

Моделирование параметров ветрового волнения в Черном море с учетом течений

А. Д. Рыбалко^{1*}, С. А. Мысленков^{1,2,3}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, Москва, Россия

³Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, Москва, Россия

*e-mail: ryb.aleksandra1@gmail.com

Поступила 10.09.2020 г.; принята к публикации 11.11.2020 г.; опубликована 25.12.2020 г.

Течения оказывают воздействие на параметры ветрового волнения, однако вопрос о том, насколько это влияние существенно для Черного моря, почти не изучен. Цель данной работы – определить масштаб и выявить пространственно-временную изменчивость влияния течений на высоту волн в Черном море. Исследование проводилось на основе результатов моделирования с использованием волновой модели *SWAN* и нерегулярной вычислительной сетки. В качестве входных данных использовался реанализ ветра *NCEP/CFSv2* и данные о течениях, полученные из архива отдела дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института РАН. Показано, что при учете циркуляции средняя высота волн в основном уменьшается. Изменения высоты незначительны относительно средних значений. Наибольшие отрицательные изменения характерны для западной и северо-восточной частей Черного моря. Здесь при учете циркуляции среднегодовые высоты волн уменьшаются на ≤ 0.1 м. Незначительное увеличение средней высоты волн характерно для южной и юго-восточной частей моря, а также для северо-западного шельфа. Увеличение среднегодовой высоты волн составляет до 0.02 м. При учете течений параметры волн меняются в наибольшей степени в зимние месяцы, в наименьшей – в конце весны и летом. В январе и феврале на большей части акватории моря учет течений изменяет среднемесячные высоты волн на $-0.04 \dots 0.06$ м. В июне и июле вклад течений близок к нулю. Максимальные изменения высоты волн составляют 6–10 % от среднемесячных значений.

Ключевые слова: влияние течений на волны, взаимодействие волн и течений, ветровые волны, Черное море, волновая модель, *SWAN*.

Благодарности: моделирование параметров волнения выполнено С.А. Мысленковым при поддержке гранта РФФИ №18-05-80088.

Для цитирования: Рыбалко А. Д., Мысленков С. А. Моделирование параметров ветрового волнения в Черном море с учетом течений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 40–53. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-40-53

© Рыбалко А. Д., Мысленков С. А., 2020



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 Current Influence on the Wind Wave Parameters in the Black Sea based on Numerical Modeling

A. D. Rybalko^{1*}, S. A. Myslenkov^{1,2,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

³ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

*e-mail: ryb.aleksandra1@gmail.com

Submitted 10.10.2020; revised 10.11.2020; published 25.12.2020

Currents affect wind waves parameters. The issue of significance of this influence for the Black Sea has not been studied properly. The purpose of this paper is to study the scale, spatial and temporal variability of influence of sea currents on the wave height in the Black Sea. The research was carried out based on simulation using SWAN wave model and an irregular computational grid. Two datasets were used as input data: the NCEP/CFSv2 wind reanalysis and current data taken from the Remote Sensing Department's archive of the Marine Hydrophysical Institute of RAS. It is shown that the average wave height mainly decreases when sea current is considered. These changes are insignificant relative to the average values of wave heights. The greatest negative changes are typical of the western and northeast parts of the Black Sea. Here, the consideration of circulation reduces the average annual wave heights by up to 0.1 m. A slight increase in the average wave height is typical of the southern and southeast parts of the sea as well as the northwest shelf. The positive contribution to the mean annual wave heights is up to 0.02 m. When taken into account, currents change wave parameters at a maximum in winter months and at a minimum in late spring and summer. Currents change the mean monthly wave heights by $-0.04 \dots 0.06$ m in January and February in most parts of the sea. The contribution of currents is close to zero in June and July. The maximum changes in wave height reach 6–10 % of the monthly average.

Keywords: current influence on waves, wave-current interaction, wind waves, Black Sea, wave model, SWAN.

Acknowledgments: wind wave module simulation was performed by S. A. Myslenkov under project no. 18-05-80088 and funded by the Russian Foundation for Basic Research.

For citation: Rybalko, A.D. and Myslenkov, S.A., 2020. Assessment of Current Influence on the Wind Wave Parameters in the Black Sea based on Numerical Modeling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 40–53. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-40-53 (in Russian).

Введение

Поле течений оказывает непосредственное влияние на параметры ветровых волн. При средней скорости течения U соотношение волнового числа k и фазовой скорости C в отсутствие поля течений и при его наличии можно представить следующим образом:

$$k(U + C) = k_0 C_0,$$

где индекс 0 соответствует отсутствию течений [1].

Имеет значение угол взаимодействия волн и течений. Когда волны и течение сонаправлены, скорость и длина волны возрастают по сравнению

с их значениями в стоячей воде. Если течение направлено навстречу распространению волн, то длина и скорость волны уменьшаются [1]. В первом случае высота волн должна уменьшаться, а во втором — увеличиваться. Если волны приближаются к течению под углом, не равным 0° или 180° , или скорость течения меняется в поперечном направлении, кроме изменения параметров, происходит рефракция волн.

История изучения взаимодействия волн и течений подробно описана в работе [2]. Первые работы, посвященные теоретическим аспектам, появились в начале 60-х гг. прошлого столетия. Но даже в настоящее время вопрос влияния течений на ветровое волнение в конкретных районах Мирового океана мало изучен. Большинство работ представляют собой исследования относительно небольших акваторий и используют волновую модель третьего поколения *SWAN*. В работе [3] оценивается влияние приповерхностных течений и уровня воды на поле ветрового волнения во время урагана Св. Иуды в восточной части Балтийского моря. Показано, что результаты моделирования волн улучшаются при учете влияния течений, особенно в условиях шторма. Так, при учете циркуляции высота значительных волн уменьшилась на 50 см в условиях глубокой воды и увеличилась на 40 см в прибрежной зоне при максимальном значении высоты волн около 2.7 м. В другой работе [4], описывающей взаимодействие волн, нагона и течений в условиях шторма, исследуется ситуация в гавани Чарлстон, Южная Каролина, во время урагана Хьюго 1989 г. Исследование проводилось при одновременном использовании волновых моделей *SWAN* и *POM (Princeton Ocean Model)*. Делается вывод, что влияние поля течений значительно меньше, чем влияние уровня воды, однако авторы рекомендуют учитывать поле течений для повышения качества модельных прогнозов в районе исследования. В работах [5, 6] исследуются заливы побережья Португалии – эстуарий р. Тежу (Лиссабон) и оз. Лагоа де Албуфейра (20 км к югу от Лиссабона). Показано, что при учете течений результаты моделирования улучшаются.

Для Черного моря влияние течений на параметры ветровых волн оценивается в работе [7]. Авторы рассматривают район дельты Дуная. Анализируются частные случаи с наиболее характерными для района исследования вариантами ветро-волновой обстановки. Показано, что эффект от учета течений меняется в зависимости от направления ветра и силы шторма. Во всех рассматриваемых авторами случаях при учете поля течений высота волн увеличивается на 12–55 %. Более продолжительные модельные расчеты (3 месяца) демонстрируют увеличение высоты волн, уменьшение периода до 28 % и длины волны до 40 %. Изменение угла распространения составляет примерно 20° . Кроме того, в работе отмечается, что течения становятся причиной возникновения волн-убийц в районе исследования. В целом анализ статистических параметров демонстрирует некоторое улучшение работы модели *SWAN* для данного района при учете поля течений.

В большинстве работ при моделировании волнения в Черном море поле течений ранее не учитывалось [8–14]. В данном исследовании на основе результатов моделирования с 2013 по 2017 г. оценивается влияние течений на высоту значительных волн на всей акватории Черного моря.

Данные и методы

В работе использовалась модель ветрового волнения *SWAN* [15]. Вычисления производились на нерегулярной вычислительной сетке, включающей в себя Черное море. Более подробное описание модели, вычислительной сетки и оценки качества приводится в [16, 17].

Расчет параметров волнения проводился на основе данных о полях ветра реанализа *NCEP/CFSv2*. Пространственное разрешение реанализа составляет $\sim 0.2^\circ$, шаг по времени – 1 ч (URL: <https://cfs.ncep.noaa.gov>). Данные о скорости течений были получены из архива Отдела дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института РАН (URL: <http://dvs.net.ru>). Полные приповерхностные скорости получаются путем суммирования геострофической компоненты, восстановленной по данным альтиметрии [18–20], и дрейфовых скоростей, рассчитанных по полям ветра *NCEP (GFS 0.25^\circ)*. Пространственное разрешение полей течений – 0.125° , шаг по времени – 6 ч.

Для оценки степени влияния течений на параметры волнения при помощи модели *SWAN* проведено два численных эксперимента: с учетом полей течений в качестве входных данных и без учета. Настройки модели и входные данные ветра были заданы идентичными. Таким образом, было получено два варианта рассчитанных параметров ветрового волнения с 2013 по 2017 г. с шагом по времени 3 ч для каждого узла вычислительной сетки. Далее для каждого узла значение высоты значительных волн без учета влияния течений вычиталось из аналогичного значения с учетом течений. Затем рассчитывались среднегодовые, среднемесячные и сезонные разности (зима (декабрь – февраль), весна (март – май), лето (июнь – август) и осень (сентябрь – ноябрь)).

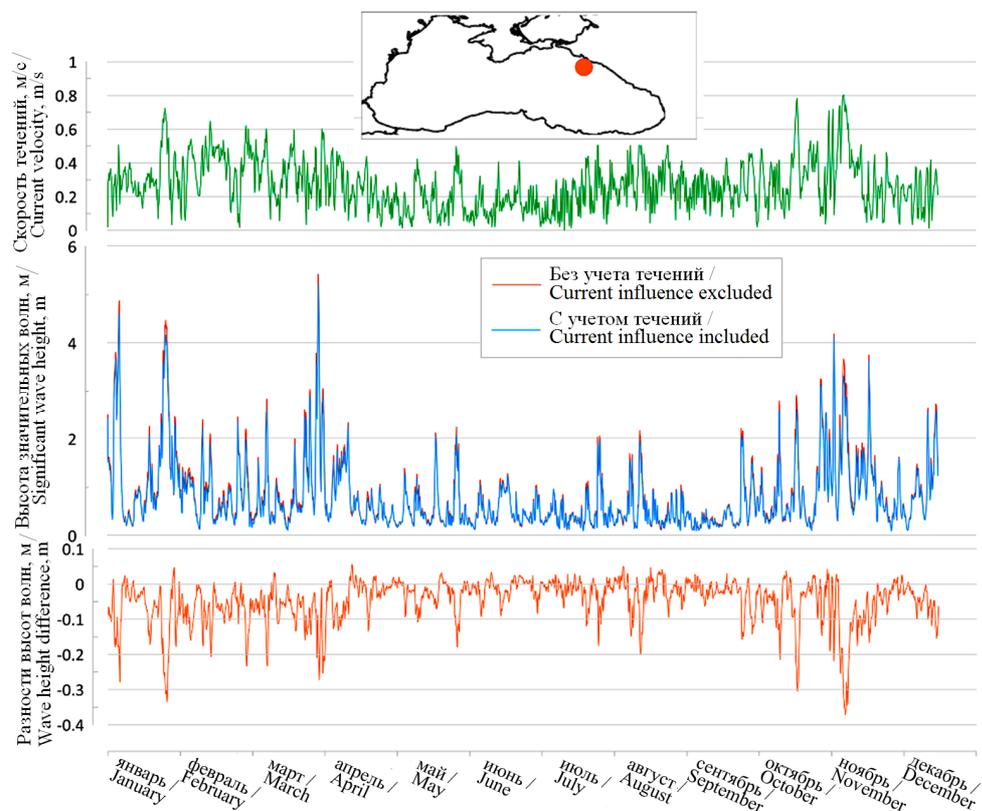
Чтобы определить процентный вклад влияния течений на высоту волн, значение средней разности высоты волн в каждой точке умножалось на 100 и делилось на среднее значение высоты волн без учета течения в каждой точке.

Оценки точности расчета ветровых волн для этой реализации волновой модели следующие: среднеквадратическое отклонение в летние месяцы 0.2–0.3 м, в зимние месяцы 0.3–0.4 м, коэффициент корреляции 0.8–0.9 [21]. Однако вычислительная точность, связанная с реализацией конечно-разностных схем, достаточно велика – от 95 до 99 % от высоты волны, так как при расчетах задавалось шесть итераций.

Результаты

Изменчивость разности высот волн в точке. Для тестового анализа была выбрана точка с координатами 44.145° с. ш., 37.935° в. д. в районе г. Туапсе, где часто присутствует струя Основного Черноморского течения (ОЧТ) [22]. В этой точке анализировался годовой ход высоты значительных волн по двум вариантам модельных расчетов, разности высот и скорости течений в 2015 г. (рис. 1). Разность получали путем вычитания высоты волн без учета течений из высоты волн с учетом течений для каждого срока.

Разности высот в рассматриваемой точке невелики относительно абсолютных значений высот волн. Большинство значений разностей лежат в диапазоне от -0.1 до 0.05 м. Максимальные разности высот волн составляют около -0.35 м для отрицательных разностей и 0.05 м для положительных. Преобладают отрицательные разности высот, т. е. при учете течений высота волн уменьшается.



Р и с . 1 . Высота волн с учетом поля течений и без, разности высот и скорости течений в 2015 г. в точке. На врезке показано положение анализируемой точки

Fig . 1 . Annual variation of wave heights with and without current field, their difference and current speed in 2015 at a point. The insert shows the position of the analyzed point

Годовой ход анализируемых параметров отражает особенности штормовой активности и циркуляции в Черном море: максимальные значения высот волн и скорости течений наблюдаются в холодное время года, а минимальные значения соответствуют концу весны – лету. Так, в январе скорость течений в рассматриваемой точке может достигать 0.7 м/с и в среднем составляет 0.3–0.4 м/с. Высоты волн достигают 4–5 м. Разности лишь в нескольких случаях положительны, наибольшие составляют 0.05 м. Максимум отрицательных значений разности составляет около –0.32 м. В мае значения всех показателей меньше: скорость течений в точке не превышает 0.5 м/с, а в среднем составляет 0.15–0.2 м/с. Наибольшие значения высот волн в мае в два раза меньше максимальных показателей в январе. Разности высот волн тоже меньше: большая часть значений лежит в диапазоне от –0.1 до 0.03 м. Максимальные отрицательные разности не превышают –0.2 м.

Значения разностей в течение года в целом невелики. Существенное увеличение разностей наблюдается, когда высота значительных волн превышает 2 м, а скорости течений составляют более 0.3 м/с.

Фазовая скорость ветровых волн в летнее время в среднем составляет 4–5 м/с, в зимнее время 6–8 м/с. При экстремальных штормах с высотой волн более 7 м фазовая скорость может достигать 14–15 м/с.

Оценка пространственной и межгодовой изменчивости высоты волн при учете течений. Для определения межгодового влияния циркуляции на высоту волн сравнивались среднегодовые значения высоты волн с учетом поля течений и без него для разных лет с 2013 по 2017 г. Анализ пространственного распределения среднегодовых разностей высот волн показывает (рис. 2), что на большей части акватории среднегодовая высота волн уменьшается при учете течений в модели.

Несмотря на значительные межгодовые различия, можно выделить следующие особенности пространственного распределения влияния течений на среднегодовую высоту волн:

во все исследуемые годы отрицательные разности характерны для западной части моря между 43° с. ш. и 45.5° с. ш., в центральной части у Крымского п-ова и в секторе Кавказского побережья России. Это означает, что в указанных областях средняя высота волн уменьшается при учете течений. Наибольшие отрицательные среднегодовые разности наблюдаются в 2015 и 2016 гг. и достигают –0.08 м. Меньшими разностями в целом характеризуются 2013 и 2014 гг. В эти годы наблюдаются значительные области, в которых либо среднегодовая высота волн не меняется при учете течений, либо наблюдаются небольшие положительные значения разностей. К таким областям относятся северо-западный шельф, часть акватории у побережья Турции и юго-восточная часть моря. При учете циркуляции увеличение среднегодовой высоты волн может составлять здесь до 0.02 м.

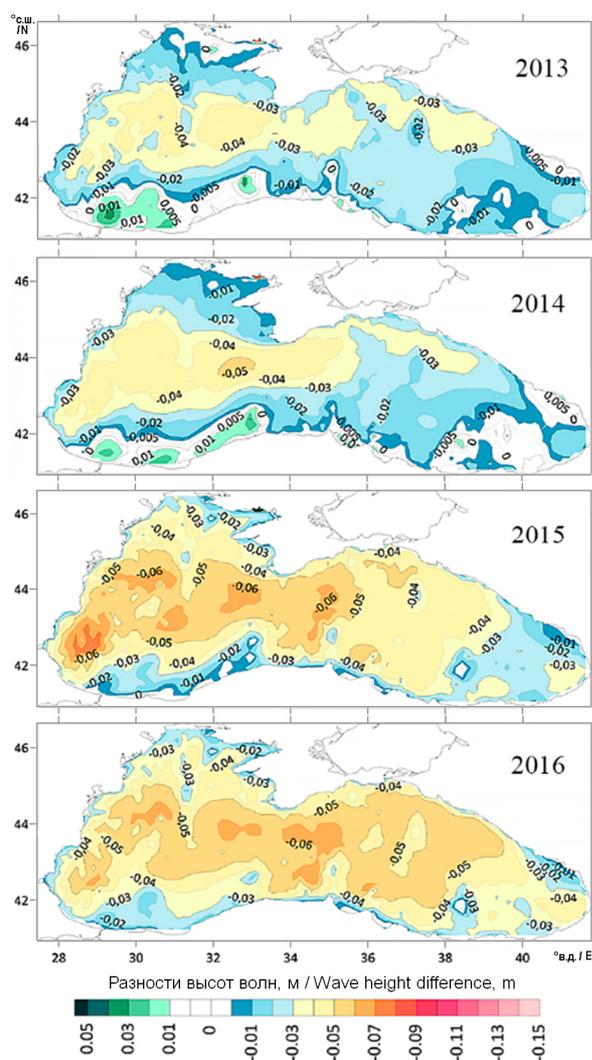


Рис. 2. Среднегодовая разность высоты волн (м) в 2013–2016 гг.

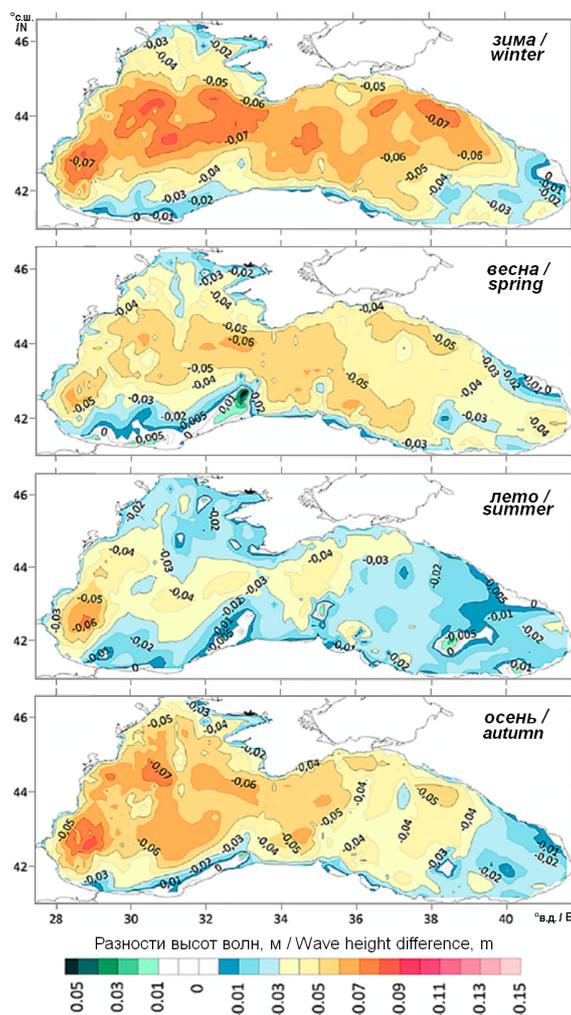
Fig. 2. Average annual wave height difference (m) in 2013–2016

Таким образом, среднегодовые разности невелики, чаще отрицательны, также присутствует существенная межгодовая изменчивость. В зоне действия ОЧТ, как правило, разности нулевые или положительные. По всей вероятности, это связано с тем, что достаточно сильный ветер, способный генерировать волны, вызывает дрейфовое течение. Поэтому в среднем волны и течения чаще сонаправлены, что уменьшает высоту волны, особенно в центральной части моря. ОЧТ изменчиво, и на среднегодовые значения разности высоты волн его влияние выражено слабо.

Влияние течений на параметры волнения по сезонам. Аналогично среднегодовым, были выполнены расчеты разностей высот волн по сезонам: зима, весна, лето, осень. Для каждого узла вычислительной сетки производилось сравнение средних по сезону высот волн по двум вариантам: с учетом течений и без него. Среднее значение высоты волн без учета влияния циркуляции вычиталось из аналогичного значения с учетом циркуляции. Пример пространственных распределений средних по сезонам разностей в 2015 г. представлен на рис. 3.

Максимум отрицательных значений разности в рассматриваемые годы достигает -0.1 м, а положительных -0.04 м.

Хотя межгодовые различия велики, все же можно говорить, что наибольшие разности высот волн отмечаются зимой, а наименьшие – летом. Это соответствует сезонному усилению штормовой активности и интенсивности течений в Черном море. Зимой высоты волн максимальны, средняя высота значительных волн для некоторых районов превышает 1.4 м [23]. Главное звено циркуляции, ОЧТ, также наиболее интенсивно в холодное время года, скорость течения составляет зимой $35-40$ см/с (до 80 см/с) [24]. Летом струя ОЧТ наименее выражена, скорости находятся в диапазоне



Р и с . 3. Средние по сезонам разности высот волны в 2015 г.

Fig. 3. Seasonally averaged wave height difference in 2015

10–25 см/с. Высоты волн также минимальны, среднее значение не превышает 0.8 м [23]. Сезонный ход разностей повторяет эти особенности.

Среднемесячные разности высот. Кроме среднегодовых и средних по сезонам, рассчитывались разности для каждого месяца между двумя вариантами численных экспериментов для каждого узла вычислительной сетки. Все среднемесячные значения разностей находятся в диапазоне от -0.14 до 0.06 м, преобладают отрицательные разности, то есть среднемесячные высоты волн уменьшаются при учете течений.

Во все рассматриваемые годы разности максимальны в зимние месяцы. В январе и феврале на большей части акватории моря наблюдаются значе-

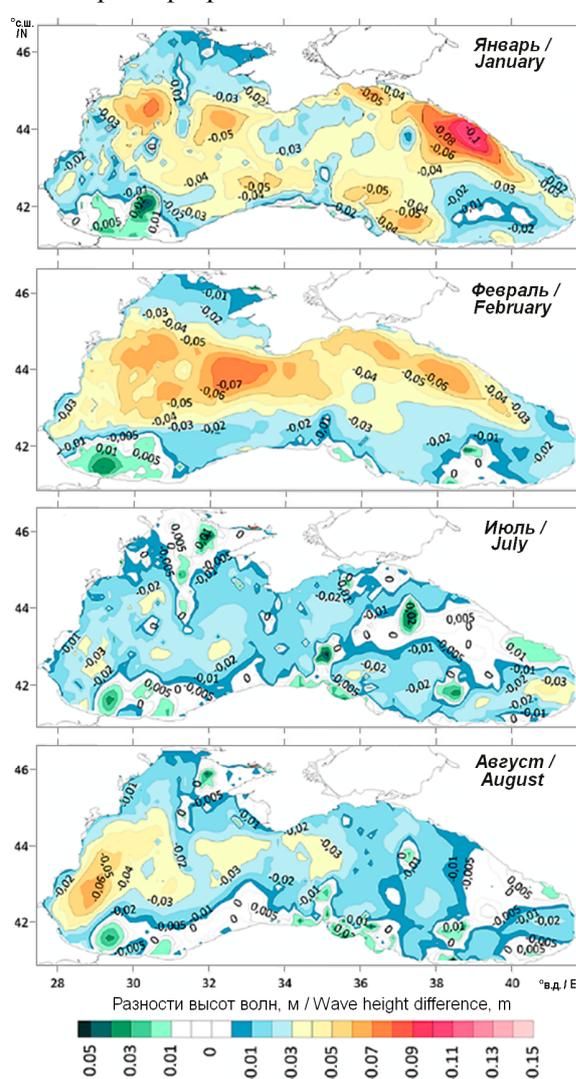


Рис. 4. Среднемесячные разности высот волн в 2013 г.

Fig. 4. Average monthly wave height difference in 2013

ния $-0.06 \dots -0.04$ м. В некоторые годы максимальные значения разности высот в феврале превышают -0.14 м на западе моря и в его центральной части ниже Крымского п-ова. В марте – мае на большей части акватории моря наблюдаются нулевые и небольшие положительные разности. В июне и июле значения разностей близки к нулю. В августе и сентябре восстанавливается зимняя картина, но абсолютные значения разностей меньше. В октябре, ноябре и декабре 2014 г. на большей части акватории моря наблюдаются нулевые и положительными разности. В остальные годы пространственное распределение сходно с распределением в январе и феврале.

На рис. 4 показано пространственное распределение средних разностей высот волн в январе, феврале, июле и августе в 2013 г.

Наблюдаемые внутригодовые различия сопоставимы с межгодовыми. Абсолютные разности даже в холодные месяцы невелики.

Процентный вклад влияния течений на высоту волн. Определялся процентный вклад влияния циркуляции на высоту волн. Для этого значение среднемесячной разности высоты волн в каждой точке делилось на среднее значение высоты волн без учета течения в каждой точке и умножалось на 100. Пример пространственного распределения процентных вкладов по акватории моря представлен на рис. 5. По всей полосе с 41.5° по 43° с. ш. в холодные месяцы средняя высота волн при учете течений уменьшается на 4–6 %, в отдельных случаях на 8–10 %, (рис. 5). В апреле – августе при учете течений средняя высота волн в этой зоне уменьшается на 2–4 %. На юго-западе при учете поля течений высота волн увеличивается, процентный вклад составляет до 6 %.

Выделяются зоны, где возможно изменение высоты волн более чем на 10 %, в отдельных случаях – на 13 %. Сюда входят западная часть моря, акватория у берегов Болгарии; зона у южной и юго-восточной части Крымского п-ова; Кавказское побережье России. В этих зонах при учете циркуляции средняя высота волн уменьшается. Зоны с наименьшим влиянием – северо-западный шельф и юго-восточная часть моря.

Заключение

Таким образом, на основе модели *SWAN* получены параметры ветрового волнения с учетом влияния поля течений в Черном море с 2013 г. по октябрь 2017 г. с шагом по времени 3 ч. Для среднемесячных и среднегодовых полей средняя высота волн при учете влияния течений в основном уменьшается. Происходит это по причине сонаправленности волн и течений при осреднении по времени более месяца.

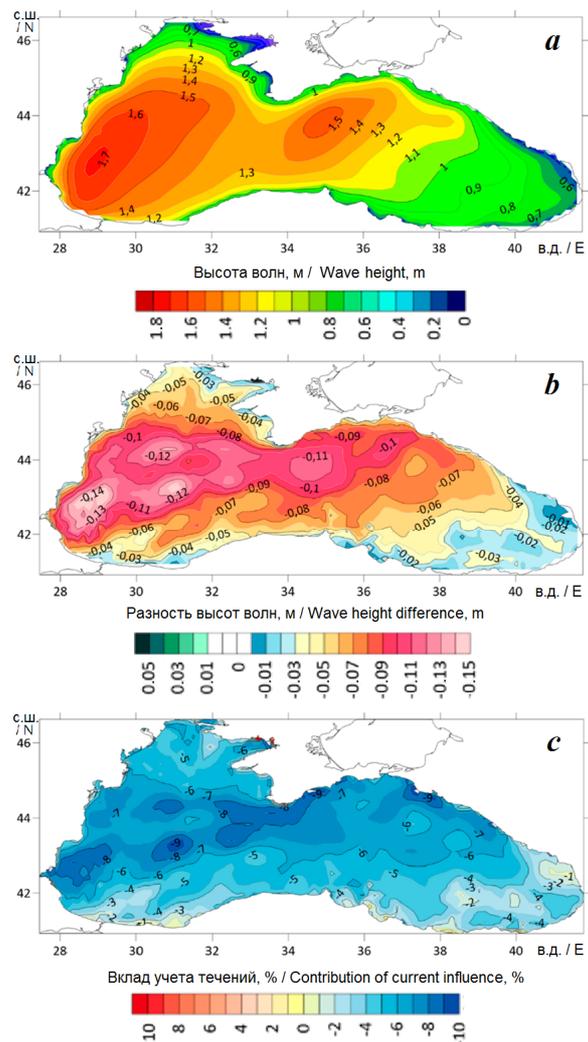


Рис. 5. Среднемесячные характеристики: *a* – высоты волн без учета течений, *b* – разностей высот и *c* – процентного вклада учета течений в феврале 2015 г

Fig. 5. Average monthly characteristics of *a* – wave height without current influence, *b* – height difference and *c* – contribution of current influence in percentage, February 2015

Влияние течений прослеживается в основном при высоте волн более 1 м, при этом скорость ветра составляет 7–10 м/с. Ветер в свою очередь порождает дрейфовое течение, сонаправленное с волнами.

Главное звено циркуляции, ОЧТ, слабо выделяется на картах разностей, осредненных за год или сезон, так как струя достаточно изменчива и статистически при осреднении размывается по пространству. В то же время дрейфовое течение в приповерхностном слое почти всегда возникает при наличии ветра, поэтому статистически на картах даже в струе ОЧТ течения и волны сонаправлены.

Влияние поля течений на средние значения параметров ветровых волн имеет следующие пространственные особенности:

- по всей протяженности центральной полосы моря (от 43° до 46° с. ш.), кроме восточной части, в течение всего периода исследования средние значения высот уменьшались при учете влияния циркуляции;
- наибольшие значения разностей с учетом течений и без него характерны для западной и северо-восточной частей Черного моря;
- при учете влияния течений высота волн увеличивается на юге моря, в его восточной части и на северо-западном шельфе. Однако положительный вклад невелик.

При учете циркуляции среднегодовые высоты волн могут уменьшаться до –0.1 м и увеличиваться до 0.04 м.

Наибольшее влияние на параметры волн учет течений оказывает в зимние месяцы, наименьшее – в конце весны и летом. Наибольшие значения разностей высот волн соответствуют 6–10 % среднемесячных значений высот волн. В среднем течения меняют высоту волн на 2–4 %, в зависимости от сезона и расположения.

Исходя из того, что влияние течений в Черном море на высоту волн незначительно, а ошибки при моделировании течений обычно велики, можно сделать предположение, что учет течений при моделировании волнения для Черного моря не обязателен. Однако необходимо провести дополнительные оценки качества воспроизведения волн на основе инструментальных измерений при моделировании с учетом течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боуден К.* Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 324 с.
2. *Rusu L., Soares C. G.* Modelling the wave–current interactions in an offshore basin using the SWAN model // *Ocean Engineering*. 2011. Vol. 38, iss. 1. P. 63–76. doi:10.1016/j.oceaneng.2010.09.012
3. The impact of surface currents and sea level on the wave field evolution during St. Jude storm in the eastern Baltic Sea / *M. Viitak [et al.]* // *Oceanologia*. 2016. Vol. 58, iss. 3. P. 176–186. doi:10.1016/j.oceano.2016.01.004
4. *Liu H., Xie L.* A numerical study on the effects of wave–current–surge interactions on the height and propagation of sea surface waves in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989 // *Continental Shelf Research*. 2009. Vol. 29, iss. 11–12. P. 1454–1463. doi:10.1016/j.csr.2009.03.013
5. *Rusu L., Bernardino M., Soares C. G.* Modelling the influence of currents on wave propagation at the entrance of the Tagus estuary // *Ocean Engineering*. 2011. Vol. 38, iss. 10. P. 1174–1183. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.05.016

6. Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet / G. Dodet [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. Vol. 118, iss. 3. P. 1587–1605. doi:10.1002/jgrc.20146
7. *Rusu E.* Wave energy assessments and modeling of wave–current interactions in the Black Sea // *Macro-engineering Seawater in Unique Environments* / Eds. V. Badescu, R. B. Cathcart. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. P. 213–259. doi:10.1007/978-3-642-14779-1_10
8. *Мысленков С. А., Столярова Е. В., Архипкин В. С.* Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Информационный сборник № 44. Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М. ; Обнинск : ИГ–СОЦИН, 2017. С. 126–135. URL: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb44/sb44.pdf> (дата обращения: 11.11.2020).
9. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study / V. S. Arkhipkin [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14, iss. 11. P. 2883–2897. doi:10.5194/nhessd-2-1193-2014
10. *Akpinar A., de León S. P.* An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea // *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 2016. Vol. 73. P. 61–75. doi:10.1016/j.dynatmoce.2015.12.002
11. *Van Vledder G. P., Akpinar A.* Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields // *Applied Ocean Research*. 2015. Vol. 53. P. 161–178. doi:10.1016/j.apor.2015.08.006
12. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море / И. М. Кабатченко [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 5. С. 61–71.
13. *Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // *Доповіді НАН України*. 2011. № 8. С. 108–112.
14. *Rusu E., Rusu L., Guedes S. C.* Prediction of extreme wave conditions in the Black Sea with numerical models // *Proceedings of the 9th International workshop on wave hindcasting and forecasting*, September 24–29, 2006, Victoria, Canada. Victoria, Canada, 11 p. URL: <http://www.waveworkshop.org/9thWaves/Papers/Rusu.pdf> (date of access: 11.11.2020).
15. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. doi:10.1029/98JC02622
16. Система мониторинга ветрового волнения в прибрежной зоне Черного моря на основе радиолокации, прямых наблюдений и моделирования: первые результаты / Д. В. Ивонин [и др.] // *Проблемы региональной экологии*. 2013. № 4. С. 172–183.
17. *Мысленков С. А., Шестакова А. А., Торопов П. А.* Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря с использованием различного ветрового форсинга // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 10. С. 61–71.
18. *Le Traon P. Y., Dibarboure G., Ducet N.* Use of a high-resolution model to analyze the mapping capabilities of multiple-altimeter missions // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2001. Vol. 18, iss. 7. P. 1277–1288. doi:10.1175/1520-0426(2001)018<1277:UOAHRM>2.0.CO;2
19. Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters / Pascual A. [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2006. Vol. 33, iss. 2. L02611. doi:10.1029/2005GL024633

20. Kubryakov A. A., Stanichny S. V. Mean dynamic topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data // *Ocean Science*. 2011. Vol. 7, iss. 6. P. 745–753. doi:10.5194/os-7-745-2011
21. Gippius F. N., Myslenkov S. A. Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 218. 108199. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.108199
22. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
23. Akpinar A., Bingölbali B., Van Vledder G. P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 126. P. 276–298. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.09.026
24. Тутов В. Б., Прокопов О. И. Характерные черты динамики и структуры вод прибрежной зоны Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2002. № 5. С. 59–67.

Об авторах:

Рыбалко Александра Дмитриевна, аспирант кафедры океанологии, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1), **ORCID ID: 0000-0001-8509-9940**, ryb.aleksandra1@gmail.com

Мысленков Станислав Александрович, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: E-5811-2014**, **Scopus Author ID: 47561699800**, stasocean@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Рыбалко Александра Дмитриевна – анализ результатов моделирования, оценки вклада течений, написание текста статьи.

Мысленков Станислав Александрович – расчет параметров волнения, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Bowden, K.F., 1984. *Physical Oceanography of Coastal Waters*. Somerset: John Wiley and Sons Inc., 302 p. <https://doi.org/10.4319/lo.1985.30.2.0449>
2. Rusu, L. and Soares, C.G., 2011. Modelling the Wave–Current Interactions in an Offshore Basin using the SWAN Model. *Ocean Engineering*, 38(1), pp. 63–76. doi:10.1016/j.oceaneng.2010.09.012
3. Viitak, M., Maljutenko, I., Alari, V., Suursaar, Ü., Rikka, S. and Lagemaa, P., 2016. The Impact of Surface Currents and Sea Level on the Wave Field Evolution during St. Jude Storm in the Eastern Baltic Sea. *Oceanologia*, 58(3), pp. 176–186. doi:10.1016/j.oceano.2016.01.004
4. Liu, H. and Xie, L., 2009. A Numerical Study on the Effects of Wave–Current–Surge Interactions on the Height and Propagation of Sea Surface Waves in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989. *Continental Shelf Research*, 29(11–12), pp. 1454–1463. doi:10.1016/j.csr.2009.03.013
5. Rusu, L., Bernardino, M., Soares, C.G., 2011. Modelling the Influence of Currents on Wave Propagation at the Entrance of the Tagus Estuary. *Ocean Engineering*, 38(10), pp. 1174–1183. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.05.016
6. Dodet, G., Bertin, X., Bruneau, N., Fortunato, A.B., Nahon, A. and Roland, A., 2013. Wave-Current Interactions in a Wave-Dominated Tidal Inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3), pp. 1587–1605. doi:10.1002/jgrc.20146

7. Rusu, E., 2010. Wave Energy Assessments and Modeling of Wave–Current Interactions in the Black Sea. In: V. Badescu and R. Cathcart, eds., 2010. *Macro-Engineering Seawater in Unique Environments. Environmental Science and Engineering*. Berlin; Heidelberg: Springer, pp. 213–259. doi:10.1007/978-3-642-14779-1_10
8. Myslenkov, S.A., Stolyarova, E.V. and Arkhipkin, V.S., 2017. [The System of Forecast of Wind Waves in the Black Sea with Refinement in Shelf Areas]. In: A. A. Alekseeva, ed., 2017. [*The Information Letter no. 44. The Results of Testing New and Improved Technologies, Models and Methods of Hydrometeorological Forecasting*]. Moscow; Obninsk: IG-SOTSIN, pp. 126–135 (in Russian).
9. Arkhipkin, V.S., Gippius, F.N., Koltermann, K.P. and Surkova, G.V., 2014. Wind Waves in the Black Sea: Results of a Hindcast Study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), pp. 2883–2897. doi:10.5194/nhessd-2-1193-2014
10. Akpinar, A. and de León, S.P., 2016. An Assessment of the Wind Re-Analyses in the Modelling of an Extreme Sea State in the Black Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 73, pp. 61–75. doi:10.1016/j.dynatmoce.2015.12.002
11. Van Vledder, G.P. and Akpinar, A., 2015. Wave Model Predictions in the Black Sea: Sensitivity to Wind Fields. *Applied Ocean Research*, 53, pp. 161–178. doi:10.1016/j.apor.2015.08.006
12. Kabatchenko, I.M., Matushevskii, G.V., Reznikov, M.V. and Zaslavskii, M.M., 2001. Numerical Modeling of Wind and Waves in a Secondary Cyclone at the Black Sea. *Russian Meteorology and Hydrology*, (5), pp. 45–53.
13. Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V., 2011. Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (8), pp. 108–112 (in Russian).
14. Rusu, E., Rusu, L. and Guedes, S.C., 2006. Prediction of Extreme Wave Conditions in the Black Sea with Numerical Models. In: WMO, 2006. *Proceedings of the 9th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. September 24–29, 2006, Victoria, Canada*. Victoria, Canada, 11 p. Available at: <http://www.waveworkshop.org/9thWaves/Papers/Rusu.pdf> [Accessed: 11.11.2020].
15. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H., 1999. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions: 1. Model Description and Validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), pp. 7649–7666. doi:10.1029/98JC02622
16. Ivonin, D.V., Myslenkov, S.A., Chernyshov, P.V., Arkhipkin, V.S., Telegin, V.A., Kuklev, S.B., Chernyshova, A.Y. and Ponomarev A.I., 2013. Monitoring System of Wind Waves in Coastal Area of the Black Sea using Coastal Radars, Direct Wave Measurements and Modeling: First Results. *Regional Environmental Issues*, (4), pp. 172–183 (in Russian).
17. Myslenkov, S.A., Shestakova, A.A. and Toporov, P.A., 2016. Numerical Simulation of Storm Waves near the Northeastern Coast of the Black Sea. *Russian Meteorology and Hydrology*, (10), pp. 706–713. doi: 10.3103/S106837391610006X
18. Le Traon, P.Y., Dibarboure, G. and Ducet, N., 2001. Use of a High-Resolution Model to Analyze the Mapping Capabilities of Multiple-Altitude Missions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(7), pp. 1277–1288. doi:10.1175/1520-0426(2001)018<1277:UOAHRM>2.0.CO;2
19. Pascual, A., Fauge`re, Y., Larnicol, G. and Le Traon, P.-Y., 2006. Improved Description of the Ocean Mesoscale Variability by Combining Four Satellite Altimeters *Geophysical Research Letters*, 33(2), L02611. doi:10.1029/2005GL024633
20. Kubryakov, A.A. and Stanichny, S.V., 2011. Mean Dynamic Topography of the Black Sea, Computed from Altimetry, Drifter Measurements and Hydrology Data. *Ocean Science*, 7(6), pp. 745–753. doi:10.5194/os-7-745-2011

21. Gippius, F.N. and Myslenkov, S.A., 2020. Black Sea Wind Wave Climate with a Focus on Coastal Regions. *Ocean Engineering*, 218, 108199. doi:10.1016/j.oceaneng.2020.108199
22. Ivanov, V.A. and Belokopytov, V.N., 2013. *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 210 p.
23. Akpınar, A., Bingölbali, B. and Van Vledder, G.P., 2016. Wind and Wave Characteristics in the Black Sea based on the SWAN Wave Model Forced with the CFSR Winds. *Ocean Engineering*, 126, pp. 276–298. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.09.026
24. Titov, V.B. and Prokopov, O.I., 2002. Typical Characteristics of the Dynamics and Structure of Waters in the Coastal Zone of the Black Sea. *Russian Meteorology and Hydrology*, (5), pp. 45–51.

About the authors:

Aleksandra D. Rybalko, postgraduate student, Oceanology Department, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-8509-9940**, *ryb.aleksandra1@gmail.com*

Stanislav D. Myslenkov, Senior Research Associate, Lomonosov Moscow State University (1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ResearcherID: E-5811-2014**, **Scopus Author ID: 47561699800**, *stasocan@gmail.com*

Contribution of the authors:

Aleksandra D. Rybalko – modeling result analysis, currents contribution assessment, writing the article

Stanislav D. Myslenkov – simulation of wave parameters, result discussion, writing the article

All the authors have read and approved the final manuscript.