

УДК 551.46

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОЛНОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ВХОДЕ В НОВОРОССИЙСКУЮ БУХТУ

© 2022 г. Б. В. Дивинский<sup>1</sup>, \*, С. Б. Куклев<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия\*e-mail: [divin@ocean.ru](mailto:divin@ocean.ru)

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 08.04.2021 г.

Основная цель представленной работы – анализ волнового климата на входе в Новороссийскую бухту (Черное море) за период с 1979 по 2019 годы. Анализ базируется на результатах математического моделирования, проведенного с помощью современной спектральной волновой модели MIKE 21 SW, ранее верифицированной с привлечением многочисленных данных инструментальных наблюдений за параметрами ветрового волнения в акваториях Черного и Азовского морей. В результате исследований установлено, что средняя мощность штормового волнения на акватории Новороссийской бухты составляет порядка 8 кВт/м. Максимальная мощность колеблется в пределах 50–100 кВт/м, но может достигать до 200 кВт/м и выше. Суммарная продолжительность штормового волнения за один год колеблется в пределах 40–60 суток. Максимальная продолжительность одного шторма может достигать до трех суток, но, в среднем, не превышает двух суток. Средняя продолжительность шторма составляет, как правило, 10–11 часов. Наибольшее число штормов (больше 130) зафиксировано в 2004 г.; в среднем за год наблюдается порядка 100 штормов. За последние несколько десятков лет на акватории Новороссийской бухты со статистической достоверностью увеличились максимальные высоты ветровых волн и выросло общее число штормов. Также, вполне вероятно, выросла среднегодовая мощность смешанного волнения и увеличилась максимальная продолжительность одного шторма, т.е. выросло время непрерывного волнового воздействия.

**Ключевые слова:** Черное море, волновой климат, Новороссийская бухта, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0030157422020034

### ВВЕДЕНИЕ

Ветровое волнение является одним из основных естественных процессов, определяющих развитие морского транспорта, освоение шельфа, динамические процессы в береговой зоне моря и оказывающих влияние на береговую инфраструктуру, экологию и рекреационный потенциал. Объектом настоящего исследования выступает Новороссийская бухта в северо-восточной части Черного моря. Заметим, что, по данным Федерального агентства морского и речного транспорта, в 2019 г. порт г. Новороссийска возглавил список российских портов по объемам грузооборота. Поскольку ветровое волнение является лимитирующим фактором успешности проведения морских и портовых операций, корректное описание волнового режима акватории является весьма актуальной задачей. В целом, изученность вопроса (в применении к Новороссийской бухте) трудно назвать достаточной. В некоторых публикациях приводятся результаты математического моделирования ветрового волнения в Новороссийской бухте [2, 3, 4, 10], однако, не умаляя научной цен-

ности этих работ, заметим, что в них рассмотрены, как правило, конкретные (отдельные) штормовые ситуации и не проведены климатические обобщения.

Таким образом, основной целью представленной работы является детальный анализ волнового климата на входе в Новороссийскую бухту, а также оценка возможных трендов в колебаниях параметров поверхностного волнения за последние 40 лет.

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Современным средством исследования параметров поверхностного волнения является математическое моделирование. В настоящей работе используется спектральная волновая модель MIKE 21 SW Датского Гидравлического института [7]. Модель реализует основные физические механизмы зарождения, трансформации и затухания ветрового волнения [11], включая:

- рост волн под воздействием приземного ветра;

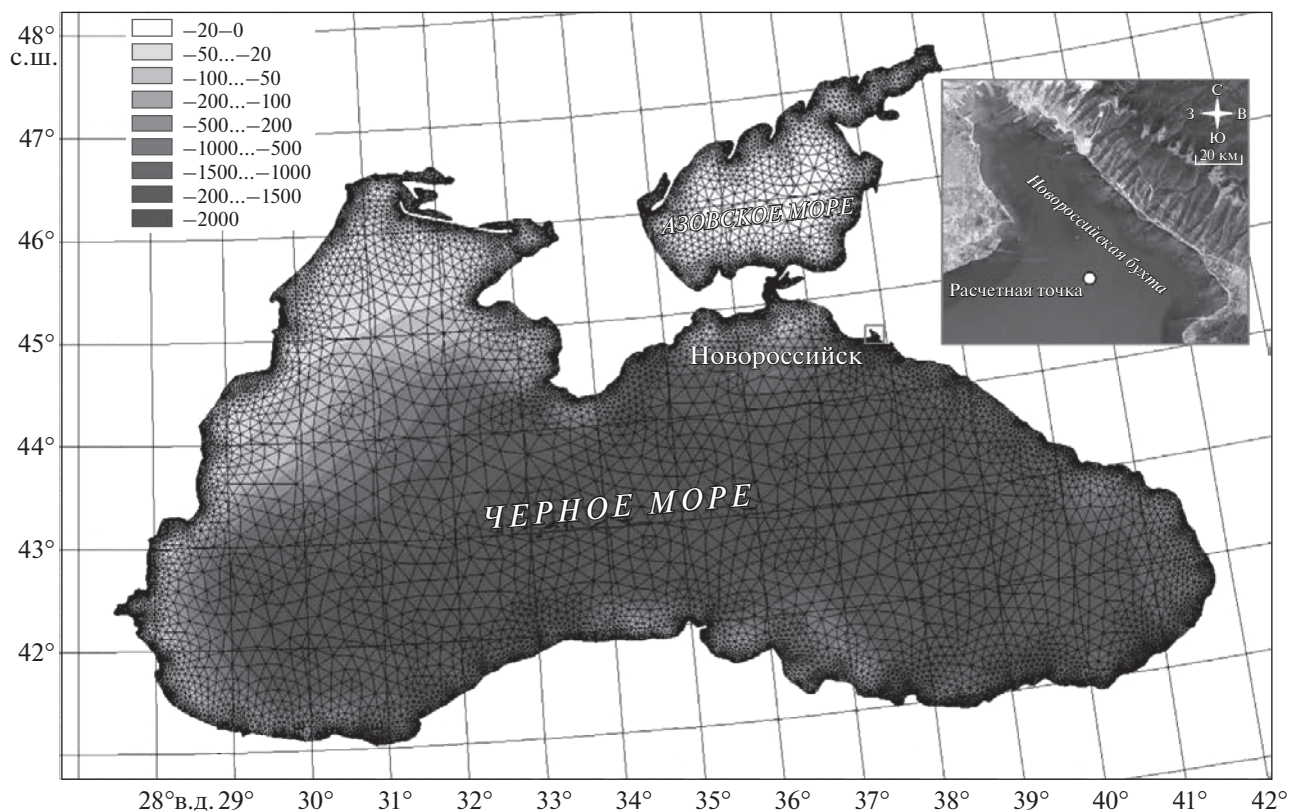


Рис. 1. Расчетная сетка, батиметрическая карта (м) Черного и Азовского морей, а также положение расчетной точки на акватории Новороссийской бухты.

- нелинейные внутриволновые взаимодействия;
- диссипацию энергии волн вследствие забурунивания, донного трения и обрушения;
- рефракцию и дифракцию волнового поля;
- взаимодействие поверхностного волнения и течений.

При описании ветрового волнения обычной практикой является представление характеристик волнового поля в виде набора интегральных параметров (значительная высота волн, средний период, генеральное направление распространения). Подобный подход оправдан в условиях однородного волнового поля. Если волновой спектр формируется как результат взаимодействия нескольких волновых систем (чисто ветровое волнение и зыбь), то представляется вполне естественным получить отдельные волновые статистики для каждой из них. Таким образом, в структуре реального смешанного волнения можно выделить, как правило, две основные составляющие: ветровое волнение и зыбь. Развитие ветрового волнения непосредственно приурочено к локальному ветровому полю. К зыби относятся волны, распространяющиеся вне зон гене-

рации, или же фазовая скорость которых превосходит скорость ветра.

Используемая неравномерная расчетная сетка покрывает всю акваторию Черного и Азовского морей и состоит из 20 тысяч расчетных элементов (рис. 1). Характерный размер элемента в прибрежной зоне составляет порядка 200 м. Расчетная точка (рис. 1, врезка) расположена на входе в Новороссийскую бухту на глубине 30 м.

Перечислим основные физические параметры, используемые при моделировании волнового климата Черного моря:

- полностью спектральная модель в нестационарной формулировке;
- спектральные частоты распределены логарифмически в диапазоне периодов от 1.6 до 16.5 с;
- разрешение модели по направлениям составляет  $15^\circ$ , что является компромиссом между рекомендованными значениями для зыби ( $2^\circ$ – $10^\circ$ ) и ветрового волнения с более широким угловым спектром ( $10^\circ$ – $30^\circ$ );
- учитываемые физические механизмы: четырехволновое взаимодействие (four-wave interaction); диссипация энергии волн посредством забурунивания, обрушения и донного трения; рефракция.

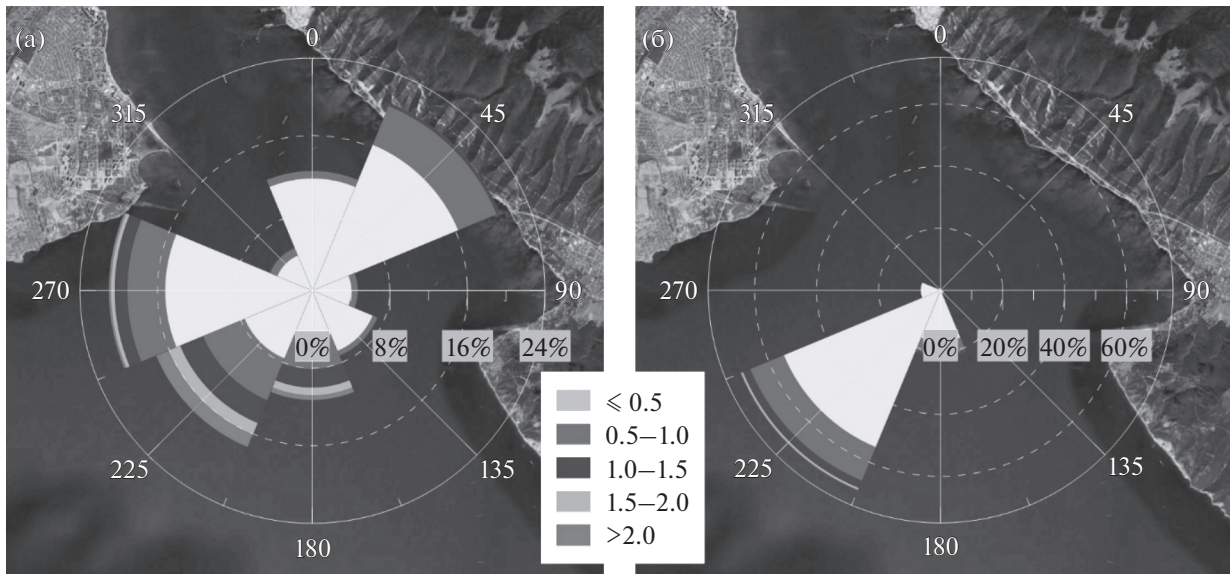


Рис. 2. Значительные высоты волн. Розы ветрового волнения (а) и зыби (б) за период с 1979 по 2019 гг.

В качестве исходных полей ветра используются данные глобального атмосферного реанализа ERA-Interim, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>). Рассматриваемая область ограничена координатами: по широте –  $40^\circ$  и  $47^\circ$  с.ш., по долготу –  $27^\circ$  и  $42^\circ$  в.д. Пространственное разрешение одинаково по широте и долготу и составляет  $0.25^\circ$ , шаг по времени – 3 часа. На основе реанализа ERA-Interim за период 1979–2019 гг. сформированы поля компонент скорости ветра, используемые в дальнейшем при моделировании полей ветрового волнения.

Модель настроена на автоматическое разделение компонент смешанного волнения. Вопросы верификации и применимости модели для прибрежных вод Черного моря подробно рассмотрены в работах [8, 9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенной работы получен массив данных, состоящий из параметров ветрового волнения и зыби с временным шагом 1 час и охватывающий период в 41 год (с 1979 по 2019 гг.) Массив расчетных характеристик включает в себя величины значительных и максимальных высот волн, средних периодов, периодов максимума спектра, направления волнения, а также такой важной характеристики, как мощность волнения. На глубокой воде мощность нерегулярного ветрового волнения оценивается выражением [6]:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} h_s^2 t_e \approx \left( 0.5 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3 \text{с}} \right) h_s^2 t_e,$$

где  $h_s$  – значительная высота волн,  $t_e$  – энергетический период волн,  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения. Энергетический период определяется как период простой монохроматической волны с мощностью, эквивалентной мощности данного нерегулярного волнения и принимается равным  $0.9t_p$  ( $t_p$  – период пика спектра). Если значительная высота волн представлена в метрах, период – в секундах, то мощность волнения будет выражаться в киловаттах на метр волнового фронта. Мощность, являясь функцией одновременно двух основных параметров ветрового волнения (высоты и периода), в достаточной мере характеризует энергетическую ценность штормов. Мощность волнения (в представленной форме) – один из выходных параметров спектральной модели MIKE 21 SW.

Климатические розы ветрового волнения и зыби приведены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, ветровое волнение наиболее обеспечено с двух направлений: западного (повторяемость 22%) и северо-восточного (20%). По повторяемости за ними следуют юго-западные (17%) и северные (12%) направления. 70% зыби приурочено к юго-западным румбам, что объясняется батиметрическими особенностями прибрежной зоны, влияющими на трансформацию поля зыби при подходе к берегу.

Общее представление о высотах волн, встречающихся при волнении различных направлений, дает диаграмма рассеивания, построенная для значительных высот ветровых волн и зыби (рис. 3).

Данные рис. 3 показывают, что наиболее сильное ветровое волнение приходит с юго-западных направлений, при этом значительные высоты

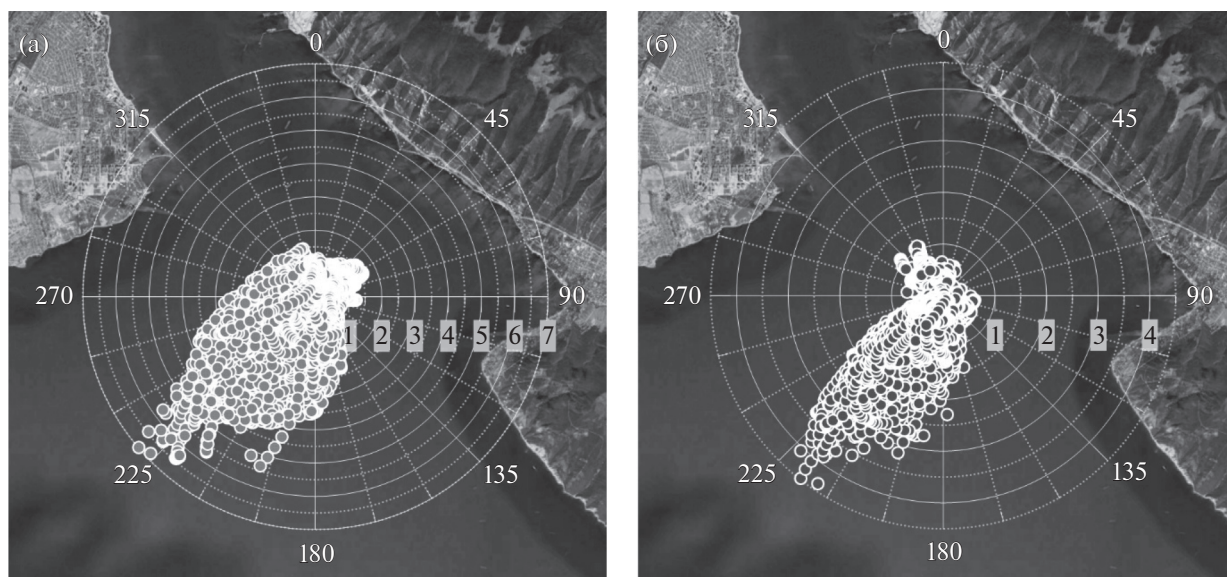


Рис. 3. Климатические диаграммы рассеивания для значительных высот ветровых волн (а) и зыби (б), полученные за период с 1979 по 2019 гг.

волн могут достигать 7 м. Волнение южных румбов несколько слабее, но, тем не менее, в нем возможны высоты волн порядка 4–5 м. При северо-восточных ветрах, несмотря на сравнительно небольшой разгон, на акватории бухты может развиваться ветровое волнение со значительными высотами волн в нем до 1.5 м. Наиболее сильная зыбь с высотами волн, достигающими до 4.5 м, приходит с юго-западных направлений.

На рис. 4 представлены среднегодовые и максимальные за каждый указанный год величины значительных высот ветровых волн и зыби, а также линейные тренды этих величин и их 90% доверительные интервалы.

Как следует из рис. 4, в среднем на акватории бухты развивается поверхностное волнение с высотами ветровых волн порядка 0.40 м, зыби – 0.35 м. Характерные значения максимальных высот для ветрового волнения составляет 4 м, зыби – 3 м. Экстремальные ветровые волнения с высотами, превышающими 6 м, наблюдались в 1988, 1992, 2000 и 2007 гг. В 2000 г. также зафиксирована самая высокая, порядка 4 м, зыбь.

Кроме непосредственно высот волн, представляет интерес рассмотрение особенностей штормовой активности, показателем которой выступает мощность смешанного волнения. Мощность, пропорциональная квадрату высот волн, является, в какой-то степени, характеристикой ударного воздействия волн. Под “штормом” будем понимать превышение кривой хода мощности величины в 1 кВт/м, что, приблизительно, соответствует волнению со значительными высотами в 0.7 м и максимальными порядка метра.

Выбор порогового уровня во многом, естественно, дискуссионен, мы же исходим из требований безопасности Новороссийского порта, которые ограничивают некоторые судовые операции при высоте волн, превышающих 1 м. Кроме того, задание интервала между соседними пиками – задача, в целом, нетривиальная. Как показывают результаты наших собственных исследований за параметрами ветрового волнения на шельфе Черного моря, средний период, охватывающий зарождение, развитие и затухание шторма, составляет 8–10 ч. Иногда, при следовании по акватории Черного моря подряд идущих циклонов, этот период уменьшается до 5–6 ч. Учитывая необходимость получения штормов в количестве, достаточных для статистических обобщений, интервал между штормами определен в 3 ч. Другими словами, два выхода кривой мощности волнения за уровень в 1 кВт/м и разделенные при этом промежутком времени, не менее, чем в три часа, трактуются как два штормовых события. На рис. 5 приведены характеристики штормов на акватории Новороссийской бухты: средняя и максимальная мощность штормового волнения, суммарная годовая продолжительность штормов, максимальная и средняя продолжительность шторма и число штормов за год.

На рис. 5 приведены также линейные тренды в колебаниях указанных параметров, а также 90% доверительные интервалы. Как следует из рис. 5, средняя мощность штормового волнения на акватории Новороссийской бухты составляет порядка 8 кВт/м. Максимальная мощность колеблется в пределах 50–100 кВт/м, но может достигать до 200 кВт/м и выше. Суммарная продолжитель-

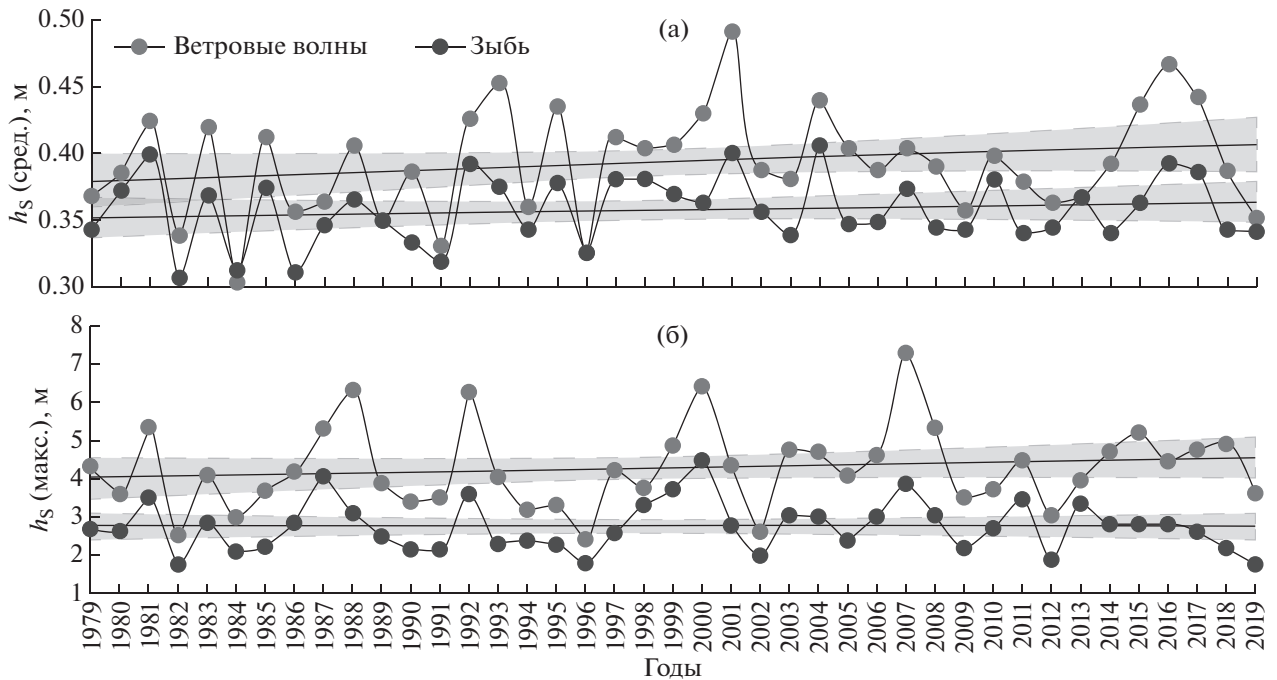


Рис. 4. Среднегодовые (а) и максимальные (б) величины значительных высот ветровых волн и зыби.

ность штормового волнения за один год колеблется в пределах 40–60 сут. Максимальная продолжительность одного шторма может достигать до трех суток, но, в среднем, не превышает двух суток. Средняя продолжительность шторма составляет, как правило, 10–11 ч. Наибольшее число штормов (больше 130) зафиксировано в 2004 г.; в среднем за год наблюдается порядка 100 штормов.

На рис. 4 и 5 приведены линейные тренды в колебаниях параметров поверхностного волнения на акватории Новороссийской бухты. Возникает закономерный вопрос об их статистической достоверности. Анализ возможных трендовых составляющих выполнен по методике, подробно изложенной в работе [5]. Данная процедура реализует непараметрический тест Манна-Кендалла. Преимущество метода заключается в том, что он не требует знания закона распределения исходных величин, а также может учитывать неравномерность временной шкалы и пропуски в имеющихся данных.

Метод рассматривает три основные статистические оценки:

- статистику Манна-Кендалла ( $S$ ). Являет собой сумму разностей между последовательными величинами;
- доверительный уровень ( $CF$ );
- коэффициент вариации ( $COV$ ).

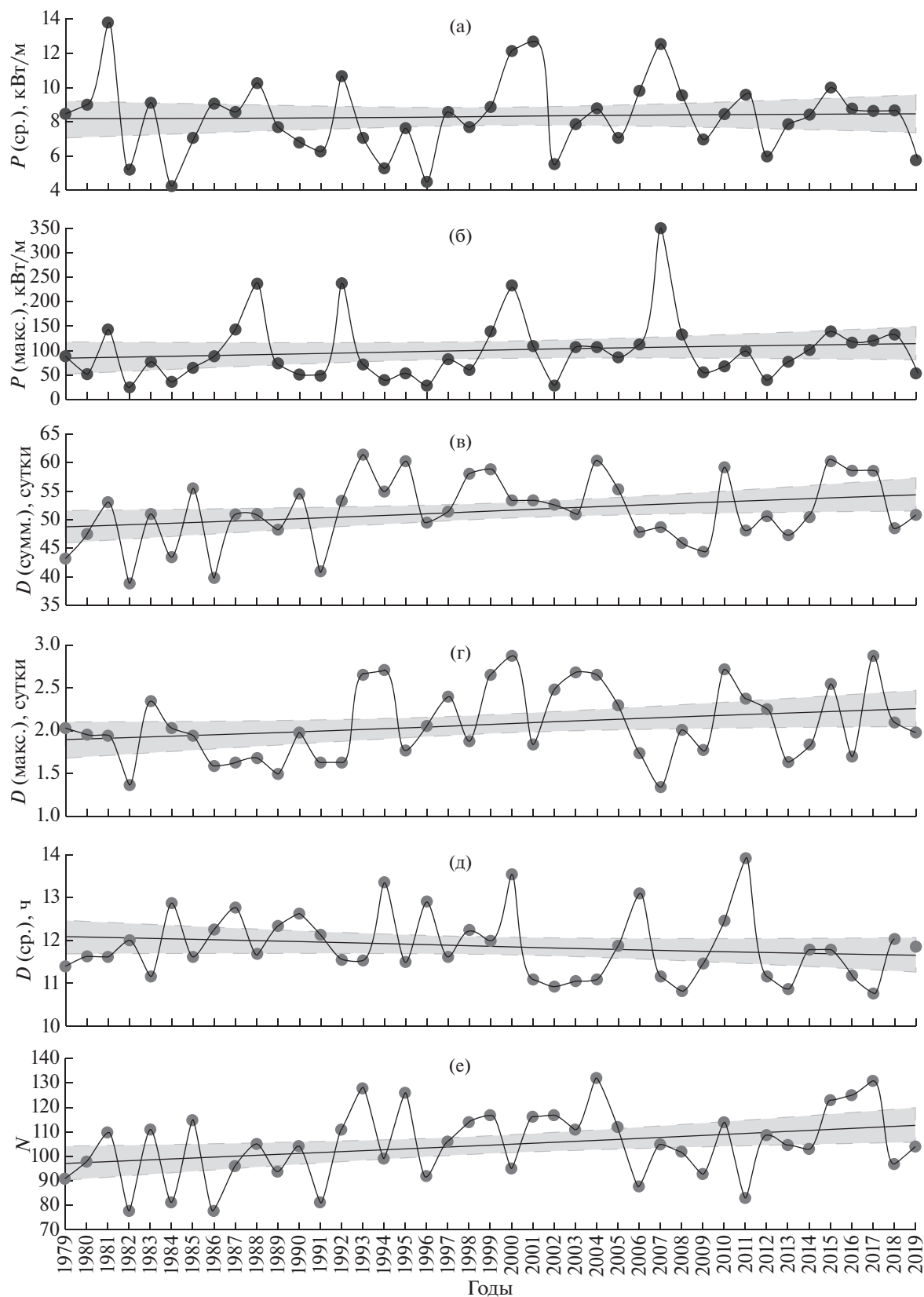
Сочетание указанных трех метрик позволяет выявить трендовые составляющие в исходных данных, а также оценить знак и статистическую

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 ( $S \leq 0$  и  $CF < 90\%$  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  $CF > 95\%$ .

Использование терминов “Отсутствие тренда” и “Устойчивое состояние” является авторским изобретением [5]. Будем иметь в виду, что выработка единых критериев оценок с необходимостью требует принятия неких фиксированных значений параметров  $S$  и  $CF$ . Однако бывают ситуации, при которых исследуемый параметр очень близок к своему граничному значению; при этом общий анализ (в том числе визуальный) в неоднозначных случаях дает возможность уловить общую тенденцию. По этой причине оценку “Отсутствие тренда” будем относить к категории “Слабый положительный тренд”, “Устойчивое состояние” – “Слабый отрицательный тренд”.

Результат анализа приведен в табл. 1.



**Рис. 5.** Характеристики штормов: (а), (б) – средняя и максимальная мощность штормового волнения; (с) – суммарная годовая продолжительность штормов; (д), (е) – максимальная и средняя продолжительность шторма; (ф) – число штормов за год.

Как показывают данные табл. 1, с уверенностью можно утверждать, что за последние 40 лет на акватории Новороссийской бухты увеличились максимальные высоты ветровых волн, а также выросло общее число штормов. Также, с некоторой долей вероятности, растет среднегодовая мощность смешанного волнения и увеличивается максимальная продолжительность одного шторма, т.е. выросло время непрерывного волнового воздействия. Средняя продолжительность шторма за период с 1979 по 2019 гг. несколько уменьшилась.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель представленной работы – анализ волнового климата на входе в акваторию Новороссийской бухты Черного моря за период с 1979 по 2019 гг. Исследования базируются на результатах математического моделирования, проведенного с помощью современной спектральной волновой модели DHI MIKE 21 SW. Верификация волновой модели выполнена с привлечением многочисленных данных инструментальных наблюдений за параметрами ветрового волнения в акваториях Черного и Азовского морей. С использованием статистических процедур выявлены климатические тренды в колебаниях основных параметров поверхностного волнения.

Основные результаты работы:

1. Получен обширный массив данных, состоящий из параметров ветрового волнения и зыби на акватории бухты с временным шагом в 1 час и охватывающий период в 41 год (с 1979 по 2019 гг.)

2. Ветровое волнение наиболее обеспечено с двух направлений: западного и северо-восточного. 70% зыби приурочено к юго-западным румбам.

3. Наиболее сильное ветровое волнение приходит с юго-западных направлений, при этом значительные высоты волн могут достигать 7 м. Волнение южных румбов несколько слабее, но, тем не менее, в нем возможны высоты волн порядка 4–5 м. При северо-восточных ветрах на акватории бухты может развиваться ветровое волнение со значительными высотами волн в нем до 1.5 м. Наиболее сильная зыбь с высотами волн, входящими до 4.5 м, соответствует юго-западным направлениям.

4. Экстремальные ветровые волнения с высотами, превышающими 6 м, наблюдались в 1988, 1992, 2000 и 2007 гг. В 2000 г. также зафиксирована самая высокая, порядка 4 м, зыбь.

5. Средняя мощность штормового (смешанного) волнения на акватории Новороссийской бухты составляет порядка 8 кВт/м. Максимальная мощность может достигать до 200 кВт/м и выше.

6. Суммарная продолжительность штормового волнения за один год колеблется в пределах полу-

тора – двух месяцев. Максимальная продолжительность одного шторма может достигать до трех суток, но, в среднем, не превышает двух суток. Средняя продолжительность шторма составляет, как правило, 10–11 ч. В среднем за год наблюдается порядка 100 штормов.

7. За период с 1979 по 2019 гг. на акватории Новороссийской бухты увеличились максимальные высоты ветровых волн, а также выросло общее число штормов. Возможно, растет также среднегодовая мощность поверхностного волнения и увеличивается максимальная продолжительность одного шторма. При этом среднегодовая продолжительность шторма несколько уменьшилась.

Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в работе [1], где указывается, что вся восточная часть Черного моря подвержена усилению штормовой активности с увеличением среднегодовых высот волн.

Небольшое замечание. Параметры ветрового волнения в заданной точке (на входе в Новороссийскую бухту в нашем случае) определяются как локальными ветровыми условиями, так и общими процессами циркуляции атмосферы. Другими словами, мы имеем дело, как правило, с результатом взаимодействия нескольких волновых систем. Расчет по всему Черному морю как раз и позволяет учесть физические явления разного масштаба, формирующие особенности волнового поля в интересующей нас точке.

**Источник финансирования.** Постановка задачи выполнена в соответствии с темой госзадания № 0128-2021-0013 и в рамках проекта РНФ № 20-17-00060, анализ экспериментальных данных выполнен при поддержке гранта РФФИ 19-45-230002, математическое моделирование и вычислительная часть – в рамках проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-941. Анализ результатов выполнен в рамках проекта РФФИ № 20-05-00009.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-367-382>
2. Кабатченко И.М., Резников М.В. Моделирование морского ветрового волнения, методы и аспекты прикладного применения // Труды ГОИН. 2011. Т. 213. С. 205–215.
3. Мысленков С.А. О влиянии локального ветрового воздействия на высоту волн в Цемесской бухте Черного моря // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 07(61). Часть 2, Июль. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.61.021>
4. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря с ис-

- пользованием модели SWAN // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013 (350). С. 58–67.
5. Aziz J.J., Ling M., Rifai H.S. et al. MAROS: A Decision Support System for Optimizing Monitoring Plans // Ground Water. 2003. V. 41(3). P. 355–367.
  6. Boyle G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future // Oxford University Press; Third edition. 2012. ISBN 978-0199545339. 566 p.
  7. DHI Water & Environment. 2007. MIKE 21, Spectral Wave Module.
  8. Divinsky B.V., Kosyan R.D. Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // Continental Shelf Research. 2017. V. 136. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
  9. Divinsky B., Kosyan R. Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // Oceanologia. 2018. V. 60. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>
  10. Myslenkov S., Chernyshova A. Comparing wave heights simulated in the Black sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // Russian Journal of Earth Sciences. 2016. T. 16. № 5. С. 1–12.
  11. Sorensen O.R., Kofoed-Hansen H., Rughjerg M., Sorensen L.S. A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique // Proceedings, International Conference on Coastal Engineering. 2004. V. 29. P. 894–906.

## Climate Variations of Certain Wave Parameters at the Entrance of the Novorossiysk Bay

B. V. Divinsky<sup>a, #</sup>, S. B. Kuklev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: divin@ocean.ru*

The main purpose of the presented work is an analysis of the wave climate of the Novorossiysk Bay (Black Sea) for the period from 1979 to 2019. The analysis is based on the mathematical modeling results performed using the modern DHI MIKE 21 SW spectral wave model. The wave model was verified using numerous instrumental data of the wind-wave parameters in the Black Sea and Azov Sea. As follows from the research, the average power of storm waves in the Novorossiysk Bay area is about 8 kW/m. The maximum power ranges within 50–100 kW/m but can reach 200 kW/m and more. The total duration of storm waves for one year ranges between 40–60 days. The maximum duration of one storm can be up to three days but does not exceed two days on average. The mean storm duration is usually 10–11 h. The largest number of storms (above 130) was recorded in 2004; on average, there are about 100 storms annually. In recent decades, at the Novorossiysk Bay area, the maximum wind wave heights and the total number of storms has increased with statistical control. Highly probable also the average annual power of combined waves and the maximum storm duration increased, i.e. the time of continuous wave effect has increased.

**Keywords:** Black Sea, wave climate, Novorossiysk bay, mathematical modeling