

Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря

Б. В. Дивинский^{1, *}, А. А. Кубряков², Р. Д. Косьян¹

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

²Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: divin@ocean.ru

Поступила в редакцию 20.02.2020 г., после доработки – 30.03.2020 г.

Цель. Цель работы – исследование климатических тенденций в колебаниях среднегодовых и среднемесячных полей значительных высот волн смешанного волнения, ветрового волнения, зыби, а также скоростей ветра по всей акватории Черного моря.

Методы и результаты. На основе численных расчетов модели *MIKE 21 SW* получены поля значительных высот волн смешанного волнения, ветрового волнения и зыби за период с 1979 по 2018 г. Долговременный анализ полей скорости ветра проведен на основе данных атмосферного реанализа *ERA-Interim*. Статистическими методами оценены линейные климатические тренды в колебаниях среднегодовых и среднемесячных значительных высот волн и средних скоростей ветра.

Выводы. Основной особенностью климатической изменчивости среднегодовых полей значительных высот волн на акватории Черного моря является хорошо выраженная пространственная неоднородность. В западной части моря наблюдается снижение штормовой активности. Для восточной части характерно увеличение значительных высот волн. Статистически достоверные положительные тренды в колебаниях значительных высот волн наблюдаются в широкой прибрежной полосе от юго-восточного побережья Крыма до побережья Грузии. За последние 40 лет волны зыби усилились в районе турецкого побережья восточнее Синопа и на морской акватории, прилегающей к Керченскому проливу. Наибольший рост среднемесячных высот волн смешанного волнения наблюдается в марте в восточной части моря и составляет 0,5–0,6 см/год. Этому значению соответствует рост средних скоростей ветра на ~0,025 м/с/год. В ноябре наблюдается снижение штормовой активности в западной части моря, что выражается в уменьшении среднемесячных значительных высот волн на 0,8 см/год. Уменьшение среднегодовых высот волн со скоростями ~0,08 см/год наблюдается в юго-западной части Черного моря. Вся восточная часть моря подвержена усилению штормовой активности с увеличением среднегодовых высот волн в полях смешанного и ветрового волнения на 0,10–0,15 см/год. Указанные особенности являются отражением климатических колебаний средних скоростей ветра с характерным ослаблением ветра в западной части моря (0,010–0,015 м/с/год) и усилением в восточной (0,015–0,020 м/с/год).

Ключевые слова: математическое моделирование, модель *DHI MIKE 21 SW*, ветровые волны, зыбь, климат, тренды.

Благодарности: постановка задачи выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-05-80035, анализ экспериментальных данных – благодаря финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-45-230004 и 20-05-00009), математическое моделирование и вычислительная часть – при поддержке грантов РФФИ (проекты № 19-05-00041 и 19-45-230002). Анализ результатов выполнен в рамках программы № 0149-2019-0014 и проекта РНФ № 20-17-00060. Анализ изменчивости ветровых характеристик выполнен в рамках госзадания № 0555-2019-0001.

Для цитирования: Дивинский Б. В., Кубряков А. А., Косьян Р. Д. Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 367–382. doi:10.22449/0233-7584-2020-4-367-382

© Дивинский Б. В., Кубряков А. А., Косьян Р. Д., 2020

Interannual Variability of the Wind-Wave Regime Parameters in the Black Sea

B. V. Divinsky^{1, *}, A. A. Kubryakov², R. D. Kosyan¹

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

²*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

*e-mail: divin@ocean.ru

Purpose. The paper is aimed at studying climatic trends in variability of the average annual and average monthly fields of significant wave heights of the mixed and wind waves, swell and the wind speeds in the Black Sea region.

Methods and Results. Based on the *MIKE 21 SW* numerical model, the significant wave heights' fields of the mixed and wind waves, and also swell were obtained for the period from 1979 to 2018. Long-term wind velocity changes were analyzed using the *ERA-Interim* reanalysis data for the same period. Linear climatic trends in the average annual and average monthly variability of the significant wave heights and the average wind speeds were evaluated by the statistical methods.

Conclusions. The main feature of climatic variability of the significant wave height fields in the Black Sea is the pronounced spatial heterogeneity. In the western part of the sea, decrease in storm activity is observed. The eastern part is characterized by increase of the average significant wave heights. Statistically significant positive trends in fluctuations of the significant wave heights are observed in the coastal area from the Crimea southeast coast to the Georgia coast. Over the past 40 years, swell waves have intensified near the Turkish coast (to the east of Sinop) and near the Kerch Strait. The largest increase of the average monthly heights of mixed waves is observed in the eastern part of the sea in March and amounts 0.5–0.6 cm/year. This corresponds to increase of the average wind speeds by ~0.025 m/s/year. In November, decrease of storm activity is observed in the western part of the sea that is expressed in diminution of the monthly average values of the significant wave heights by 0.8 cm/year. Decrease of the average annual wave heights by ~0.08 cm/year is observed in the south-western part of the Black Sea. On the contrary, the whole eastern part of the sea is subject to the increased storm activity accompanied by growth of the average annual wave heights in the fields of the mixed and wind waves by 0.10–0.15 cm/year. The above-mentioned features reflect climatic variability of the average wind speeds, which are characterized by wind weakening in the western part of the sea (0.010–0.015 m/s/year) and its amplification in the sea eastern part (0.015–0.020 m/s/year).

Keywords: mathematical modeling, model *DHI MIKE 21 SW*, wind waves, swell, climate, trends.

Acknowledgements: the problem was set within the framework of the RFBR project No. 18-05-80035, experimental data were analyzed due to the RFBR financial support (projects No. 19-45-230004 and 20-05-00009); mathematical modeling and calculations were carried out with support of the RFBR grants (projects No. 19-05-00041 and No. 19-45-230002). The results were analyzed within the framework of program No. 0149-2019-0014 and the RSF project No. 20-17-00060. Variability of wind characteristics was analyzed within the framework of state task No. 0555-2019-0001.

For citation: Divinsky, B.V., Kubryakov, A.A. and Kosyan, R.D., 2020. Interannual Variability of the Wind-Wave Regime Parameters in the Black Sea. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(4), pp. 337-351. doi:10.22449/1573-160X-2020-4-337-351.

Введение

Ветровое волнение является одним из основных факторов, определяющих гидро- и литодинамические процессы в береговой зоне моря, экологическое состояние прибрежных вод, а также их рекреационный потенциал. Пространственные поля поверхностных волн формируются в результате воздействия атмосферных образований разной природы, интенсивности и масштаба. Черное море, несмотря на относительную замкнутость и сравнительно небольшие размеры, является частью глобальной климатической системы.

В настоящее время сам факт перестройки глобальной климатической системы (другими словами, изменения климата) никем не оспаривается. Вместе с тем механизмы трансформаций, а также наличие (или отсутствие) тенденций в длиннопериодных колебаниях, наблюдаемых в конкретном регионе, являются предметами интенсивных исследований и обсуждений.

Современным и крайне эффективным методом исследования ветрового волнения является математическое моделирование, в основе которого лежит численное решение уравнения баланса волновой энергии, отражающее физические закономерности на этапах зарождения, трансформации и затухания поверхностного волнения. В мировой практике наибольшее распространение получили модели *WAM* [1], *WAVEWATCH* [2], *SWAN* [3], *DHI MIKE 21 SW* [4]. Важнейшие технические аспекты моделирования подробно изложены в работе [5]. Спектральные волновые модели с успехом применяются для исследований волновых процессов в широком диапазоне пространственно-временной изменчивости, а также служат надежным инструментом оперативного прогноза ветрового волнения. В связи с этим укажем на работу [6], в которой приведены этапы адаптации спектральной модели *SWAN* для учета особенностей ее функционирования в Черноморском центре морских прогнозов.

Исследованию волнового климата на Черном море посвящено множество работ (см., например, [7–17]). В них использовались различные модели ветрового волнения, те или иные исходные поля приземного ветра, проводились численные эксперименты с настроечными параметрами моделей. Список работ, естественно, гораздо шире, но в большинстве своем исследования носят региональный характер или анализ основан на ограниченных (по времени) исходных данных.

Можно отметить несколько работ, в которых исследуется изменчивость параметров ветрового волнения за климатический отрезок времени для всей акватории Черного моря. В работе [18] проведен анализ пространственно-временной изменчивости волнового климата Черного моря за период с 1979 по 2015 г. Основным вывод, сделанный авторами, следующий: на акватории Черного моря за последние годы наблюдается перераспределение волновой энергии по направлениям ее распространения. В западной части моря это перераспределение отражается в увеличении доли волнения северо-восточного направления и уменьшении вклада волнения северо-западного направления. В восточной части моря растет вклад ветровых волн юго-восточных румбов с ослаблением волнения северо-западного направления.

В статье [19] проанализированы данные за период с 1979 по 2009 г. и приведены карты пространственных распределений среднемесячных показателей, а также коэффициентов вариации мощностей ветрового волнения. Анализ трендовых составляющих выполнен для девяти точек, выбранных вдоль побережья Черного моря, при этом статистически значимых климатических трендов не обнаружено. Исследованиям волнового климата западной части Черного моря посвящена статья [20]. Ее автор приходит к аналогичному выводу: в колебаниях мощности ветрового волнения (по крайней мере, для рассматриваемого региона) никаких значимых тенденций не наблюдается.

В статье [21] изложены результаты исследований пространственной изменчивости длиннопериодных колебаний основных параметров ветрового волнения на акватории Черного моря, а именно средних значительных высот волн, а также характеристик экстремального волнения, в качестве которых выступают 95%-ные квантили распределений значительных высот. Основной вывод, сделанный в статье: среднегодовые показатели значительных высот волн увеличиваются в восточной части Черного моря (до 1,6% в год), в то время как в западной части наблюдается отрицательная тенденция (до -1,2% в год). Отмечено также, что в случаях сильного и экстремального волнения оценки линейных трендов еще больше.

В работе [22] исследуется климатическая изменчивость потоков волновой энергии в южной и юго-западной частях Черного моря. Сделан вывод о том, что для всех контрольных точек наблюдается уменьшение средних и увеличение максимальных мощностей волн.

Результатом работы [23] стал анализ климатических полей мощностей ветрового волнения и зыби по всей акватории Черного моря за период с 1979 по 2018 г. Установлено, что существует выраженная тенденция к увеличению средней мощности волнения: для ветровых волн – в северо-восточной и частично центральной частях моря; для зыби – в восточной. В поле смешанного волнения наблюдается рост средней мощности в северо-восточной части моря. В западной части моря явные тенденции в колебаниях средней мощности волнения отсутствуют.

Можно заключить, что в настоящее время отсутствует единое представление о климатических трендах в колебаниях параметров ветрового волнения на Черном море.

Целью настоящей работы является проведение дополнительных исследований климатических колебаний параметров поверхностного волнения и ветра на Черном море и выявление возможных трендовых составляющих.

Отметим еще, что в структуре реального поверхностного волнения выделяются, как правило, два основных компонента: ветровое волнение, непосредственно связанное с локальным ветровым полем, и волны зыби, распространяющиеся вне зон генерации волнения (или же движущиеся с фазовой скоростью, превышающей скорость ветра). Другими словами, энергетический спектр морского волнения формируется как результат взаимодействия нескольких волновых систем. При этом представляет интерес получение отдельных волновых характеристик для каждого из компонентов волнения. Также отметим, что, в отличие от открытого океана, где возможно одновременное присутствие нескольких различных систем волн зыби, характеристики зыби на Черном море обусловлены ограниченными географическими размерами и замкнутостью акватории моря. По этой причине мы не ставим задачу подробной детализации и вкладываем в понятие «зыбь» все поверхностное волнение, направление распространения которого не согласуется с генеральным направлением ветра.

Определим основные задачи исследования:

- получение климатических полей значительных высот волн смешанного волнения, ветрового волнения и зыби по всей акватории Черного моря за период с 1979 по 2018 г.;

- определение возможных трендов в климатических колебаниях значительных высот ветровых волн, волн зыби и смешанного волнения;
- оценка значений климатических трендов в колебаниях средних скоростей ветра на акватории Черного моря.

Основной метод исследований – математическое моделирование.

Описание модели

В настоящей работе используется спектральная волновая модель *MIKE 21 SW* Датского гидравлического института (*Danish Hydraulic Institute, DHI*) [4]. Модель реализует основные физические механизмы зарождения, трансформации и затухания ветрового волнения, включая начальный рост волн под воздействием приземного ветра, нелинейные внутриволновые взаимодействия, диссипацию энергии волн вследствие забурунивания, донного трения и обрушения, рефракцию и дифракцию волнового поля, взаимодействие поверхностного волнения и течений.

Расчетная сетка покрывает всю акваторию Черного и Азовского морей и состоит из 20 тысяч расчетных элементов (рис. 1).

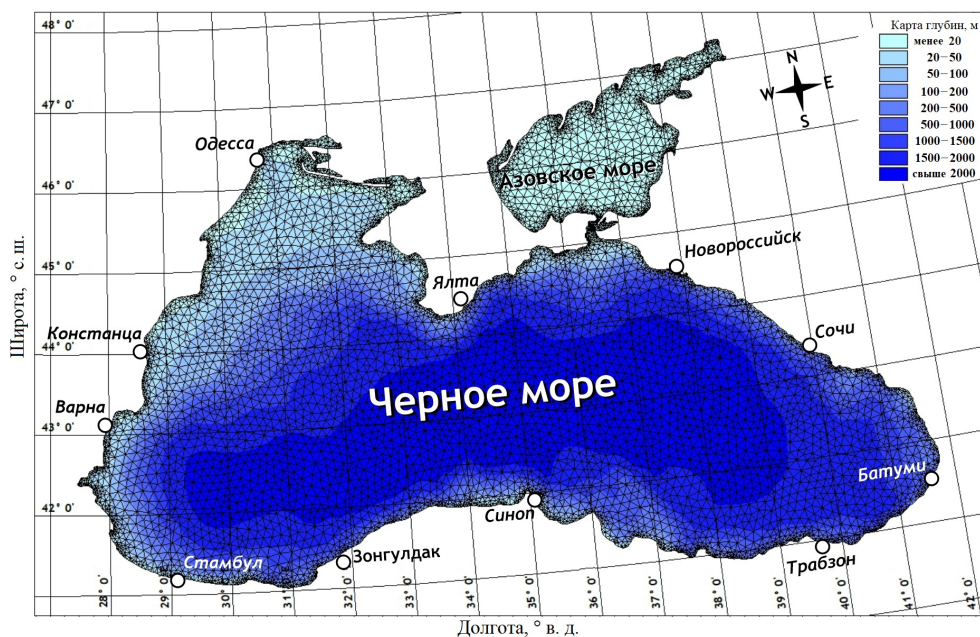


Рис. 1. Расчетная сетка и батиметрическая карта Черного и Азовского морей

Fig. 1. Calculation grid and bathymetric map of the Black and Azov seas

Отметим основные морфологические особенности Черного моря. Большую часть моря занимает глубоководная котловина с максимальными глубинами, превышающими 2000 м. Северо-западная часть моря обладает широкой шельфовой полосой протяженностью до 200 км. Крутой континентальный склон и шельф, не превышающий 20 км, характерен для южного и восточного побережий.

Несмотря на то что мелководное Азовское море включено в общую расчетную сетку, полученные для него результаты не вполне корректны, поскольку акватория моря, как правило, с ноября по март характеризуется наличием ледяного покрова. Учет этого обстоятельства составит предмет дальнейших исследований.

Спектральная модель оптимизирована под задачу разделения составляющих поверхностного волнения на ветровое волнение и зыбь.

Отметим основные характеристики модели:

- 50 спектральных частот распределены в диапазоне периодов от 1,6 до 17,3 с, с использованием соотношения $f_n = f_0 C^n$ ($f_0 = 0,055$ Гц, $C = 1,05$, $n = 1, 2, \dots, 50$);
- количество дискретных направлений равно 32, т. е. разрешение модели по направлениям составляет $11,25^\circ$;
- разделение компонент волнения производится с использованием критерия, учитывающего «возраст» волн.

Настройка модели *MIKE 21 SW* выполнена с использованием результатов разнообразных натуральных исследований, проведенных по всей акватории Черного и Азовского морей в широком диапазоне глубин и условий волнообразования. Для верификации модели привлечены данные экспериментов, проведенных с помощью волнографов *Datawell Waverider*, струнных волнографов, установленных на стационарных морских платформах, приборов *ADCP*, а также спутниковых измерений (альтиметрия). Результаты верификации модели подробно изложены в работах [18, 24].

В качестве исходных полей ветра используются данные глобального атмосферного реанализа *ERA-Interim*, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (URL: <http://apps.ecmwf.int>). Рассматриваемая область ограничена координатами: по широте – 400° и 470° с. ш., по долготе – 270° и 420° з. д. Пространственное разрешение полей ветра одинаково по широте и долготе и составляет 0,250, шаг по времени – 3 ч. Данные *ERA-Interim* для Черного моря были верифицированы в работе [25] на основе сопоставления с контактными измерениями на газодобывающей платформе «Голицыно-4».

Результаты

В результате проведенной работы получен массив данных, состоящий из полей параметров поверхностного волнения на Черном море с временным шагом 1 ч и охватывающий период в 40 лет (с 1979 по 2018 г.) Из общего массива выбираются интересующие нас поля значительных высот ветровых волн, зыби и смешанного волнения.

Анализ возможных трендовых составляющих в межгодовых колебаниях пространственных полей значительных высот волн выполнен по методике, подробно изложенной в работе [26].

Данная процедура реализует непараметрический тест Манна – Кендалла. Преимущество метода заключается в том, что он не требует знания закона распределения исходных величин и может учитывать неравномерность временной шкалы и пропуски в имеющихся данных.

Метод рассматривает три основные статистические оценки:

- статистика Манна – Кендалла (S) (являет собой сумму разностей между последовательными величинами),
- доверительный уровень (CF),
- коэффициент вариации (COV).

Сочетание указанных трех метрик позволяет выявить трендовые составляющие в исходных данных, а также оценить знак и статистическую значимость тенденций. Интерпретация результатов представляет собой вероятностную оценку положительного (отрицательного) тренда в колебаниях исследуемого параметра:

- увеличение ($S > 0$ и $CF > 95\%$),
- вероятное увеличение ($S > 0$ и $90\% < CF < 95\%$),
- отсутствие тренда ($(S > 0$ и $CF < 90\%)$ или ($S \leq 0$ and $CF < 90\%$ и $COV \geq 1$)),
- устойчивое состояние ($S \leq 0$ и $CF < 90\%$ и $COV < 1$),
- вероятное уменьшение ($S < 0$ и $90\% < CF < 95\%$),
- уменьшение ($S < 0$ и $CF > 95\%$).

Термины «отсутствие тренда» и «устойчивое состояние» являются авторскими из работы [26]. Будем иметь в виду, что для выработки единых критериев оценок необходимо принять некие фиксированные значения параметров S и CF . Однако бывают ситуации, при которых значение исследуемого параметра очень близко к граничному; при этом общий анализ (в том числе визуальный) в неоднозначных случаях дает возможность уловить общую тенденцию. По этой причине оценку, выраженную формулировкой «отсутствие тренда», будем относить к категории «слабый положительный тренд», а «устойчивое состояние» – к категории «слабый отрицательный тренд».

Для сглаживания эффекта возможных случайных ошибок исходные данные предварительно усреднялись по пространственным координатам, при этом формировалась прямоугольная сетка со сторонами, приблизительно равными 40 км. Процедура трансформации триангуляционной сетки в прямоугольную выполнена методами линейной интерполяции с использованием внутреннего модуля *DHI MIKE*.

Результаты анализа возможных трендов в колебаниях среднегодовых и среднемесячных значительных высот волн для смешанного волнения, а также двух его компонентов (ветрового волнения и зыби) приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

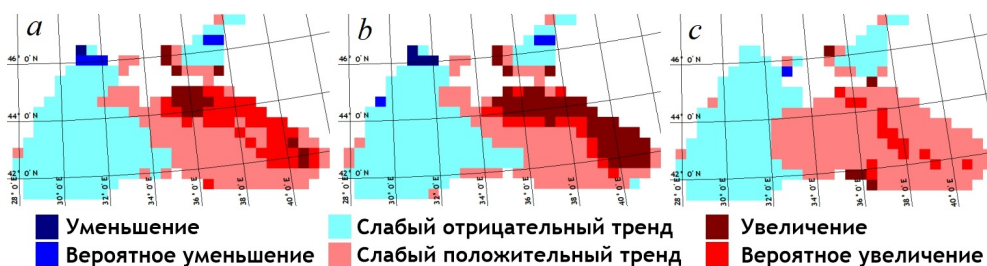
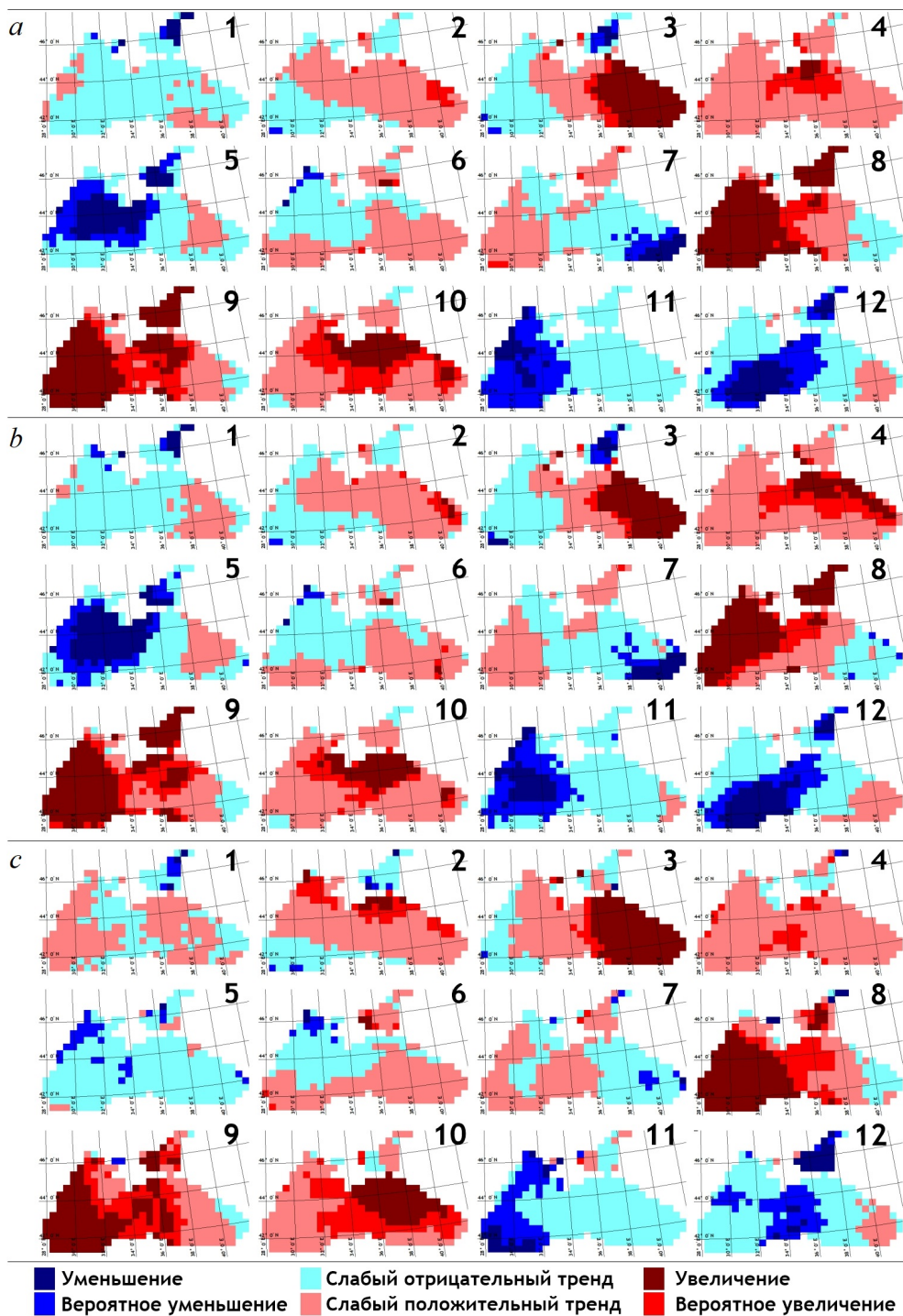


Рис. 2. Вероятностная оценка линейных трендов в колебаниях среднегодовых значительных высот волн смешанного волнения (а), ветрового волнения (b) и зыби (c)

Fig. 2. Probabilistic assessment of linear trends of the average annual significant wave heights of mixed waves (a), wind waves (b) and swell (c)



Р и с. 3. Вероятностная оценка линейных трендов в колебаниях среднемесячных значительных высот волн смешанного волнения (а), ветрового волнения (b) и зыби (с)

Fig. 3. Probabilistic assessment of linear trends in fluctuations of the monthly average significant wave heights of mixed waves (a), wind waves (b) and swell (c)

Как следует из рис. 2, основной особенностью климатической изменчивости среднегодовых полей значительных высот волн на акватории Черного моря является выраженная пространственная или, точнее, зональная неоднородность.

В западной части моря наблюдается некоторое снижение штормовой активности. Для восточной части характерно увеличение среднегодовых значительных высот волн. Статистически достоверные положительные тренды в колебаниях значительных высот волн наблюдаются в широкой прибрежной полосе от юго-восточного побережья Крыма до побережья Грузии. Наиболее заметно подобное увеличение проявляется в поле ветровых волн, для смешанного волнения увеличение трактуется как вероятное. За последние 40 лет волны зыби усилились в районе турецкого побережья восточнее Синопа и на морской акватории, прилегающей к Керченскому проливу. Для Азовского моря (его южной части) характерен климатический рост значительных высот волн, но, как было уже сказано, это заключение можно отнести к оценочному.

Итоговую картину трендов климатических колебаний, отмеченную на рис. 2, формируют внутрисезонные колебания со своими выраженными особенностями (рис. 3).

Как следует из рис. 3, относительную стабильность волновой климат проявляет в январе, феврале и июне. В эти месяцы по всей акватории Черного моря фиксируются незначительные отрицательные и положительные тренды в полях ветрового и смешанного волнения. Исключением является зыбь, усиливающаяся в феврале в северной части моря.

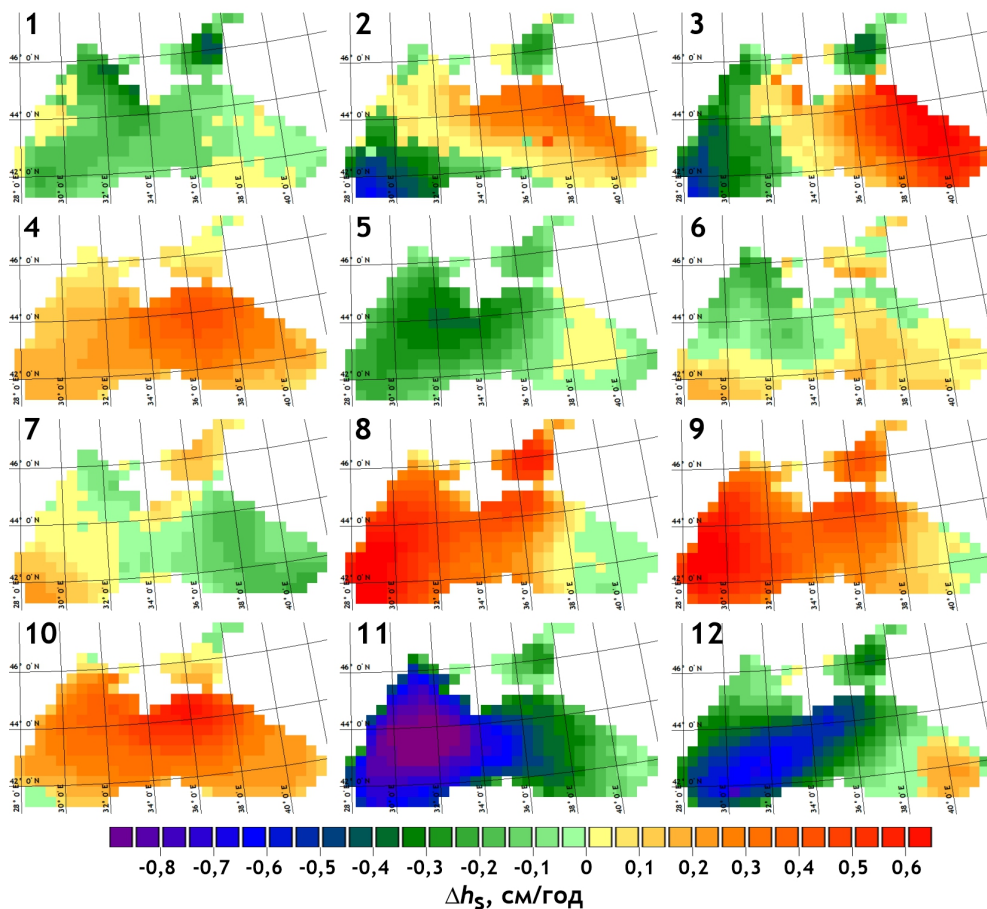
Отметим **статистически значимые** тренды в среднемесячных колебаниях значительных высот волн:

- положительные – в марте (западная часть моря), августе (восточная), сентябре (восточная и центральная), октябре (центральная и юго-восточная);
- отрицательные – в мае (восточная и центральная части), июле (юго-восточная), ноябре (восточная), декабре (юго-западная и центральная).

Таким образом, наблюдается общее снижение штормовой активности в зимние месяцы и ее рост в весенне-осенние. Если сравнивать рис. 2 и 3, то можно заметить, что распределению среднегодовых трендов наиболее близко соответствует картина особенностей среднемесячных трендов в марте.

В абсолютном выражении значения среднемесячных трендов в колебаниях значительных высот волн смешанного волнения (в см/год) представлены на рис. 4. Для сравнения на рис. 5 приведены значения трендов в колебаниях средних скоростей ветра над акваторией Черного моря (в м/с/год).

Как следует из рис. 4, 5 (вполне ожидаемо), пространственные особенности климатических колебаний параметров ветра и поверхностного волнения почти совпадают. Наибольший рост высот волн наблюдается в марте в восточной части моря и составляет 0,5–0,6 см/год. Этому соответствует рост средних скоростей ветра на ~0,025 м/с/год. В ноябре наблюдается снижение штормовой активности в западной части моря, что выражается в уменьшении средних значений значительных высот волн на 0,8 см/год. Это падение (для западной части) настолько ощутимо, что его не компенсирует средний рост высот волн в августе – сентябре.

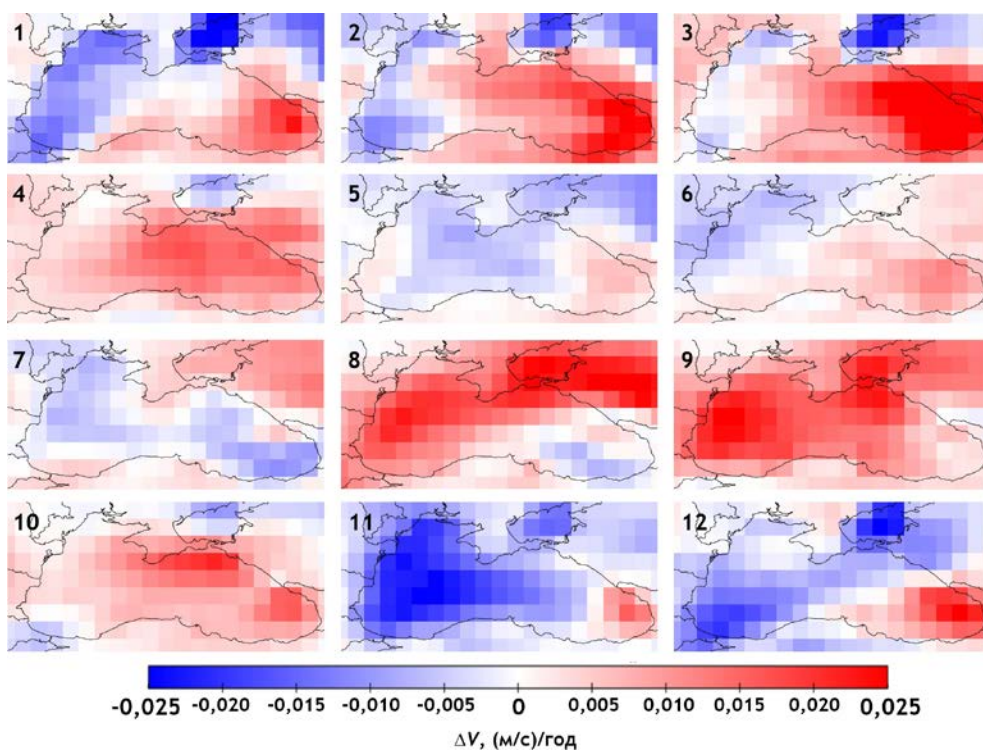


Р и с. 4. Пространственные распределения значений среднемесячных трендов (см/год) в колебаниях значительных высот волн смешанного волнения
Fig. 4. Spatial distributions of the monthly average trends' values (cm/year) in the significant wave height fluctuations of mixed waves

Оценки межгодовых значений трендовых составляющих в колебаниях значительных высот волн смешанного волнения, его компонентов, а также средних скоростей ветра представлены на рис. 6. Напомним, оценки сделаны на основе массива данных за период с 1979 по 2018 г.

Как следует из рис. 6, за последние 40 лет на акватории Черного моря наблюдается ярко выраженное перераспределение волновой энергии. Несмотря на то что юго-западная часть моря по-прежнему является самой бурной, в ней наблюдается уменьшение среднегодовых высот волн со скоростями, примерно равными 0,08 см/год. Вся восточная часть моря подвержена усилению штормовой активности с увеличением среднегодовых высот волн в полях смешанного и ветрового волнения на 0,10–0,15 см/год. Аналогичная картина наблюдается в распределении значений трендов для волн зыби: в западной части происходит уменьшение высот зыби на ~0,05 см/год, в центральной и восточной областях – увеличение на число того же порядка величины. Указанные особенности являются отражением климатических колеба-

ний средних скоростей ветра (см. рис. 4, *d*), для которых характерно ослабление ветра в западной части моря (0,010–0,015 м/с/год) и усиление в восточной (0,015–0,020 м/с/год).



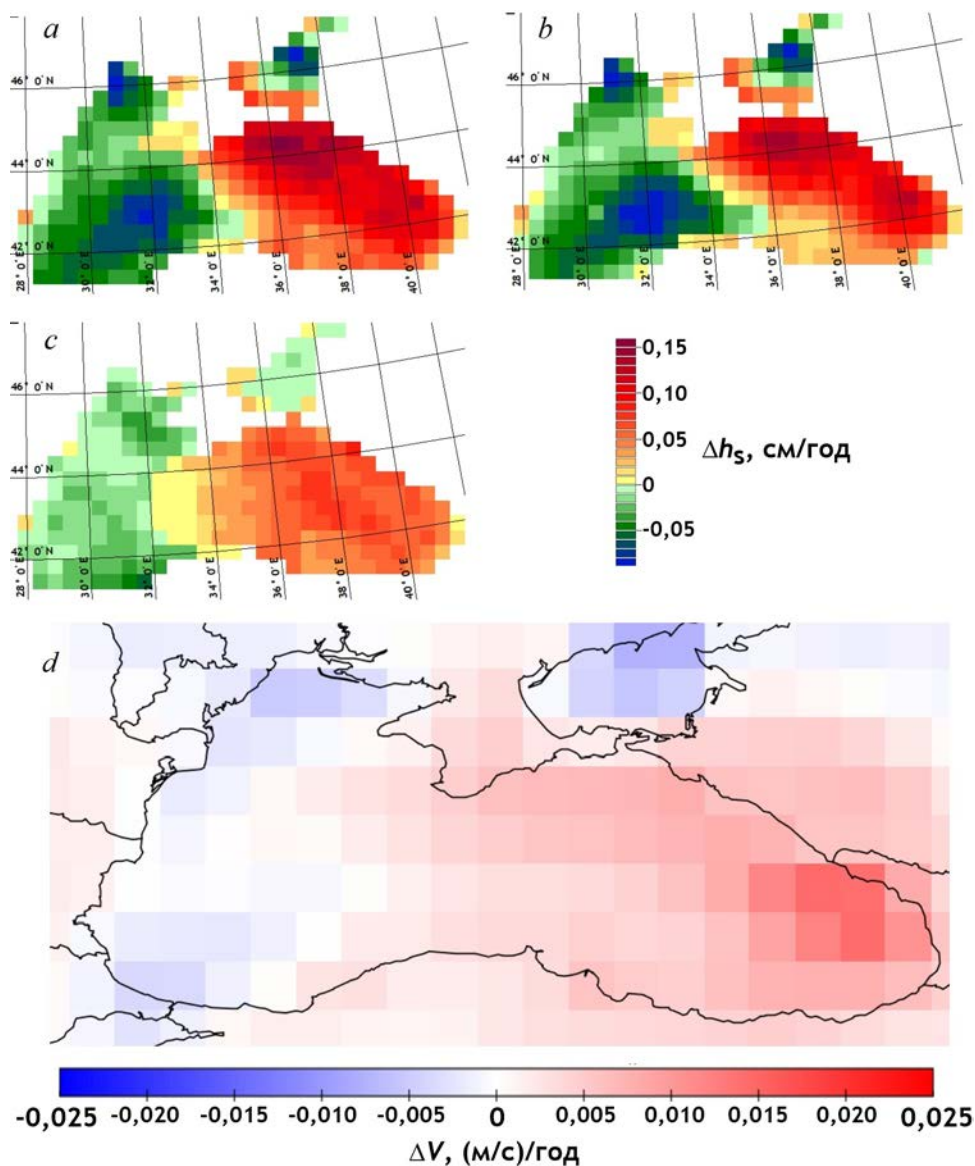
Р и с. 5. Пространственные распределения значений среднемесячных трендов (м/с/год) в колебаниях средних скоростей ветра

F i g. 5. Spatial distributions of the monthly average trends' values (m/s/year) in the average wind speed fluctuations

Необходимое замечание. Строго говоря, анализ значимости линейных климатических трендов, приведенный на рис. 2, позволяет говорить о достоверном увеличении среднегодовых высот волн в восточной части моря. Уменьшение среднегодовых значительных высот волн в западной части, скажем так, выражено, но лишено статистической значимости. Картина, представленная на рис. 2, – итоговая, сглаженная. Если рассматривать отдельные сезоны (месяцы), то находим, что в зимние месяцы с необходимой достоверностью штормовая активность падает, в марте и начале осени – возрастает.

Полученные характеристики трендов достаточно хорошо прослеживаются на графике среднегодовой изменчивости значительной высоты волнения и скорости ветра, осредненных по западной (27,5°–34,0° в. д.) и восточной части (34°–42° в. д.) бассейна (рис. 7).

Кривая хода высоты волнения соответствует изменчивости основного генерирующего волны фактора – ветра. Хорошо заметны рост высот волн и скоростей ветра в восточной части моря и незначительное падение в западной части моря.

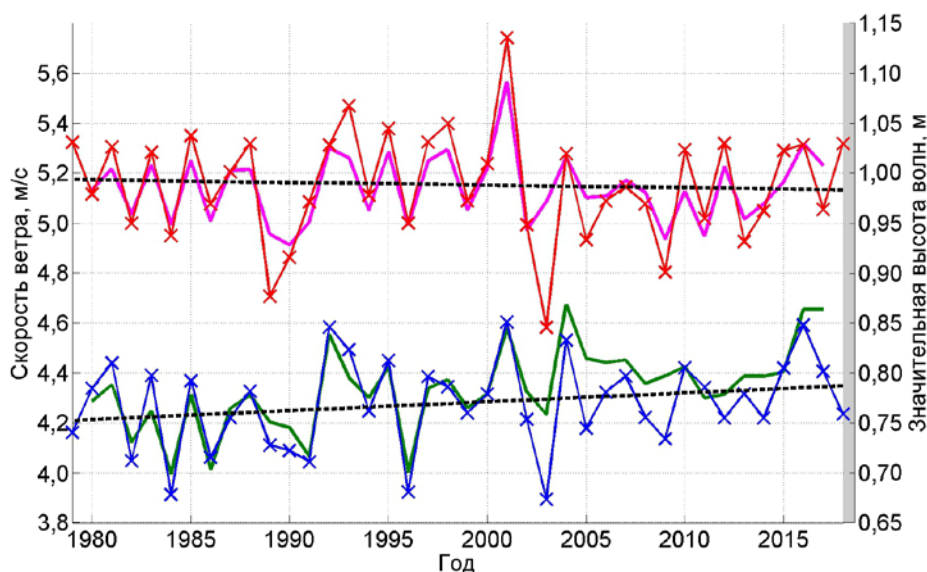


Р и с. 6. Пространственные распределения значений среднегодовых трендов в колебаниях значительных высот волн смешанного волнения (*a*), ветрового волнения (*b*), зыби (*c*), а также средних скоростей ветра (*d*)

F i g. 6. Spatial distributions of the average annual trends' values in fluctuations of the significant wave heights of mixed waves (*a*), wind waves (*b*), swell (*c*), and the average wind speeds (*d*)

Сходные особенности, а именно: рост скорости ветра в восточной части бассейна и ее падение в западной, были получены в работе [27] по данным измерений скаттерометров за 2000–2017 гг. В этой работе такие изменения связываются с долговременной интенсификацией и смещением сибирского антициклона на запад в сторону европейской части России. Подобная трансформация глобальной циркуляции приводит к смене направления доминирующих ветров с северо-восточного на северное в восточной части бассейна

и ослаблению влияния Азорского максимума на западе моря. В то же время наблюдаемое ослабление северо-восточных ветров, определяющих разгон волн в северо-западной части моря, а также северо-западных ветров, связанных с действием Азорского антициклона, приводит к уменьшению энергии ветра в западной части моря [27]. Длиннопериодное уменьшение скорости ветра и высоты волнения в западной части моря фиксируется также по данным контактных измерений. Так, в работах [28, 29] обнаружен отрицательный тренд скорости ветра в северо-западной части моря за период с 1945 по 2005 г.



Р и с. 7. Изменчивость среднегодовых значений значительных высот волн (м) в западной (красная линия) и восточной (синяя линия) части моря и их аппроксимация линейной функцией (черные линии), изменчивость среднегодовой скорости ветра (м/с) в западной (фиолетовая линия) и восточной (зеленая линия) частях моря

Fig. 7. Variability of the average annual values of the significant wave heights (m) in the western (red line) and eastern (blue line) parts of the sea and their approximation by the linear function (black lines); variability of the average annual wind speeds' values (m/s) in the western (purple line) and eastern (green line) parts of the sea

С указанными особенностями хорошо согласуются результаты исследований, приведенные в [30]. В этой работе, основанной на данных численного реанализа атмосферных полей с повышенным пространственным разрешением, сделан вывод о том, что поля ветра и завихренности существенно различаются для западной и восточной половин моря.

Отметим также значительную межгодовую изменчивость осредненных ветро-волновых параметров (рис. 7). Наименьшие скорости ветра и волн в западной части моря отмечались в 1989 и 2003 гг. Наиболее значительное волнение и высокие скорости ветра фиксируются в 2001 г., который характеризовался аномальными явлениями в морской экосистеме. В частности, усиление штормов в 2001 г. вызвало значительный рост глубины верхнего квазиоднородного слоя моря [31] и появление аномального цветения фитопланк-

тона в летний период [32]. Значительная межгодовая изменчивость может вызвать различия в приводимых оценках тренда по литературным данным за разные периоды.

Выводы

В результате проведенной работы получены среднегодовые и среднемесячные климатические поля значительных высот волн смешанного волнения, его основных компонентов (ветрового волнения и зыби), а также скоростей ветра для всей акватории Черного моря за период с 1979 по 2018 г.

Основной особенностью климатической изменчивости среднегодовых полей значительных высот волн на акватории Черного моря является хорошо выраженная пространственная неоднородность. В западной части моря наблюдается некоторое снижение штормовой активности. Для восточной его части характерно увеличение среднегодовых значительных высот волн. Статистически достоверные положительные тренды в колебаниях значительных высот волн наблюдаются в широкой прибрежной полосе от юго-восточного побережья Крыма до побережья Грузии. Наиболее заметно подобное увеличение проявляется в поле ветровых волн. За последние 40 лет волны зыби усилились в районе турецкого побережья восточнее Синопа и на морской акватории, прилегающей к Керченскому проливу.

Вероятностные оценки линейных трендов в колебаниях среднемесячных значительных высот волн смешанного волнения, ветрового волнения и зыби показывают, что положительные статистически значимые тренды характерны для марта (в западной части моря), августа (в восточной), сентября (в восточной и центральной), октября (в центральной и юго-восточной), отрицательные – для мая (в восточной и центральной частях), июля (в юго-восточной), ноября (в восточной), декабря (в юго-западной и центральной). Таким образом, наблюдаются общее снижение штормовой активности в зимние и ее рост в весенне-осенние месяцы.

В абсолютном выражении наибольший рост среднемесячных высот волн смешанного волнения наблюдается в марте в восточной части моря и составляет 0,5–0,6 см/год. Этому соответствует рост средних скоростей ветра на ~0,025 м/с/год. В ноябре наблюдается снижение штормовой активности в западной части моря, что выражается в уменьшении среднемесячных значительных высот волн на 0,8 см/год.

Уменьшение среднегодовых высот волн со скоростями ~0,08 см/год наблюдается в юго-западной части Черного моря. Вся восточная часть моря подвержена усилению штормовой активности с увеличением среднегодовых высот волн в полях смешанного и ветрового волнения на 0,10–0,15 см/год. Аналогичная картина наблюдается в распределении значений трендов для волн зыби: в западной части происходит уменьшение высот зыби на ~0,05 см/год, в центральной и восточной областях – увеличение на число того же порядка. Указанные особенности являются отражением климатических колебаний средних скоростей ветра с характерным ослаблением ветра в западной части моря (0,010–0,015 м/с/год) и усилением в восточной (0,015–0,020 м/с/год).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model / The WAMDI Group // *Journal of Physical Oceanography*. 1988. Vol. 18, iss. 12. P. 1775–1810. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1775:TWMTGO>2.0.CO;2)
2. *Tolman H. L.* A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents // *Journal of Physical Oceanography*. 1991. Vol. 21, iss. 6. P. 782–797. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2)
3. *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. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
4. MIKE 21 Wave Modelling. MIKE 21 Spectral Waves FM: Short description. Horsholm : DHI, 2007. 14 p. URL: https://www.mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/short%20descriptions/mike21_sw_fm_short_description.pdf (date of access: 03.07.2020).
5. Wave modelling – The state of the art / L. Cavaleri [et al.]; The WISE Group // *Progress in Oceanography*. 2007. Vol. 75, iss. 4. P. 603–674. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.05.005>
6. Система оперативного прогноза ветрового волнения Черноморского центра морских прогнозов / Ю. Б. Ратнер [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 5. С. 56–66. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-56-66
7. Variability of the nearshore wave climate in the Eastern part of the Black Sea / Y. Saprykina [et al.] // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. Vol. 176, iss. 8. P. 3757–3768. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02143-1>
8. *Akpınar A., Ponce de León S.* 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. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2015.12.002>
9. *Rusu L.* Assessment of the wave energy in the Black Sea based on a 15-Year hindcast with data assimilation // *Energies*. 2015. Vol. 8, iss. 9. P. 10370–10388. <https://doi.org/10.3390/en80910370>
10. 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. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
11. *Akpınar A., İhsan Kömürçü M.* Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data // *Applied Energy*. 2013. Vol. 101. P. 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.005>
12. *Aydoğan B., Ayat B., Yüksel Y.* Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 57. P. 436–447. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.047>
13. *Galabov V.* On the wave energy potential of the Bulgarian Black Sea Coast // 13th SGEM GeoConference on Water Resources, Forest, Marine and Ocean Ecosystems: SGEM2013 Conference Proceedings, June 16–22, 2013. Varna, Bulgaria, 2013. P. 831–838. doi:10.5593/SGEM2013/BC3/S15.003
14. *Мысленков С. А., Шестакова А. А., Торопов П. А.* Численное моделирование штормового волнения у северо-восточного побережья Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 10. P. 61–71.
15. *Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // *Доповіді Національної академії наук України*. 2011. № 8. С. 108–112.
16. *Rusu E.* Wave energy assessments in the Black Sea // *Journal of Marine Science and Technology*. 2009. Vol. 14, iss. 3. P. 359–372. <https://doi.org/10.1007/s00773-009-0053-6>
17. Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea / Z. Cherneva [et al.] // *Coastal Engineering*. 2008. Vol. 55, iss. 11. P. 881–893. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.028>
18. *Divinsky B. V., Kosyan R. D.* Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // *Continental Shelf Research*. 2017. Vol. 136. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>

19. *Akpınar A., Bingölbali B., Van Vledder G. Ph.* Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations // *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 130. P. 482–497. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.12.023>
20. *Rusu L.* The wave and wind power potential in the western Black Sea // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 139. P. 1146–1158. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.017>
21. *Aydoğın B., Ayat B.* Spatial variability of long-term trends of significant wave heights in the Black Sea // *Applied Ocean Research*. 2018. Vol. 79. P. 20–35. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.001>
22. *Akpınar A., Jafali H., Rusu E.* Temporal variation of the wave energy flux in hotspot areas of the Black Sea // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, iss. 3. 562. <https://doi.org/10.3390/su11030562>
23. *Divinsky B. V., Kosyan R. D.* Climatic trends in the fluctuations of wind waves power in the Black Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2020. Vol. 235. 106577. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106577>
24. *Divinsky B., Kosyan R.* Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // *Oceanologia*. 2018. Vol. 60, iss. 3. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>
25. Сопоставление скорости ветра над Черным морем по спутниковым и метеорологическим данным / А. В. Гармашов [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 3. С. 351–360. doi:10.7868/S0002351516030044
26. MAROS: A Decision Support System for Optimizing Monitoring Plans / J. J. Aziz [et al.] // *Groundwater*. 2003. Vol. 41, iss. 3. P. 355–367. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02605.x>
27. Wind velocity and wind curl variability over the Black Sea from QuikScat and ASCAT satellite measurements / A. Kubryakov [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 224. P. 236–258. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.034>
28. *Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н.* Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 17. С. 225–243.
29. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 2: Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.
30. *Ефимов В. В., Анисимов А. Е.* Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392.
31. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием / А. А. Кубряков [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 449–468. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
32. Non-linearities, regime shifts and recovery: The recent influence of climate on Black Sea chlorophyll / A. McQuatters-Gollop [et al.] // *Journal of Marine Systems*. 2008. Vol. 74, iss. 1–2. P. 649–658. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.06.002>

Об авторах:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, divin@ocean.ru

Кубряков Арсений Александрович, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, arskubr@mhiras.ru

Косьян Рубен Дереникович, заведующий лабораторией геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: C-5154-2014**, rkosyan@hotmail.com