

УДК 551.463.6 552.463.5

## ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ВОД НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОДСПУТНИКОВОМ ПОЛИГОНЕ “ГЕЛЕНДЖИК”

© 2021 г. А. И. Кубряков<sup>а, \*</sup>, А. В. Григорьев<sup>б, с, \*\*</sup>, В. А. Кубряков<sup>б, \*\*\*</sup>

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

<sup>б</sup>Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет,  
Кропоткинский пер., 6, Москва, 119034 Россия

<sup>с</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия

\*e-mail: alexander.kubryakov@mhi-ras.ru

\*\*e-mail: ag-privat@mail.ru

\*\*\*e-mail: kubr@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 11.08.2021 г.

Представлена разработанная на основе технологии двойного вложения сеток  $\sigma$ -координатная оперативная модель прогноза состояния вод на Черноморском подспутниковом полигоне в районе г. Геленджик. Данные для задания начальных и граничных условий модели поступают из Черноморской прибрежной прогностической системы. Модель способна воспроизводить субмезомасштабную изменчивость течений на полигоне. Приведен пример трехдневного прогноза полей температуры, солености и скорости течений для зимнего сезона.

**Ключевые слова:** оперативная модель, технология вложенных сеток, циркуляция вод, сигма-координаты, подспутниковый полигон, субмезомасштабные процессы

**DOI:** 10.31857/S0002351521060079

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для Черного моря разработан целый ряд моделей циркуляции с высоким разрешением, позволяющих исследовать мезомасштабную и субмезомасштабную изменчивость гидродинамических процессов [1–11], в том числе в прибрежных водах. Для прибрежных морских районов особенно актуальным является создание оперативных моделей прогноза динамики вод, поскольку стремительно возрастающая в последние десятилетия антропогенная нагрузка на эти акватории обуславливает возрастание вероятности крупных аварий и катастроф с нанесением непоправимого ущерба их рекреационным и биологическим ресурсам. Что требует наличия актуальной информации не только о текущем состоянии вод, но и о возможном его изменении для быстрого принятия управленческих решений в целях ликвидации негативных последствий.

Пространственное разрешение существующих в настоящее время оперативных глобальных моделей Черного моря [12–17], несмотря на ошеломляющий прогресс компьютерных технологий, все еще недостаточно для описания всего спектра из-

менчивости его циркуляции из-за требований сохранения приемлемого времени счета при оперативном прогнозе. Описание в рамках глобальной модели мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости в какой-либо конкретной локальной области возможно при использовании сетки с переменным шагом, как это сделано, например, в [18, 19]. При этом для достижения необходимого разрешения используемая система координат модифицируется путем помещения полюса в нужную точку расчетной области. При использовании этого метода отсутствует необходимость задания условий на открытых границах, ограничивающих рассматриваемую локальную область. Однако такой подход скорее приемлем для решения конкретных исследовательских задач, чем для построения оперативных прогностических систем, поскольку, во-первых, как отмечено в [18], уменьшение шага по пространству в локальной области с неизбежностью ведет к необходимости уменьшения шага по времени и, как следствие, к увеличению времени счета. Во-вторых, при необходимости проведения расчетов в другой локальной области требуется перестройка всей глобальной модели. Одним из решений этой проблемы

является построение локальных прибрежных моделей, в которых достаточно высокое разрешение позволяет сохранить разумное время счета.

Оперативный прогноз состояния вод в прибрежных районах Черного моря осуществляется Черноморской прибрежной системой морских прогнозов (ЧПСМП), разработанной в рамках проектов Европейской комиссии EU FP6 ЕСООР и FP7 MyOcean [15, 20–24], которая является подсистемой функционирующей в Морском гидрофизическом институте оперативной системы диагноза и прогноза Черного моря, основанной на глобальной общепассажирской модели Черного моря [15–17]. ЧПСМП охватывает почти все побережье Черного моря, за исключением северного берега Турции, и включает пять районов: юго-западный бассейн вдоль берегов Болгарии и Турции, северо-западный шельф у берегов Румынии и Украины, акваторию вокруг п-ва Крым, северо-восточную зону у побережья России и прибрежную зону Грузии. Для расчета циркуляции в прибрежной зоне Грузии используется модель в  $z$ -координатах [25], для остальных районов используется  $\sigma$ -координатная модель BSCM (BlackSeaCoastalModel), являющаяся, по сути, версией модели циркуляции Принстонского университета (POM), адаптированной к физико-географическим условиям Черного моря [20, 26–30]. Оперативная модель циркуляции, на основе которой осуществляется прогноз состояния вод в северо-восточной области Черного моря у побережья России (RuReM), инсталлирована в Государственном океанографическом институте им. Н.Н. Зубова (ГОИН) [23]. Прогностические расчеты по прибрежным моделям производятся на основе использования технологии вложенных сеток без обратной связи [31]. Вся необходимая информация для этих моделей поступает из глобальной модели Черного моря. Валидация модели RuReM проводилась на основе данных наблюдений на Черноморском подспутниковом полигоне “Геленджик” (далее – полигон), развернутом на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [23, 33, 34]. Полигон является уникальным источником натурной информации о состоянии морской среды, в том числе для валидации математических моделей. Размещенные на полигоне автономные измерительные системы, а также судовые и спутниковые наблюдения обеспечивают регулярное получение гидрофизических, гидрохимических и биооптических данных с высоким пространственно-временным разрешением [32].

Все указанные выше прибрежные модели, в том числе модель RuReM, имеют горизонтальное разрешение около 1 км. Этого разрешения достаточно для воспроизведения мезомасштабной изменчивости (квазигеострофические вихри с горизонтальным масштабом  $\sim 10$  км), но недостаточно

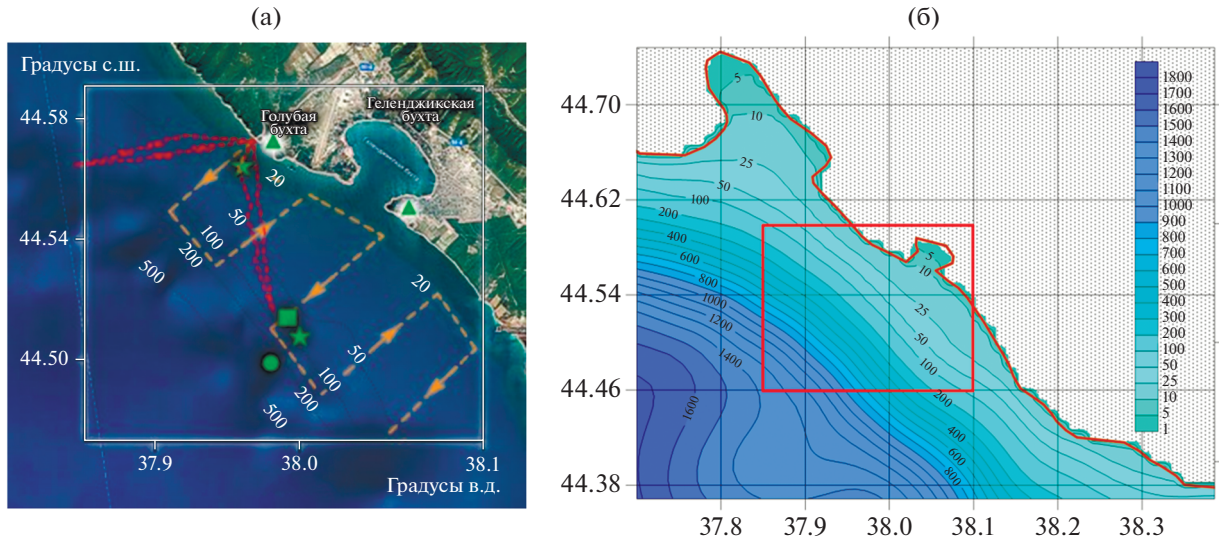
для описания субмезомасштабных процессов (нестационарные вихри с масштабом  $\sim 1$  км) [1]. В частности, для описания термохалинной структуры и динамики вод на полигоне.

Целью настоящей работы является описание оперативной модели прогноза состояния моря в акватории, включающей в себя полигон, основанной на технологии двойного вложения сеток и сочлененной с оперативной прибрежной региональной моделью RuReM.

## МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯЦИИ

В качестве локальной модели циркуляции вод нами использовалась вышеупомянутая  $\sigma$ -координатная модель BSCM, адаптированная к физико-географическим условиям полигона. Ранее на основе этой модели со сверхвысоким разрешением восстанавливалась субмезомасштабная циркуляция в Севастопольской бухте [35]. Модель основана на полной системе уравнений термодинамики океана со свободной поверхностью в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости  $A_M$  вычислялся по формуле Смагоринского [36], турбулентное число Прандтля для определения коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии принималось равным 5. Коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии и вязкости вычислялись согласно инкорпорированной в модель циркуляции модели турбулентности Меллора–Ямады [37]. Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели по пространству производилась на сетке  $S$  по терминологии Аракавы [38]. При интегрировании по времени используется технология разделения на моды [39, 40], согласно которой сначала решаются уравнения относительно уровня и средних по глубине горизонтальных компонент скорости по явной схеме “чехарда” с достаточно малым шагом по времени, удовлетворяющим критерию КФЛ [41] для быстрых баротропных длинных волн. После выполнения нескольких шагов по времени решается система уравнений для внутренней моды с гораздо большим шагом по времени. При этом используется полунявная схема [40], в соответствии с которой сначала рассчитываются по явной схеме первого порядка точности с направленными против потока разностями члены, описывающие адвекцию и горизонтальную диффузию. Для уменьшения схемной вязкости применялась итеративная схема Смоларкевича [42] со специально определяемой “антидиффузионной” скоростью. Затем методом прогонки вычисляются слагаемые, описывающие вертикальную диффузию. Шаг по времени полагался равным для баротропной моды 0.4 с, для бароклинной – 12 с.

Горизонтальное разрешение модели составляет примерно 141 м вдоль широты и 191 м вдоль дол-



**Рис. 1.** Полигон “Геленджик” (<https://ocean.ru/index.php/otdeleniya-i-filialy-io-ran/yuzhnoe-otdelenie/item/1060-cher-nomorskij-poligon-io-ran-gelendzhik-poligon-gelendzhik>) (а) и рельеф дна в расчетной области (б). Красным прямоугольником обозначен полигон.

готы. По вертикали использовалось 18  $\sigma$ -уровней: 0.0; -0.004; -0.009; -0.013; -0.022; -0.034; -0.046; -0.058; -0.079; -0.11; -0.171; -0.268; -0.366; -0.463; -0.561; -0.78; -0.902; -1.000. На рис. 1 приведена топография дна в расчетной области и границы полигона. Используемый в модели рельеф дна был создан на основе базы данных GEBCO (шаг исходной сетки ~1 км) посредством линейной интерполяции в узлы расчетной сетки.

На открытых жидких границах области ставились условия, аналогичные задаваемым на жидкой границе региональной модели RuReM:

– для нормальных компонент баротропной (средней по глубине) скорости использовалось условие Флэттера:

$$U_R^{normal} = U_G^{normal} + \epsilon \sqrt{\frac{g}{H}} (\eta_R - \eta_G), \quad (1)$$

где индекс  $R$  соответствует вложенной локальной модели с более высоким разрешением, а  $G$  – внешней региональной модели с низким разрешением в соответствующем узле расчетной сетки локальной модели. Константа  $\epsilon = 1$  для восточной границы и  $\epsilon = -1$  для западной и южной границ;

– для касательных компонент баротропной скорости используется условие:

$$U_R^{tangent} = U_G^{tangent}, \quad (2)$$

– для нормальных и касательных компонент бароклинной скорости используется такое же условие:

$$u_R^{normal} = u_G^{normal}; \quad u_R^{tangent} = u_G^{tangent}, \quad (3)$$

– для температуры и солёности в точках, где вода втекает в расчетную область:

$$T_R = T_G; \quad S_R = S_G, \quad (4)$$

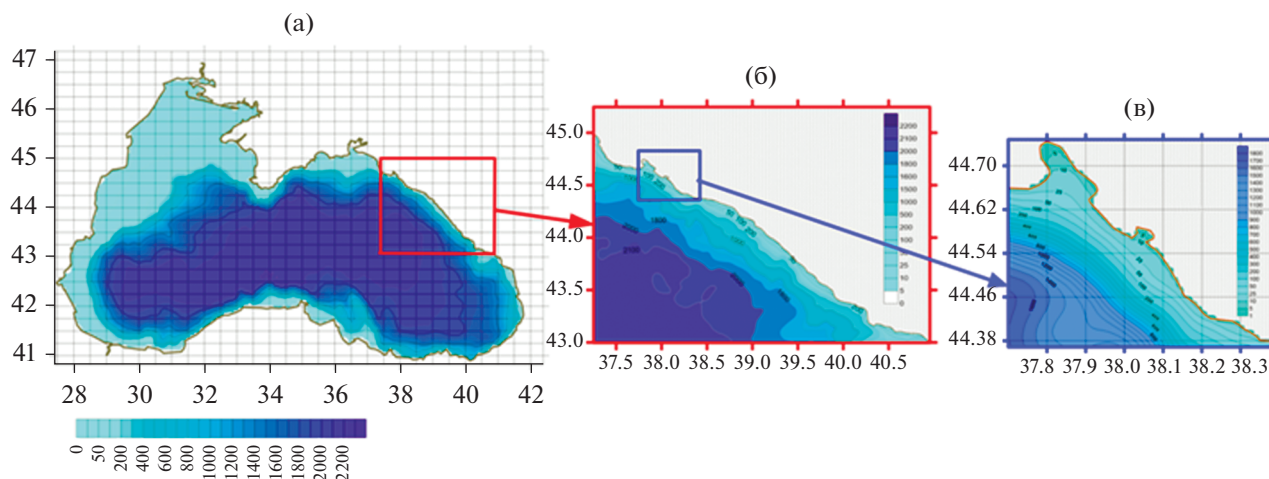
а в точках, где вода вытекает из нее, значения параметров вычисляются с использованием схемы направленных разностей против потока для уравнения адвекции:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_n \frac{\partial T}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial t} + u_n \frac{\partial S}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

В (1)–(5)  $t$  – время;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – глубина моря;  $U, V$  – соответственно зональная и меридиональная составляющие баротропной скорости течений;  $u, v$  – зональная и меридиональная составляющие бароклинной скорости течений;  $T, S$  – температура и солёность морской воды соответственно;  $n$  – единичный вектор нормали.

В принятой постановке задачи не требуется какого-либо условия на границе для уровня свободной поверхности моря. Однако в целях использования унифицированных программ отображения результатов расчета на границе ставилось условие равенства нулю нормальной производной от уровня, что никоим образом не влияет на результат.

Необходимые значения параметров региональной модели в узлах локальной модели вычислялись с использованием сначала линейной интерполяции по горизонтали значений в ближайших узлах региональной сетки, а затем с помощью сплайнов – по вертикали.



**Рис. 2.** Схема применения технологии двойного вложения сеток: (а) – глобальная модель Черного моря, (б) – региональная модель RuReM, (в) – локальная модель. Прямоугольниками красного и синего цвета обозначены расчетные области.

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Крупномасштабная (глобальная) модель, лежащая в основе системы диагноза и прогноза состояния всего бассейна Черного моря, обеспечивает необходимыми данными для задания начальных и граничных условий региональную модель RuReM, которая, в свою очередь, передает необходимые данные в локальную модель полигона. В глобальной модели ассимилируются спутниковые данные измерений температуры и уровня морской поверхности [15, 16]. При задании атмосферного воздействия используются данные греческого центра атмосферных прогнозов SKIRON [43], которые скачиваются по сети Internet раз в 3 ч.

Алгоритм расчета основан на последовательном применении метода вложенных сеток в оффлайн-режиме сначала к региональной модели, а затем к локальной (рис. 2).

Расчет состоял из следующих шагов. Пусть  $[t_n, t_m]$  – период времени, на который предполагается делать прогноз ( $n, m = n + 3$  – номера дней), т.е.  $t_n$  – начальный момент прогноза. За начальный момент времени расчета принимается момент времени  $t_{n-1}$  – за сутки до начала времени прогноза. Таким образом, в качестве начальных значений температуры, солености, уровня моря и скорости течений в региональной модели принимались интерполированные в узлы сетки региональной модели значения соответствующих параметров глобальной модели в момент времени  $t_{n-1}$ . Начиная с момента времени  $t_{n-1}$ , для согласования полей глобальной и региональной модели проводился расчет до момента  $t_n$ . Далее собственно проводился прогноз – расчет до момента времени  $t_m$  (рис. 3). Следует отметить, что проведенные численные эксперименты показали, что

возмущения от границы, ввиду достаточной малости прибрежной расчетной области по сравнению с акваторией всего моря, успевают за сутки пройти всю прибрежную область и что увеличение этого периода лишь незначительно влияло на распределение гидрофизических полей в начальный момент прогноза  $t_n$ .

В течение расчета в региональную модель из глобальной модели с заданной дискретностью передавались данные для определения параметров на жидкой границе в соответствии с процедурой, описанной выше, а также с помощью билинейной интерполяции – данные о напряжении ветра, потоках тепла, осадках и испарении на поверхности выбранной области. На каждый расчетный момент времени граничные значения для региональной модели получались путем линейного интерполирования с использованием соседних во времени значений глобальной модели. Дискретность передачи данных не может, естественно, быть меньше расчетного шага по времени глобальной модели. Во время расчета по региональной модели формируются необходимые поля для расчета по локальной модели и расчет по последней проводится по аналогичной процедуре для того же периода времени  $[t_{n-1}, t_{n+3}]$ .

## ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЕРАТИВНЫХ РАСЧЕТОВ

На данном этапе прогноз состояния вод в акватории полигона проводился в полуавтоматическом режиме. Т.е. запуск локальной модели проводился вручную, сразу после формирования региональной моделью RuReM необходимых массивов данных. Выходные файлы локальной модели содержали трехмерные поля скорости течений, температуры



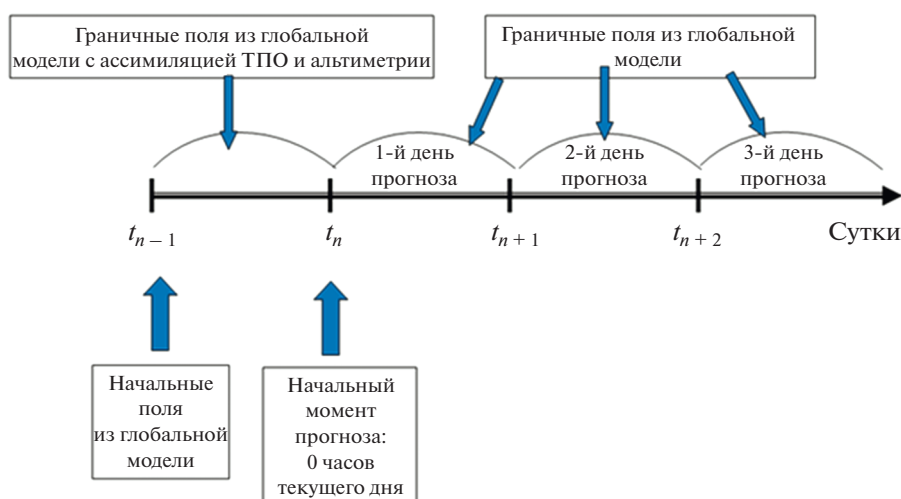


Рис. 3. Схема алгоритма расчета по времени.

и солёности морской воды и двумерные поля напряжения трения ветра, уровня моря, составляющих теплового баланса на поверхности моря на каждые 3 ч срока прогноза.

Более высокое разрешение локальной модели по сравнению с региональной позволяет воспроизвести процессы, которые “проваливаются” на более грубой сетке региональной модели, что приводит к существенным отличиям в картинах распределения гидрологических параметров на рассматриваемой акватории.

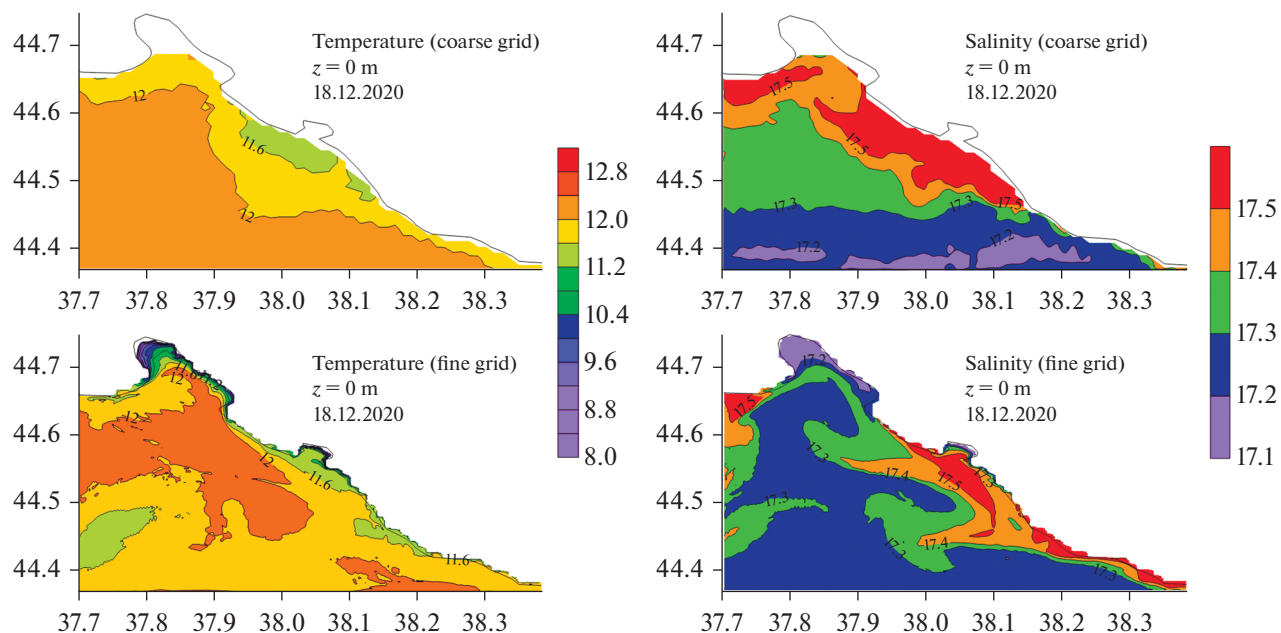
В качестве примера приведем результаты трехдневного прогноза по двум моделям в зимний период — с 14 по 18 декабря 2020 г. Все рисунки приведены на конечный момент расчета. В обеих моделях задавалось идентичное атмосферное воздействие.

На рис. 4 приведено распределение температуры и солёности на поверхности, полученное по региональной и локальной моделям (здесь и в дальнейшем результаты региональной модели RuReM представлены только для района, соответствующего локальной модели). Несмотря на некоторое подобие, в то же время отчетливо видны различия в распределении этих параметров. И в региональной, и в локальной моделях низкие значения температуры имеют место вдоль берега, и температура повышается в направлении к открытому морю. Причиной такого распределения температуры является более высокая скорость и степень выхолаживания вод моря в мелководных прибрежных областях в сравнении с глубоководной областью. Однако, в локальной модели вдольбереговая полоса с низкой температурой более узкая и значения температуры здесь на 1–2°C ниже, чем в региональной модели.

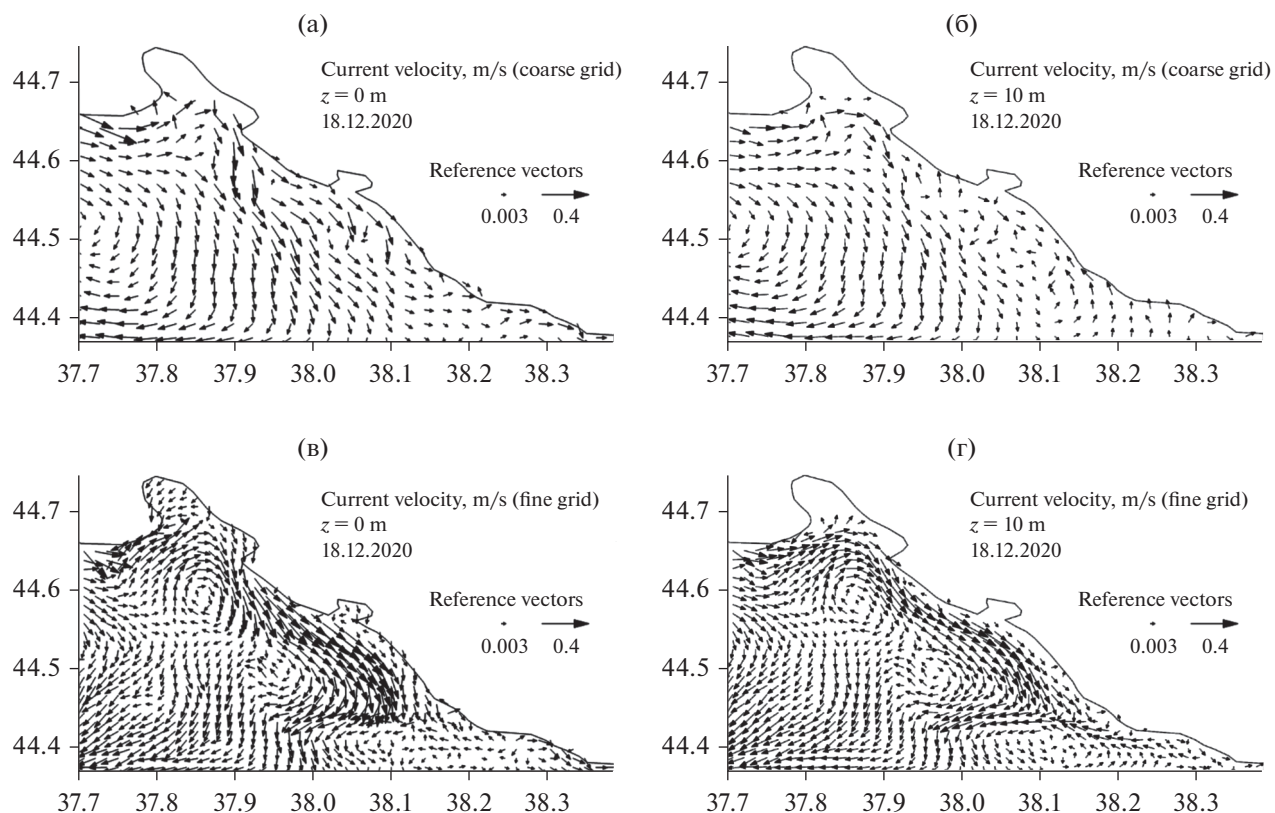
Картина распределения солёности в общем подобна распределению температуры, с той лишь разницей, что солёность, в противоположность температуре, уменьшается в направлении от берега к открытому морю. По результатам локальной модели вдольбереговая полоса с высокой солёностью более узкая и значения солёности здесь на 0.3–0.4‰ ниже, чем в региональной модели.

На рис. 5 приведены рассчитанные по двум моделям поля скорости течений на поверхности и на глубине 10 м. Как видно из рисунков, в расчетах по локальной модели (рис. 5в, 5г), отчетливо видно струйное вдольбереговое течение и два антициклонических вихря справа от него (соответственно северо-западная и центральная область моделирования). Интенсивность течений в локальной модели примерно на 40% выше в сравнении с региональной. Горизонтальные размеры вихрей составляют ~4 км. Локализация струйного течения соответствует прибрежной шельфовой области, а примыкающих к нему антициклонов — области у свала глубин (см. рис. 1б). То есть данное течение не является частью Основного черноморского течения (ОЧТ), ось которого традиционно приурочивают к подножию свала глубин. Отметим также взаимообусловленное соответствие полей течений (рис. 5) и солёности (рис. 4, картинка справа).

Долговременные измерения течений в шельфовой зоне моря в районе полигона [44, 45] показали, что течения здесь носят ярко выраженный колебательный характер. При этом значительно превалирует вдольбереговая составляющая скорости, которая часто (с периодичностью 1–2 сут) меняет знак. Подобный характер изменчивости



**Рис. 4.** Температура (слева) и соленость (справа) на поверхности, рассчитанные по региональной (вверху) и локальной (внизу) моделям.



**Рис. 5.** Скорость течений на поверхности (а, в) и на глубине 10 м (б, г) по региональной (а, б) и локальной (в, г) моделям.

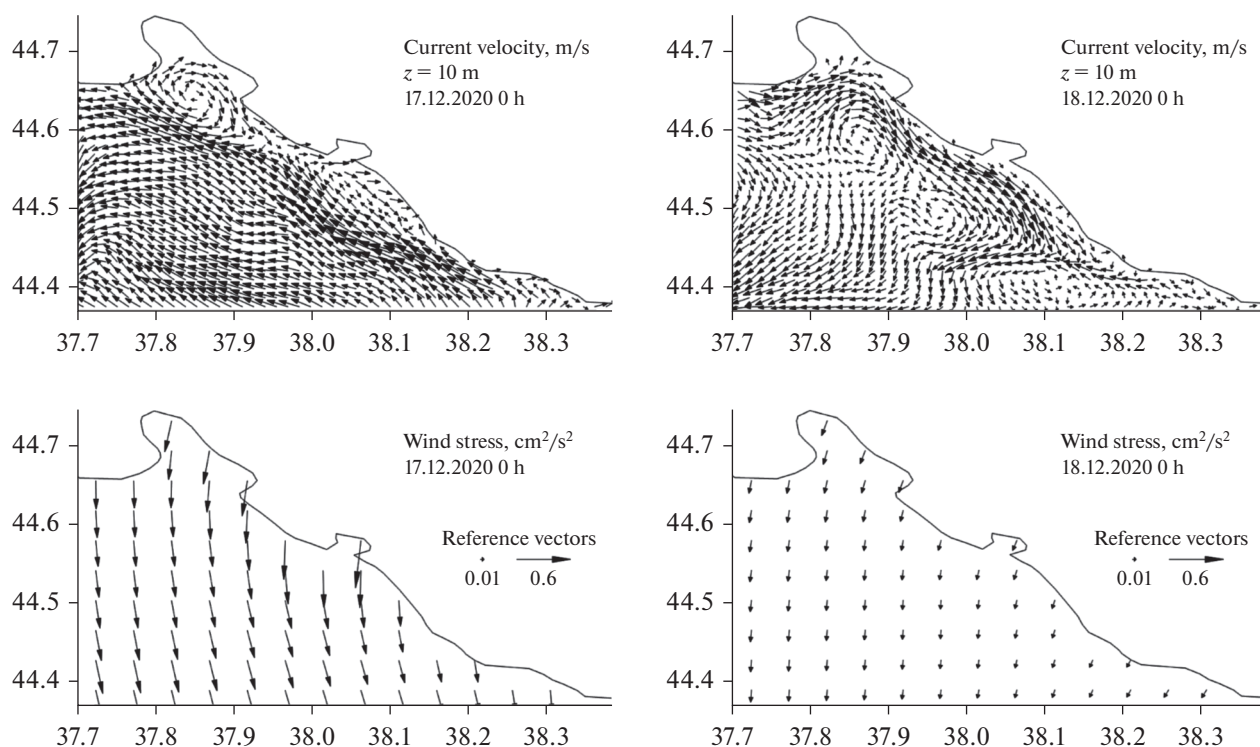


Рис. 6. Скорости течений на глубине 10 м по данным локальной модели (вверху) и касательное напряжение трения ветра (внизу) в 00 ч 17.12 и 18.12 2020 г.

течений можно объяснить наличием в этой зоне субмезомасштабных вихрей с горизонтальными размерами 2–7 км, время жизни которых не превышает несколько суток [45].

Построенные по данным локального моделирования поля скорости течений с разницей в 1 сут (17 и 18 декабря) демонстрируют именно подобную изменчивость течений (рис. 6, верхние картинки). 17 декабря вдольбереговое течение направлено на северо-запад, у входа в Новороссийскую бухту локализован примакающий к нему антициклонический вихрь. 18 декабря вдольбереговое течение меняет направление на противоположное, с двумя описанными выше антициклоническими вихрями на его периферии. При этом направление ветра не меняется, при значительном изменении его скорости (напряжения), рис. 7 внизу. То есть изменчивость течений обусловлена динамикой вод региона в целом.

В приведенных примерах расчета по локальной модели в непосредственно прибрежной зоне присутствуют только антициклонические вихри, что обусловлено конкретными внешними условиями в рассматриваемый период времени. В тестовых расчетах для других временных периодов наблюдались также и субмезомасштабные циклонические образования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана оперативная модель прогноза состояния вод на полигоне “Геленджик” на основе технологии двойного вложения сеток, сочлененная с оперативной прибрежной региональной моделью циркуляции RuReM для района, примыкающего к северо-восточному побережью Черного моря.

2. Проведенные расчеты показали, что разработанная модель способна в оперативном режиме воспроизводить субмезомасштабную динамику вод на полигоне, характеризующуюся высоким уровнем изменчивости в области небольших пространственно-временных масштабов (100 м, 1 ч) по сравнению с областями открытого моря.

3. Модель воспроизводит прибрежные течения реверсивного характера с периодом ~1 сут, а также субмезомасштабные вихри с горизонтальными размерами ~5 км, что соответствует данным натурных наблюдений на полигоне “Геленджик”.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы госзадания 0555-2021-0003 “Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды

и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений”, гранта РФФИ – проект № 18-05-80028 “Опасные явления” и при поддержке гранта РФФИ – проект № 18-45-920018 “p\_a”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Залесный В.Б., Гусев А.В., Агошков В.И.* Моделирование циркуляции Черного моря с высоким разрешением прибрежной зоны // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 316–333.
2. *Дивинский В.В., Куклев С.В., Зацепин А.Г., Чубаренко В.В.* Моделирование субмезомасштабной изменчивости морских течений в прибрежной зоне Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 1–6.
3. *Enriquez C., Shapiro G., Souza A., Zatsepin A.* Hydrodynamic modelling of mesoscale eddies in the Black Sea // Ocean Dynamics. 2005. V. 55. P. 476–489.
4. *Grayek S., Stanev E., Kandilarov R.* On the response of the Black Sea level to external forcing: altimeter data and numerical modelling // Ocean Dynamics. 2010. V. 60. № 1. P. 123–140.
5. *Коротенко К.А.* Моделирование мезомасштабной циркуляции Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 909–915.
6. *Дымова О.А.* Моделирование мезо- и субмезомасштабных процессов в прибрежных зонах Черного моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 8. С. 21–30.
7. *Демьшев С.Г.* Численный прогностический расчет течений в Черном море с высоким горизонтальным разрешением // Морской гидрофизический журн. 2011. Т. 21. № 1. С. 36–47.
8. *Демьшев С.Г., Евстигнеева Н.А.* Моделирование мезо- и субмезомасштабных особенностей циркуляции у восточного берега Крыма на основе численного расчета // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 628–638.
9. *Kordas O., Gourjii A., Nikiforovich E., Cherniy D.* A Study on Mathematical Short-term Modelling of Environmental Pollutant Transport by Sea Currents: The Lagrangian Approach // J. Environmental Accounting and Management. 2017. V. 5. P. 86–103.
10. *Bruciaferri D., Shapiro G., Stanichny S., Zatsepin A., Ezer T., Wobus F., Francis X., and Hilton D.* A new numerical model for the Black Sea circulation // Geophys. Res. Abstracts. 2019. V. 21, EGU2019-5933. EGU General Assembly 2019.
11. *Мизюк А.И., Алескерова А.А., Кубряков А.А.* Циркуляция в Керченском проливе по результатам численного моделирования с применением локального сгущения расчетной сетки // “Моря России: наука, безопасность, ресурсы”. Тезисы конф. Морской гидрофизический институт. Севастополь, 03–07 октября 2017 г. С. 40–41.
12. *Демьшев С.Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 1. С. 137–149.
13. *Ciliberti S.A., Peneva E., Storto A., Kandilarov R., Lecci R., Yang C., Coppini G., Masina S., Pinardi N.* Implementation of Black Sea numerical model based on NEMO and 3DVAR data assimilation scheme for operational forecasting // Geophysical Research Abstracts. 2016. V. 18. EGU2016–16222. EGU General Assembly 2016.
14. *Ciliberti S.A., Peneva E., Storto A., Lemieux-Dudon B., Özsoy E., Coppini G., Masina S., Pinardi N., Palazov A.* Development of a regional NEMO-based configuration for the Black Sea in the framework of Copernicus Marine Environment and Monitoring Service: recent developments and future perspectives // Geophys. Res. Abstracts. 2018. V. 20. EGU2018-18191. EGU General Assembly 2018.
15. *Palazov A., Ciliberti S., Peneva E., Gregoire M., Staneva J., Lemieux-Dudon B., Masina S., Pinardi N., Vandembulcke L., Behrens A., Lima L., Coppini G., Marinova V., Slabakova V., Lecci R., Creti S., Palermo F., Stefanizzi L, Valcheva N., Agostini P.* Black Sea Observing System // Front. Mar. Sci. 2019. V. 6. P. 315.
16. *Korotaev G.K., Oguz T., Dorofeyev V.L., Demyshev S.G., Kubryakov A.I., Ratner Yu.B.* Development of Black Sea nowcasting and forecasting system // Ocean Sci. 2011. V. 7. P. 629–649.
17. *Korotaev G.K., Ratner Yu.B., Dorofeyev V.L., Kubryakov A.I., Stefanescu S., Fomin V.V.* Operational forecast of the Black Sea dynamics. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges // Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS. 20–22 May 2008. Exeter, UK. EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010. P. 177–183.
18. *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 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 6. С. 664–675.
19. *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.
20. *Kubryakov A.I., Korotaev G.K., Dorofeyev V.L., Ratner Y.B., Palazov A., Valchev N. et al.* Black Sea coastal forecasting system // Ocean Sci. 2012. V. P. 183–196.
21. *Kubryakov A., Korotaev G., Ratner Y., Grigoriev A., Kordzadze A., Stefanescu S., Valchev N., Matescu R.* The Black Sea Neashore Regions Forecasting System: operational implementation. Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges // Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS. 20–22 May 2008. Exeter, UK. EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010. P. 293–296.
22. *Ратнер Ю.Б., Холод А.Л., Кубряков А.И., Баянкина Т.М., Иванчик М.В.* Использование данных измерений с дрейфующих буев SVP–BTC и ARGO для валидации результатов прогноза температуры воды в прибрежной области Черного моря // Морской гидрофизический журн. 2014. № 5. С. 33–48.



23. Григорьев А.В., Грузинов В.М., Зацепин А.Г., Воронцов А.А., Кубряков А.И., Шаповал А.О. Оперативная океанография северо-восточной части Черного моря: оценки точности моделирования в сравнении с данными контактных наблюдений. Гидрометеорологические исследования и прогнозы // Продолжение серии периодического журнала "Труды Гидрометцентра России". 2018. № 1. С. 79–96.
24. Kubryakov A.I., Grigoriev A.V., Kordzadze A.A. et al. Nowcasting / forecasting subsystem of the circulation in the Black Sea nearshore regions // European Operational Oceanography: Present and Future. 4th EuroGOOS Conference. 6–9 June 2005. Brest. France, 2006. P. 605–610.
25. Kordzadze A.A., Demetrashvili D.I. Operational forecast of hydrophysical fields in the Georgian Black Sea coastal zone within the ECOOP // Ocean Sci. 2011. V. 7. P. 793–803.
26. Еремеев В.Н., Кубряков А.И., Щипцов А.А. Расчет распространения техногенного загрязнения у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте // Сб. науч. тр. "Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты". Морской гидрофизический институт. Севастополь. 2000. С. 45–55.
27. Кубряков А.И., Попов М.А. Моделирование циркуляции и распространения загрязняющей примеси в Балаклавской бухте // Морской гидрофизический журн. 2005. № 3. С. 49–61.
28. Кныш В.В., Кубряков А.И., Инюшина Н.В., Кортаев Г.К. Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в  $\sigma$  – координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености // Сб. научн. тр.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь. 2008. № 16. С. 243–265.
29. Кныш В.В., Кортаев Г.К., Моисеенко В.А., Кубряков А.И., Белокопытов М.Н., Инюшина Н.В. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971–1993 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 3. С. 433–446.
30. Кубряков А.И., Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Кортаев Г.К. Влияние оптических свойств воды на динамику верхних слоев Черного моря в период с 1985 до 2001 гг. // Сб. научн. тр.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012. Т. 2. № 26. С. 224–255.
31. Кубряков А.И. Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. Севастополь, 2004. № 11. С. 31–50.
32. <https://ocean.ru/index.php/otdeleniya-i-filialy-io-ran/yuzhnoe-otdelenie/item/1060-chernomorskij-poligon-io-ran-gelendzhik-poligon-gelendzhik>.
33. Григорьев А.В., Зацепин А.Г., Воронцов А.А., Кубряков А.И., Шаповал А.О. Качественные и количественные оценки адекватности моделирования мезомасштабной динамики вод северо-восточной части Черного моря по данным наблюдений // Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018 Сборник трудов Международного симпозиума. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Московский университет им. С.Ю. Витте. 2018. С. 94–97.
34. Григорьев А.В., Кубряков А.А., Кубряков А.И., Шаповал К.О. Оперативная океанография северо-восточной части Черного моря: оценки точности моделирования в сравнении с данными спутниковых наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 4. С. 33–39.
35. Белокопытов В.Н., Кубряков А.И., Пряхина С.Ф. Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журн. 2019. Т. 35. № 1. С. 5–15.
36. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Weather Rev. 1963. V. 91. P. 99–164.
37. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics and Space Physics. 1982. V. 20. № 4. P. 851–875.
38. Аракава А., Лэмб В.В. Вычислительные схемы для основных динамических процессов в глобальной циркуляционной модели Калифорнийского университета в Лос-Анжелесе / Модели общей циркуляции атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1981. С. 197–284.
39. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model // In: N. Heaps, ed. Three Dimensional Shelf Models, Coastal Estuarine Sci. Washington D.C.: AGU, 1987. V. 5. P. 1–16.
40. Madala R.V., Piacsek S.A. A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans // Journal Comput. Phys. 1997. № 23. P. 167–178.
41. Курант Р., Фридрихс К., Леви Г. О разностных уравнениях математической физики // УМН. 1941. № 8. С. 125–160.
42. Smolarkiewicz P.K. A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion // J. Comput. Phys. 1984. V. 54. P. 325–362.
43. Papadopoulos A., Katsafados P., Kallos G., Nickovic S. The weather forecasting system for Poseidon – An overview // The Global Atmosphere and Ocean System. 2002. V. 2. P. 219–237.
44. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М. Новые данные о режиме течений на шельфе в северо-восточной части Черного моря // Океанология. 2001. Т. 41. № 3. С. 325–334.
45. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.

## Operational Forecast of Water Dynamics at the Black Sea Sub-Satellite Polygon “Gelendzhik”

A. I. Kubryakov<sup>1, \*</sup>, A. V. Grigoriev<sup>2, 3, \*\*</sup>, and V. A. Kubryakov<sup>2, \*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup>*Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet, Kropotkinskiy lane, 6, Moscow, 119034 Russia*

<sup>3</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),  
Institutskiy lane, 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russia*

*\*e-mail: alexander.kubryakov@mhi-ras.ru*

*\*\*e-mail: ag-privat@mail.ru*

*\*\*\*e-mail: kubr@mail.ru*

A  $\sigma$ -coordinate operational model for forecasting the state of waters at the Black Sea sub-satellite polygon in the area of Gelendzhik, developed on the basis of the technology of double nesting of grids, is presented. The data for setting the initial and boundary conditions of the model comes from the Black Sea Coastal Prediction System. The model is able to reproduce the sub-mesoscale variability of currents at the test site. An example of a three-day forecast of temperature, salinity and current velocity fields for the winter season is given.

**Keywords:** operational model, nested grid technology, water circulation, sigma coordinates, sub-satellite polygon, submesoscale processes