

УДК 551.465

Оперативная океанография северо-восточной части Черного моря: оценки точности моделирования в сравнении с данными натурных измерений

***А.В. Григорьев^{1*}, В.М. Грузинов¹, А.Г. Зацепин², А.А. Воронцов³,
А.И. Кубряков⁴, К.О. Шаповал⁵***

¹ Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва, Россия;

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва, Россия;

³ Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, г. Обнинск, Россия;

⁴ Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь, Россия;

⁵ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия
**ag-privat@mail.ru*

Приводятся результаты моделирования термохалинной структуры и циркуляции вод в северо-восточной части Черного моря на основе общесейсовой и региональной численных моделей. Модельные результаты сравниваются с данными гидрометеостанций российского Кавказского побережья и данными заякоренного зондирующего комплекса «Аквалог» Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, установленного в прибрежной зоне около Геленджика. Производится оценка точности расчетов.

Ключевые слова: Черное море, оперативная океанография, численное моделирование, натурные измерения, сравнение данных, оценки точности, моделирования, реанализ данных

Operational oceanography of the north-eastern part of Black Sea: estimation of the accuracy of modelling in comparison with data of field measurements

***A.V. Grigoriev^{1*}, V.M. Gruzinov¹, A.G. Zatsepin², A.A. Vorontsov³,
A.I. Kubryakov⁴, K.O. Shapoval⁵***

¹ State Oceanographic Institute, Moscow; Russia

² P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow; Russia

³ All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center, Obninsk; Kaluzhsky region, Russia

⁴ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol; Russia

⁵ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia
**ag-privat@mail.ru*

The results of modelling of the thermohaline structure and water circulation in the northeastern part of the Black Sea are presented. The modelling is fulfilled on the basis of the basinscale and regional numerical models. Model results are compared with the data of hydrometeorological stations at the Russian Caucasian coast and data of the moored profiler "Aqualog" of the Shirshov Institute of Oceanology RAS deployed at the coastal zone near Gelendzhik. Accuracy of calculations is estimated.

Keywords: Black Sea, operational oceanography, numerical modelling, field measurements, data comparison, estimation of modelling accuracy, data reanalysis

Введение

Моделирование динамики и термохалинных характеристик вод северо-восточной области Черного моря проводилось в рамках задач оперативной океанографии в международном Черноморском центре морских прогнозов, созданного на базе Морского гидрофизического института (МГИ) РАН, и Государственном океанографическом институте им. Н.Н. Зубова (ГОИИ) [9, 16, 17]. В результате существенного увеличения вычислительных мощностей и точности воспроизведения физических процессов появляется возможность получения гидрофизических полей с малой пространственно-временной дискретностью, не достижимой при использовании иных методов. В [2, 3, 10, 15] дано описание автоматизированной системы диагноза и прогноза характеристик вод Черного моря с использованием региональной модели *Princeton Ocean model (POM)* [8], совмещенной с крупномасштабной моделью всего Черного моря (общесейновой моделью) МГИ [5, 10] (рис. 1), и приводятся оценки физической адекватности результатов моделирования.

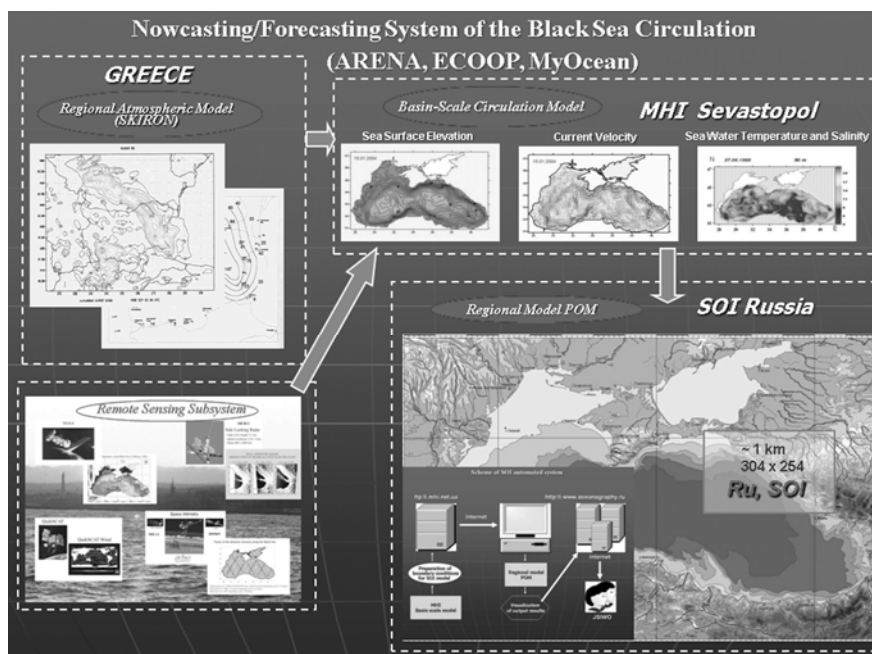


Рис. 1. Схематическое отображение автоматизированной системы моделирования прибрежной динамики прибрежных вод Черного моря.

Fig. 1. Schematic representation of the automated system for numerical modeling of dynamics of coastal waters of the Black Sea.

Приведенные в указанных выше работах результаты носят, за некоторым исключением, качественный характер. В настоящей статье будут представлены и проанализированы результаты, полученные на основе

сравнения модельных данных с данными контактных натуральных измерений на морских гидрометеорологических станциях (ГМС) Кавказского побережья Черного моря и зондирующего комплекса «Аквалог» ИО РАН в районе г. Геленджика.

Характеристика используемых модельных и натуральных данных

Региональная модель северо-восточной области Черного моря *RuReM* создана на основе одной из версий широко известной модели океанической циркуляции *POM*, адаптированной к условиям региона [10, 13]. Разрешение региональной модели *RuReM* составляет ~1 км по горизонтали при 18 слоях в сигма-координатах.

Конечно-разностная аппроксимация по горизонтали как в глобальной z -координатной модели (МГИ), так и в региональной σ -координатной модели (*POM*) производилась на сетке C , то есть меридиональная и зональная составляющие скорости определялись в узлах, сдвинутых относительно тех, где определялись температура и соленость.

Задание сетки и граничных условий для исследуемой прибрежной области и реализация алгоритма расчета производились следующим образом. Крупномасштабная сетка глобальной модели покрывает всю акваторию Черного моря. Выбранная прибрежная область ограничивалась прямоугольником, стороны которого проходили параллельно широте и долготе по узлам крупномасштабной сетки, в которых вычислялась температура и соленость; узлы мелкомасштабной сетки для температуры и солености располагались на этих же линиях. Шаг по пространству для региональной модели принимался кратным шагу глобальной модели. При этом узлы, в которых рассчитывалась составляющие скорости, были сдвинуты в соответствующем направлении на полшага мелкомасштабной сетки. Обоснование и технология задания условий на жидкой границе прибрежной области подробно приведены в [18, 19].

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

Алгоритм расчета заключался в следующем. Пусть $[t_n, t_m]$ – период времени, на который предполагается делать прогноз (n, m – номер дня) в прибрежной области, т. е. t_n – начальный момент прогноза. За начальный момент времени расчета принимается момент времени t_{n-1} , за одни сутки до начала времени прогноза. Таким образом, в качестве начальных значений температуры, солености, уровня моря и скорости в региональной модели принимались интерполированные в узлы сетки региональной модели значения соответствующих параметров глобальной модели в начальный момент времени t_{n-1} . Расчеты по глобальной модели выполняются непрерывно. Затем производится расчет до момента времени t_m . Это дает

возможность согласования рассчитываемых по региональной модели полей до момента начала прогноза, поскольку возмущения от границы, ввиду малости прибрежной расчетной области, успевают за одни сутки пройти всю область.

Во время расчета в прибрежную модель из глобальной модели с заданной дискретностью передаются данные для определения параметров на жидкой границе раздела в соответствие 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 получаются путем линейного интерполирования с использованием соседних во времени значений. Дискретность передачи данных не может, естественно, быть меньше расчетного шага по времени глобальной модели.

Расчетные данные глобальной модели поступают из Черноморского центра морских прогнозов МГИ [9], созданного в рамках Европейского проекта *MyOcean* (Project №: FP7-SPACE-2007-1, <http://www.myocean.eu/>). Она обеспечивает непрерывный диагноз и пятисуточный прогноз температуры, солёности, скорости морских течений и параметров ветрового волнения. Данные для задания атмосферного воздействия поступают из метеоцентра SKIRON (Греция, <http://forecast.uoa.gr>) или системы региональных атмосферных прогнозов отдела взаимодействия океана и атмосферы (BAO, <http://www.vao.hydrophys.org>) МГИ. Метеоцентр SKIRON использует модель Eta [20], в отделе BAO – модель MM5 [11].

На вход глобальной модели циркуляции Черного моря [4, 6] поступает следующая информация: суммарный поток тепла из атмосферы в море; поток коротковолновой солнечной радиации, проникающей в верхние слои моря до глубин несколько десятков метров; поток массы водяного пара с морской поверхности в атмосферу (испарение); осадки (масса осадков в виде дождя или снега, выпадающих на морскую поверхность единичной площади в единицу времени); поток импульса между атмосферой и морем (зональная и меридиональная компоненты напряжения трения ветра).

Кроме того, в модели ассимилируются спутниковые альтиметрические данные и данные о температуре морской поверхности, поступающие с портала *MyOcean*. Результаты расчетов с пространственным разрешением ~5 км по горизонтали на 35 горизонтах выдаются с периодичностью 1 час, записываются в оперативный архив и в дальнейшем используются для расчетов локальных прогнозов с пространственным разрешением 1 км по горизонтали. Помимо гидрологических параметров, в оперативный архив также с периодичностью 1 час записываются проинтегрированные по пространству и времени данные прогноза параметров атмосферы.

Вся эта информация обеспечивает возможность полного задания необходимых начальных и граничных условий на поверхности и на жидких боковых границах прибрежной модели.

ФГБУ «ГОИН» получает необходимые граничные и начальные условия для региональной модели *RuReM* с сервера МГИ РАН в ежедневном режиме и производит диагностические и прогностические (на 3 суток) расчеты термохалинной структуры и динамики вод региона [3, 15–17]. Модели *RuReM* и МГИ совмещены посредством использования описанной выше технологии «вложенных сеток».

Как показано в [3, 15], уменьшение пространственной дискретности в региональной модели имеет принципиальное значение, поскольку позволяет воспроизводить в модельных расчетах динамические образования с горизонтальными размерами ~ 10 км, что невозможно сделать в крупномасштабных моделях. Вертикальные профили, построенные по данным гидрологических зондирований и по модельным расчетам, отражают типичную вертикальную структуру вод региона. Синоптическая изменчивость в пространстве и времени четко выражена в модельных расчетах динамики вод региона.

На рис. 2 приведены спектры изменчивости солености на морской ГМС «Сочи» за период 1991–2005 гг. и на ближайшей к Сочи точке сеточной области (региональная модель) за 2009 г. Как видно из рисунков, на всех из них ярко выражена синоптическая составляющая. Но если в спектре натуральных данных ярко выделяются два равнозначных пика – на периодах 2–3 суток и ~ 10 суток, то в спектре, построенном по данным моделирования, пик для периода 2–3 суток выражен значительно слабее, максимум же энергии сосредоточен на частотах, соответствующих периоду ~ 5 суток.

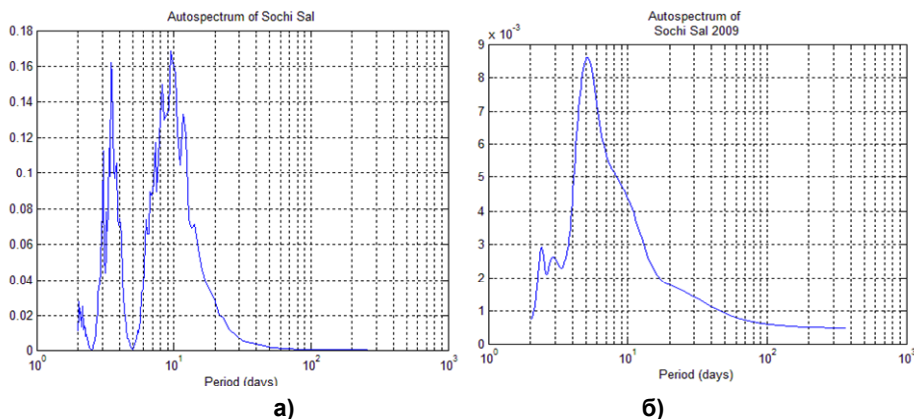


Рис. 2. Оценки автоспектров изменчивости солености в районе ГМС «Сочи», построенные по натурным данным (а) и выходным данным региональной модели (б).

Fig. 2. Estimates of autospectra of variability of salinity in the area of HMS Sochi constructed from the field data (a) and output data of the regional model (б).

Такое различие в локальных максимумах спектров может быть вызвано следующими причинами. Согласно [7], непосредственно у берега существуют в том числе субмезомасштабные вихри с горизонтальными размерами 2–7 км и временем жизни 1–3 суток. Их влияние на термохалинную структуру вод и находит свое отражение в спектрах данных, получаемых на береговых ГМС. Модель с шагом по горизонтали ~ 1 км не может достаточно хорошо «разрешать» такие вихри в непосредственно прилегающей к берегу области [2, 3]. В регионе также ярко выражены инерционные колебания с частотой $\sim 17,5$ часов [5, 7, 14]. Подобный пример приведен на рис. 3, где представлен временной ход модуля вектора скорости течений – модельных и измеренных комплексом «Аквалог» в период шторма 23–28 марта 2013 г. на глубине 30 м. Как видно из рисунка, региональная модель адекватно воспроизводит инерционные колебания в сравнении с натурными данными измерений («Аквалог»), как по частоте, так и по амплитуде.

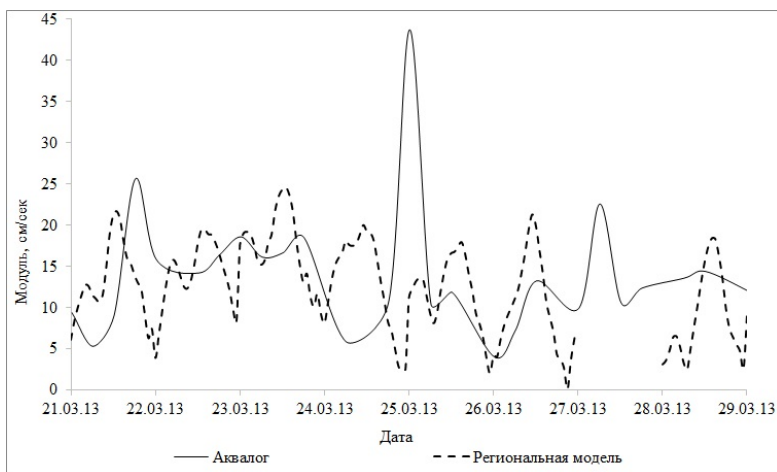


Рис. 3. Временной ход модуля вектора скорости течений, по результатам моделирования (пунктирная линия) и измерений комплексом «Аквалог» (сплошная линия), в период шторма 23–28 марта 2013 г. на глубине 30 м.

Fig. 3. The time course of the absolute value of the current velocity vector based on simulation results (dashed line) and measurements by the Aqualog complex (solid line) during a storm on March 23–28, 2013 at a depth of 30 m.

В результате имеется возможность обеспечивать заказчиков информацией о полях течений, температуры и солёности на различных глубинах, а также уровня моря в графическом и цифровом виде. Эти характеристики могут быть рассчитаны как на текущий день (диагноз), так и в виде прогноза. Модель работает в оперативном режиме с 2010 г. в рамках задач оперативной океанографии (с перерывами, вызванными технологическими проблемами в ГОИНе и МГИ), обеспечивая диагноз и прогноз на трое суток. Результаты в ежедневном режиме представляются на сайте ФГБУ «ГОИН» [2, 3].

Характеристики условий испытаний системы

Оценки точности прогнозов на основе крупномасштабной (МГИ РАН) и региональной (*RuReM*) моделей производились посредством сравнения данных моделирования с данными контактных наблюдений на морских ГМС Кавказского побережья Черного моря и данных зондирований заякоренного прибора «Аквалог» ИО РАН, расположенного в районе Голубой бухты (г. Геленджик). Были использованы данные реанализа на основе модели МГИ с усвоением спутниковых данных температуры поверхности моря и аномалий уровня, а также диагностические и прогностические данные модели *RuReM*. Диагностический расчет по модели *RuReM* представляет собой расчет от предыдущих суток до текущего дня с учетом известного атмосферного форсинга и данных начальных и граничных условий из крупномасштабной модели МГИ РАН.

Следует отметить, что сеточные области обеих моделей не достигают собственно берега и не могут рассматриваться как точные модельные аналоги береговых ГМС, а для сравнения с данными «Аквалог» используются данные в ближайших к расположению прибора точках сеток. Расстояния между точками сеточных областей и измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расстояния от точек сеточных областей моделирования до ближайших точек натуральных измерений

Table 1. Distances from the points of grid simulation areas to the nearest points of field measurements

Точка наблюдений	Расстояние, м	
	МГИ	<i>RuReM</i>
ГМС «Новороссийск»	1558	1124
ГМС «Геленджик»	3283	2203
ГМС «Туапсе»	6114	3116
ГМС «Сочи»	2102	1066
«Аквалог»	2109	395

Эксперименты по оценке качества диагнозов и прогнозов по моделям МГИ и *RuReM* проводились в течение 2012 и 2016 гг. Источники и состав исходных данных таковы:

а) граничные и начальные данные для региональной модели *РОМ* из крупномасштабной модели МГИ – уровень (L), значения напряжения ветра, полного потока тепла, испарения, осадков, температуры воды (T), солености воды (S), компонент скорости течений (U , V);

б) диагностические данные о термохалинных полях и скорости течений на основе модели МГИ с усвоением спутниковых данных о температуре поверхности моря и альтиметрии («реанализ», проект *MyOcean*), параметры аналогичны указанным в пункте (а);

в) диагностические и прогностические данные региональной модели *RuReM* (граничные долготы 37,252–40,961 градусов, граничные широты 43,011–45,253 градусов);

г) данные наблюдений морских ГМС Кавказского побережья Черного моря – «Новороссийск», «Геленджик», «Туапсе», «Сочи» – температура поверхности моря, 4 стандартных срока наблюдений; соленость поверхности моря, 1 срок (время измерений неизвестно);

д) данные измерений комплекса «Аквалог»: температура, соленость, компоненты скорости течений, ~4 срока в сутки (~ каждые 6 ч); координаты постановки: 44,491° с. ш., 37,973° в. д., глубина ~260 м.

Количество используемых сроков наблюдений комплекса «Аквалог» составило 58 в 2012 г. и 162 в 2016 году.

Количество составленных прогнозов и диагнозов, используемых для статистических оценок качества моделирования для модели МГИ составило 366 (2012 г.), для модели *RuReM* – 110 (2012 г.) и 274 (2016 г.).

Результаты сравнения данных моделирования и контактных наблюдений

Некоторые характерные примеры графиков временного хода температуры, солености на поверхности моря (ГМС) и на глубине 50 м («Аквалог») для срока 00 UTC в течение 2012 г. (ежесуточно), а также оценки точности диагностических и прогностических расчетов приведены ниже.

На рис. 4 приведен график временного хода температуры поверхности моря в районе ГМС «Новороссийск», построенный по модельным и контактными данным. Как видно из рисунка, модельные оценки достаточно хорошо описывают особенности временной изменчивости температуры в районе. Причем региональная модель лучше описывает экстремумы временного хода в сравнении с крупномасштабной.

Оценки качества диагноза и прогноза температуры приведены в табл. 2 и 3. Средние моделируемые величины (*Mid*) отличаются от наблюдаемых не более чем на 1,2° для модели МГИ и 0,9° для модели *RuReM* (табл. 2); среднеквадратичные отклонения (*RMS*) – соответственно, не более, чем на 0,8° для модели МГИ и на 0,9° для модели *RuReM*. Коэффициенты корреляции (*R*) между модельными и наблюдаемыми данными – не менее 95 % для модели МГИ и 93 % – для модели *RuReM* при доверительном интервале 2 % [12]. Столь хорошее соответствие данных обусловлено усвоением спутниковой информации о температуре поверхности моря в общекосмической модели, формирующей начальные и граничные условия для модели региональной.

Следует отметить, что коэффициенты корреляции для модели МГИ, хотя и в пределах статистической погрешности, но превосходят аналоги для модели *RuReM*. Это вызвано тем, что данные модели МГИ – результат «реанализа», т. е. учета данных наблюдений непосредственно на момент их усвоения. Модель же *RuReM* использует данные модели МГИ в качестве начальных с суточным отставанием и усвоение не использует.

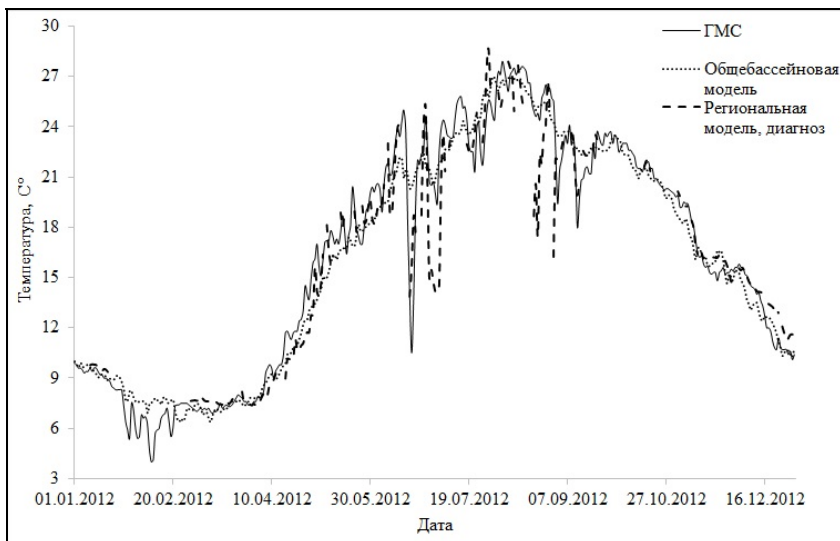


Рис. 4. Временной ход значений температуры поверхности моря, измеренных на ГМС «Новороссийск» (сплошная линия), и построенный по выходным данным модели МГИ (обозначены точками) и RuReM (пунктирная линия).

Fig. 4. Time course of the sea surface temperature values measured at the Novorossiysk hydrometeorological station (solid line) and based on the output data of the MHI model (indicated by dots) and RuReM (dashed line).

Таблица 2. Оценки точности диагностических расчетов температуры поверхности моря

Table 2. Accuracy estimation of diagnostic calculations of sea surface temperature

Точка наблюдений	Mid, градусы			RMS, градусы					R, %	
	ГМС	МГИ	RuR	ГМС	МГИ	RuR	ГМС-МГИ	ГМС-RuR	ГМС-МГИ	ГМС-RuR
Новороссийск	16.3	16.2	16.4	6.8	6.6	6.0	1.4	1.9	98	95
Геленджик	16.7	16.3	16.7	7.2	6.4	6.3	1.6	1.8	98	97
Туапсе	16.8	16.8	17.7	7.2	6.7	6.8	1.4	2.1	98	95
Сочи	15.8	17.0	15.8	6.5	6.8	6.8	2.6	2.9	95	93

Примечание: *Mid* – среднее значение ряда; *RMS* – среднеквадратическая ошибка (для прогнозов), отклонение (для рядов); *R* – коэффициент корреляции.

ГМС – ряды наблюдений на морских ГМС; МГИ – ряды данных моделирования по общесейсовой модели МГИ (диагноз, «реанализ»); RuR – ряды данных региональной модели RuReM (диагноз).

Таблица 3. Оценки точности прогнозов температуры поверхности моря по модели *RuReM*. Заблаговременность прогноза 24–72 ч

Table 3. Accuracy estimation of sea surface temperature forecasts by the *RuReM* model. Timing ahead 24-72 h

Точка наблюдений	Rel, %			Surplus, %		
	24 ч	48 ч	72 ч	24 ч	48 ч	72 ч
Новороссийск	6	6	9	38	44	42
Геленджик	5	6	9	20	23	26
Туапсе	6	7	8	32	36	41
Сочи	7	7	7	24	33	35

Примечание: *Rel* – отношение *RMS* ошибок прогноза к *RMS* ряда измерений; *Surplus* – процент прогнозов по модели, превышающих по успешности инерционный.

Качество прогноза по модели *RuReM* может быть также охарактеризовано параметрами *Rel* (отношением *RMS* ошибок прогноза к *RMS* ряда натуральных наблюдений) и *Surplus* (процент модельных прогнозов, лучших в сравнении с инерционными). Как следует из табл. 3, при значениях *Rel*, не превышающих 9 %, результаты прогноза с использованием ежесуточных значений температуры в 00 UTC надо признать неудовлетворительными.

В отличие от температуры, модельные данные о солёности корректируются на основе усвоения данных спутниковой альтиметрии с использованием технологии пересчета в поправки солёности, подразумевающей определенную автомодельность ее вертикальных профилей [3, 4]. По-видимому, в прибрежной зоне на небольших глубинах такой алгоритм некорректен. Коэффициенты корреляции модельных и наблюдаемых на ГМС значений солёности не превышают 50 %.

Вне прибрежной зоны, на больших глубинах, где установлен комплекс «Аквалог», алгоритм корректировки солёности потенциально может привести к иным результатам. В среднем комплекс делает 4 цикла (вертикальных профиля) в сутки, что усложняет привязку данных к конкретному времени. Были выбраны данные, полученные близко к 00 UTC с дискретностью по вертикали 1 м. Для сравнения с модельной информацией использовались данные измерений на глубине 50 м.

Временной ход температуры, измеренной комплексом «Аквалог» и построенный по данным модели МГИ («реанализ») и *RuReM* (диагноз и прогноз на 1–3 суток), приведен на рис. 5.

Отчетливо видно, что во временной изменчивости температуры («Аквалог») хорошо выражены колебания синоптического масштаба с периодом ~5 суток. В выходных данных региональной модели *RuReM* они также имеют свое отражение, но с меньшей амплитудой. Причем их проявления в графиках весьма схожи как для диагноза, так и при прогнозах на 1–2 суток. В данных модели МГИ такие колебания фактически не проявляются. Оценки качества диагноза и прогноза температуры в данном случае приведены в табл. 4 и 5.

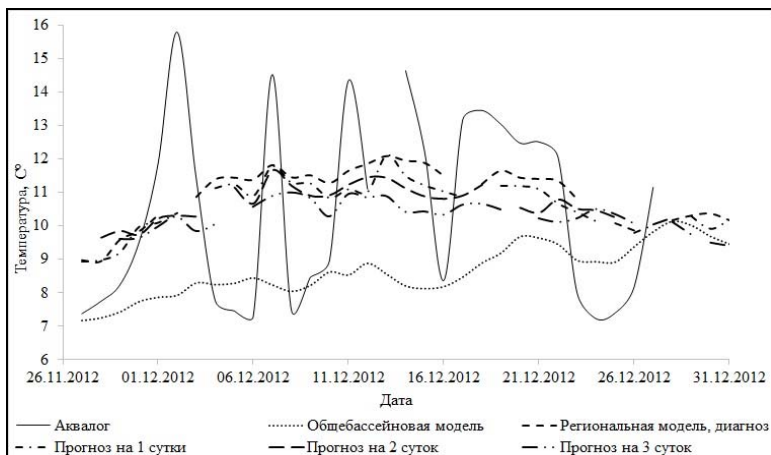


Рис. 5. Временной ход значений температуры на глубине 50 м по данным комплекса «Аквалог», численных моделей МГИ (обозначены точками) и *RuReM* (пунктирные линии).

Fig. 5. The time course of the temperature values at a depth of 50 m according to the data of the Aqualog complex, the *MHI* (indicated by dots) and *RuReM* (dashed lines) numerical models.

Таблица 4. Оценки точности диагностических расчетов температуры на глубине 50 м по численным моделям МГИ и *RuReM* (*RuR*) в сравнении с данными измерений комплекса «Аквалог» (*AQL*)

Table 4. Accuracy estimation of diagnostic temperature calculations at a depth of 50 m in numerical models of *MHI* and *RuReM* (*RuR*) in comparison with the measurements of the complex "Aqualog" (*AQL*)

<i>Mid</i> , градусы			<i>RMS</i> , градусы				<i>R</i> , %		
<i>AQL</i>	МГИ	<i>RuR</i>	<i>AQL</i>	МГИ	<i>RuR</i>	<i>AQL</i> - МГИ	<i>AQL</i> - <i>RuR</i>	<i>AQL</i> - МГИ	<i>AQL</i> - <i>RuR</i>
10.44	8.50	11.03	2.74	0.70	0.90	3.38	2.40	21	51

Примечание: *Mid* – среднее значение ряда; *RMS* – среднеквадратическая ошибка (для прогнозов), отклонение (для рядов); *R* – коэффициент корреляции.

Таблица 5. Оценки точности прогнозов температуры на глубине 50 м по численной модели *RuReM*. Заблаговременность прогноза 24–72 ч

Table 5. Estimations of the accuracy of the temperature forecasts at a depth of 50 m according to the numerical model of *RuReM*. Timing ahead 24-72 h

<i>Rel</i> , %			<i>Surplus</i> , %		
24 ч	48 ч	72 ч	24 ч	48 ч	72 ч
36	39	38	60	70	67

Примечание: *Rel* – отношение *RMS* ошибок прогноза к *RMS* ряда измерений; *Surplus* – процент прогнозов по модели, превышающих по успешности инерционный.

Как следует из данных, приведенных в табл. 4, средние значения рядов измерений температуры комплексом «Аквалог» значительно ближе к данным модели *RuReM*, нежели модели МГИ, что очевидно и из рис. 5. Среднеквадратические отклонения для рядов измерений и модельных данных отличаются в 3–4 раза. Коэффициент корреляции между данными «Аквалог» и *RuReM* значительно выше в сравнении с моделью МГИ, но равен всего лишь 51 % при доверительном интервале 12 % (табл. 4). В то же время, в сравнении с инерционным прогнозом, прогноз температуры по модели *RuReM* имеет преимущество в 60–70 % случаев (табл. 5).

Аналогичные результаты для солености приведены на рис. 6 и в табл. 6. Синоптические колебания также выражены достаточно хорошо в натуральных и модельных (*RuReM*) данных, и фактически не отражены в данных модели МГИ. Обращает на себя внимание тенденция к увеличению значений солености с увеличением срока прогноза, вызванная, вероятно, отсутствием усвоения данных в региональной модели.

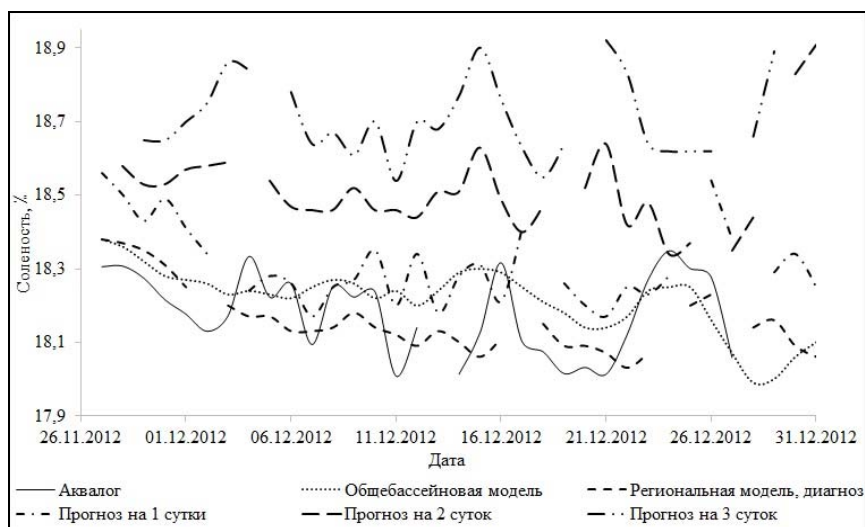


Рис. 6. Временной ход значений солености на глубине 50 м, измеренной комплексом «Аквалог» и по данным численных моделей МГИ (обозначен точками) и *RuReM* (пунктирные линии).

Fig. 6. The time course of salinity values at a depth of 50 m measured by the Aqualog complex and according to the numerical models of the MHI (indicated by dots) and *RuReM* (dashed lines).

Средние значения наблюдаемых и диагностических модельных величин солености близки, различия не превышают 0,06 ‰ (табл. 6). Значения коэффициентов корреляции натуральных и модельных значений солености выше для района нахождения комплекса «Аквалог» в сравнении с соответствующими значениями для районов ГМС, но сравнимы с коэффициентом корреляции для температуры – около 50 % при доверительном

интервале 12 %, т. е. остаются малыми. Использование модели *RuReM* имеет преимущество перед инерционным прогнозом не более чем в 40 % случаев. Степень физической адекватности моделирования в районе постановки комплекса «Аквалог» заметно выше, нежели в непосредственно прибрежной зоне.

Таблица 6. Оценки точности диагностических расчетов солёности на глубине 50 м по численным моделям МГИ и *RuReM* (*RuR*) в сравнении с данными измерений комплекса «Аквалог» (*AQL*)

Table 6. Accuracy estimation of diagnostic calculations of salinity at a depth of 50 m in numerical models of *MHI* and *RuReM* (*RuR*) in comparison with the measurements of the complex "Aqualog" (*AQL*)

<i>Mid</i> , ‰			<i>RMS</i> , ‰				<i>R</i> , %		
<i>AQL</i>	МГИ	<i>RuR</i>	<i>AQL</i>	МГИ	<i>RuR</i>	<i>AQL</i> - МГИ	<i>AQL</i> - <i>RuR</i>	<i>AQL</i> - МГИ	<i>AQL</i> - <i>RuR</i>
10.44	8.50	11.03	2.74	0.70	0.90	3.38	2.40	21	51

Примечание: *Mid* – среднее значение ряда; *RMS* – среднеквадратическая ошибка (для прогнозов), отклонение (для рядов); *R* – коэффициент корреляции.

Результаты моделирования изменчивости скорости течений для момента времени 00 UTC оказались неудовлетворительными. Возможно, некоторое сглаживание данных сможет улучшить результат. Аналогичные приведенным выше оценки для среднесуточных значений измерений скорости зондирующего комплекса «Аквалог» и модельных данных *RuReM* были сделаны по данным 2016 года. Результаты представлены на рис. 7, 8 и в табл. 7, 8.

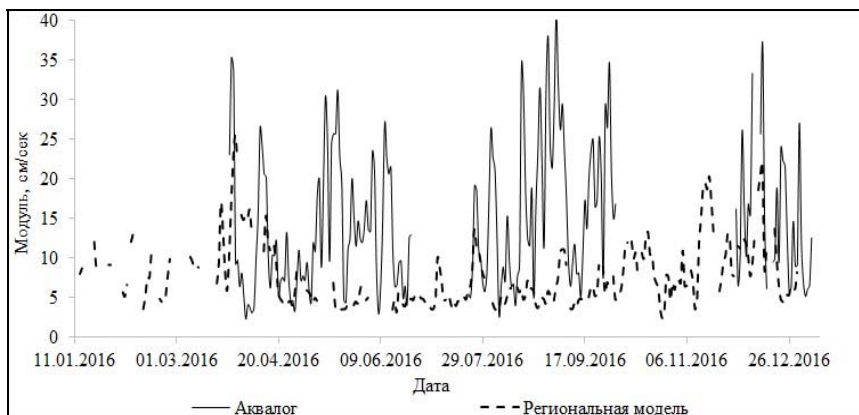


Рис. 7. Временной ход среднесуточных значений модуля скорости течений на глубине 35 м, измеренной комплексом «Аквалог» и вычисленной по модели *RuReM* (пунктирная линия).

Fig. 7. The time course of the mean daily values of the current velocity modulus at a depth of 35 m measured by the *Aqualog* complex and calculated by the *RuReM* model (dashed line).

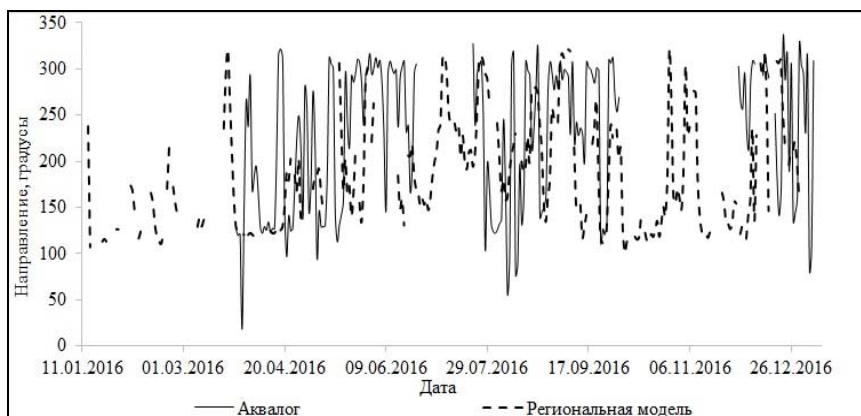


Рис. 8. Временной ход среднесуточных значений направления скорости течения на глубине 35 м по данным измерений комплекса «Аквалог» и вычисленной по модели *RuReM* (пунктирная линия).

Fig. 8. The time course of the average daily values of current velocity direction at a depth of 35 m according to the measurements of the complex "Aqualog" and calculations using the *RuReM* model (dashed line).

Как видно из приведенных графиков и таблиц, средние значения измеренных и моделируемых скоростей течений как по модулю, так и по направлению оказываются весьма близки. Среднеквадратические отклонения измеренных значений примерно в два раза превышают модельные. Коэффициенты корреляции (30 % для модуля и 40 % для направления скорости течений при доверительном интервале 7 %) невелики, однако модельный прогноз более чем в 50 % случаев превосходит инерционный.

Таблица 7. Оценки точности диагностических расчетов среднесуточных значений модуля и направления скорости течений (V) по модели *RuReM* (RuR) в сравнении с данными измерений комплекса «Аквалог» (AQL)

Table 7. Accuracy estimation of the diagnostic calculations of the daily average values of the module and the direction of the current velocity (V) according to the *RuReM* (RuR) model in comparison with the observational data of the *Aqualog* complex (AQL)

Характеристика	Mid		RMS		R, %
	AQL	RuR	AQL	RuR	AQL-RuR
Модуль V , м/с	0.15	0.14	0.09	0.04	30
Направление V , градусы	229	225	75	47	40

Примечание: *Mid* – среднее значение ряда; *RMS* – среднеквадратическая ошибка; *R* – коэффициент корреляции.

Таблица 8. Оценки точности прогнозов среднесуточных значений модуля и направления скорости течений (V) по модели *RuReM* (*RuR*). Заблаговременность прогноза 24–72 ч

Table 8. Accuracy estimation of forecasts for the daily average values of the module and the direction of the current velocity (V) according to the *RuReM* model. Forecast projection: 24-72 h

Характеристика	<i>Rel, %</i>			<i>Surplus, %</i>		
	24 ч	48 ч	72 ч	24 ч	48 ч	72 ч
Модуль V , м/с	14	12	38	56	50	58
Направление V , градусы	1	1	1	58	58	62

Примечание: *Rel* – отношение *RMS* ошибок прогноза к *RMS* ряда измерений; *Surplus* – процент прогнозов по модели, превышающих по успешности инерционный.

Заключение

На основании сравнения данных измерений температуры, солености и скорости течений, выполненных на морских ГМС Кавказского побережья Черного моря и зондирующим комплексом «Аквалог» (район г. Геленджика), и данных моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Результаты расчетов с использованием региональной модели северо-восточной области моря *RuReM* с горизонтальным разрешением ~ 1 км имеют преимущество в физической адекватности и точности прогнозов перед аналогичными расчетами по общесейсической модели МГИ с разрешением ~ 5 км.

2. Диагностические и прогностические значения температуры поверхности моря, полученные с помощью описанной выше системы диагноза и прогноза, имеют достаточно высокую точность и коррелированность по отношению к наблюдениям.

3. Аналогичные оценки для солености оказываются неудовлетворительными, что обусловлено некорректностью использовавшегося алгоритма усвоения данных спутниковой альтиметрии в мелководной прибрежной зоне.

4. Степень физической адекватности моделирования и точности прогнозов солености в районе постановки комплекса «Аквалог» заметно выше, нежели в непосредственно прибрежной зоне.

5. Прогноз температуры и среднесуточных значений модуля и направления вектора течений, выполненный посредством региональной модели *RuReM*, превосходит по качеству инерционный прогноз.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-РГО 17-05-41089.

Список литературы

1. Барabanов В.С., Ефимов В.В., Шокуров М.В. Об использовании мезомасштабной модели для расчета приводного ветра и осадков над Черным морем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2003. Вып. 7. С. 177-189.
2. Григорьев А.В. Моделирование динамики вод прибрежной зоны Черного моря // Труды ГОИН. 2015. Вып. 216. С. 221-239.
3. Грузинов В.М., Борисов Е.В., Григорьев А.В. Прикладная океанология. Обнинск: Артифекс, 2012. 384 с.
4. Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия РАН. ФАО. 2012. Том 48, № 1. С. 137-149.
5. Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К. Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2004. № 1. С. 52-68
6. Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Анализ изменчивости гидрофизических полей Черного моря в течение двух деkad (1993-2012) на основе результатов реанализа // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 1, С. 33-48.
7. Журбас В.М., Зацепин А.Г., Григорьева Ю.В., Еремеев В.Н., Кременецкий В.В., Мотыжев С.В., Поярков С.Г., Пулейн П.-М., Станичный С.В., Соловьев Д.М. Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейферным данным // Океанология. 2004. Том 44, № 1. С. 34-48.
8. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанологию Черного моря. Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2006. 382 с.
9. Коротаев Г.К., Демьшев С.Г., Дорофеев В.Л., Кныш В.В., Кубряков А.И., Суслин В.М., Баянкина Т.М., Воронина Н.Н., Иванчик А.М., Иванчик М.В., Крыль М.В., Мамчур Н.Л., Ратнер Ю.Б., Холод А.Л., Инюшина Н.В., Макаев А.И., Мартынов М.В., Шокуров М.В. Архитектура и результаты работы международного Черноморского центра морских прогнозов, созданного на базе МГИ НАН Украины в рамках проекта европейского союза «Мой океан» // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Т. 1, вып. 27. С. 128-133.
10. Кубряков А.И. Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2004. Вып. 11. С. 31-50.
11. Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В., Иванчик А.М., Холод А.Л. Контроль качества данных атмосферного форсинга в оперативной системе Черноморского центра морских прогнозов // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 5. С. 25-37.
12. РД 52.27.759-2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада, лтд, 2011. 201 с.
13. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model // Three Dimensional Shelf Models, Coastal Estuarine Sci. 1987. Vol. 5. P. 1-16.
14. Davis R.E. Modeling eddy transport of passive tracers // J. Mar. Res. 1987. Vol. 45. P. 635-666.
15. Grigoriev A.V., Zatsepin A.G. Numerical Modeling of Water Dynamics of Russian Zone of the Black Sea within the Framework of Operational Oceanography Tasks // J. Coast. Dev. 2014. Vol. 17, No. 1, <http://dx.doi.org/10.4172/1410-5217.1000387>.
16. 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.
17. Kubryakov, A.I., Korotaev, G.K., Dorofeev, V.L., Ratner, Y.B., Palazov, A., Valchev, N., Malciu, V., Mateescu, R., Oguz, T. Black Sea coastal forecasting system // Ocean Sci. 2012. Vol. 8. P. 183-196. doi:10.5194/os-8-183-2012.

18. Marsaleix P., Auclair F., Estournel C. Considerations on open boundary conditions for regional and coastal ocean models // J. Atmosph. Oceanic. Tech. 2006. Vol. 23, no. 11. P. 1604-1613.
19. Matano R.P., Palma E.D. On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: the barotropic mode // J. Geoph. Res. 1998. Vol. 103. C1. P. 1319-1341.
20. Papadopoulos A., Katsafados P., Kallos G., Nickovic S. The weather forecasting system for POSEIDON-An overview // Global Atmos. Ocean Sys. 2002. Vol 8, no. 2-3. P. 219-237.

References

1. Barabanov V.S., Efimov V.V., Shokurov M.V. Ob ispol'zovanii mezomashtabnoi modeli dlya rascheta privodnogo vetra i osadkov nad Chernym morem [On the use of a mesoscale model for calculating driving wind and precipitation over the Black sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones of sea], 2003, vol. 7, pp. 177-189. [in Russ.].
2. Grigoriev A.V. Modelirovanie dinamiki vod pribrezhnoi zony Chernogo morya [Modelling of dynamics of waters in the coastal zone of the Black Sea]. *Trudy GOIN* [SOI's Proceedings], 2015, vol. 216, pp. 221-239. [in Russ.].
3. Gruzinov V. M., Borisov E.V., Grigoriev A.V. Prikladnaya okeanografiya [Applied Oceanography]. Obninsk: Artifeks Publ., 2012, 384 p. [in Russ.].
4. Demyshev S.G. Numerical model of online forecasting Black Sea currents. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 120-132.
5. Dorofeev V.L., Korotaev G.K. Assimilyatsiya dannykh sputnikovoi al'timetrii v vikhrazreshayushchei modeli tsirkulyatsii Chernogo morya [Assimilation of satellite altimetry data in the vortex-permitting model of the Black Sea circulation]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Physical Oceanography], 2004, iss. 1, pp. 52-68. [in Russ.].
6. Dorofeev V.L., Sukhikh L.I. Analysis of Variability of the Black Sea Hydrophysical Fields in 1993-2012 Based on the Reanalysis Results. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Physical Oceanography], 2016, iss. 2, pp. 33-47, doi: 10.22449/0233-7584-2016-1-33-48. [in Russ.].
7. Zhurbas V.M., Zatsepin A.G., Grigorieva Yu.V., Poyarkov S.G., Ereemeev V.N., Kremenskiy V.V., Motyzhnev S.V., Stanichny S.V., Soloviev D.M., Poulain P.-M. Water circulation and characteristics of currents of different scales in the upper layer of the Black Sea from drifter data. *Okeanologiya* [Oceanology], vol. 44, no. 1, pp. 30-43.
8. Korotaev G.K., Ereemeev V.N. Vvedenie v operativnuyu okeanografiyu Chernogo moray [Introduction to operative Oceanography of the Black Sea]. Sevastopol: NPTSEKOSI-GIDROFIZIKA Publ., 2006, 382 p. [in Russ.].
9. Korotaev G.K., Demyshev S.G., Dorofeev V.L., Knysh V.V., Kubryakov A.I., Suslin V.M., Bayankina T.M., Voronina N.N., Ivanchik A.M., Ivanchik M.V., Kryl' M.V., Mamchur N.L., Ratner Yu.B., Kholod A.L., Inyushina N.V., Makaev A.I., Martynov M.V., Shokurov M.V. Arkhitektura i rezul'taty raboty mezhdunarodnogo Chernomorskogo tsentra morskikh prognozov, sozdannogo na baze MGI NAN Ukrainy v ramkakh proekta evropeiskogo soyuza «Moi okean» [Architecture and work results of the international black sea center of marine forecasts, created on the basis of MGI NAS of Ukraine within the framework of the European Union project "My ocean"]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones of sea], 2013, vol. 1, no 27, pp. 177-189.
10. Kubryakov A.I. Primenenie tekhnologii vlozhennykh setok pri sozdanii sistemy monitoringa gidrofizicheskikh polei v pribrezhnykh raionakh Chernogo morya [Application of the technology of nested grids in the creation of monitoring system of hydrophysical fields in the coastal areas of the Black sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones of sea], 2004, vol. 11, pp. 31-50.

11. Ratner Yu.B., Ivanchik M.V., Ivanchik A.M., Kholod A.L. System of the wind wave operational forecast in the Black Sea marine forecasting center. *Morskoi gidrofizicheskiy zhurnal* [Physical Oceanography], 2017, iss. 5, pp. 51-59, doi: 10.22449/0233-7584-2017-5-56-66. [in Russ.].
12. RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. Moscow: TriadaltD Publ, 2011, 201 p. [in Russ.].
13. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model. *Three Dimensional Shelf Models, Coastal Estuarine Sci.* 1987, vol. 5, pp. 1-16.
14. Davis R.E. Modeling eddy transport of passive tracers. *J. Mar. Res.*, 1987, vol. 45, pp. 635-666.
15. Grigoriev A.V., Zatselin A.G. Numerical Modeling of Water Dynamics of Russian Zone of the Black Sea within the Framework of Operational Oceanography Tasks. *J. Coast. Dev.*, 2014, vol. 17, no. 1, available at: [dx.doi.org/10.4172/1410-5217.1000387](https://doi.org/10.4172/1410-5217.1000387).
16. Kubryakov A., Korotaev G., Ratner Y., Grigoriev A., Kordzadze A., Stefanescu S., Valchev N., Mateescu R. The Black Sea Neashore Regions Forecasting System: operational implementation. *Proc. Fifth Int. Conference "Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges"* on EuroGOOS 20-22 May 2008, Exeter, UK. EuroGOOS Office, SMHI, Norkoping, Sweden, 2010, pp. 293-296.
17. Kubryakov, A.I., Korotaev, G.K., Dorofeev, V.L., Ratner, Y.B., Palazov, A., Valchev, N., Malciu, V., Mateescu, R., Oguz, T. Black Sea coastal forecasting system. *Ocean Sci.*, 2012, Vol. 8, pp. 183-196, doi:10.5194/os-8-183-2012.
18. Marsaleix P., Auclair F., Estournel C. Considerations on open boundary conditions for regional and coastal ocean models. *J. Atmosph. Oceanic. Tech.*, 2006, vol. 23, no. 11, pp. 1604-1613.
19. Matano R.P., Palma E.D. On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: the barotropic mode. *J. Geoph. Res.*, 1998, vol. 103, C1, pp. 1319-1341.
20. Papadopoulos A., Katsafados P., Kallos G., Nickovic S. The weather forecasting system for POSEIDON-An overview. *Global Atmos. Ocean Sys.*, 2002, vol 8, no. 2-3, pp. 219-237.

Поступила в редакцию 15.02.2018 г.

Received by the editor 15.02.2018.