

Верификация данных реанализа *ERA-Interim* в Азово-Черноморском бассейне

Т. Б. Гранкина^{1,*}, Р. А. Ибраев^{1,2,3}, П. А. Могильников³

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: grankina@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2018 г., после доработки – 28.12.2019 г.

Цель. Цель работы – оценить качество метеорологической информации *ERA-Interim* Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) в районе Азово-Черноморского бассейна, исследовать возможность использования этих данных для задания атмосферного форсинга в численной модели гидродинамики Черного и Азовского морей.

Методы. Анализ проводится на основе сравнения среднегодовых полей *ERA-Interim* с данными измерений параметров атмосферной циркуляции, представленными в гидрометеорологических атласах. Отмечаются наиболее существенные расхождения полей *ERA-Interim* с данными климатических массивов, рассматриваются связанные с этими расхождениями возможные ошибки воспроизведения циркуляции вод в указанных морях.

Результаты и выводы. Сравнительный анализ показал, что по ряду параметров данные реанализа качественно согласуются с натурными данными. Наибольшие расхождения (до 70%) отмечаются в поле осадков осенью у побережья Кавказа. Такая ошибка в граничных условиях может негативно повлиять на поверхностное распределение солёности при численном моделировании и, как следствие, на воспроизведение термохалинной циркуляции моря в этом регионе. Также значительную ошибку в результаты численных расчетов могут внести расхождения в полях приводного ветра. В данных *ERA-Interim* модуль скорости ветра в целом занижен на 7% по всей акватории Черного моря в весенне-летний период и на 20-25% в Азовском море в течение всего года. Направление результирующего ветра наиболее искажено в летний период, в то время как зимой расхождения существенны только в юго-восточной части Черного моря. Наилучшее соответствие данным климатических массивов отмечается в полях температуры и влажности воздуха: расхождения в этих параметрах минимальны.

Ключевые слова: Черное море, Азовское море, *ERA-Interim*, гидродинамическое моделирование, атмосферный форсинг.

Благодарности: работа выполнена в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0021) при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-05-01282).

Для цитирования: Гранкина Т. Б., Ибраев Р. А., Могильников П. А. Верификация данных реанализа *ERA-Interim* в Азово-Черноморском бассейне // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 3. С. 261–272. doi:10.22449/0233-7584-2019-3-261-272

Verification of the ERA-Interim Reanalysis Data in the Azov-Black Sea Basin

T. B. Grankina^{1,*}, R. A. Ibrayev^{1, 2, 3}, P. A. Mogilnikov³

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia*

*e-mail: grankina@gmail.com

Purpose. The purpose of the paper is to assess quality of meteorological information for the Azov–Black Sea basin derived from the ERA-Interim reanalysis (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), and to examine possibility of using the obtained data for presetting atmospheric forcing in the numerical hydrodynamic model of the Black and Azov seas.

Methods. The analysis is based on comparison of the annual average ERA-Interim fields with the measurement data on the atmospheric circulation parameters represented in hydrometeorological atlases. The most significant discrepancies between the ERA-Interim fields and the data of climatic arrays are noted and, consequently, the discrepancy-related potential errors arising in reproducing water circulation in the indicated seas are considered.

Results and Conclusions. The comparative analysis showed that, for a number of the parameters, the reanalysis data were in qualitative agreement with the measurements. The highest discrepancies (up to 70%) were revealed in the precipitation field nearby the Caucasian coast in autumn. Such an error in the boundary conditions can negatively affect both the sea surface salinity distribution in the numerical modeling and, therefore, reproduction of thermohaline circulation in this region of the sea. A significant error in the results of numerical modeling can also be induced by the discrepancies in the wind fields. In the ERA-Interim data, the wind speed module is generally understated by 7% over the whole Black Sea in a spring-summer period, and by 20–25% in the Azov Sea throughout a year. The direction of the resultant wind is the most distorted in summer, whereas in winter, the deviations are significant only in the southeastern part of the Black Sea. The best agreement is observed between the temperature and air humidity fields, and the climatic arrays' data: the discrepancies between the values of these parameters are minimal.

Keywords: Black Sea, Sea of Azov, ERA-Interim, hydrodynamic modeling, atmospheric forcing.

Acknowledgements: the investigation is carried out in the Shirshov Institute of Oceanology, RAS within the framework of the state task of FASO, RAS (theme No. 0149-2018-0021) at partial support of RFBR (project No. 17-05-01282).

For citation: Grankina, T.B., Ibrayev, R.A. and Mogilnikov, P.A., 2019. Verification of the ERA-Interim Reanalysis Data in the Azov–Black Sea Basin. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(3), pp. 236-246. doi:10.22449/1573-160X-2019-3-236-246

Введение

Для исследования общей структуры и изменчивости циркуляции Черного моря много лет применяется численное моделирование [1–11]. Проведение численных экспериментов требует задания корректных граничных условий на поверхности моря. Для этого можно использовать совместную модель море – атмосфера, что сопряжено с целым рядом трудностей, в частности с необходимостью соблюдения баланса потоков на границе двух сред. Существует и другой способ, позволяющий настроить отдельно модель морской циркуляции, – задание параметров атмосферы и потоков на поверхности моря на основе данных различных реанализов атмосферной циркуляции.

Один из наиболее современных реанализов – *ERA-Interim* Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (*European Centre for Medium-Range*

Weather Forecasts, сокращенно *ECMWF*) [12], который широко применяется в исследованиях различных морей, в том числе Азовского и Черного [11, 13, 14]. Пространственное разрешение этих данных составляет $0,75^\circ$ (около 80 км), шаг по времени равен 6 ч. Данные охватывают период с 1979 г. по настоящее время. При этом следует учитывать, что *ERA-Interim* является реанализом глобальной атмосферной циркуляции, поэтому в каждом отдельном регионе планеты он может содержать характерные для этого региона ошибки [15, 16]. Например, при построении полей вдоль побережья Азово-Черноморского бассейна ошибки могут возникать из-за невозможности учесть точные контуры береговой линии. А такие параметры, как температура воздуха, термическая радиация, имеют контрастные значения над морем и над сушей. Таким образом, при использовании данных *ERA-Interim* в рассматриваемом нами регионе необходима их верификация.

С этой целью нами по данным *ERA-Interim* построены среднемесячные и среднегодовые поля температуры и влажности воздуха, модуля скорости ветра, результирующего ветра, атмосферного давления, осадков, солнечного и термического излучения. Именно эти параметры и потоки используются для задания внешнего воздействия на поверхности в разработанной нами численной модели гидро- и термодинамики океана [17].

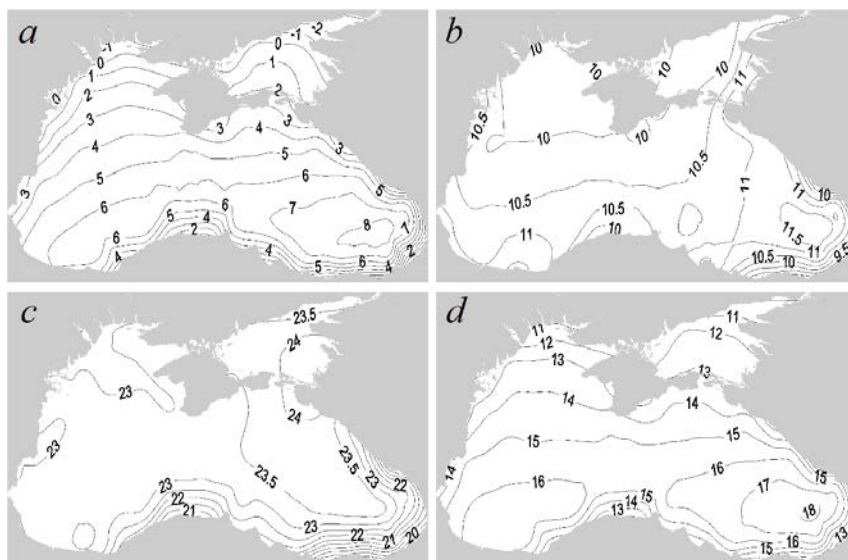
Для получения среднеклиматических значений данные *ERA-Interim* осреднялись за 30-летний период – с 1979 по 2008 гг. Полученные распределения указанных функций сопоставлены с климатическими полями, представленными в гидрометеорологических атласах Черного и Азовского морей [18–20]. Следует отметить, что эти гидрометеорологические атласы содержат информацию о среднем состоянии атмосферы для более ранних периодов, частично или совсем не пересекающихся с рассматриваемым периодом. Это не позволяет в полной мере судить о качестве данных *ERA-Interim*, поскольку найденные расхождения могут быть обусловлены как ошибками в данных реанализа и самих гидрометеорологических атласов, так и изменениями климата. Однако мы будем исходить из предположения о том, что любые климатические изменения в этом регионе во второй половине XX – начале XXI в. не носили кардинального характера и данные за разные периоды времени сопоставимы.

При проведении сравнительного анализа акцент сделан на значениях рассматриваемых полей в открытых частях моря, поскольку вследствие невысокого пространственного разрешения данных *ERA-Interim* береговая линия учтена в них грубо, что неизбежно будет приводить к искажению атмосферных параметров вдоль побережий. Поэтому о качестве данных будем судить по их соответствию климатическим полям в открытом море, на территорию которого приходится большая часть площади рассматриваемого бассейна.

На основе такого сравнительного анализа делается вывод о применимости реанализа *ERA-Interim* в качестве источника данных о внешнем воздействии при воспроизведении циркуляции Азовского и Черного морей в численной модели, а также рассматриваются основные расхождения с данными атласов и возможные связанные с ними ошибки моделирования.

1. Температура воздуха

На рис. 1 представлены среднемесячные поля температуры воздуха по данным *ERA-Interim* для центральных месяцев четырех сезонов. Сравнительный анализ показал, что поля *ERA-Interim* хорошо согласуются с данными атласов для Черного [18] и Азовского [19] морей во все сезоны на большей части акватории Азово-Черноморского бассейна. Среднегодовое распределение температуры во всем бассейне почти совпадает с данными климатических массивов. Наибольшее отклонение данных *ERA-Interim* относительно данных натуральных измерений отмечается на юго-восточном побережье Черного моря с февраля по июнь с незначительным занижением температуры воздуха на 0,5–1 °С. Это может быть обусловлено использованием при построении климатических полей [18] данных наблюдений, большинство которых проводилось в дневные часы. Над Азовским морем температура по данным реанализа в среднем завышена на 1 °С, что при проведении модельных расчетов может отразиться на времени начала и скорости формирования ледового покрова в осенне-зимний период.

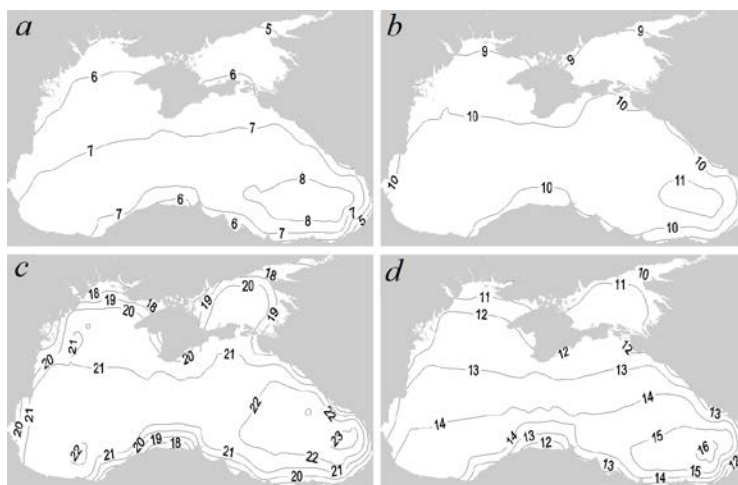


Р и с. 1. Среднемесячное распределение температуры воздуха на высоте 2 м (°С) по данным *ERA-Interim* за 1979–2008 гг. в январе (а), апреле (b), июле (c) и октябре (d)
F i g. 1. Average long-term distribution of air temperature at the 2 m height (°C) based on the *ERA-Interim* data for 1979–2008 in January (a), April (b), July (c) and October (d)

Средняя температура воздуха над открытым морем в целом выше, чем у побережья, и только весной распределение температуры обратное. Максимум среднемесячной температуры воздуха приходится на июль – август (около 24 °С). Минимум приходится на январь – февраль (–1 °С). Средняя за год температура воздуха над морем изменяется от 10 °С на севере до 15 °С на юго-востоке, что достаточно хорошо согласуется с данными [20]. В холодное время года четко прослеживается характерное ее меридиональное увеличение. Летом температурное поле более однородно.

2. Влажность воздуха

Чтобы провести сравнительный анализ полей влажности, по данным *ERA-Interim* рассчитаны многолетние среднемесячные распределения парциального давления водяного пара (рис. 2). По данным наблюдений, внутригодовые изменения влажности воздуха аналогичны годовому ходу температуры воздуха. В холодное время года среднегодовое пространственное распределение парциального давления водяного пара над морем аналогично распределению температуры. Соответственную идентичность полей влажности и температуры в зимние месяцы наблюдаем в данных *ERA-Interim*. Сопоставление полученных данных с данными гидрометеорологических атласов также выявило соответствие данных *ERA-Interim* климатическим данным: отмечаются лишь незначительные отклонения (до 0,5 гПа). Наименьшие значения давления водяного пара и по данным *ERA-Interim*, и по климатическим данным отмечаются в январе – феврале (5–9 гПа), максимальные – в августе (19–24 гПа). Среднегодовые значения влажности по всему Азово-Черноморскому бассейну составляют 10–14,5 гПа.



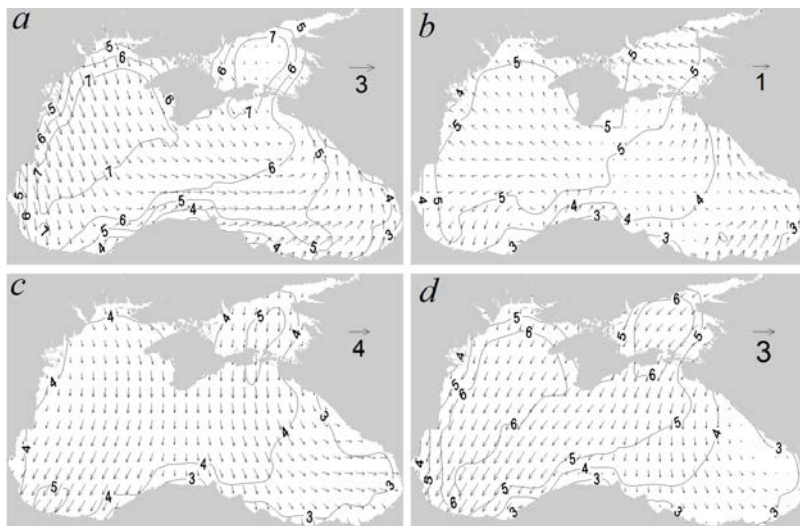
Р и с. 2. Среднегодовое распределение парциального давления водяного пара на высоте 2 м (гПа) по данным *ERA-Interim* за 1979–2008 гг. в январе (a), апреле (b), июле (c) и октябре (d)
F i g. 2. Average long-term distribution of water vapor partial pressure at the 2 m height (гПа) based on the *ERA-Interim* data for 1979–2008 in January (a), April (b), July (c) and October (d)

3. Скорость ветра

Ветер является важнейшим фактором формирования циркуляции вод во всем Мировом океане, в том числе Черном и Азовском морях. В этом разделе рассматриваются средний модуль скорости и результирующий ветер на высоте 10 м (рис. 3).

По данным *ERA-Interim*, на протяжении всего года скорость ветра над Черным морем возрастает с юго-востока на северо-запад, что несколько противоречит климатическим данным, представленным в гидрометеорологическом атласе [18], согласно которым скорость ветра имеет преимущественно меридиональное распределение с возрастанием с юга на север. При этом рас-

хождения в значениях модуля скорости ветра относительно невелики. В осенне-зимний период поля скорости ветра по данным *ERA-Interim* хорошо согласуются с климатическими данными на большей части черноморской акватории. Исключение составляет только юго-западная ее часть, где в это время скорость ветра завышена на 1–1,5 м/с по сравнению с данными климатических массивов. Такое же завышение отмечается и в некоторые весенние месяцы, однако в весенне-летний период на большей части территории Черного моря скорость ветра по данным *ERA-Interim*, наоборот, занижена на 0,5–1 м/с, наиболее существенно – на северо-западе.



Р и с. 3. Среднегодовое распределение (м/с) результирующего ветра (векторы) и среднего модуля скорости ветра (изолинии) по данным *ERA-Interim* за 1979–2008 гг. в январе (а), апреле (b), июле (c) и октябре (d)

F i g. 3. Average long-term distribution (m/s) of the resultant wind (vectors) and the wind speed mean module (isolines) based on the *ERA-Interim* data for 1979–2008 in January (a), April (b), July (c) and October (d)

В Азовском море отклонение средних скоростей ветра по данным *ERA-Interim* более существенно. В целом, как и в Черном море, отклонение минимально в осенне-зимний период. Наиболее выражено оно весной, когда скорость ветра в большей части Азовского бассейна занижена относительно климатических данных [19] в среднем на 2 м/с, летом и осенью – на 1–1,5 м/с. В зимний период значительное расхождение с данными климатических массивов отмечается только в Таганрогском заливе: здесь скорости занижены на ~ 1 м/с, причем такая ситуация наблюдается на протяжении всего года. При этом качественно распределение скорости ветра соответствует климатическим данным: максимальные его скорости отмечаются в центральной части Азовского моря, минимальные – вдоль побережья и в Таганрогском заливе.

В поле результирующего ветра (по сравнению со скоростью ветра) на основе данных *ERA-Interim* отмечается значительно большее несоответствие данным климатических массивов. Прежде всего, это относится к летнему периоду, когда над большей частью Азово-Черноморского бассейна преобла-

дают северные ветры, при том что, согласно климатическим данным [18], ветер в этот сезон имеет преимущественно западные (юго-западные или северо-западные) направления [18]. В холодное время года направление ветра по данным *ERA-Interim* в целом согласуется с климатическими данными, за исключением юго-восточной части Черного моря, где вследствие образования над Армянским нагорьем области высокого давления преобладают восточные ветры. По данным реанализа, в этом районе направление ветра меняется на южное, то есть влияние указанной области высокого давления прослеживается в меньшей степени, чем в климатическом поле ветра. В целом же вследствие указанных расхождений в определении преобладающих направлений ветра, особенно в летний период, могут возникать существенные ошибки при воспроизведении течений в рассматриваемом бассейне.

4. Атмосферное давление

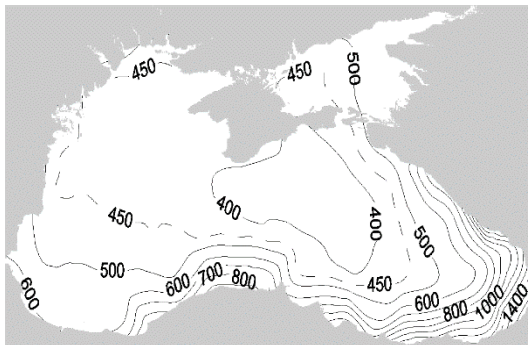
В задачах моделирования гидро- и термодинамики океана атмосферное давление является второстепенным фактором. Напрямую этот параметр используется только для расчета испарения с поверхности моря. Поэтому возможные ошибки будут оказывать лишь незначительное влияние на результаты моделирования в сравнении с ошибками в прочих компонентах атмосферного воздействия. Подробно останавливаться на этой характеристике не будем. Максимальное среднеемесячное давление, по данным наблюдений, отмечается на северном, северо-восточном побережьях в ноябре, на южном, юго-западном в январе и составляет 1019–1021 гПа. По данным *ERA-Interim*, максимальное значение (1020 гПа) отмечается только в январе на южном и юго-западном побережьях. Отклонение среднеемесячных значений атмосферного давления, по данным *ERA-Interim*, составляет в среднем около 0,5 гПа в сторону завышения данных в феврале, апреле, августе, октябре. В ноябре, наоборот, данные немного занижены. Минимальное (1015,5 гПа) и максимальное (1017,5 гПа) значения за год по данным атласа и по данным *ERA-Interim* (1015,9 и 1016,8 гПа соответственно) хорошо согласуются, несмотря на значительное несоответствие ветровых полей.

5. Осадки

Прямые измерения осадков систематически проводятся в основном на побережье, поэтому представленная в гидрометеорологических атласах картина не может рассматриваться как эталонная при сравнении с данными реанализа (рис. 4). Рассмотрим основные отклонения данных *ERA-Interim* от данных климатических массивов.

Как и ожидалось, расхождение данных реанализа с данными гидрометеорологических атласов [18, 19] велико, хотя качественно картина распределения осадков совпадает. Наибольшие отклонения данных реанализа от климатических данных отмечаются в осенние месяцы у берегов Батуми: интенсивность осадков здесь занижена более чем вдвое – до 170 мм/мес. При численном воспроизведении термохалинной циркуляции вод Черного моря столь существенная ошибка неизбежно будет приводить к завышенным значениям солености верхнего слоя и, вероятно, избыточно интенсивной конвекции вод. Зимой по данным *ERA-Interim* в этой части Черного моря также наблюдается

занижение интенсивности осадков, однако более умеренное – до 20 мм/мес. В весенне-летний период значения близки к климатическим данным. В остальных частях Черного моря расхождения между данными реанализа *ERA-Interim* и данными наблюдений менее существенны и составляют около 20 мм/мес в ту или иную сторону.



Р и с. 4. Среднеголетнее распределение осадков (мм/год) по данным *ERA-Interim* за 1979–2008 гг.

F i g. 4. Average long-term distribution of precipitation (mm/year) based on the *ERA-Interim* data for 1979–2008

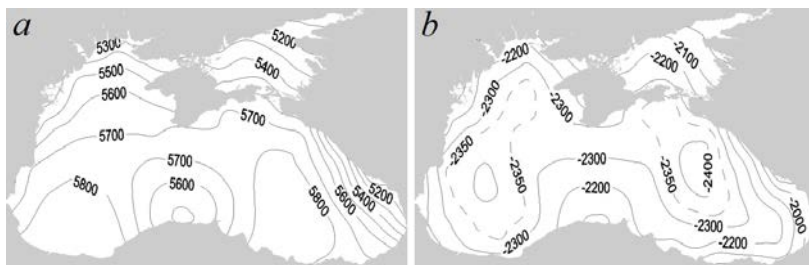
В Азовском море на протяжении всего года интенсивность осадков по данным реанализа превышает климатические данные на 5–10 мм/мес. В среднем по году наибольшее отклонение от климатических данных наблюдается в юго-восточной части моря (занижение около 500 мм/год). Также существенное отклонение (превышение около 200 мм/год) среднегодовой интенсивности осадков отмечается на северо-западе региона.

6. Радиационные потоки

Солнечная и термическая радиации существенно зависят от локальных условий облачности, учитываемых в климатических атласах весьма приблизительно. Поэтому отклонения этих полей, как и полей осадков, по данным *ERA-Interim* от средноклиматических значений не следует однозначно трактовать как ошибку. Тем не менее в работе [21] показано, что данные реанализа часто указывают на чистое небо тогда, когда в действительности наблюдается облачность. Авторы этой работы предостерегают от прямого использования данных *ERA-Interim* о солнечной радиации без должных корректировок.

На рис. 5 приведены среднегодовые многолетние поля *ERA-Interim* солнечной и термической радиации. По данным гидрометеорологического атласа Черного моря [18], поглощенное солнечное излучение имеет строго меридиональное распределение с увеличением потока от 4500 МДж/(м²год) на севере до 4900 МДж/(м²год) на юге. В реанализе *ERA-Interim* распределение приходящей солнечной радиации имеет значительно более сложную структуру и значения, превышающие указанные на 800–900 МДж/(м²год). Если учесть, что альbedo морской поверхности составляет около 10% (в районах моря,

в которых отсутствует зимний ледяной покров), то можно сделать вывод, что данные *ERA-Interim* превышают климатические данные в среднем примерно на 6%. Такое же относительное завышение отмечено и в акватории Азовского моря (по данным [19]). Тем не менее следует учитывать, что у побережья Кавказа данные реанализа имеют локальный минимум, обусловленный повышенной облачностью, в то время как в данных атласа этот минимум практически не прослеживается. Таким образом, данные *ERA-Interim* могут быть более корректными по сравнению с климатическими атласами, по крайней мере, в отдельных районах рассматриваемого бассейна.



Р и с. 5. Среднеголетнее распределение приходящей солнечной радиации (*a*) и эффективного термического излучения (*b*) на поверхности (МДж/(м²год)) по данным *ERA-Interim* за 1979–2008 гг.

F i g. 5. Average long-term distribution of the arriving solar radiation (*a*) and the effective thermal radiation (*b*) on the surface (MJ/(m²year)) based on the *ERA-Interim* data for 1979–2008

В поле эффективной термической радиации отмечаются существенно большие расхождения с климатическими данными. В Черном море ее интенсивность выше значений, рассчитанных в климатическом массиве [18], на 5% в юго-восточной и северо-западной частях моря, на 10% – в северо-восточной, на 10–15% – в центральной части и до 25–30% – на юго-западе. Вероятно, причина этого расхождения – занижение средней облачности при проведении реанализа, что также может обуславливать избыточное солнечное излучение. Более того, завышенный поток солнечной радиации будет неизбежно приводить к завышению термической, поскольку последняя напрямую зависит от температуры поверхности моря. Таким образом, корректировка обоих радиационных потоков должна проводиться согласованно.

В Азовском море среднегодовая термическая радиация превышает климатические данные [19] на 30–40%, причем ее годовой ход коррелирует с температурой поверхности моря, в то время как по данным климатического атласа ее минимум должен приходиться на летний период, а максимум – на зимний. Учитывая, что зимой Азовское море частично или полностью покрывается льдом, экранирующим тепловые потоки на поверхности, такой годовой ход в данных атласа представляется сомнительным, и необходимость корректировки данных *ERA-Interim* по термической радиации в акватории Азовского моря неочевидна.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ показал, что данные реанализа *ERA-Interim* в целом согласуются с климатическими атласами Черного и Азовско-го морей. Поля температуры воздуха и парциального давления пара в при-водном слое имеют минимальные расхождения с климатическими данными (в пределах 1 °С и 0,5 гПа соответственно) и не требуют существенной кор-ректировки. Атмосферное давление также близко к данным гидрометеороло-гических атласов. Наиболее значимые несоответствия климатическим усло-виям отмечаются в поле результирующего ветра, прежде всего, в летний пе-риод, когда он имеет преимущественно северные направления вместо запад-ных. Скорость ветра также имеет наибольшие расхождения с климатически-ми данными в летний период, однако по абсолютной величине они сравни-тельно невелики: до 1–1,5 м/с в Черном море и до 2 м/с в Азовском. Интен-сивность осадков по данным *ERA-Interim* качественно соответствует данным климатических массивов, за исключением юго-восточной части Черного моря в осенний период, где она занижена на 170 мм/мес, то есть более чем вдвое, что может существенно сказаться на показателе солёности верхнего слоя мо-ря при проведении численных расчетов его циркуляции. Радиационные пото-ки, как нам представляется, в данных *ERA-Interim* имеют более корректную пространственно-временную изменчивость относительно полей, представ-ленных в гидрометеорологических атласах, но по абсолютной величине они систематически завышены. Интенсивность солнечной радиации и в Черном, и в Азовском море превышает среднеклиматические значения в среднем по году на 6%. Интенсивность эффективного термического излучения выше климатических данных в различных районах Черного моря на 5–30% и в Азовском море – на 30–40%. Предположительно, причина завышения и солнечной, и термической радиации одна – заниженная средняя облачность в реанализе. Также при расчете полей реанализа избыточный приток солнеч-ной радиации может приводить к завышению термического излучения вслед-ствие перегрева поверхности моря. Поэтому корректировка двух радиацион-ных потоков должна проводиться согласованно.

В целом, данные реанализа *ERA-Interim* могут быть использованы в каче-стве атмосферного форсинга при моделировании термохалинной циркуляции в Азово-Черноморском бассейне, однако, если их не корректировать, следует ожидать весьма существенных ошибок воспроизведения и динамики вод, и их термохалинной структуры. Хотя корректировка полей осадков и радиа-ционных потоков может быть выполнена достаточно просто, устранение ошибок в ветровом поле (прежде всего, направления ветра) представляет со-бой весьма нетривиальную задачу. Одним из наиболее перспективных путей решения этой проблемы нам представляется метод динамической регионали-зации данных реанализа [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кныш В. В., Кортаев Г. К., Лишаев П. Н. Методика использования трехмерных полей температуры и солёности Черного моря, восстановленных по малочисленным данным измерений и альтиметрии, в оперативной прогностической модели // Морской гидро-физический журнал. 2016. № 2. С. 53–69. doi:10.22449/0233-7584-2016-2-53-69

2. Демьяшев С. Г., Дымова О. А. Расчет и анализ энергетики циркуляции вод в прибрежных районах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 3. С. 49–62. doi:10.22449/0233-7584-2017-3-49-62
3. Расчет течений и распространения загрязнения в прибрежных водах Большого Сочи / Н. А. Дианский [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 6. С. 664–675. doi:10.7868/S0002351513060047
4. Stanev E. V. On the mechanisms of the Black sea circulation // Earth-Science Reviews. 1990. Vol. 28, iss. 4. P. 285–319. doi:10.1016/0012-8252(90)90052-W
5. Control of Black Sea intermediate water mass formation by dynamics and topography: Comparison of numerical simulations, surveys and satellite data / E. V. Stanev [et al.] // Journal of Marine Research. 2003. Vol. 61, no. 1. P. 59–99. doi:10.1357/002224003321586417
6. Black Sea thermohaline properties: Long-term trends and variations / S. Miladinova [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122, iss. 7. P. 5624–5644. doi:10.1002/2016JC012644
7. Formation and changes of the Black Sea cold intermediate layer / S. Miladinova [et al.] // Progress in Oceanography. 2018. Vol. 167. P. 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.07.002>
8. Kubryakov A. A., Stanichny S. V. Seasonal and interannual variability of the Black Sea eddies and its dependence on characteristics of the large-scale circulation // Deep-Sea Research I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 97. P. 80–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2014.12.002>
9. Korotenko K. A. Modeling mesoscale circulation of the Black Sea // Oceanology. 2015. Vol. 55, iss. 6. P. 820–826. <https://doi.org/10.1134/S0001437015060077>
10. Beşiktepe Ş., Lozano C. J., Robinson A. R. On the summer mesoscale variability of the Black Sea // Journal of Marine Research. 2001. Vol. 59, no. 4. P. 475–515. <https://doi.org/10.1357/002224001762842163>
11. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П. Н. Лишаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 49–68. URL: http://мгфж.рф/images/files/2014/05/201405_03.pdf (дата обращения: 10.03.2019).
12. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
13. Сухих Л. И., Дорофеев В. Л. Исследование чувствительности результатов реанализа гидрофизических полей Черного моря к используемому атмосферному воздействию // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 5. С. 48–64. doi:10.22449/0233-7584-2016-5-48-64
14. Ефимов В. В., Савченко А. О., Анисимов А. Е. Особенности теплообмена Черного моря с атмосферой в осенне-зимний период // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 6. С. 71–81. URL: http://мгфж.рф/images/files/2014/06/201406_06.pdf (дата обращения: 10.03.2019).
15. Berg P., Feldmann H., Panitz H.-J. Bias correction of high resolution regional climate model data // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 448–449. P. 80–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.026>
16. Cattiaux J., Douville H., Peings Y. European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties // Climate Dynamics. 2013. Vol. 41, iss. 11–12. P. 2889–2907. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1731-y>
17. Ибраев Р. А., Дьяконов Г. С. Моделирование динамики океана при больших колебаниях уровня // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 514–526. doi:10.7868/S0002351516040064
18. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV: Черное море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 430 с.

19. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V: Азовское море / Под ред. Н. П. Гоптарева, А. И. Симонова, Б. М. Затучной, Д. Е. Гершановича. СПб. : Гидрометеоиздат, 1991. 235 с.
20. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2: Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь, 2012. 421 с.
21. *Boilley A., Wald L.* Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 75. P. 135–143. doi:10.1016/j.renene.2014.09.042
22. *Анисимов А. Е., Яровая Д. А., Барабанов В. С.* Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 4. С. 14–28. doi:10.22449/0233-7584-2015-4-14-28

Об авторах:

Гранкина Татьяна Борисовна, научный сотрудник, группа моделирования изменчивости климата океанов и морей (физическое направление), Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат физико-математических наук, grankina@gmail.com

Ибраев Рашит Ахметзиевич, главный научный сотрудник, группа исследования крупно и мезомасштабной динамики вод Мирового океана и окраинных морей России на основе моделирования и анализа данных наблюдений, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 8), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9099-4541**, ibrayev@mail.ru

Могильников Павел Алексеевич, бакалавр прикладной физики и математики, студент магистратуры, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9)