

А.В.Григорьев<sup>1</sup>, А.А.Кубряков<sup>2</sup>, А.И.Кубряков<sup>2</sup>, К.О.Шаповал<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова, г.Москва

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт, г.Долгопрудный, Московская обл.

### ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОГРАФИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ: ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРАВНЕНИИ С ДАННЫМИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Представлены результаты сравнения данных численного моделирования термохалинной структуры и динамики вод северо-восточной части Черного моря с данными спутниковых и контактных наблюдений на морских гидрометеорологических станциях Кавказского побережья. Показано, что модельные расчеты температуры поверхности моря имеют весьма высокую схожесть и коррелированность с данными наблюдений (более 93 %), обусловленную усвоением спутниковых данных в общебассейновой модели Черного моря (данные из которой являются начальными и граничными условиями для региональной модели северо-восточной области). Коэффициенты корреляции данных спутниковой альтиметрии, гидрометеорологических станций и моделирования превышают 70 %. Этот результат говорит в пользу использования данных альтиметрии и моделирования для слежения за уровнем, а также использования данных альтиметрии в алгоритмах усвоения в численных моделях. При этом необходима модификация используемых алгоритмов усвоения для корректировки моделируемых полей солёности в мелководных областях моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *оперативная океанография, численное моделирование, температура поверхности моря, аномалии уровня, усвоение данных, Черное море*  
doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-33-39

**Введение.** Результаты сравнения данных численного моделирования и контактных наблюдений (температуры, солёности, скорости течений) приведены в работе [1]. В данной статье приводятся аналогичные результаты для спутниковых наблюдений. В настоящей работе будут представлены и проанализированы результаты, полученные на основе сравнения спутниковых наблюдений над температурой поверхности моря (*SST*) и аномалиями уровня (*SSH*) с модельными данными и данными контактных натурных измерений на морских гидрометеорологических станциях (ГМС) Кавказского побережья Черного моря.

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 (ГОИН). Описание автоматизированной системы диагноза и прогноза характеристик вод Черного моря с использованием региональной модели *RuReM*, совмещен-

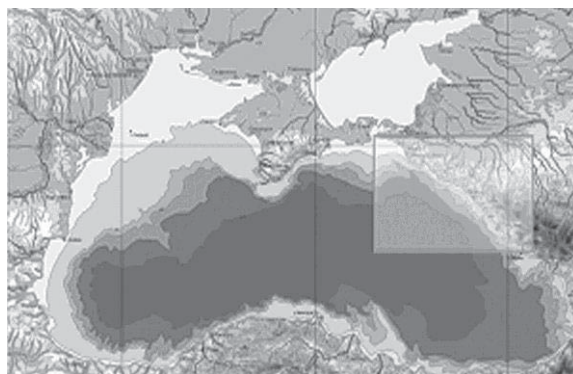
© А.В.Григорьев, А.А.Кубряков, А.И.Кубряков, К.О.Шаповал, 2019

*Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.33-39.*

ной с крупномасштабной моделью всего Черного моря (общемасштабной моделью) МГИ по технологии «вложенных сеток», приведено в работах [2 – 6].

**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 *Princeton Ocean Model (POM)*, адаптированной к условиям региона [6 – 8] (рис.1). Разрешение региональной модели *RuReM* составляет ~1 км по горизонтали при 18 слоях в сигма-координатах.

В общемасштабной модели используется атмосферный форсинг (*SKIRON*, [9]) и ассимилируются спутниковые альтиметрические данные и данные о температуре морской поверхности, поступающие с портала *MyOcean* [10, 11]. Расчеты проводятся с пространственным разрешением ~5 км по горизонтали на 35 горизон-



Р и с . 1 . Область моделирования северо-восточной части Черного моря.

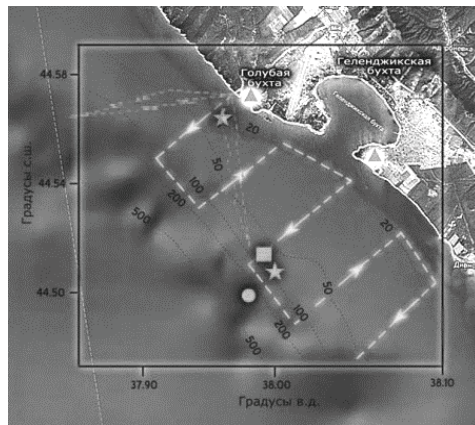
тах. Вся эта информация обеспечивает возможность полного задания необходимых начальных и граничных условий на поверхности и на жидких боковых границах региональной модели.

Результатом моделирования являются поля уровня моря, течений, температуры и солёности на различных горизонтах, рассчитанные на текущий день (диагноз) и прогностические на 3-е суток. Автоматизированная система работает в оперативном режиме с 2010 г. в рамках задач оперативной океанографии.

Используются данные наблюдений (температура поверхности моря, уровень моря в 4 стандартных срока наблюдений за 2016 г.) на морских ГМС Кавказского побережья Черного моря: «Новороссийск», «Геленджик», «Туапсе», «Сочи».

В качестве спутниковых данных использовались ежедневные карты температуры морской поверхности, полученные по измерениям сканера *MODIS-Aqua* за 2016 г. с разрешением 4 км (*Level 3*) из архива (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), и региональный массив картированных аномалий уровня *AVISO (Archivage Validation Interprétation des données des Satellites Océanographiques)* для Черного моря (<http://www.aviso.oceanobs.com/>) за 2016 г. Региональный массив был создан в агентстве *CLS (Collection and Location by Satellite)*. Пространственное разрешение карт составляет  $1/8^\circ$  (~ 12,5 км), что в два раза выше, чем для глобального массива данных ( $1/4^\circ$ ). Временное разрешение использованных данных составляло 1 и 7 дней (в различных частях настоящей работы). Картированные данные были получены по комбинированным измерениям вдольтрековых аномалий уровня с нескольких спутников с помощью методов, предложенных в [12]. При создании массивов в исходные альтиметрические данные были введены традиционные для таких измерений коррекции [13].

**Результаты сравнения данных моделирования, контактных и спутниковых наблюдений.** Приведенные в работе [1] результаты были получены как для «срочных» (00 UTC, 2012 г.), так и среднесуточных (2016 г.) данных. Качественные различия между ними оказались невелики. Как показали дальнейшие исследования, этот факт может быть вызван значительным влиянием инерционных движений на поля течений в глубоководной зоне моря [14, 15]. На значения температуры и солёности у берегов такие движения не оказывают заметного влияния. А вот уже в районе постановки зондирующего комплекса «Аквалог» (Гидрофизический полигон «Геленджик», координаты 44,491° с.ш., 37,973° в.д., глубина около 260 м, рис.2) инерционные колебания на частоте ~17,5 ч уже играют существенную роль. Поэтому суточное осреднение не приводит к качественному улучшению оценок точности модельных диагноза и прогноза.



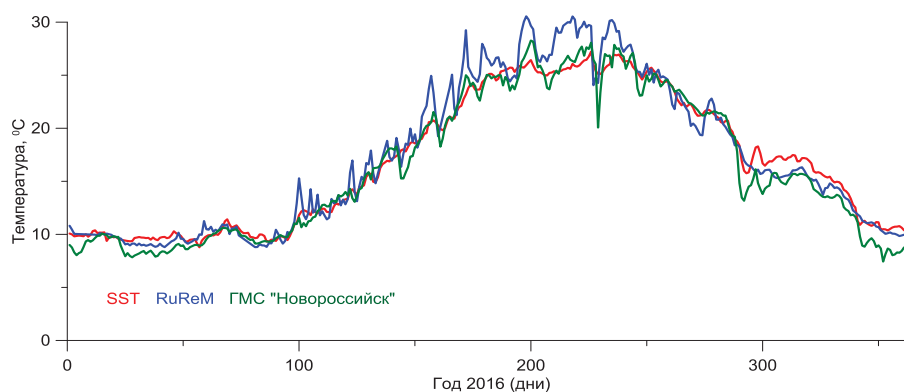
Р и с . 2 . Гидрофизический полигон «Геленджик». Кружком обозначено место постановки зондирующего комплекса «Аквалог».

В настоящей работе будут сравниваться среднесуточные модельные и наблюдаемые данные. Следует отметить также, что модельные и спутниковые данные были использованы в точках сеточных областей, не совпадающих в точности с точками наблюдений на ГМС и постановки комплекса «Аквалог».

Модельные значения температуры поверхности моря имеют высокую точность и коррелированность по отношению к наблюдениям, что обусловлено усвоением данных SST в общебассейновой модели моря. Расчеты солёности в сравнении с данными ГМС оказываются неудовлетворительными. Модельные данные о солёности корректируются на основе усвоения данных спутниковой альтиметрии с использованием технологии пересчета в поправки солёности, подразумевающей определенную автомодельность ее вертикальных профилей [4, 10]. По-видимому, в прибрежной зоне на небольших глубинах такой алгоритм некорректен. Этот вывод подтверждается тем, что расчеты солёности в районе постановки комплекса «Аквалог» намного ближе к измеренным, нежели у берегов.

Ниже приведены качественные и количественные оценки точности модельных расчетов температуры поверхности моря и аномалий уровня в сравнении с данными спутниковых наблюдений.

На рис.3 приведен график временного хода температуры поверхности моря в районе ГМС «Новороссийск», построенный по модельным, контактными (ГМС) и спутниковым (SST) данным. Как видно из рисунка, модельные оценки достаточно хорошо описывают особенности временной изменчивости температуры в районе. Спутниковые данные имеют заметно более сглаженный вид в сравнении с данными ГМС и RuReM.



Р и с . 3 . Временной ход значений температуры поверхности моря на морской ГМС «Новороссийск» (зеленая линия), построенный по данным модели *RuReM* (синяя линия) и спутниковым данным (красная линия).

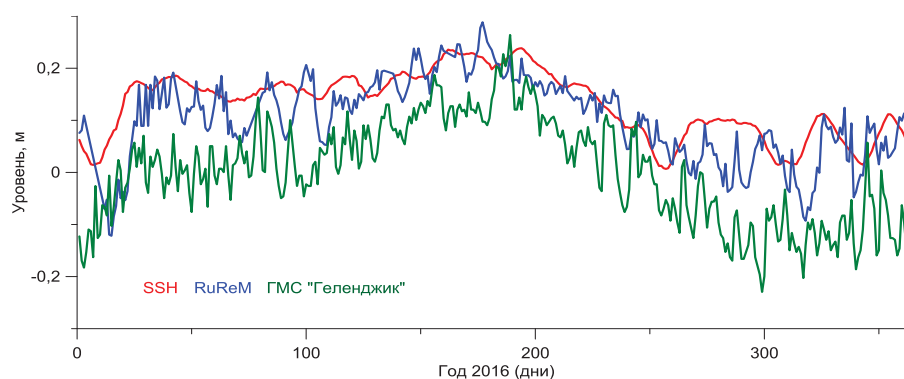
Оценки качества расчетов температуры поверхности моря приведены в табл.1. Средние моделируемые величины *RuReM* (*Mid*) отличаются не более чем на  $0,9^\circ$  от данных ГМС и  $1,7^\circ$  от *SST* (Сочи, остальные пункты – не более  $0,4^\circ$ ). Среднеквадратичные отклонения (*RMS*) – не более чем на  $0,9^\circ$  для ГМС и на  $0,6^\circ$  для *SST*. Коэффициенты корреляции (*R*) между модельными и наблюдаемыми данными – не менее 93 % для ГМС и 96 % – для *SST* при доверительном интервале 2 % [16]. Как уже отмечалось в [1], столь хорошее соответствие данных обусловлено усвоением спутниковой информации о температуре поверхности моря в общеконцевой модели, формирующей начальные и граничные условия для модели региональной. Причем это соответствие с используемыми в работе полями *SST* оказались даже выше.

Аналогичные приведенным выше данные для значений уровня приведены на рис.4 и в табл.2. Как и температурные, спутниковые данные об уровне оказываются гораздо более сглаженными в сравнении с данными ГМС и *RuReM*. Отметим, что данные ГМС приведены к нулю Кронштадтского футштока, а данные *SST* и *RuReM* – отклонения от их средних значений. Поэтому среднее за год значение уровня по данным ГМС будет заметно отли-

Т а б л и ц а 1 . Оценки точности расчетов температуры поверхности моря.

точка наблюдений	<i>Mid</i> , °C			<i>RMS</i> , °C			<i>R</i> , %	
	ГМС	<i>SST</i>	<i>RuReM</i>	ГМС	<i>SST</i>	<i>RuReM</i>	<i>SST-RuReM</i>	ГМС- <i>RuReM</i>
Новороссийск	16,3	16,8	16,4	6,8	6,2	6,0	98	95
Геленджик	16,7	16,8	16,7	7,2	6,2	6,3	99	97
Туапсе	16,8	17,3	17,7	7,2	6,3	6,8	96	95
Сочи	15,8	17,5	15,8	6,5	6,2	6,8	99	93

Примечание: *Mid* – среднее значение ряда; *RMS* – среднеквадратическая ошибка (для прогнозов), отклонение (для рядов); *R* – коэффициент корреляции. ГМС – ряды наблюдений на морских ГМС; *SST* – ряды спутниковых данных; *RuR* – ряды данных региональной модели *RuReM*.



Р и с . 4 . Временной ход аномалий уровня моря на морской ГМС «Геленджик» (зеленая линия), построенный по данным модели *RuReM* (синяя линия) и спутниковым данным (красная линия).

чаться от соответствующих значений *SST* и *RuReM*, на величины *RMS* и коэффициентов корреляции этот факт влияния не оказывает.

Оценки качества модельных расчетов аномалий уровня моря приведены в табл.2. Средние моделируемые величины *RuReM* (*Mid*) отличаются не более чем на 0,03 м от данных *SSH*. Среднеквадратичные отклонения (*RMS*) – не более чем на 0,02 м для ГМС и на 0,04 м для *SSH*. Коэффициенты корреляции (*R*) между модельными и наблюдаемыми данными – не менее 71 % для ГМС и 61 % (Сочи, остальные пункты – не менее 74 %) – для *SSH* при доверительном интервале 2 %. Кроме того, достаточно высокие коэффициенты корреляции оказываются между данными наблюдений на ГМС и *SSH* – 65 % опять же для Сочи и не менее 78 % для остальных пунктов.

Столь в целом неплохое соответствие модельных и, что даже важнее, наблюдаемых на ГМС данных полям *SST* свидетельствует о безусловной возможности использовать спутниковую альтиметрию для корректировки моделируемых полей в задачах оперативной океанографии. При этом остается открытым вопрос о технологии корректировки полей солёности на основе данных *SST*, в особенности в мелководных зонах моря.

**Заключение.** На основании сравнения данных численного моделирования, контактных (ГМС) и спутниковых измерений температуры поверхности моря и аномалий уровня можно сделать следующие выводы.

Т а б л и ц а 2 . Оценки точности расчетов аномалий уровня моря.

точка наблюдений	<i>Mid</i> , м		<i>RMS</i> , м			<i>R</i> , %		
	<i>SSH</i>	<i>RuReM</i>	ГМС	<i>SSH</i>	<i>RuReM</i>	<i>SSH-RuReM</i>	ГМС- <i>RuReM</i>	<i>SSH-ГМС</i>
Новороссийск	0,13	0,10	0,10	0,06	0,08	78	73	81
Геленджик	0,13	0,10	0,10	0,06	0,08	75	73	79
Туапсе	0,09	0,12	0,10	0,07	0,08	76	71	78
Сочи	0,12	0,14	0,10	0,07	0,08	61	71	65
Аквалог	0,12	0,10		0,07	0,08	74		

1. Модельные расчеты температуры поверхности моря имеют весьма высокую схожесть и коррелированность с данными наблюдений ГМС (более 93 %) и SST (более 96 %). Столь высокое соответствие обусловлено усвоением спутниковых данных в общебассейновой модели Черного моря (МГИ), данные из которой являются начальными и граничными условиями для региональной модели северо-восточной части моря (*RuReM*).

2. Коэффициенты корреляции данных альтиметрии (SSH), ГМС и моделирования превышают 70 % (за исключением п.Сочи). Этот результат говорит в пользу использования данных SSH и моделирования для слежения и прогноза уровня в прибрежных областях северо-восточной области Черного моря, а также использования данных SSH в алгоритмах их усвоения в численных моделях. При этом необходима модификация используемых алгоритмов усвоения данных SSH в задачах оперативной океанографии Черного моря для корректировки моделируемых полей солёности в его мелководных областях.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.В., Грузинов В.М., Зацепин А.Г., Воронцов А.А., Кубряков А.И., Шаповал К.О. Оперативная океанография северо-восточной части Черного моря: оценки точности моделирования в сравнении с данными натурных измерений // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. (Продолжение серии периодического журнала «Труды Гидрометцентра России»).– 2018.– 1.– С.79-96.
2. Кортаев Г.К., Демышев 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.– вып.27, т.1.– С.128-133.
3. Кортаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 382 с.
4. Демышев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2012.– т.48, №. 1.– С.137-149.
5. Грузинов В.М., Борисов Е.В., Григорьев А.В. Прикладная океанография.– Обнинск: Артифекс, 2012.– 384 с.
6. 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.
7. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model // Coastal Estuarine Sci.– 1987.– 5.– P.1-16.
8. 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.– v.17, iss.1.
9. Ratner Yu.B., Ivanchik M.V., Ivanchik A.M., Kholod A.L. Quality control of the atmospheric forcing data in the operational system of the Black Sea Marine Forecasting Center // Physical Oceanography.– 2016.– № 5.– С.24-35.

10. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 2004.– № 1.– С.52-68.
11. *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. Proc. 5th International Conference on EuroGOOS.– 2010.– P.293-296.
12. *Pascual A., Faugère Y., Larnicol G., Le Traon P.Y.* Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters // Geophysical Research Letters.– 2006.– 33, L02611.
13. *Fu L.-L., Cazenave A.* Satellite altimetry and earth sciences. A handbook of techniques and applications.– International Geophysics series.– v.69.– London: Academic Press, 2001.– 463 p.
14. *Diansky N.A., Fomin V.V., Grigoriev A.V., Chaplygin A.V., Zatsepin A.G.* Spatial-temporal variability of inertial currents in the eastern part of the Black Sea in a storm period // Physical Oceanography.– 2019.– v.26, iss.2.– P.135-146.
15. *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 дрейфтерным данным // Океанология.– 2004.– т.44, № 1.– С.34-48.
16. *РД 52.27.759-2011.* Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов.– М.: Триада, ЛТД, 2011.– 201 с.

Материал поступил в редакцию 06.11.2019 г.

A.V.Grigoriev, A.A.Kubryakov, A.I.Kubryakov, K.O.Shapoval

OPERATIONAL OCEANOGRAPHY OF THE NORTH-EASTERN BLACK SEA:  
EVALUATION OF MODEL ACCURACY COMPARED TO SATELLITE  
OBSERVATIONS DATA

The data of numerical simulation of thermohaline structure and water dynamics in the north-eastern Black Sea is compared with data of satellite and contact observations at marine meteorological stations of the Caucasus Coast. It was shown that the modeling sea surface temperature have very high similarity and correlation with the observational data (more than 93 %) due to the assimilation of satellite data in the Black Sea model, the data from which are the initial and boundary conditions for the regional model. The correlation coefficients of satellite altimetry data, meteorological stations and modelling exceed 70 %. This result shows that the altimetry and modeling data to track and forecast the level should use, also these data may be used in their assimilation algorithms in numerical models. Moreover, it is necessary to modify the altimetry data assimilation algorithms used in operational oceanography to adjust the simulated salinity in shallow sea.

KEYWORDS: operational oceanography, numerical simulation, sea surface temperature, level anomaly, data assimilation, the Black Sea