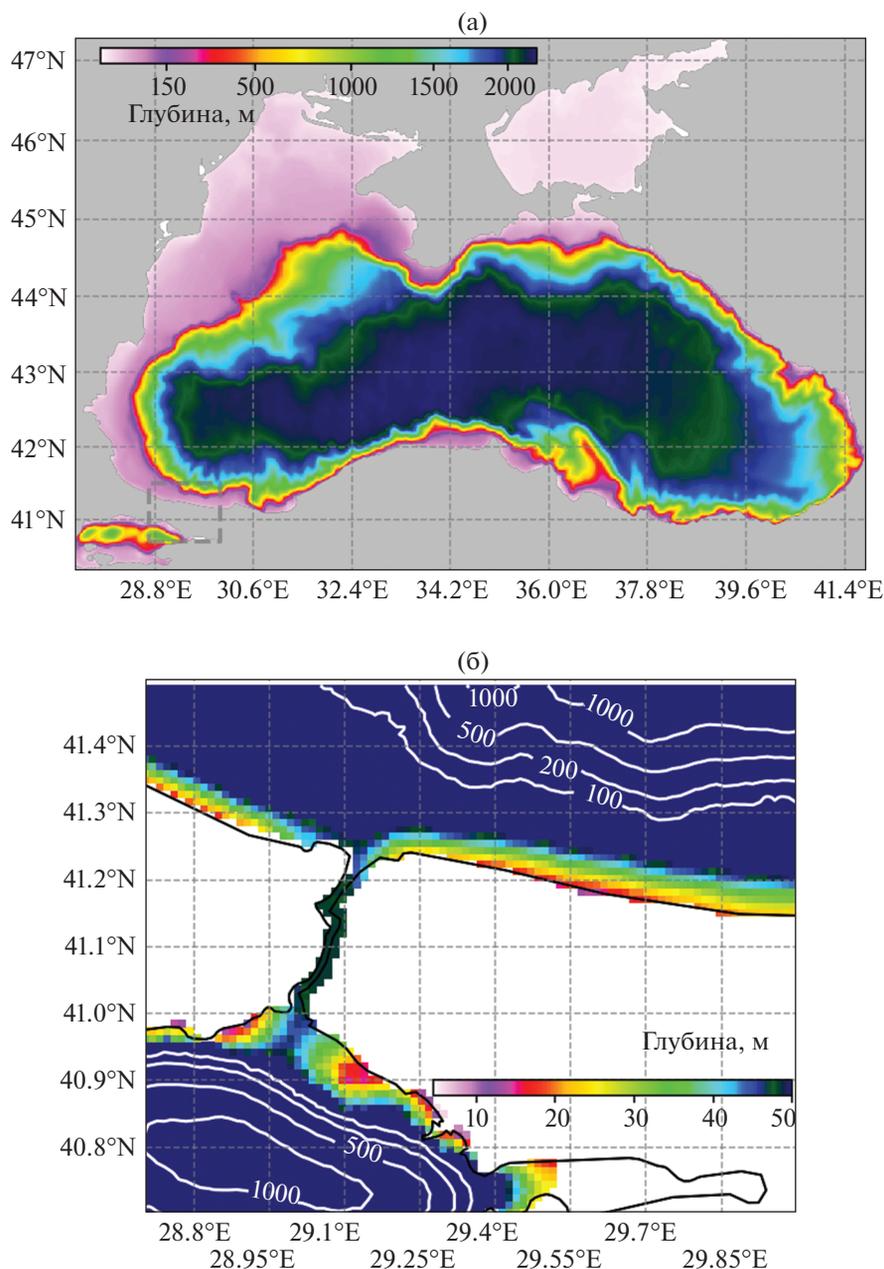
Работа имеет следующую структуру. В разделе 2 описываются особенности используемой региональной конфигурации численной модели циркуляции. Дается общая характеристика полей температуры и солености, а также циркуляции вод. Третий раздел посвящен событиям формирования внутриводных линз в районе устья пролива Босфор и описанию характерных траекторий их распространения, анализируется их структура, определяются характерные размеры и эволюция их характеристик. В обсуждении проводится сопоставление полученных в численном эксперименте свойств линз в Черном море с аналогичными линзами, формируемыми в результате затoka средиземноморских вод в Атлантический океан и оценивается возможность организации специального эксперимента для поиска внутриводных линз в районе устья пролива.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

### 2.1. Модель общей циркуляции и граничные условия

В данной работе используется региональная конфигурация модели *NEMO* [8] с высоким пространственным разрешением, позволяющая воспроизводить мезо- и субмезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в морях каскада. Расчетный домен представляет собой квазирегулярную сетку, покрывающую каскад бассейнов Мраморного, Черного и Азовского морей с шагами  $1/96^\circ$  по широте и  $1/69^\circ$  по долготe. Это соответствует приблизительно 1.157 км в меридиональном направлении. Вдоль параллели шаг меняется равномерно от 1100 на севере до 1230 м на юге. Батиметрия домена построена на основе массива *EMODNet*<sup>1</sup> (рис. 1). Для получения адекватных зна-

<sup>1</sup> Батиметрические метаданные и данные цифровой модели рельефа были получены с портала батиметрии *EMODnet* – <http://www.emodnet-bathymetry.eu>.



**Рис. 1.** Расчетный домен конфигурации: (а) батиметрия [м]; (б) приближение в область пролива Босфор, демонстрирующее расположение расчетных точек по отношению к реальной береговой черте (черная линия) в этой акватории.

чений расхода через пролив Босфор был использован прием “полузакрытая” ячейка [8] для достижения поперечного размера в проливе 1000 м.

Гидродинамический блок модели основан на системе примитивных уравнений [8]. Для нелинейных слагаемых в уравнениях переноса–диффузии тепла и соли используется схема *TVD* [12]. Дискретизация по времени осуществляется посредством модифицированной схемы “чехарда” [13]. По вертикали используется *z*-координата с дробным шагом.

Параметризация вертикального турбулентного перемешивания выполнена посредством модели *k-ε* [14]. Обмен по горизонтали описывается бигармоническим оператором с коэффициентами вязкости ( $-4 \times 10^7 \text{ м}^4/\text{с}$ ) и диффузии тепла и соли ( $-8 \times 10^6 \text{ м}^4/\text{с}$ ). В качестве уравнения состояния используется формула ЮНЕСКО [15].

Расчет уровня моря осуществляется с учетом кинематического условия на поверхности моря [16]. Для этого используется схема расщепления по времени, предполагающая на каждом шаге “медленной” моды расчет поля уровня из проин-

тегрированных по вертикали уравнений движения с шагом по времени 4 с (т.н. “быстрая” мода), а затем численное интегрирование уравнений для трехмерных гидрофизических параметров. Это т.н. “медленная” мода, для которой шаг по времени составляет 1 мин.

При численном интегрировании системы уравнений на твердых боковых границах для уравнений движения для тангенциальной компоненты скорости ставится условие скольжения и равенство нулю нормальной компоненты скорости. На дне задается нелинейное трение для горизонтальных компонент скорости и равенство нулю вертикальной компоненты скорости. В уравнениях переноса – диффузии тепла (соли) на боковых границах и дне ставятся условия отсутствия потоков. Для граничных условий на поверхности в настоящей работе используются поля температуры и влажности воздуха на уровне 2 м, компонент горизонтальной скорости ветра на 10 м, потоки нисходящего длинноволнового и коротковолнового излучения, осадки в жидкой и твердой фазах из глобального атмосферного реанализа последнего поколения ERA5 [17]. Этот продукт имеет пространственное разрешение  $1/4^\circ$ . Временное разрешение составляет 1 ч, что может быть весьма важно для воспроизведения короткопериодных процессов и дневного хода.

Для получения адекватных значений температуры в Азовском море использовалась коррекция потока тепла: в момент, когда вода достигает температуры заморзания, ставится условие отсутствия потока тепла, что позволяло не описывать формирование ледяных полей.

В Мраморном море, западнее о. Мармара (приблизительно вдоль  $27.38^\circ$  в.д.), используется открытая жидкая граница. Граничные условия для температуры и солёности, уровня и баротропного транспорта были получены на основе продуктов Службы мониторинга состояния морской среды проекта Коперник (Copernicus Marine Environment Monitoring System) [18].

При проведении численных экспериментов сток рек Черного и Азовского моря учитывается на основе данных из [19, 20]. Устья рек рассматриваются как точки поступления пресной воды. При этом предполагается, что вода поступает во все ячейки модели от поверхности до дна, изменяя общую солёность в столбе жидкости. В [9] было показано, что учет речного стока таким образом с данными из [20] позволил воспроизвести тренд солёности в бассейне Азовского моря. Потоками тепла и импульса в устьях рек, а также речным стоком в бассейне Мраморного моря мы пренебрегали. В расчетах предполагалось, что термохалинные характеристики этой части каскада будут в большей степени определяться граничными условиями на открытой границе.

## 2.2. Начальные условия и численный эксперимент

Для подготовки начальных полей была использована процедура комбинации различных источников, подробно изложенная в [9]. Температура и солёность в Азовском море построены посредством оптимальной интерполяции наблюдений *in situ*. В качестве начальных условий для Черного моря использованы поля температуры и солёности из реанализа гидрофизических параметров ЦМП ЧМ (<http://mis.bsmfc.net>, дата последнего обращения 29.03.2018 г.).

Исходное разрешение подготовленных полей составляло  $1/24^\circ$ . Далее массивы были проинтерполированы на сетку новой конфигурации и выполнен предварительный прогностический расчет циркуляции каскада с 15 августа по 31 декабря 2007 г. для адаптации модели к высокому разрешению. Результаты предыдущих работ показали, что данный процесс происходит за период порядка 4 мес. [21].

С использованием полученных начальных и граничных условий на базе новой конфигурации модели был проведен прогностический расчет (без усвоения данных) общей циркуляции морей каскада на период январь 2008–апрель 2010 гг. с разрешением 1.16 км (эксперимент HR).

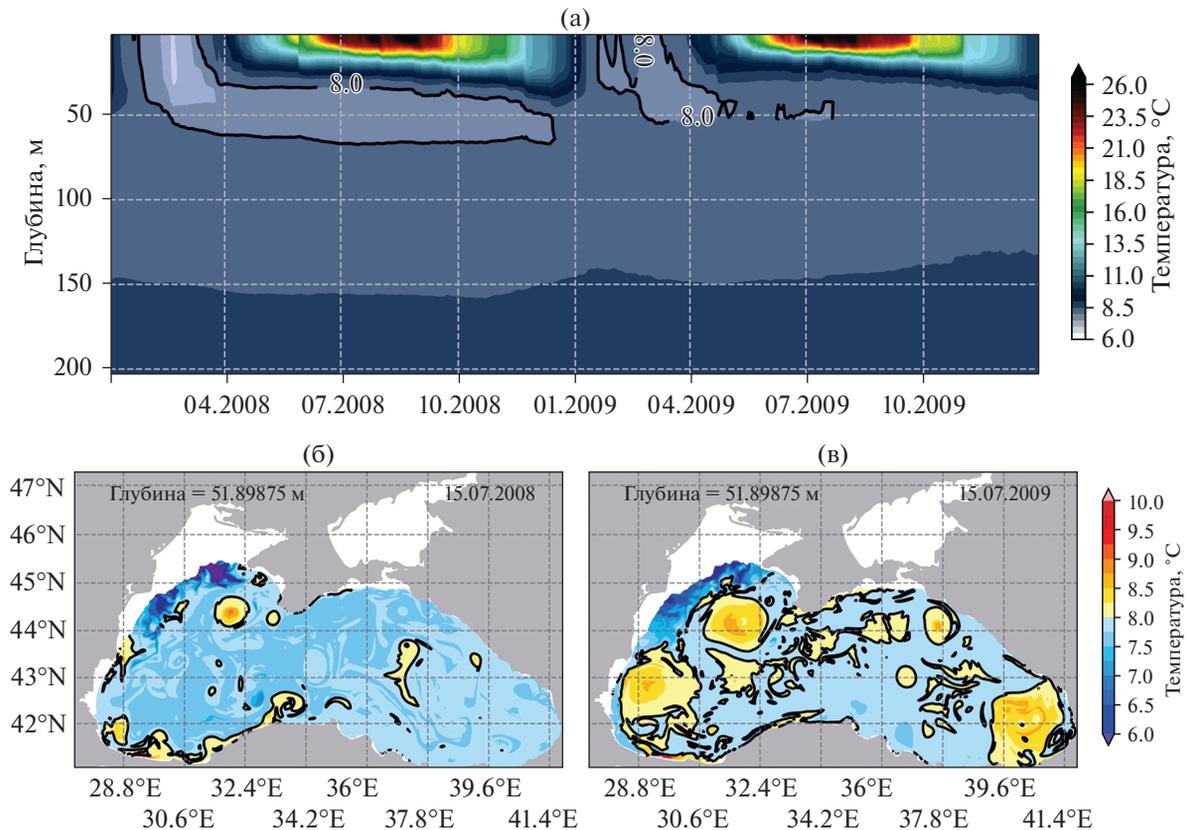
## 2.3. Идентификация центра линзы

В дальнейшем рассматриваются внутривихревые “солёные” линзы, которые формировались в численном расчете. Для определения положения центра линзы мы использовали полуавтоматическую методику, основанную на расчете параметра Окубо–Вейса [22, 23]:

$$W = s_n^2 + s_s^2 - \omega,$$

где  $s_n = du/dx - dv/dy$  и  $s_s = dv/dx + du/dy$  (нормальная и сдвиговая компоненты напряжения),  $\omega$  – относительная завихренность поля скорости.

Отрицательные значения параметра ( $W < 0$ ) указывают на области с преобладанием относительной завихренности, то есть где определяющим движением является вращение частиц. Для определения положения границ вихревой структуры на основе результатов эксперимента в качестве порогового значения параметра Окубо–Вейса взято  $W_l < -2 \times 10^{-10} \text{ с}^{-1}$ . Наиболее ярко линзы проявлялись в поле солёности на горизонте 64.07 м. Поскольку нас интересовали линзы с более солёной (относительно фоновой) трансформированной мраморноморской водной массой, дополнительно было выбрано пороговое значение для солёности (выше 19.5‰).



**Рис. 2.** Холодный промежуточный слой по результатам численного моделирования: а – средняя по глубоководной части Черного моря температура в слое 0–200 м; б, в – температура на горизонте 51.9 м 15 июля 2008 и 2009 г., соответственно.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

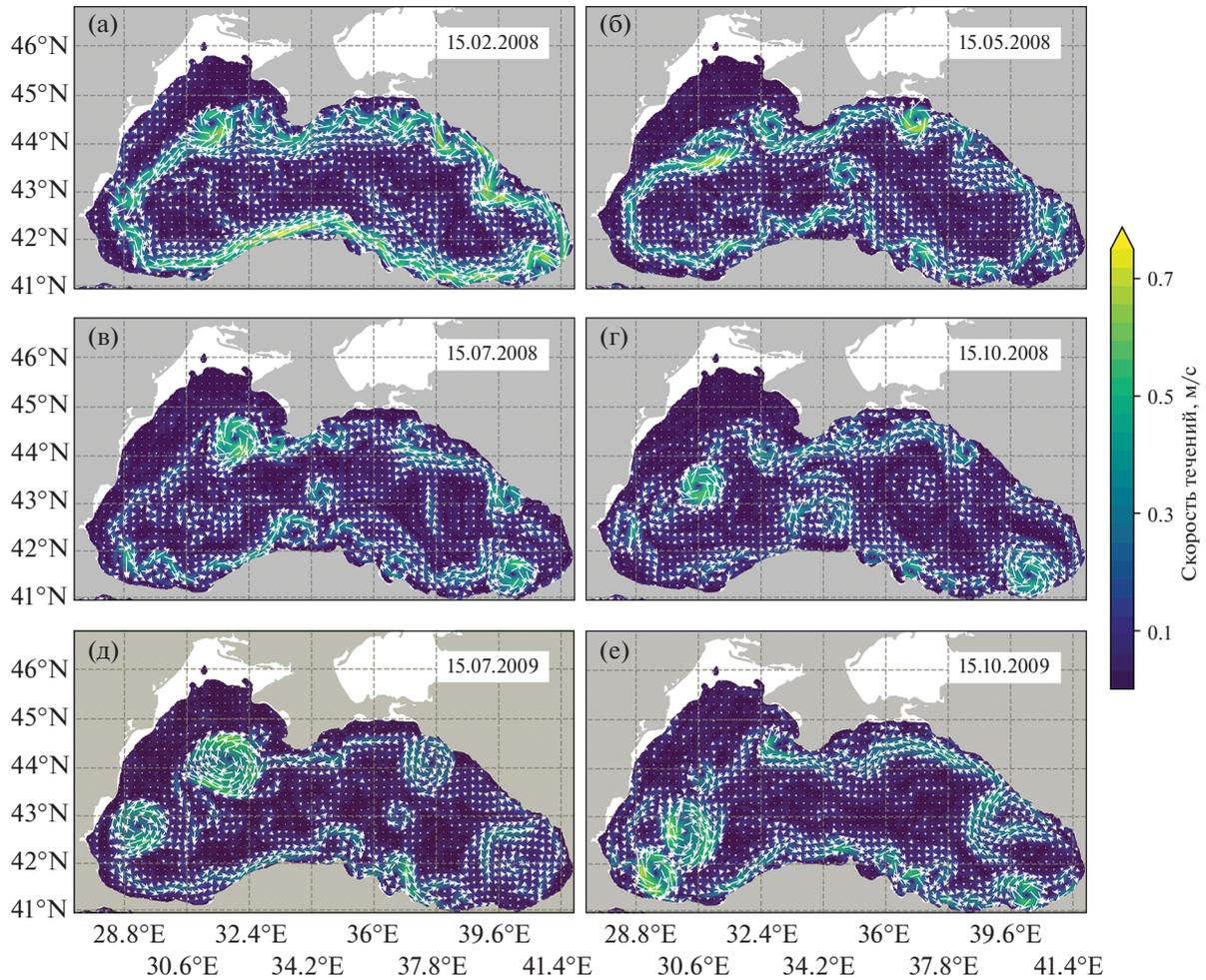
#### 3.1. Общая характеристика гидрофизических полей по результатам моделирования

Остановимся подробнее на результатах численного моделирования циркуляции в эксперименте *HR*. На рис. 2 представлено изменение со временем среднего по глубоководной части Черного моря профиля температуры. Выбранная параметризация вертикального турбулентного перемешивания позволила воспроизвести холодный промежуточный слой (ХПС) в Черном море (идентифицированный по изотерме 8°C). Положение слоя несколько выше по сравнению с результатами выполненного ранее реанализа физических параметров [24]. В Черном море ХПС в 2009 г. был также слабо выраженным [25]. Различия в структуре слоя в 2008 и 2009 г. представлены на рис. 2б, 2в. По сравнению с 2008 г., в июле 2009 г. наблюдается нарушение целостности слоя, вызванное большим количеством вихрей. Хорошо выражено поступление более теплых водных масс из пролива Босфор и их распространение за счет вдольбереговой циркуляции.

Расчеты позволили воспроизвести типичную картину сезонной изменчивости ОЧТ (для примера представлен 2008 г.): интенсивная струя течения наблюдается в зимний период (рис. 3а). В это время в течениях не проявляются крупные вихри, а главным образом выражено меандрирование струи при обтекании берега. Весной устойчивость струи ОЧТ снижается, а мезомасштабные вихри интенсифицируются. Летом и осенью течение практически не проявляется. Структура полей течений представляет систему мезомасштабных вихрей, основными областями формирования которых являются Анатолийское побережье (за мысом Синоп), свал глубин в северо-западной части бассейна (после оконечности полуострова Крым) и побережье Кавказа.

На рис. 3д видно, что летом 2009 г. размеры вихрей справа от ОЧТ больше, чем в 2008 (рис. 3в). Более интенсивны Батумский, Кавказский, Севастопольский и Калиакрский и антициклоны у Анатолийского побережья. Здесь происходит интенсивное опускание вод, что, по-видимому, приводит к разрушению ХПС летом 2009 г. (рис. 2а, 2в).

Остановимся более подробно на изменчивости вблизи пролива Босфор. Рисунок 4а демон-



**Рис. 3.** Сезонная изменчивость циркуляции в бассейне Черного моря по результатам численного моделирования: скорости течений на горизонте 34.89 м.

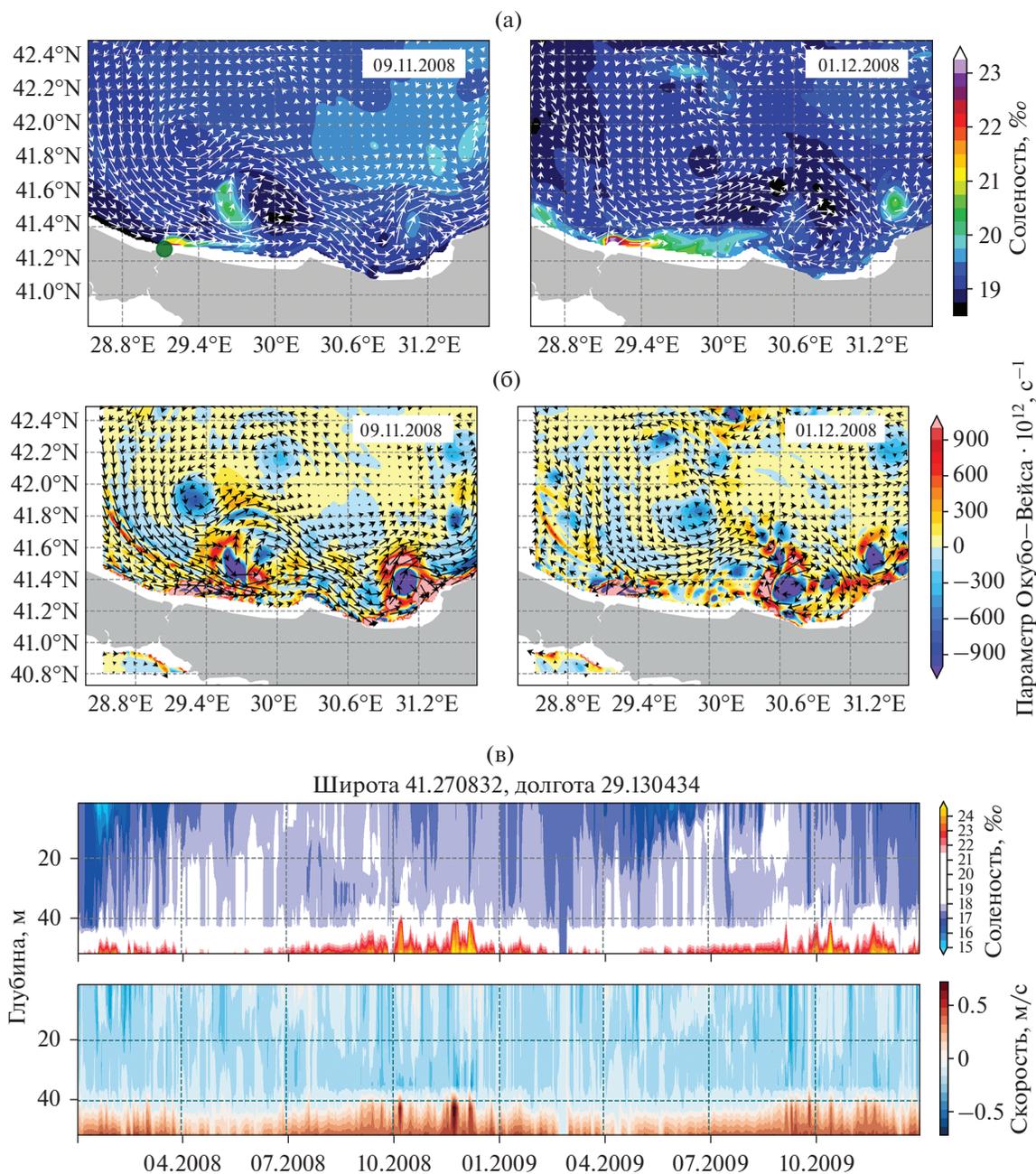
стрирует наличие динамической структуры типа “языка” соленых вод в данной акватории. 11 сентября 2008 г. можно наблюдать момент отрыва от нее субмезомасштабной линзы (рис. 4а, 4б, слева). Параметр Окубо–Вейса позволяет выделить значительное количество вихревых структур в этой области (рис. 4б), движение которых происходит вдоль побережья, по направлению движения ОЧТ. Далее сформировавшаяся линза переместилась восточнее на расстояние  $\approx 130$  км (рис. 4а, 4б, справа).

Несмотря на недостаточное разрешение в акватории самого пролива, модель воспроизводит двухслойную структуру течений на выходе, что демонстрирует рис. 4в, нижняя панель. Как видно, в слое приблизительно 0–40 м течение направлено в бассейн Мраморного моря (отрицательные значения). На глубинах от 40 до 60 м в Черное море поступает трансформированная мраморноморская водная масса (рис. 4в, верху). На диаграммах рис. 4в можно выделить период октябрь–конец декабря каждого года, когда наблюда-

ется интенсификация нижнебосфорского течения, что приводит к соответствующему возрастанию солености (выше 24‰).

Как отмечалось в работе [4], проявления вод средиземноморского происхождения в бассейне Черного моря отмечаются после штормовых событий в ноябре 2007 и 2008 гг. Оценка средней кинетической энергии поверхностных течений в бассейне Мраморного моря также свидетельствует об интенсификации циркуляции в сентябре и создания необходимых условий для увеличения притока мраморноморских водных масс (рис. 4в).

В отмеченные периоды в полях солености мы выделили 5 линзовых структур: 3 – в 2008 г. и 2 – в 2009 г. (рис. 5). Общеизвестно, что за счет  $\beta$ -эффекта подобные структуры в открытом океане имеют тенденцию к западному дрейфу [26, 27]. Однако в настоящей работе данное явление выражено слабо, поскольку линзы сразу попадали в струю ОЧТ. Например, осенью 2008 г. траектории линз прижаты к Анатолийскому побережью. При



**Рис. 4.** Пространственно-временная изменчивость гидрофизических полей в прибосфорской акватории: а – солёность и циркуляция (белые стрелки) на горизонте 64.07 м 11 ноября и 1 декабря 2008 г., соответствующие событиям отрыва и перемещения линзы; зелёный кружок – точка (41.27° с.ш.; 29.13° в.д.); б – параметр Окубо–Вейса и циркуляция (чёрные стрелки) на горизонте 64.07 м 11 ноября и 1 декабря 2008 г.; в – поведение со временем солёности и меридиональной скорости в точке (41.27° с.ш.; 29.13° в.д.).

этом линза, сформировавшаяся в ноябре, имеет большее время жизни (приблизительно месяц – до середины декабря). В этот период видно более интенсивное (по сравнению с октябрём) нижнебосфорское течение (рис. 4в).

Траектории линз в 2009 г. сначала отклоняются на запад и, совершая петлю, далее движутся в восточном направлении. Такая особенность обу-

словлена взаимодействием вихревых структур разных масштабов и знаков: перенос мелкомасштабных циклонических вихрей происходит на периферии более крупных антициклонов. Наличие более крупных вихрей в этом году по сравнению с предыдущим отмечалось ранее (рис. 3д, 3е). Наиболее долгоживущая линза прослеживается в полях солёности на протяжении более двух меся-

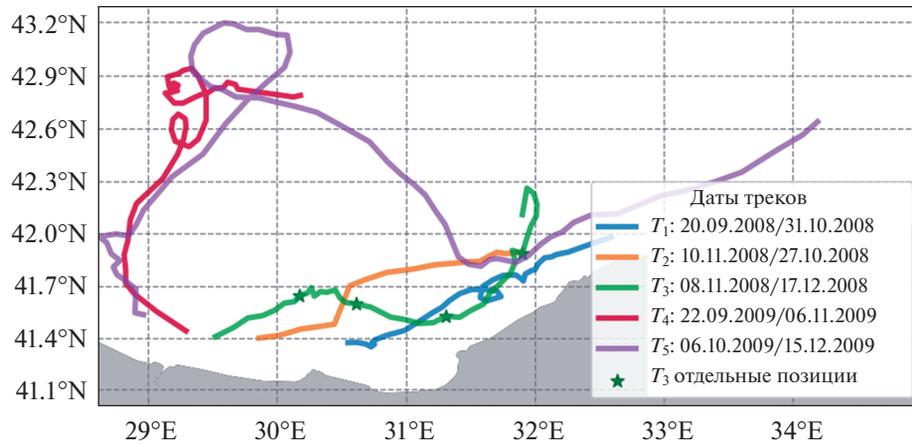


Рис. 5. Траектории движения центра и периоды жизни внутрипикноклиновых соленых линз по результатам численного моделирования. Звездочки соответствуют датам (слева направо) 15 ноября, 25 ноября, 1 декабря, 10 декабря.

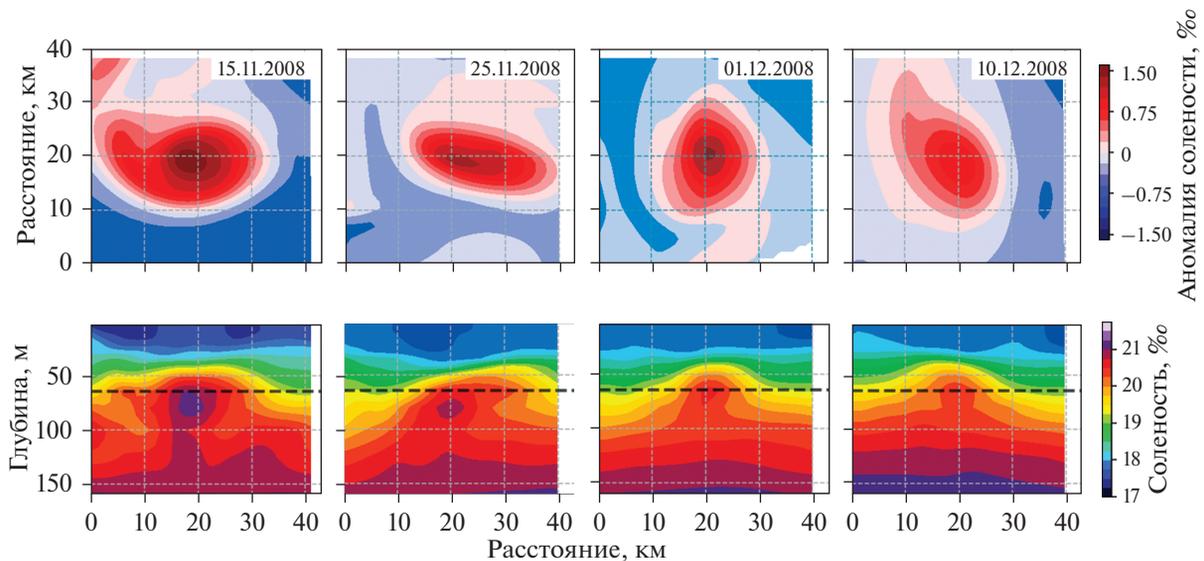


Рис. 6. Пространственная структура и эволюция линзы  $T_3$  в ноябре–декабре (слева направо 15 ноября, 25 ноября, 1 декабря, 10 декабря) 2008 г.: вверху – аномалия солёности в акватории  $40 \times 40$  км в области линзы на горизонте 64.07 м; внизу – зональный разрез в поле солёности в слое 0–150 м по центру акватории. Черная пунктирная линия – положение горизонта 64.07 м.

цев 2009 г. Траектория ее центра хорошо прослеживается до центральной части Черного моря ( $42.6^\circ$  с.ш.,  $34.2^\circ$  в.д.). Далее происходит смешение с водными массами близкой солёности. Механизмы циркуляции таких линз в Черном море хорошо соответствуют тому, что известно об аналогичных структурах в Средиземном море.

Пространственные характеристики идентифицированных линз очень схожи. Для примера рассмотрим более детально эволюцию ранее отмеченной линзы  $T_3$  в ноябре–декабре 2008 г. (рис. 5). Идентифицированные структуры действительно имеют форму линз (рис. 6). Линза  $T_3$  15 ноября имела ярко выраженное ядро соленых вод (выше

$21\text{‰}$ ), с горизонтальными размерам приблизительно 8 км. Центр ядра залегает на глубине  $\approx 75$  м (рис. 6, снизу). Вертикальный размер ядра составляет около 40 м. На горизонтах выше 45 м линза в поле солёности не проявляется. Значительная интенсивность субмезомасштабного циклона в начальный период жизни обеспечивает вертикальный подъем соленых вод с глубин 120–150 м. Как отмечалось ранее, момент отрыва происходит 8–9 ноября. После этого линза сужается в зональном направлении: 15 ноября аномалия относительно центра вытянута на запад, а уже 25 ноября – на восток. Это хорошо видно и на вертикальных разрезах (рис. 6, снизу). К 25 ноября ядро линзы не

сколькo распреснилось, по-видимому, за счет горизонтального турбулентного перемешивания. Вместе с тем, интенсивность вертикального подъема вод уменьшилась.

Форма линзы становится более устойчивой 1 декабря с почти одинаковыми зональными и меридиональными размерами ( $\approx 15$  км), которые далее практически не меняются. В отмеченный период линза подхватывается более крупным антициклоном, ярко выраженным в полях течений и параметра Окубо–Вейса (рис. 4б), что приводит сначала к незначительному прижатию линзы к берегу, а затем к отрыву и движению в глубоководную часть (рис. 5). При этом форма линзы незначительно меняется (рис. 4, снизу).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [4] по данным наблюдений *in situ* показано, что в Черном море наблюдается распространение средиземноморских вод на значительные расстояния. При этом предполагается, что основным механизмом их распространения являются интрузии. В настоящей работе на основе численных расчетов показано, что, помимо интрузий, перенос средиземноморских вод на большие расстояния осуществляется внутривихревыми образованиями. Траектории движения центров линз достаточно близки к выявленным в работе [4] путям распространения средиземноморских вод. В расчетах черноморские линзы образуются в период сезонного усиления нижнебосфорского течения, по-видимому, в условиях, когда связанный с ним импульс превышает некое критическое значение.

Главное отличие черноморских линз от Медди заключается в их размере, который очевидно связан с величиной первого бароклинного радиуса деформации Россби. Данный параметр в Черном море примерно в два раза меньше, чем в умеренных широтах Северной Атлантики. В силу этого черноморские линзы имеют меньший радиус в сравнении с Медди.

Вероятно, небольшой размер черноморских линз не позволял до сих пор обнаружить их существование по наблюдениям. Другим возможным обстоятельством, затрудняющим их обнаружение на основе наблюдений, является полученная в численном расчете относительно невысокая частота их формирования. Вместе с тем не стоит абсолютизировать этот теоретический вывод, т.к. достаточно сглаженный по пространству атмосферный форсинг, использовавшийся в расчетах, навряд ли позволяет воспроизводить реакцию нижнебосфорско-

го течения на локальные порывы ветра и изменения давления. Однако они могут способствовать краткосрочному усилению нижнебосфорского течения и, соответственно, образованию внутривихревых линз в другие сезоны.

Так или иначе, представляется, что для проверки полученных в настоящей работе результатов требуется организация специализированного полевого эксперимента, направленного на поддержание частой сети гидрологических наблюдений в прибосфорском районе в периоды наиболее вероятного образования черноморских внутривихревых линз.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте РАН при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-77-30001).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ozsoy E., Ünlüata Ü., Top Z. The evolution of Mediterranean water in the Black Sea: interior mixing and material transport by double diffusive intrusions // *Progress in Oceanography*. 1993. V. 31. P. 275–320.
2. Latif M.A., Özsoy E., Oguz T., Ünlüata Ü. Observations of the Mediterranean inflow into the Black Sea // *Deep Sea Research*. 1991. 38(2). P. 711–723.
3. Konovalov S.K., Murray J.W., Luther G.W. Basic processes of Black Sea Biogeochemistry // *Oceanography Society*. 2005. V. 18. № 2. P. 24–36.
4. Falina A., Sarafanov A., Ozsoy E., Turunçeoğlu U.U. Observed basin-wide propagation of Mediterranean water in the Black Sea // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. № 4. P. 3141–3151.
5. Richardson P., Walsh D., Armi L., Schroder M., Price J.F. Tracking three meddies with SOFAR floats // *J. Physical Oceanography*. 1989. V. 19. P. 371–383.
6. Parrow M., Boebel O., Zhevrakis V., Zenk W., Cantos-Fuguerola A., Gould J. Two circulation regimes of the Mediterranean outflow revealed by lagrangian measurements // *J. Physical Oceanography*. 2002. V. 32. № 5. P. 1332–1330.
7. Марчук Г.И., Патон Б.Е., Коротаев Г.К., Залесный В.Б. Информационно-вычислительные технологии — новый этап развития оперативной океанографии // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 6. С. 1–14.
8. Madec G., NEMO System Team. NEMO ocean engine. Issue 27. Scientific Notes of Climate Modelling Center. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). 2016. 412 p.
9. Мизюк А.И., Коротаев Г.К., Григорьев А.В., Пузина О.С., Лишаев П.Н. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихререзающей модели // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35. № 5. С. 496–510.

10. Гусев А.В., Залесный В.Б., Фомин В.В. Методика расчета циркуляции Черного моря с улучшенным разрешением в районе полигона ИО РАН // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 6. С. 978–989.
11. Дианский Н.А., Фомин В.В., Жохова Н.В., Коршенко А.Н. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи на основе численного моделирования // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675.
12. Zalesak S.T. Fully multidimensional flux corrected transport algorithms for fluids // *J. Computational Physics*. 1979. № 31. P. 335–362.
13. Leclair M., Madec G. A conservative leap-frog time stepping method // *Ocean Modelling*. 2009. V. 30(2–3). P. 88–94.
14. Rodi W. Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // *J. Geophysical Research*. 1987. V. 92(C5). P. 5305–5328
15. Fofonoff N.P., Millard Jr.R.C. Algorithms for computation of fundamental property of sea water // *UNESCO technical papers in marine sciences*. 1983. V. 44. 51 p.
16. Roulet G., Madec G. Salt conservation, free surface, and varying levels: a new formulation for ocean general circulation models // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. P. 23927–23942.
17. Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/> (дата последнего обращения 22.08.2018 г.)
18. Global Ocean 1/12 Physics Analysis And Forecast Updated Daily [Электронный ресурс]. URL: [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_ANALYSIS\\_FORECAST\\_PHY\\_001\\_024](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024) (дата последнего обращения 26.09.2018 г.)
19. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 4. Черное море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия под ред. Альтмана Э.Н., Симонина А.И. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1991. 429 с.
20. Основные гидрологические характеристики морских устьев рек европейской территории России // База данных. 2012. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620681.
21. Мизюк А.И., Сендеров М.В., Коротаев Г.К., Саркисян А.С. Особенности горизонтальной изменчивости температуры поверхности в западной части Черного моря по результатам моделирования с высоким пространственным разрешением // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 5. С. 639–648.
22. Okubo A. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences // *Deep Sea Research*. 1970. V. 17. P. 445–454.
23. Weiss J. The dynamics of enstrophy transfer in two dimensional hydrodynamics // *Physica D*. 1991. V. 48(2–3). P. 273–294.
24. Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в период 1993–2012 годов на основе результатов выполненного реанализа // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 33–48.
25. Пузина О.С., Мизюк А.И. Сезонная и межгодовая изменчивость характеристик холодного промежуточного слоя Черного моря в 1993–2012 гг. по результатам ретроспективного анализа // *Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Материалы молодежной научной конференции*. 2016. Севастополь: ФГБУН МГИ. С. 183–188.
26. Бреховских Л.М., Кошляков М.Н., Федоров К.Н., Фомин Л.М., Ямпольский А.Д. Полигонный гидрофизический эксперимент в тропической зоне // *Докл. АН СССР*. 1971. Т. 198. С. 1434–1439.
27. Анисимов М.В., Дианский Н.А. Физический механизм западного дрейфа рингов фронтальных течений в океане // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 3. С. 325–332.

## The Black Sea Intra-Pycnocline Lenses from the Results of Numerical Simulation of the Basin Circulation

Artem I. Mizyuk<sup>1,\*</sup> and Gennady K. Korotaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Marine Hydrophysical Institute, RAS Kapitanskaya st., 2, Sevastopol, 299011 Russia*

\*e-mail: [artem.mizyuk@mhi-ras.ru](mailto:artem.mizyuk@mhi-ras.ru)

The exact scenario of the propagation of highly saline Marmora Sea waters in the Black Sea basin is not clear. Together with river runoff they form the prevailing haline stratification of the basin. One of the regimes of their propagation can be the formation of lenses similar to highly salted and warm lenses of Mediterranean Sea water in the basin of Atlantic Ocean. The purpose of this study is numerical modeling and following analysis of such dynamical structures that form in the Black Sea as a result of water exchange through the Bosphorus strait. The major difficulty in this case is the need for high spatial resolution in the strait. The paper provides a brief description of NEMO ocean modeling framework used and the features of configuration that allows to reproduce the circulation in the basins of the Azov, Black and Marmara seas with a spatial resolution of 1.16 km. The fields from the ERA5 atmospheric reanalysis were used as atmospheric forcing. The carried out numerical experiment allows us to reproduce a typical structure of the seasonal variability of the Black

Sea rim current, as well as the features of the vertical structure of the basin waters, for the period 2008 – 2009. The spatial resolution of the results of numerical modeling made it possible to reconstruct the dynamics of salt waters in the region and at the exit of the Bosphorus Strait quite qualitatively. For the period 2008–2009 five lenses were simulated formed near the strait and captured by rim current jet. They are pronounced in the sea water salinity field for the period of one–two months. Using one of the lenses as an example it is shown that its core is located at a depth of about 75 m. The structure vertical size is almost 40 m and the horizontal scale is 15 km. The simulation results demonstrate that lens formation events are associated with an gain of the salt water inflow after storms in the Sea of Marmara basin. Verification of the results obtained in the study is possible on the basis of a specialized field experiment in the Bosphorus region during the periods of the most probable formation of the Black Sea intra-pycnocline lenses.

**Keywords:** numerical circulation modeling, intra-pycnocline lenses, Black Sea, Bosphorus, Sea of Marmara, NEMO, high resolution