

Научная статья
УДК 551.465
EDN TPMTAZ

Оценка применимости атмосферных форсингов *SKIRON* и *ERA5* для реконструкции циркуляции Черного моря на основе результатов моделирования гидрофизических полей

О. А. Дымова *, Н. А. Миклашевская

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: olgdyмова@rambler.ru

Аннотация

Проведено моделирование циркуляции Черного моря в 2016 г. с разными наборами данных об атмосферном воздействии с целью определения оптимального атмосферного форсинга для проведения ретроспективного анализа гидрофизических полей. Для расчетов использована вихреразрешающая z -модель Морского гидрофизического института с разрешением 1.6 км. По результатам двух экспериментов выявлены различия в структуре циркуляции. Показано, что вследствие заниженного потока коротковолновой радиации и слабого ветрового воздействия по данным *SKIRON*, по сравнению с *ERA5*, циклоническая циркуляция Черного моря ослабевает, изопикнические поверхности выравниваются, а холодный промежуточный слой не определяется по изотерме 8 °С. Выполнено сопоставление модельных термохалинных характеристик, рассчитанных при использовании атмосферных форсингов *ERA5* и *SKIRON*, с данными натурных наблюдений за температурой и соленостью, полученными буями-профилометрами *ARGO* и судовым оборудованием в 87, 89, 91-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий». По результатам валидации получено, что в верхнем 300-метровом слое средние по всем станциям измерений среднеквадратические отклонения температуры и солености в эксперименте *ERA5* меньше на 28 и 17 % соответственно, чем среднеквадратические отклонения, рассчитанные по данным эксперимента *SKIRON*.

Ключевые слова: Черное море, моделирование, температура, соленость, скорость течений, натурные наблюдения, форсинг, *ERA5*, *SKIRON*

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2024-0001.

Для цитирования: Дымова О. А., Миклашевская Н. А. Оценка применимости атмосферных форсингов *SKIRON* и *ERA5* для реконструкции циркуляции Черного моря на основе результатов моделирования гидрофизических полей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 6–25. EDN TPMTAZ.

© Дымова О. А., Миклашевская Н. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Assessment of SKIRON and ERA5 Atmospheric Forcing for the Reconstruction of the Black Sea Circulation Based on Hydrophysical Modeling Results

O. A. Dymova *, N. A. Miklashevskaya

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: olgadymova@mhi-ras.ru

Abstract

A modeling of the Black Sea circulation for 2016 was carried out with different sets of atmospheric forcing data to determine the optimal atmospheric forcing for retrospective analysis of hydrophysical fields. An eddy-resolving z-model of Marine Hydrophysical Institute with a resolution of 1.6 km was used for the calculations. Differences in the circulation structure for the two experiments were revealed. It was shown that in the SKIRON experiment compared to ERA5, the cyclonic circulation of the Black Sea was weakened, the isopycnic surfaces were aligned, and the cold intermediate layer was not determined by the 8°C isotherm due to the underestimation of the solar radiation flux and weakening of the wind influence. A comparison of the model thermohaline characteristics calculated using ERA5 and SKIRON atmospheric forcings and measurement data of temperature and salinity obtained by ARGO profiling floats and onboard equipment in 87, 89, 91 cruises of R/V *Professor Vodyanitsky* was carried out. According to the validation results, it was obtained that in the upper 300-meter layer, for all measurement stations the mean RMSE of temperature and salinity in the ERA5 experiment were 28 and 17% lower, respectively, than the RMSE calculated from the SKIRON data.

Keywords: Black Sea, modeling, temperature, salinity, current velocity, *in situ* data, forcing, ERA5, SKIRON

Acknowledgment: The work was supported by the state assignment of MHI RAS on topic no. FNNN-2024-0001 (“Oceanological processes” code).

For citation: Dymova, O.A. and Miklashevskaya, N.A., 2025. Assessment of SKIRON and ERA5 Atmospheric Forcing for the Reconstruction of the Black Sea Circulation Based on Hydrophysical Modeling Results. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–25.

Введение

Черное море является полузамкнутым бассейном, соединенным с Мировым океаном узким мелководным проливом с двухслойным течением. По типу вертикальной структуры течений в проливе Босфор Черное море относится к бассейнам эстуарного типа с оттоком более пресной воды в верхнем слое и притоком более соленой в нижнем. Вследствие того, что водообмен с Мировым океаном в таких морях ограничен, структура их циркуляции существенно зависит от атмосферных условий.

На основе сравнительного численного анализа бюджета энергии таких полузамкнутых морей, как Средиземное, Красное, Черное и Балтийское, в работе [1] показано, что на циркуляцию в бассейне значительное влияние, помимо работы силы ветра, оказывают потоки плавучести через проливы. Качественные аспекты изменчивости течений в бассейнах авторы связывают

с различиями между относительными вкладами работ силы ветра и силы плавучести в энергетический бюджет. На основе численного моделирования динамики вод Каспийского моря в работе [2] показано, что повышение уровня в 1980–1990-х гг. обусловлено изменениями объема речного стока и атмосферных условий над бассейном. Корректное воспроизведение водного баланса, определяемого атмосферным форсингом, помогло воспроизвести резкое повышение уровня (до 2.5 м) в Каспийском море. В работе [3] представлены результаты моделирования экстремальных нагонов в Азовском море. Показано, что при использовании атмосферных данных с высоким разрешением *WRF* (разрешение 10 км) точность воспроизведения штормовых нагонов выше, чем в данных, рассчитанных с применением форсинга *ERA-Interim* (разрешение 0.75°). В работе [4] на основе результатов численных экспериментов исследовано влияние на циркуляцию в Черном море таких компонентов атмосферного воздействия, как ветровой и термохалинный форсинг, и показано, что среднегодовая циклоническая завихренность поля ветра и сезонная изменчивость потока тепла из атмосферы поддерживают крупномасштабную циклоническую циркуляцию в бассейне. В работе [5] показано, что изменение интенсивности ветрового воздействия над Черным морем приводит к существенным различиям в структуре поля скорости течений: если над морем преобладает циклоническая завихренность поля ветра, то в поле скорости доминирует крупномасштабная циркуляция; если ветровое воздействие ослаблено, то формируется вихревой режим циркуляции с преобладанием мезомасштабных структур.

Приведенные работы [1–5] демонстрируют значимость атмосферного воздействия при численном анализе динамики замкнутых и полужамкнутых морей. Поэтому для ретроспективного анализа циркуляции таких морей необходимо тщательно контролировать выбор данных о внешнем воздействии, особенно о ветровом напряжении. Несмотря на большое количество высококачественных реанализов Черного моря (см., например, работы [6, 7] и набор данных¹⁾), мы планируем, помимо термохалинных и гидродинамических массивов, рассчитать также энергетические характеристики циркуляции, не предоставляемые известными нам реанализами, для исследования механизмов наблюдаемых трендов изменчивости гидрофизических полей.

Цель настоящей работы – валидировать результаты моделирования циркуляции Черного моря, полученные при использовании различных наборов атмосферных данных, и выбрать атмосферный форсинг для проведения ретроспективного анализа гидрофизических полей Черного моря.

Численная модель

Для реконструкции циркуляции Черного моря использовали вихреразрешающую *z*-модель Морского гидрофизического института (модель МГИ) [8]. Модель основана на полной системе уравнений термогидродинамики океана в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды.

¹⁾ Black Sea physical reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) : [Data set] / L. Lima [et al.] // Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). 2020. https://doi.org/10.25423/CMCC/BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_00

Уравнение состояния представлено нелинейной зависимостью плотности от температуры и солёности. Уровень моря рассчитывается из уравнения, полученного при выполнении линеаризованного кинематического условия на свободной поверхности, вертикальная скорость – из уравнения неразрывности. На твердых боковых границах для компонентов вектора скорости ставятся условия равенства нулю нормальной скорости и производной по нормали касательной скорости, для температуры и солёности задано равенство нулю производных по нормали. На дне ставится условие прилипания и условие отсутствия нормальных потоков тепла и соли. В модели учитываются сток рек и водообмен через проливы, на жидких участках границы ставятся условия Дирихле. На свободной поверхности в качестве граничных условий задается напряжение трения ветра, потоки тепла из атмосферы, осадки и испарение. Кроме того, при наличии доступных данных на свободной поверхности усваивается температура поверхности моря. Вертикальное турбулентное перемешивание описано с помощью модели замыкания Меллора – Ямады [9], горизонтальная вязкость и диффузия – оператором Лапласа с постоянными коэффициентами. В начальный момент времени задаются уровень моря, его температура и солёность, горизонтальные компоненты вектора скорости. Уравнения модели, граничные условия и используемые коэффициенты подробно описаны в работе [8].

Модель МГИ реализована на сетке C [10] с разрешением 1.6 км по горизонтальным координатам. Такое разрешение является достаточным для воспроизведения мезомасштабных особенностей циркуляции и в мористой части, и прибрежной зоне Черного моря [11], так как оно меньше баротропного радиуса деформации Россби, в среднем составляющего 15–17 км, и бароклинного радиуса, который в прибрежной зоне достигает 5 км. Согласно [12] термин «мезомасштабные» в работе будет употребляться для обозначения вихревых структур с размерами 30–150 км. По вертикали заданы 27 z -горизонтов с шагом от 2.5 м вблизи поверхности до 200 м в глубинных слоях. Батиметрия бассейна построена по данным *EMODnet*²⁾ с разрешением (1/8)′.

Численные эксперименты и атмосферный форсинг

Проведено два численных эксперимента для 2016 г. с одинаковыми настройками модели, но с разным атмосферным воздействием. Начальные поля для экспериментов одинаковы и построены по данным реанализа *CMEMS* для Черного моря¹⁾. Для задания температуры на поверхности моря взяты данные системы *Copernicus*³⁾. Температура, солёность и расходы воды в реках и проливах соответствуют среднемесячным климатическим значениям из атласа [13]. В первом эксперименте (далее – эксперимент *ERA5*) используются часовые данные реанализа *ERA5*⁴⁾, предоставляемые Европейским центром

²⁾ European Marine Observation and Data Network (EMODnet). URL: <https://www.emodnet-bathymetry.eu> (дата обращения: 3.03.2025).

³⁾ Black Sea - High Resolution and Ultra High Resolution L3S Sea Surface Temperature : Product ID SST_BS_SST_L3S_NRT_OBSERVATIONS_010_013E.U / CMEMS ; Copernicus Marine Data Store. <https://doi.org/10.48670/moi-00158>

⁴⁾ ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present : [Data set] / H. Hersbach [et al.] / Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

среднесрочных прогнозов погоды для глобального климата, с разрешением 0.25° . Во втором эксперименте (далее – эксперимент *SKIRON*) атмосферное воздействие включает двухчасовые данные, полученные системой моделирования *SKIRON/Dust* (Греция) с пространственным разрешением 0.1° [14].

Сравнительный анализ данных *SKIRON* и *ERA5* показал существенную разницу в ветровом форсинге над Черноморским регионом. Касательные напряжения трения ветра рассчитаны по аэродинамической формуле аналогично [15] по данным о скорости ветра на высоте 10 м. Как видно из рис. 1, для обоих форсингов сильные ветры над Черным морем чаще всего (около 10 %) имеют направление между северным и северо-восточным румбами, что согласуется с климатическими оценками [15]. Такая структура полей ветра способствует формированию циклонической циркуляции вод⁵⁾ в верхнем деятельном слое [16]. Однако максимальные значения напряжения трения ветра различаются почти в 1.4 раза и достигают $5 \cdot 10^{-5}$ Н/см², по данным *ERA5*, и $3.5 \cdot 10^{-5}$ Н/см², по данным *SKIRON*, что соответствует скоростям ветра около 23 и 18 м/с соответственно. Сопоставление с доступными наблюдениями показывает, что скорость ветра по данным *ERA5* более близка к реальности. В подтверждение вышесказанного на рис. 2 представлены поля ветра 3 декабря 2016 г., построенные по данным форсингов *ERA5*, *SKIRON* и полученные в отделе дистанционных методов исследований ФГБУН ФИЦ МГИ по спутниковым данным (URL: http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml). Видно, что участки большой скорости ветра в *ERA5* (рис. 2, *b*) более репрезентативны.

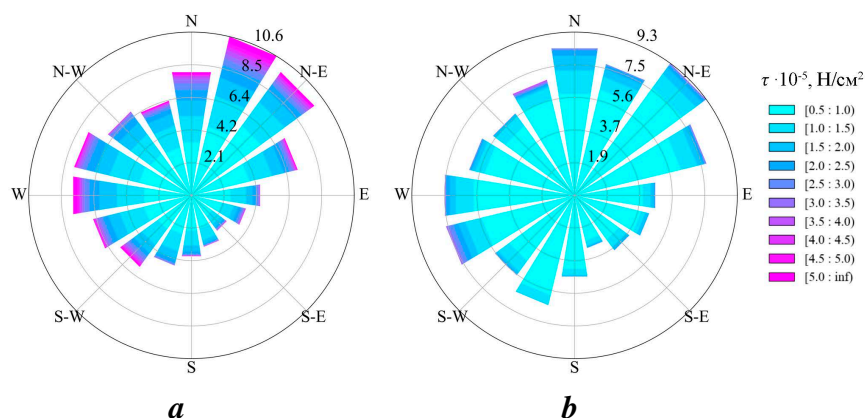


Рис. 1. Гистограммы повторяемости, %, основных направлений и значений напряжения трения ветра τ для Черного моря в 2016 г., по данным: *a* – *ERA5*, *b* – *SKIRON*. Данные рассчитаны по скорости ветра на высоте 10 м

Fig. 1. Histograms of repeatability, %, of the wind directions and the wind stress values τ for the Black Sea in 2016: *a* – *ERA5*, *b* – *SKIRON*. The data are calculated from wind speed at a height of 10 m

⁵⁾ Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / Блатов А. С. [и др.]. Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. 240 с.

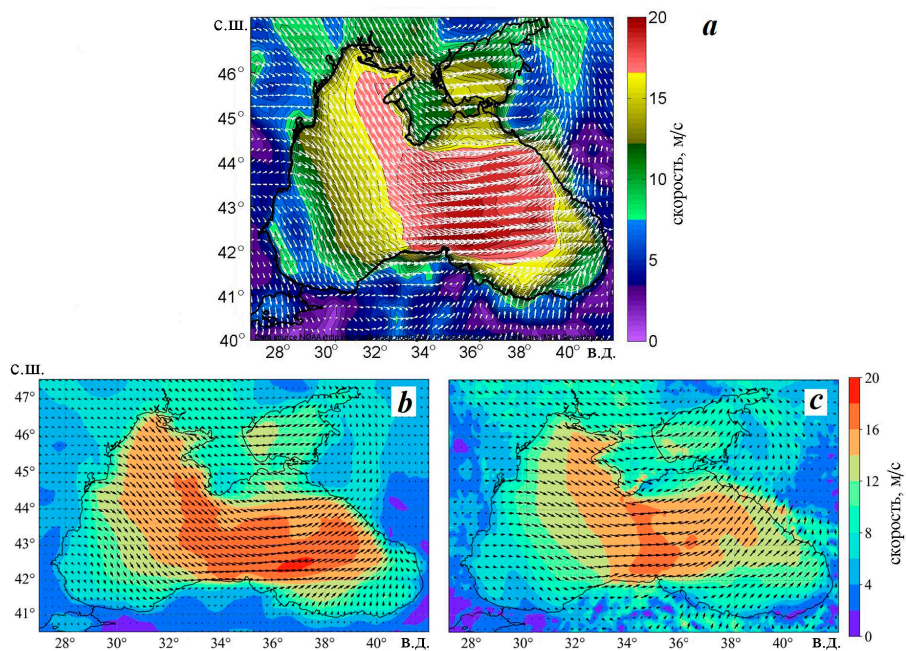


Рис. 2. Примеры отображения поля скорости ветра за 3 декабря 2016 г.: *a* – по спутниковым данным (URL: http://dvs.net.ru/mp/data/vel/jpg/wind/wind_nomads_2016120306.jpg); *b* – по данным ERA5; *c* – по данным SKIRON

Fig. 2. Examples of presentation of the wind fields on 3 December 2016: *a* – from satellite data (http://dvs.net.ru/mp/data/vel/jpg/wind/wind_nomads_2016120306.jpg), *b* – from ERA5 data, *c* – from SKIRON data

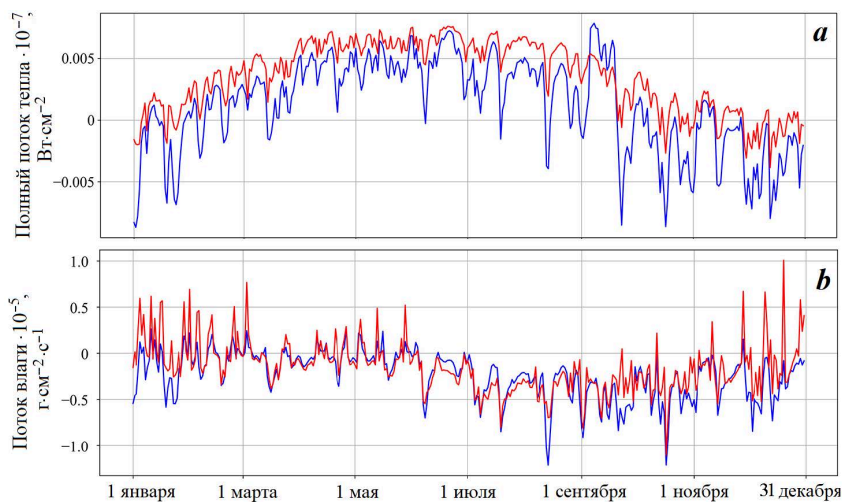


Рис. 3. Суммарные потоки тепла (*a*) и влаги (*b*) в 2016 г. по данным ERA5 (красные линии) и SKIRON (синие линии)

Fig. 3. Total fluxes of heat (*a*) and moisture (*b*) in 2016 according to ERA5 (red lines) and SKIRON (blue lines)

Временная изменчивость остальных потоков по данным форсингов *ERA5* и *SKIRON* качественно сходна. Для средних по поверхности значений полный поток тепла (явное, скрытое тепло, длинноволновая и солнечная радиация) в течение года на 15–20 % выше по данным *ERA5* (рис. 3, *a*). Для потока влаги (осадки минус испарение) в *ERA5* зимой и осенью наблюдается увеличение количества осадков (рис. 3, *b*).

Результаты моделирования и валидации

В результате численных экспериментов за весь исследуемый период получены среднесуточные данные о полях температуры, солености и скорости течений, а также об уровне моря. Для валидации результатов рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) модельных температуры и солености от данных натуральных наблюдений, выполненных буями-профилометрами *ARGO*⁶⁾ и судовым оборудованием в 87, 89 и 91-м рейсах НИС «Профессор Водяницкий» [17] в 2016 г., предоставленных Банком океанологических данных МГИ [18] (рис. 4, табл. 1). Массив данных содержал более 200 тыс. измерений, полученных как в прибрежной зоне, так и в глубоководной части моря. Как видно из рис. 4 и табл. 1, побережье Крыма, Турции и центральная глубоководная часть моря хорошо обеспечены данными наблюдений в холодный и теплый сезоны, для побережья Северного Кавказа имеются сведения от двух буйев *ARGO* за период осень – зима 2016 г. Отсутствуют данные для северо-западного шельфа и области Батумского антициклона.

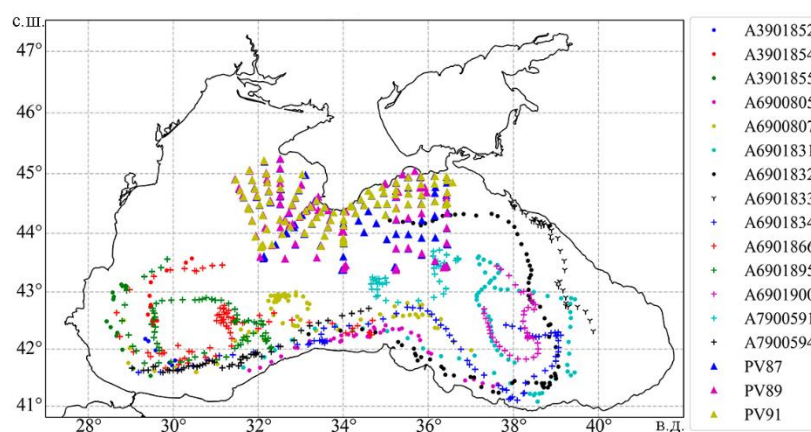


Рис. 4. Карта станций измерений профилей температуры и солености буями *ARGO* и в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» в 2016 г.

Fig. 4. Map of location the temperature and salinity measurement stations conducted by *ARGO* floats and R/V *Professor Vodyanitsky* in 2016

⁶⁾ URL: <https://www.coriolis.eu.org/Data-Products/Data-selection> (дата обращения: 3.03.2025).

Т а б л и ц а 1. Сведения об измерениях температуры и солености в 2016 г.

T a b l e 1. Information about temperature and salinity measurements in 2016

Идентификатор буя А / рейса PV / Identifier of float A / cruise PV	Даты станций / Date of stations	Количество станций / Number of stations	Число измерений / Number of measure- ments	Максимальная глубина профиля, м / Maximum profile depth, m
A3901852	6–28 декабря / 6–28 December	6	624	1507
A3901854	2 ноября – 29 декабря / 2 November – 29 December	13	1507	1509
A3901855	22 октября – 28 декабря / 22 October – 28 December	15	1461	1356
A6900805	2 января – 12 ноября / 2 January – 12 November	39	2354	1500
A6900807	2 января – 31 декабря / 2 January – 31 December	137	189737	991
A6901831	5 января – 30 декабря / 5 January – 30 December	74	7126	1513
A6901832	2 января – 27 декабря / 2 January – 27 December	73	6579	1520
A6901833	2 июня – 29 декабря / 2 June – 29 December	42	3614	1517
A6901834	5 января – 30 декабря / 5 January – 30 December	74	6746	1505
A6901866	2 января – 28 декабря / 2 January – 28 December	74	96639	987
A6901895	2 января – 27 декабря / 2 January – 27 December	73	8321	723
A6901900	4 января – 22 июля / 4 January – 22 July	41	10777	978
A7900591	11 января – 27 декабря / 11 January – 27 December	38	36836	1012
A7900594	3 января – 25 августа / 3 January – 25 August	48	18307	1974
PV87	30 июня – 18 июля / 30 June – 18 July	124	108681	2180
PV89	30 сентября – 9 октября / 30 September – 9 October	104	60741	2185
PV91	16 ноября – 3 декабря / 16 November – 3 December	107	48945	2068

Для данных, полученных от каждого буя, в каждом рейсе и по каждой модели, в точках, ближайших к станциям измерений на соответствующую дату, было проведено вертикальное осреднение профилей в шести слоях, для которых характерны особые термохалинные условия⁵⁾: верхнем слое (0–5 м), слое сезонного термоклина (5–30 м), холодном промежуточном слое (30–100 м), слое постоянного галоклина (100–300 м), двух глубоководных слоях (300–800 м и 800–1500 м). Затем вдоль треков рассчитаны ряды отклонений температуры и солености от данных измерений и вычислены СКО. Анализ таблиц СКО для всех треков (в работе не представлены) показал, что тенденция изменения СКО в указанных слоях сохраняется для всех данных. Наибольшие отклонения от данных наблюдений получены для полей температуры в летний сезон в термоклине, для полей солености – в галоклине. Ниже глубины 300 м значения СКО малы и близки в двух экспериментах, разница между ними не превышает 0.025 °С и 0.036 ‰ для температуры и солености соответственно. Далее в табл. 2 приведены осредненные по всем трекам СКО температуры и солености для обоих экспериментов в верхнем 300-метровом слое.

Как видно из табл. 2, во всем слое в эксперименте *ERA5* значения ошибок воспроизведения температуры меньше, чем в эксперименте *SKIRON*. Наибольшие СКО температуры в обоих экспериментах выявлены в слое 5–30 м, при этом значения СКО в эксперименте *ERA5* меньше на 28 %, чем в *SKIRON*. Для солености разница между значениями СКО в слое 0–30 м мала и составляет около 0.03 ‰, а в слое галоклина СКО солености в эксперименте *ERA5* примерно на 17 % меньше, чем в эксперименте *SKIRON*.

Таким образом, термохалинные характеристики в слоях постоянного галоклина и сезонного термоклина в эксперименте *ERA5* ближе к данным измерений, чем в эксперименте *SKIRON*. Формирование сезонного термоклина обусловлено прежде всего прогревом верхнего слоя вод, следовательно, увеличенный поток тепла по данным *ERA5* (см. рис. 3, *a*) дает более реалистичные поля температуры. Уменьшение ошибки в слое галоклина в эксперименте *ERA5* может быть связано как с увеличением потока осадков в осенне-зимний период (см. рис. 3, *b*), так и с изменением структуры поля течений. Последнее утверждение будет проверено ниже при сравнительном анализе полей скорости течений и солености в двух экспериментах.

Таблица 2. СКО температуры и солености по результатам экспериментов *ERA5* и *SKIRON*

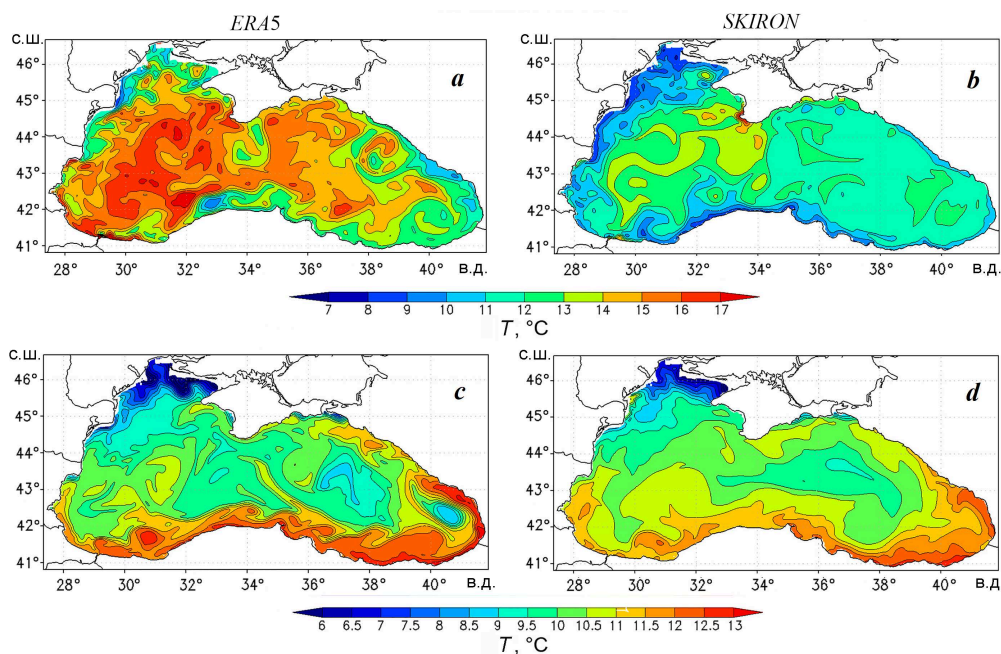
Table 2. RMSE of temperature and salinity by the results of the *ERA5* and *SKIRON* experiments

Слой, м / Layer, m	СКО температуры, °С / Temperature RMSE, °С		СКО солености, ‰ / Salinity RMSE, ‰	
	<i>SKIRON</i>	<i>ERA5</i>	<i>SKIRON</i>	<i>ERA5</i>
0–5	1.175	0.625	0.224	0.258
5–30	2.390	1.706	0.188	0.212
30–100	0.623	0.489	0.454	0.384
100–300	0.199	0.154	0.423	0.312

Для анализа различий между результатами экспериментов сопоставлены пространственные распределения полей течений, температуры и солености на различных горизонтах в течение года. Получено, что при расчетах с использованием данных *SKIRON* поля всех рассматриваемых термогидродинамических характеристик в верхнем 20-метровом слое более гладкие, чем при расчетах с использованием форсинга *ERA5*.

Рассмотрим детально особенности модельных полей температуры. С января по конец апреля в эксперименте *ERA5* температура воды в поверхностном слое в районе северо-западного шельфа была ниже на 3–4 °С, чем во втором эксперименте. В целом по бассейну эта разница составляла 1–2 °С на горизонте 5 м, 0.5–1 °С на горизонте 20 м. С третьей декады апреля на обоих горизонтах вода стала прогреваться быстрее в первом эксперименте, чем во втором. Согласно литературным данным⁵⁾, в результате весенне-летнего прогрева в Черном море формируется слой термоклина с глубиной залегания летнего максимума вертикального градиента на 15–20 м [19]. Как показала валидация (табл. 2), максимальные СКО температуры выявлены в слое 5–30 м по результатам обоих экспериментов.

На рис. 5 представлены распределения температуры на горизонте 20 м на 15 июня и 15 декабря, рассчитанные в двух экспериментах. Видно, что в июне разница между значениями температуры по данным *ERA5* и *SKIRON* для западной части бассейна в среднем составила 3–4 °С, для восточной –



Р и с . 5 . Поля температуры на горизонте 20 м 15 июня 2016 г. (*a, b*) и 15 декабря 2016 г. (*c, d*), полученные с использованием атмосферных форсингов *ERA5* (*a, c*) и *SKIRON* (*b, d*)

Fig. 5. Temperature fields at the 20 m horizon on 15 June 2016 (*a, b*) and 15 December 2016 (*c, d*) obtained by using atmospheric forcings *ERA5* (*a, c*) and *SKIRON* (*b, d*)

до 3 °С (рис. 5, *a, b*). При этом для каждого эксперимента наибольшая разница температур между западной и восточной частями бассейна наблюдалась в зонах вихревой активности и составляла 3–5 °С.

В эксперименте *ERA5* к сентябрю восточная часть прогревается почти до тех же значений температуры, что и западная (20–24 °С). Для эксперимента *SKIRON* к середине сентября разница температур на горизонте 20 м между западной и восточной частями бассейна составила около 10 °С (22.5–24 °С в западной, 12.5–15.5 °С в восточной). С конца октября поля температуры в двух экспериментах по всему горизонту различались незначительно (на 0.5–1 °С), кроме юго-восточного района моря, где по данным эксперимента *ERA5* температура была ниже на 3–4 °С вследствие воздействия циклонического мезомасштабного вихря (рис. 5, *c*).

Для летнего периода были проанализированы потоки тепла из атмосферы, а также проведено сравнение восстановленной температуры с данными 87-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (30 июня – 18 июля 2016 г.). Обнаружено, что разница в интенсивности прогрева верхнего слоя вод в двух расчетах (рис. 5, *a, b*) связана с различиями в величине потока коротковолновой радиации. Так, средний за июнь 2016 г. поток коротковолновой радиации на поверхности моря составил 249.51 и 187.43 Вт/м² по данным *ERA5* и *SKIRON* соответственно. Пространственное распределение потока (рис. 6) также соответствует неравномерности распределения температуры в западной и восточной частях моря: для обоих форсингов поток коротковолновой радиации в западной части выше, чем в восточной.

Оценки отклонений от данных прямых измерений позволяют определить, какой из двух экспериментов дает результаты, более близкие к реально наблюдаемой температуре. На рис. 7 показана разница между измеренной и рассчитанной температурой на горизонте 15 м в точках выполнения станций 87-го летнего рейса НИС «Профессор Водяницкий» (см. рис. 4). Видно, что в эксперименте *ERA5* отклонения температуры ниже, чем в эксперименте *SKIRON*: средняя по всем станциям разница почти в два раза меньше по абсолютному значению (рис. 7), а СКО в слое 5–30 м составило по данным *ERA5* 2.83 °С против 3.65 °С по данным *SKIRON*.

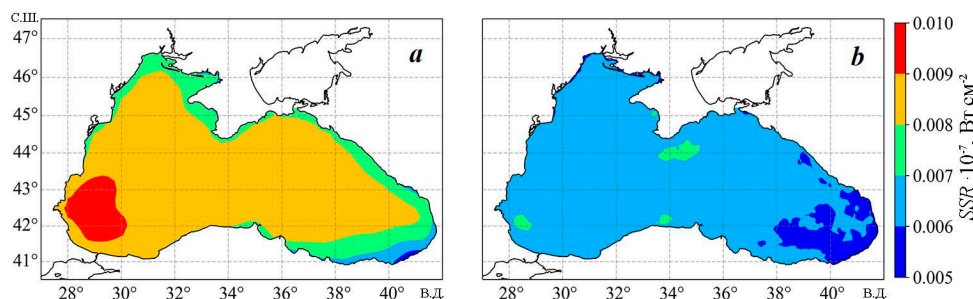


Рис. 6. Средние за июнь 2016 г. поля потока коротковолновой радиации *SSR* по данным *ERA5* (*a*) и *SKIRON* (*b*)

Fig. 6. Monthly-mean solar radiation fields for June 2016 according to *ERA5* (*a*) and *SKIRON* (*b*) data

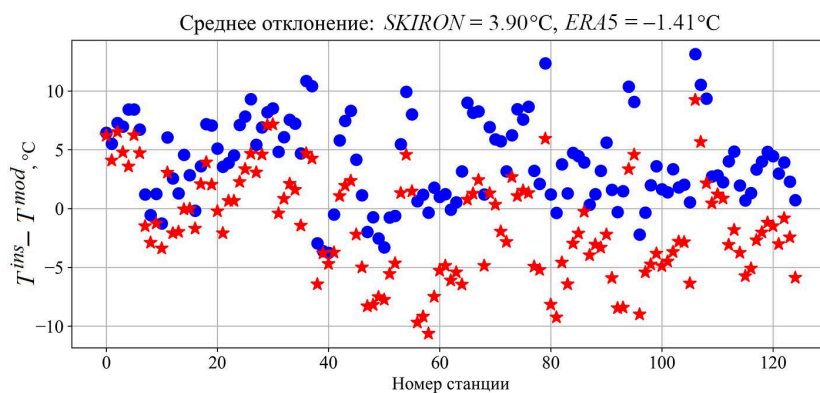


Рис. 7. Разница температуры на горизонте 15 м между данными измерений в 87-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» и результатами численных экспериментов *ERA5* (звездочки) и *SKIRON* (кружки)

Fig. 7. Temperature deviation between the measurement data of 87th cruise of R/V *Professor Vodyanitsky* and the results of numerical experiments *ERA5* (stars) and *SKIRON* (circles) at the 15 m horizon

Известно, что основной вклад в тепловой баланс над Черным морем дает коротковолновая радиация (с максимумом в июне) [19]. Следует ожидать, что различия в величине полного потока тепла в весенне-летний сезон по данным *ERA5*, наблюдаемые на рис. 3, *a*, также будут определяться именно этой составляющей баланса. Рис. 6 подтверждает, что коротковолновая радиация по *ERA5* выше. Поскольку постановка численных экспериментов одинаковая, а различались только атмосферные потоки на свободной поверхности, то можно утверждать, что заниженные потоки коротковолновой радиации в форсинге *SKIRON* по сравнению с форсингом *ERA5* приводят к существенной недооценке температуры в верхнем слое моря.

Анализ распределения температуры на зональном разрезе вдоль 43.5° с. ш. показал, что поля температуры в осенне-зимний период более однородны в эксперименте *SKIRON*, чем в эксперименте *ERA5*. Кроме того, при расчетах с использованием данных *SKIRON* температура воды в верхнем перемешанном слое в первой половине года примерно на 0.5–1.0 °C выше, чем с использованием данных *ERA5*. Весенний прогрев воды в эксперименте *SKIRON* начинается раньше, чем в эксперименте *ERA5*, однако с конца апреля в эксперименте *ERA5* процесс интенсифицируется и вода начинает нагреваться быстрее, чем в эксперименте *SKIRON*. Как видно из рис. 8, *a*, в эксперименте *ERA5* четко прослеживается формирование холодного промежуточного слоя, определяемого изотермой 8 °C, тогда как в эксперименте *SKIRON* по изотерме 8 °C он почти не определяется (рис. 8, *b*). Сопоставление модельной температуры с данными буя-профилимера *ARGO* 6901831 (траектория буя летом 2016 г. проходила в окрестностях 43° с. ш. – см. рис. 4) показало, что результаты эксперимента *ERA5* ближе к данным наблюдений, так как отклонение модельной температуры от данных наблюдений в эксперименте *ERA5* на 0.3–1 °C меньше, чем в эксперименте *SKIRON* (рис. 8, *c*). Вертикальное расположение

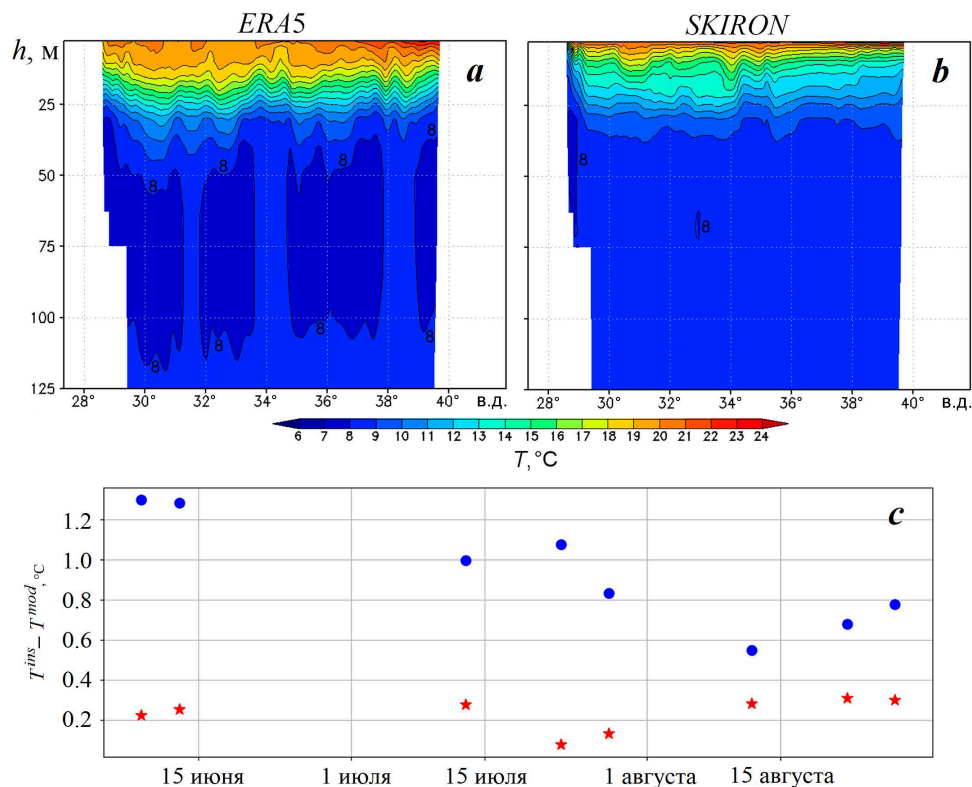


Рис. 8. Зональные разрезы полей температуры вдоль 43.5° с. ш. 15 июня 2016 г., полученные с использованием атмосферных форсингов ERA5 (a) и SKIRON (b). Разница температуры на горизонте 75 м между данными измерений буй-профилера ARGO № 6901831 и результатами численных экспериментов ERA5 (звездочки) и SKIRON (кружки) (c)

Fig. 8. Zonal sections of temperature fields along 43.5° N for 15 June 2016 obtained by using atmospheric forcing ERA5 (a) and SKIRON (b). Temperature deviation between the measurement data of ARGO profiler float no. 6901831 and the modeling results of numerical experiments ERA5 (stars) and SKIRON (circles) (c) at the 75 m horizon

изолиний температуры в слое 50–110 м на рис. 8 указывает на наличие фронтальных зон, препятствующих горизонтальному перемешиванию, что в центральной глубоководной части моря может быть обусловлено вихревой динамикой.

Поля солёности на горизонтах до 20 м, полученные по результатам двух численных экспериментов, в осенне-зимний период (январь – февраль и октябрь – декабрь) количественно и качественно похожи, различия проявляются с марта по октябрь. Так, по результатам расчетов с использованием данных ERA5 получено, что в этот период на горизонте 20 м в районах устьев рек Дуная, Днепра и Днестра наблюдаются достаточно обширные зоны вод с солёностью ниже 16 ‰, тогда как во втором эксперименте солёность выше 16.75 ‰. Кроме того, в указанный период на рассматриваемом горизонте

более соленые воды занимают большую площадь по результатам расчетов с использованием данных *SKIRON*. Анализ потока влаги на поверхности моря (осадки минус испарение) показал, что в весенне-летний сезон данные форсингов близки (рис. 3, *b*), а потоки тепла и массы в устьях рек и проливах в обоих экспериментах одинаковы. Следовательно, изменение стратификации вследствие нагрева приводит к перестроению поля скорости и затем поля солености в результате адвективного переноса. Поэтому мы полагаем, что различия в пространственном распределении поля солености связаны со структурой поля течений.

Ниже горизонта 30 м поля солености различаются более существенно в течение всего расчетного периода. Как видно из табл. 2, наибольшая разница между расчетами наблюдается в слое постоянного галоклина. На рис. 9 представлены поля солености на горизонте 100 м в июне и декабре 2016 г. Получено, что в эксперименте *SKIRON* соленость в зоне материкового склона выше примерно на 0.5 ‰ летом (рис. 9, *b*) и на 1 ‰ зимой (рис. 9, *d*), чем в эксперименте *ERA5*. В зонах действия мезомасштабных вихрей значения солености близки. К концу года перепад солености между глубоководной частью моря и присклоновой зоной в эксперименте *ERA5* больше (рис. 9, *e*), чем по данным эксперимента *SKIRON* (рис. 9, *f*), что косвенно указывает на интенсификацию Основного Черноморского течения (ОЧТ) и формирование куполообразной структуры поля солености с повышенными значениями в центре бассейна и пониженными на периферии.

Сопоставление модельных данных и вдольтрековых измерений солености буями *ARGO* на горизонтах в слое постоянного галоклина показало, что данные эксперимента *ERA5* точнее воспроизводят соленость. Это подтверждается анализом средних и среднеквадратических отклонений солености. В табл. 3 представлены СКО солености от данных измерений в слое 100–300 м для некоторых буев *ARGO*, работавших в глубоководной части (рис. 4). Для большинства буев СКО солености меньше при использовании форсинга *ERA5*.

На рис. 10 показана разница между измеренными и рассчитанными значениями солености на горизонте 100 м. Видно, что в мае – августе СКО солености в эксперименте *ERA5* в два – три раза меньше, чем в эксперименте *SKIRON*, а среднее за год отклонение – примерно на 20 % меньше.

Как показал анализ, различия в пространственном распределении солености мало связаны с разницей в потоке влаги из атмосферы в двух экспериментах и, по-видимому, определяются изменением структуры поля скорости. В верхнем 20-метровом слое скорости течений и вихри с января по конец апреля 2016 г. в эксперименте *SKIRON* менее интенсивны, особенно в районе Анатолийского побережья и Крыма. В январе – апреле максимальные скорости в указанных районах по данным эксперимента *ERA5* в 1.5 раза превышали значения по данным *SKIRON* (на горизонте 20 м 55–60 и 30–35 см/с соответственно) с сохраняющимися направлениями течений. Во вторую половину года в эксперименте *SKIRON* ОЧТ как единый круговорот не формируется, поэтому наблюдается значительная разница в локализации течений, особенно в районе формирования Севастопольского антициклона, а также в районе Анатолийского побережья. В июле – октябре максимальные значения скорости в районе

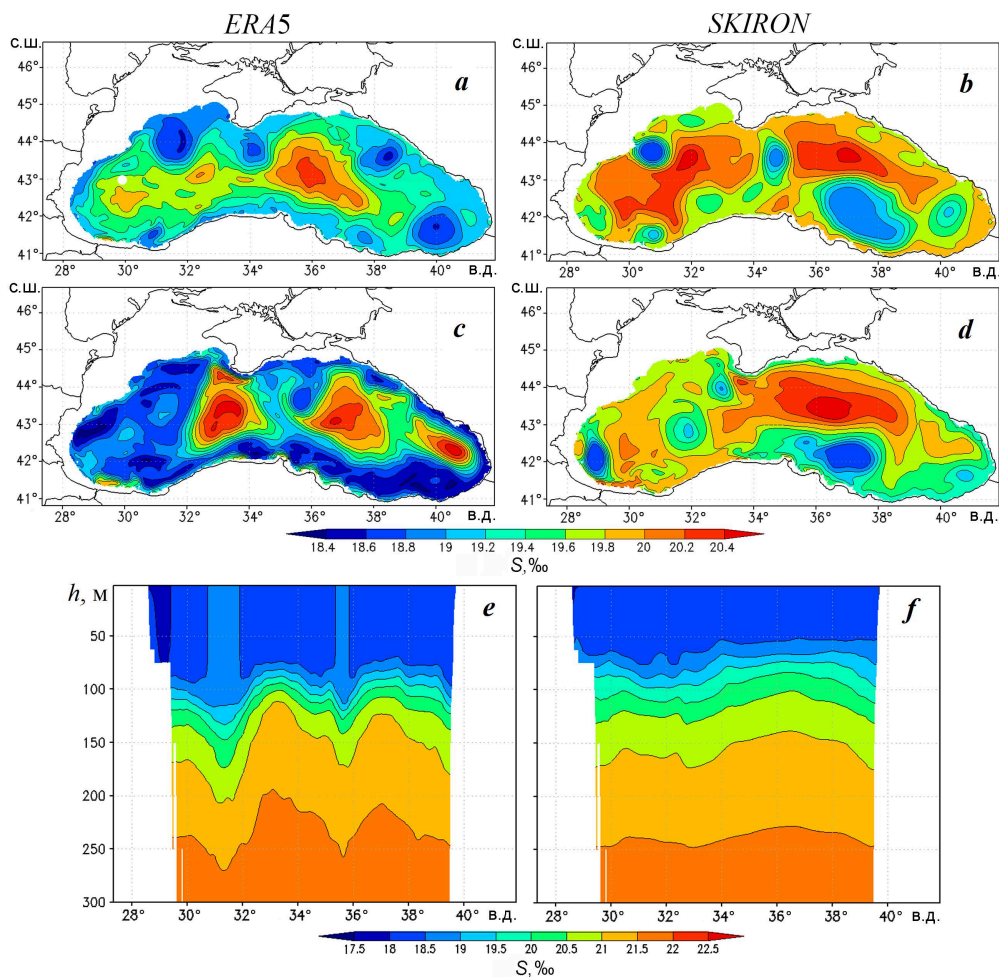


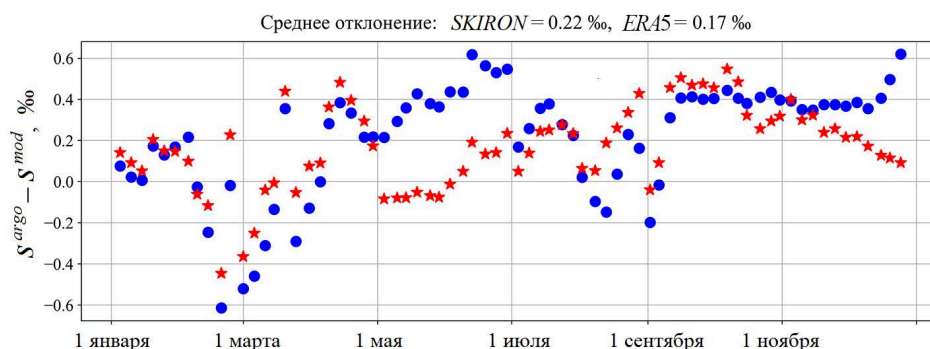
Рис. 9. Поля солёности на горизонте 100 м 15 июня 2016 г. (a, b) и 15 декабря 2016 г. (c, d), зональный разрез поля солёности вдоль 43° с. ш. на 15 декабря 2016 г. (e, f), полученные с использованием атмосферных форсингов ERA5 (a, c, e) и SKIRON (b, d, f)

Fig. 9. Salinity fields on 15 June 2016 (a, b) and 15 December 2016 (c, d) at the 100 m horizon and zonal section of the salinity field along 43°N for 15 December 2016 (e, f), obtained by using atmospheric forcings ERA5 (a, c, e) and SKIRON (b, d, f)

Таблица 3. СКО солёности, рассчитанной в экспериментах ERA5 и SKIRON, от данных буев ARGO в слое 100–300 м

Table 3. RMSE salinity, calculated in the ERA5 and SKIRON experiments, from ARGO data at a depth of 100–300 m

Форсинг / Forcing	Идентификатор буя / Float identifier					
	6900805	6900807	6901832	6901834	7900591	7900594
ERA5	0.267	0.271	0.291	0.266	0.334	0.187
SKIRON	0.241	0.487	0.368	0.45	0.511	0.25

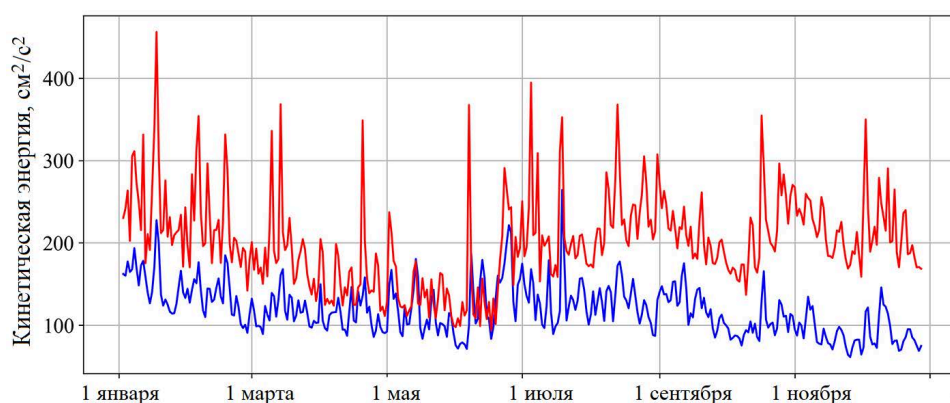


Р и с . 10. Разница солёности на горизонте 100 м между данными измерений буя-профилимера *ARGO* 6901834 и результатами численных экспериментов *ERA5* (звездочки) и *SKIRON* (кружки)

Fig. 10. The salinity deviation between the measurement data of *ARGO* profiler float 6901834 and the results of numerical experiments *ERA5* and *SKIRON* at the 100 m horizon

Севастопольского антициклона стали различаться в два – три раза (55–60 см/с для *ERA5* и 20–25 см/с для *SKIRON* на горизонте 20 м). А течение около побережья Турции, направленное на восток, в эксперименте *SKIRON* не наблюдалось.

На рис. 11 представлено изменение со временем средней кинетической энергии течений на первом z -уровне сетки модели в двух экспериментах. Так как на этом уровне в уравнения движения в качестве граничных условий входят касательные напряжения ветра, то изменение энергии течений здесь напрямую зависит от ветра. Как показано на рис. 1, по данным форсинга *ERA5*



Р и с . 11. Изменение со временем средней кинетической энергии течений на верхнем горизонте, по данным экспериментов *ERA5* (красная линия) и *SKIRON* (синяя линия)

Fig. 11. Time variability of mean current kinetic energy in the upper model horizon according to data of *ERA5* (red line) and *SKIRON* (blue line) experiments

ветер над Черным морем был более интенсивен, чем по данным *SKIRON*, что и привело к увеличению скорости поверхностных течений. Поведение кривых на рис. 11 подтверждает повышение скорости течений на верхнем горизонте в эксперименте *ERA5* и увеличение разницы между экспериментами во второй половине года.

Изменение структуры течений на верхних горизонтах отразилось и на интенсивности ОЧТ и мезомасштабных вихрей в глубинных слоях. На рис. 12 показаны модельные поля скорости течений на горизонте 100 м для июня и декабря 2016 г. Видно, что в июне орбитальные скорости на периферии мезомасштабных вихрей достигают 25–30 см/с в двух экспериментах (рис. 12, *a, b*), а интенсивность ОЧТ (скорость в стрежне и ширина течения) выше по данным эксперимента *ERA5*. В декабре в эксперименте *ERA5* Севастопольский и Батумский антициклоны со скоростями до 36 и 28 см/с соответственно четко наблюдаются в поле течений, вблизи Анатолийского побережья также прослеживается цепочка мезомасштабных антициклонов (рис. 12, *c*). Во втором эксперименте на горизонте 100 м зимой количество и интенсивность мезомасштабных антициклонов на периферии ОЧТ существенно ниже, а скорость ОЧТ составляет в среднем около 10 см/с.

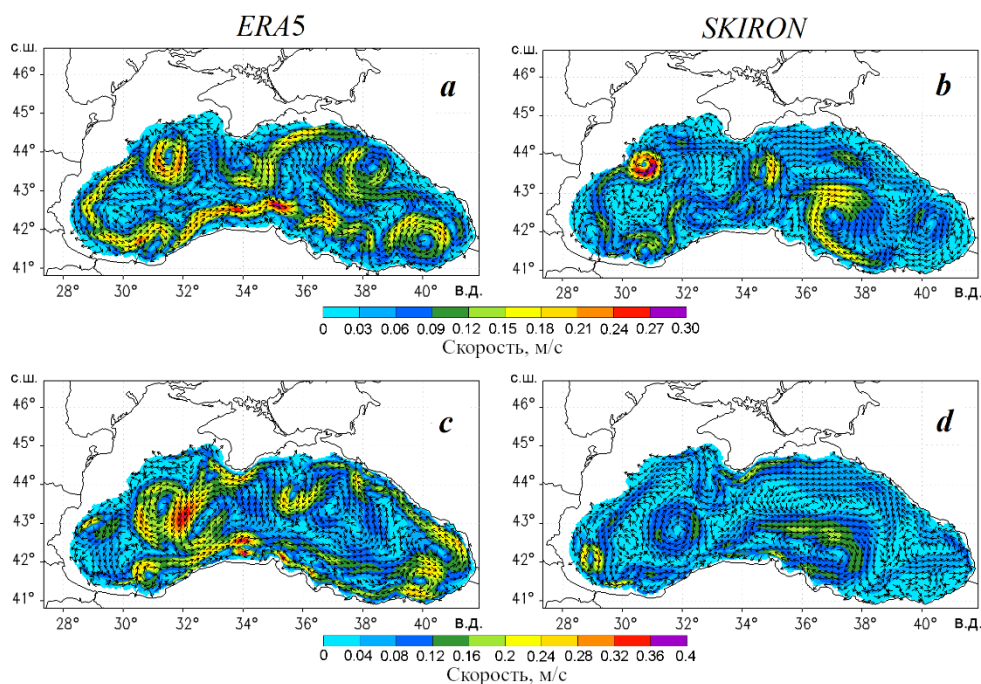


Рис. 12. Поля скоростей течений на горизонте 100 м 15 июня 2016 г. (*a, b*) и 15 декабря 2016 г. (*c, d*), полученные с использованием атмосферных форсингов *ERA5* (*a, c*) и *SKIRON* (*b, d*)

Fig. 12. Current velocity fields obtained by using atmospheric forcing *ERA5* (*a, c*) and *SKIRON* (*b, d*) at the 100 m horizon on 15 June 2016 (*a, b*) and 15 December 2016 (*c, d*)

Сопоставление полей течений (рис. 12) с полями солёности (см. рис. 9) на горизонте 100 м подтверждает, что увеличение градиента солёности между глубоководной и присклоновой зонами в эксперименте *ERA5* зимой обусловлено более интенсивной циклонической циркуляцией вод и эволюцией мезомасштабных антициклонов на периферии ОЧТ.

Заключение

Проведено два численных эксперимента по реконструкции циркуляции Чёрного моря с использованием атмосферных форсингов *ERA5* и *SKIRON* для 2016 г. Выполнена валидация результатов моделирования температуры и солёности на основе данных контактных измерений, выполненных буями-профиломерами *ARGO* и в рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Проведен сравнительный анализ гидрофизических полей, полученных в двух экспериментах.

Валидация модельных полей температуры и солёности показала, что термохалинная структура вод Чёрного моря более точно реконструируется при использовании атмосферного форсинга *ERA5*. Для этого эксперимента СКО температуры в слое 5–30 м уменьшилось на 28 %, СКО солёности в слое 30–100 м – примерно на 17 %.

Гидрофизические поля Чёрного моря для 2016 г., рассчитанные с использованием данных *ERA5*, отличаются от рассчитанных по данным *SKIRON* увеличением температуры верхнего 20-метрового слоя в весенне-летний сезон, формированием холодного промежуточного слоя, увеличением горизонтального градиента солёности между периферией и центральной частью бассейна в слое постоянного галоклина, интенсификацией ОЧТ и прибрежных мезомасштабных антициклонов (Севастопольский, Батумский антициклоны, вихри Анатолийского побережья) в верхнем 300-метровом слое.

При сравнении данных форсингов для 2016 г. получено, что в *ERA5* выше интенсивность ветрового воздействия в течение всего года и интенсивность коротковолновой солнечной радиации в тёплый период года. По результатам эксперимента *SKIRON*, недостаточное количество энергии ветра и заниженный поток тепла приводят к ослаблению циклонической циркуляции Чёрного моря, выравниванию изопикнических поверхностей и уменьшению температуры в слое 50–150 м. Таким образом, для проведения ретроспективного анализа гидрофизических полей Чёрного моря целесообразно использовать атмосферный реанализ *ERA5*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cessi P., Pinardi N., Lyubartsev V. Energetics of semienclosed basins with two-layer flows at the strait // *Journal of Physical Oceanography*. 2014. Vol. 44, No. 3. P. 967–979. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0129.1>
2. Dyakonov G. S., Ibrayev R. A. Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 527–541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
3. Assessment of Extreme Surge Simulation Accuracy in the Sea of Azov for Various Types of Atmospheric Forcing and Ocean Model Parameters / V. Fomin [et al.] // *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. May 3–5, 2019. Heraklion, Crete, Greece. 2019. Vol. 1. P. 340–344. <https://doi.org/10.5220/0007836603400344>

4. *Oguz T., Malanotte-Rizzoli P., Aubrey D.* Wind and thermohaline circulation of the Black Sea driven by yearly mean climatological forcing // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C4. P. 6845–6863. <https://doi.org/10.1029/95JC00022>
5. *Демьшев С. Г., Дымова О. А., Миклашевская Н. А.* Пространственно-временная изменчивость гидрофизических и энергетических характеристик циркуляции Черного моря при доминировании движений разных масштабов // *Океанологические исследования*. 2022. Т. 50, № 3. С. 27–50. EDN VIUSLY. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(3).2)
6. Reanalysis of seasonal and interannual variability of Black Sea fields for 1993–2012 / Korotaev G. K. [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 4. P. 418–430. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040071>
7. Acceleration of climate change in the upper layer of the Black Sea / Korotaev G. K. [et al.] // *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 518, iss. 1. P. 1550–1555. EDN ICHYUN. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602797>
8. *Демьшев С. Г.* Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149. EDN OOWHLL.
9. *Mellor G. L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Reviews of Geophysics*. 1982. Vol. 20, iss. 4. P. 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
10. *Arakawa A., Lamb V. R.* A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equation // *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109, iss. 1. P. 18–36. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0018:APEAEC>2.0.CO;2)
11. Оценки параметров краевых внутренних волн в Черном море / Грузинов В. М. [и др.] // *Труды Государственного океанографического института*. Москва, 2018. Вып. 219. С. 205–226. EDN XSEMDZ.
12. *Chelton D. B., Schlax M. G., Samelson R. M.* Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*. 2011. Vol. 91, iss. 2. P. 167–216. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.01.002>
13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. 429 с.
14. The regional weather forecasting system SKIRON: An overview / G. Kallos [et al.] // *Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*. October 15–17, 1997. Athens, Greece. University of Athens, 1997. P. 109–122.
15. *Шокуров М. В., Шокурова И. Г.* Завихренность напряжения трения ветра на поверхности Черного моря при различных ветровых режимах // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 13–26. EDN YLLPWM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-13-26>
16. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. <https://doi.org/10.1029/2002JC001508>
17. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») / Ю. В. Артамонов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 3. С. 247–253. EDN YNHСUP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-3-247-253>

18. Information resources of Marine Hydrophysical Institute, RAS: current state and development prospects / T. M. Bayankina [et al.] // Processes in GeoMedia – Volume II. Springer Geology. Springer, Cham, 2021. P. 187–197. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_22
19. *Иванов В. А., Белокопытов В. Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. 212 с.

Поступила 15.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.09.2024 г.; принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Дымова Ольга Алексеевна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 7565-1082, ORCID ID: 0000-0003-4036-2447, ResearcherID: P-9669-2015, olgadymova@rambler.ru**

Миклашевская Надежда Андриановна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 8476-2604, ORCID ID: 0000-0003-2619-343X, ResearcherID: P-2167-2017, nmikl@rambler.ru**

Заявленный вклад авторов:

Дымова Ольга Алексеевна – обзор литературы по проблеме исследования, изучение концепции; обозначение методологической основы исследования; проведение вычислений, обработка и описание результатов исследования, анализ результатов и их интерпретация, визуализация/представление данных в тексте, критический анализ и пересмотр текста

Миклашевская Надежда Андриановна – обработка и описание результатов исследования, качественный и количественный анализ результатов, визуализация/представление данных в тексте, подготовка текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.