

**РАЗДЕЛ 2.**  
**ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ  
И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ**

*УДК 551.466.2*

**ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ Г. СУДАК  
(ЧЕРНОЕ МОРЕ)**

*Харитонов Л. В.<sup>1</sup>, Михайличенко С. Ю.<sup>2</sup>, Фомин В. В.<sup>3</sup>, Алексеев Д. В.<sup>4</sup>*

*<sup>1, 2, 3, 4</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Российская Федерация*

*E-mail: <sup>1</sup>kharitonova.dntmm@gmail.com, <sup>2</sup>iham1984@rambler.ru, <sup>3</sup>fomin.dntmm@gmail.com,  
<sup>4</sup>d.alekseev@mhi-ras.ru*

В статье проведено исследование волнового климата прибрежной акватории г. Судак (Черное море). На основе статистического анализа ретроспективных данных модели SWAN-ERA1 за 1979–2019 гг. получены оперативные и экстремальные характеристики ветрового волнения. С использованием распределения Гумбеля рассчитаны волновые параметры штормов различной повторяемости. Для ветра 4%-й режимной обеспеченности на основе модели SWAN и метода вложенных сеток произведены расчеты характеристик ветровых волн с высоким пространственным разрешением (~2 м). Проанализированы поля высот значительных волн и придонных орбитальных скоростей. Выявлено, что наиболее сильное волнение формируется при юго-западном, южном и юго-восточном ветрах. Полученные результаты имеют практическую значимость для оценки нагрузок на берегозащитную инфраструктуру и прогнозирования литодинамических процессов в береговой зоне.

**Ключевые слова:** волновой климат, ветровое волнение, Черное море, Судак, математическое моделирование, SWAN, экстремальные характеристики, придонные скорости, береговая зона.

**ВВЕДЕНИЕ**

Районом исследования в данной работе является часть Судакской бухты Черного моря, прилегающая с запада к м. Алчак (рис. 1). Здесь находятся два участка берега различных типов: урбанизованная набережная г. Судак, построенная в начале 1970-х годов, и м. Алчак, являющийся с 1988 г. заповедным урочищем. Мыс и одноименная гора сложены прочными серыми мраморовидными известняками. Пляж здесь очень узкий, часто представляющий собой просто глыбовый навал. Подводный склон приглубый. Берегозащитные сооружения города-курорта представляют собой бетонную набережную с 6 бунами, расположенными через 90 м. В межбунных пространствах расположен пляж шириной до 20–30 м из темно-серого песка с мелкой галькой [1]. Гидротехнические сооружения в настоящее время нуждаются в реконструкции, при проведении которой необходимы сведения о режимно-климатических особенностях ветрового волнения в прибрежной акватории с высоким пространственным разрешением. Однако, региональных работ по исследованию волнового режима в рассматриваемом районе нет.

На сегодняшний день существует множество работ по исследованию различных аспектов ветрового волнения в Черном море. Они посвящены изучению волнового климата во всем морском бассейне [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] и в отдельных

больших по площади районах акватории [13, 14, 15, 16]. Общей особенностью всех вышеперечисленных работ является то, что в них исследуются характеристики волн вдали от береговой линии. Использование их для изучения характеристик ветрового волнения в мелководных прибрежных регионах затруднительно, в первую очередь, из-за грубого пространственного разрешения полученных результатов, что не дает возможности учитывать влияние локальных особенностей берегового и донного рельефа на характеристики волн и ветра. Региональные работы дополняют и уточняют общую картину ветрового волнения для всего Азово-Черноморского бассейна и являются важным продолжением и развитием вышеперечисленных исследований.

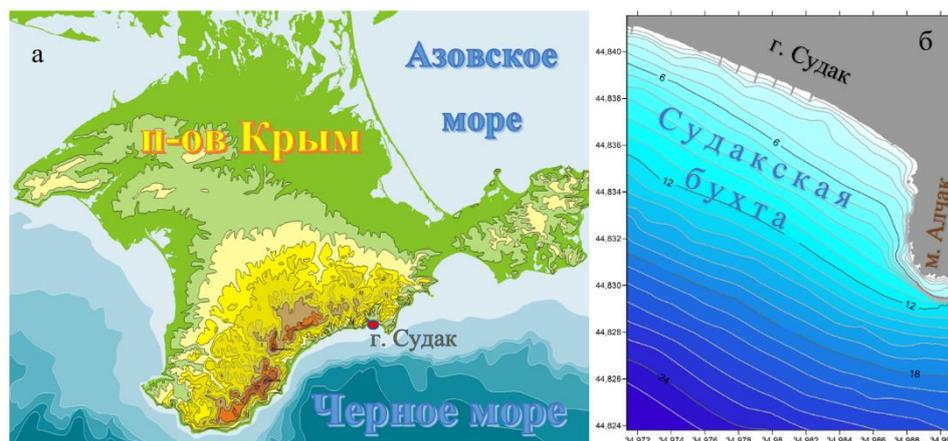


Рис. 1. Положение изучаемой области (а). Батиметрическая карта-схема района исследования (б)

Составлено авторами.

Сведения о ветро-волновом режиме вдоль восточного берега Крыма представлены в справочных материалах [17, 18], где все море разбито на большие области по определенным критериям. Анализу данных, собранных на гидрометеорологических станциях, посвящены работы [19, 20], однако ближайший пост наблюдения расположен на МГ Ялта и не характеризует ситуацию в акватории г. Судак. Исследования волнового климата в береговой зоне Крымского полуострова на основе результатов математического моделирования проводились в работах [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31], однако район Судакской бухты в них остался без внимания. Таким образом, данное исследование является продолжением цикла региональных работ по исследованию ветро-волновых характеристик прибрежных акваторий Крыма.

*Целью* настоящей работы является исследование статистических характеристик и пространственной структуры ветрового волнения в акватории Черного моря в районе г. Судак методами статистического анализа и математического моделирования.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе для оценки статистических характеристик волнения в исследуемом районе использовались результаты ретроспективных расчетов ветровых волн за период 1979–2019 гг. с дискретностью по времени 1 ч. Массив данных (далее — массив SWAN-ERA1) был получен с помощью численной спектрально-дискретной модели SWAN (Simulating Waves Nearshore) [32, 33]. Результаты валидации и верификации модели по данным измерений волнения на морских платформах представлены в работах [2, 34]. Расчеты проводились на неструктурированной расчётной сетке для Азово-Черноморского региона со сгущением в прибрежной зоне [8]. В качестве полей ветра были использованы данные глобальных атмосферных реанализов ERA-Interim и ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов [35] с пространственным разрешением 0,25°. Угловое разрешение модели SWAN составляло 10°. По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0,055–0,625 Гц, использовалась неравномерная сетка с 40 узлами. При интегрировании по времени применялась неявная разностная схема с шагом 30 минут.

Из массива SWAN-ERA1 был выбран ближайший к Судаку узел расчетной сетки на изобате 45 м. Для этой точки были сформированы многолетние ряды параметров, включающие: высоту значительных волн ( $h_s$ ); среднее направление волнения ( $\theta$ ); пиковый период волн ( $\tau_p$ ); средний период волн ( $\bar{\tau}$ ). На основе сформированных рядов были рассчитаны оперативные и экстремальные характеристики ветрового волнения. Оперативные характеристики волнения определяют фоновые условия эксплуатации проектируемых объектов прибрежной инфраструктуры в исследуемом районе, экстремальные характеристики — режим предельных нагрузок на эти объекты.

На втором этапе работы на основе модели SWAN [32, 33] получены карты пространственного распределения параметров ветрового волнения в прибрежной зоне г. Судак. Расчеты проведены для восьми основных направлений ветра 10, 4, 2 и 1%-ной режимной обеспеченности (РО) (табл. 1), значения которых были получены в результате осреднения данных из работы [17] для 2 района Черного моря.

Таблица 1.  
Максимальная скорость ветра (м/с) 10, 4, 2 и 1 %-ной режимной  
обеспеченности (РО) по восьми румбам

РО, %	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
10	26,8	29,1	24,5	19,9	23,7	29,7	28,4	24,8
4	28,0	30,7	25,9	21,1	25,1	31,2	29,4	25,6
2	28,9	31,9	26,9	22,0	26,3	32,3	30,2	26,1
1	29,8	33,0	28,0	23,0	27,4	33,4	30,9	26,7

Составлено авторами по [17].

Для повышения точности математического моделирования волновых полей использовался 5-ти шаговый метод вложенных сеток. Построение рельефа дна расчетных областей проводилось на основе оцифровки всех доступных навигационных карт районов расчетов. На первом шаге моделировались поля волнения во всем Черноморском бассейне; на втором и третьем шагах волнение рассчитывалось для областей, включающих полуостров Крым и его южный берег соответственно; на четвертом шаге поля волн определялись для акватории от м. Капчик до м. Меганом. На пятом шаге на сетке с самым высоким пространственным разрешением  $\sim 2 \times 2$  м рассчитывались поля волн в прибрежном районе г. Судак размером 1,5 на 2 км, включающем м. Алчак (рис. 1). На втором и всех последующих шагах параметры ветровых волн на жидких границах расчетных областей определялись интерполяцией модельных данных, полученных на предыдущем шаге. Угловое разрешение модели SWAN составляло  $10^\circ$ . По частотной координате, изменяющейся от 0,02 до 2 Гц, использовалась неравномерная сетка с 31 узлом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ оперативных характеристик волнения в точке с глубиной 45 м на траверзе набережной г. Судак показал, что максимальную повторяемость (49%) имеют волны с высотами 0,25 и 0,5 м; волны высотой 1 м и 2,5 м возникают в 8% и 0,9% случаев соответственно (рис. 2, а). Гистограмма повторяемости средних периодов волн (рис. 2, б) имеет характерную особенность: на ней отчетливо выделяется интервал 2,5–3,5 с, где повторяемость периодов превышает 14%, в указанный интервал периодов попадает 45% всех случаев.

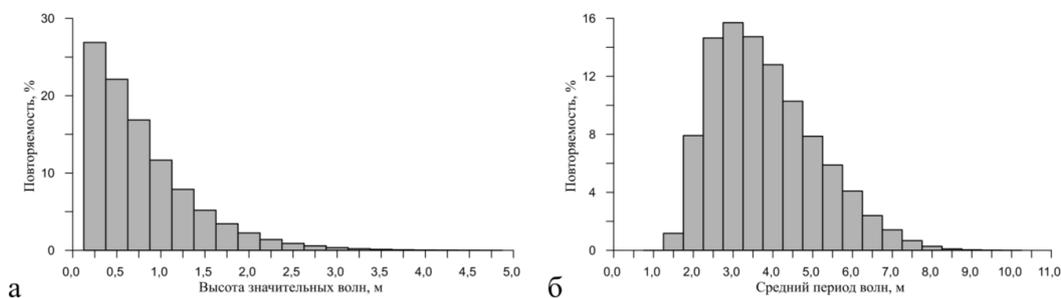


Рис. 2. Повторяемость высоты значительных волн (а) и среднего периода волн (б) на изобате  $\sim 45$  м в районе г. Судак по данным SWAN-ERA1

Составлено авторами.

В большинстве случаев волны в исследуемый район приходят с востока-юго-востока и юго-юго-запада (повторяемость 14%) (рис. 3, а). На розе средних многолетних значений высоты значительных волн (рис. 3, б) выделяется 3 направления подхода к исследуемому району наиболее высоких волн: восток-юго-

## ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ Г. СУДАК (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

восток, юг, юго-юго-запад. Средние многолетние значения для этих направлений достигают 1,0–1,1 м.

Для исследуемой акватории также рассчитаны продолжительности штормовых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок этих характеристик использовались значения высот волн 3%-ой обеспеченности в системе шторма ( $h_{3\%}$ ). Для конкретного шторма равенство  $h_{3\%} = a$  означает, что в 3-х процентах всех случаев высоты волн будут превышать значение  $a$ . Расчет  $h_{3\%}$  выполнялся с помощью интегральной функции вероятности распределения высот волн для моря конечной глубины [36].

Длительность штормовых ситуаций определялась условиями  $h_{3\%} > 1,25$  м;  $h_{3\%} > 2$  м;  $h_{3\%} > 3$  м;  $h_{3\%} \geq 4$  м. В табл. 2 приведены данные о средней многолетней продолжительности (сут) по месяцам штормовых ситуаций в прибрежной акватории г. Судак. В нижней строке таблицы для каждой градации дана ее средняя за год продолжительность. Как видно из таблицы, наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре — январе, минимальная длительность штормов отмечается в июне — июле.

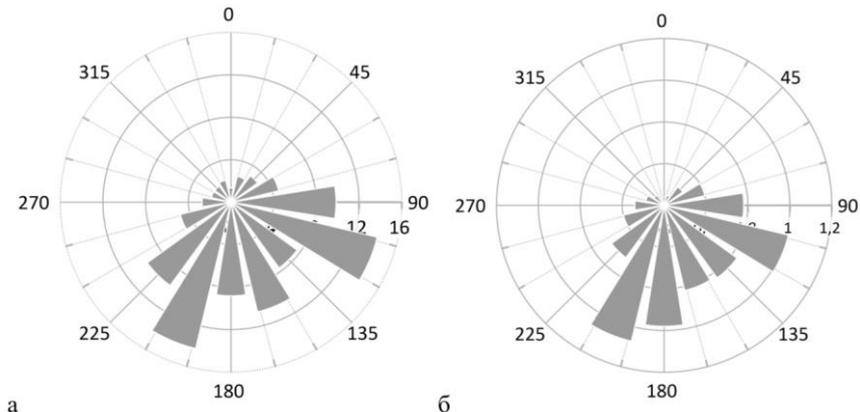


Рис. 3. Розы повторяемости среднего направления волнения (%) (а) и распределения по направлениям средних многолетних значений высоты значительных волн (м) (б) на изобате ~45 м в районе г. Судак по данным SWAN-ERA1  
Составлено авторами.

Анализ распределения по годам длительности (сут) штормов по данным SWAN-ERA1 за период 1979–2019 гг. для четырех градаций интенсивности шторма, приведённых выше, показал, что средние многолетние значения длительности штормов соответственно равны: 14,2 сут; 7,6 сут; 3,1 сут; 1,2 сут (рис. 4, а, б).

На рис. 4, г приведено распределение годовых максимумов высоты значительных волн  $h_s$ . Видно, что их значения изменяются в пределах от 2,7 до 5,9 м, а среднее составляет 4,1 м.

Таблица 2.

Средняя многолетняя продолжительность (сут) штормовых ситуаций по месяцам на изобате ~45 м в районе г. Судак по данным SWAN-ERA1

Месяцы	$h_{3\%} \geq 1,25 \text{ м}$	$h_{3\%} \geq 2 \text{ м}$	$h_{3\%} \geq 3 \text{ м}$	$h_{3\%} \geq 4 \text{ м}$
1	21,2	13,3	6,3	2,7
2	19,0	12,3	5,7	2,3
3	19,3	11,4	5,0	1,9
4	14,6	7,5	2,5	0,8
5	9,7	3,9	1,0	0,2
6	6,8	2,4	0,7	0,2
7	7,3	2,3	0,7	0,2
8	8,7	3,3	0,6	0,1
9	10,9	5,0	1,7	0,6
10	15,2	7,7	2,9	1,0
11	18,3	10,4	4,6	1,9
12	21,4	13,3	6,3	2,8
Среднее за год	14,4	7,7	3,2	1,2

Составлено авторами.

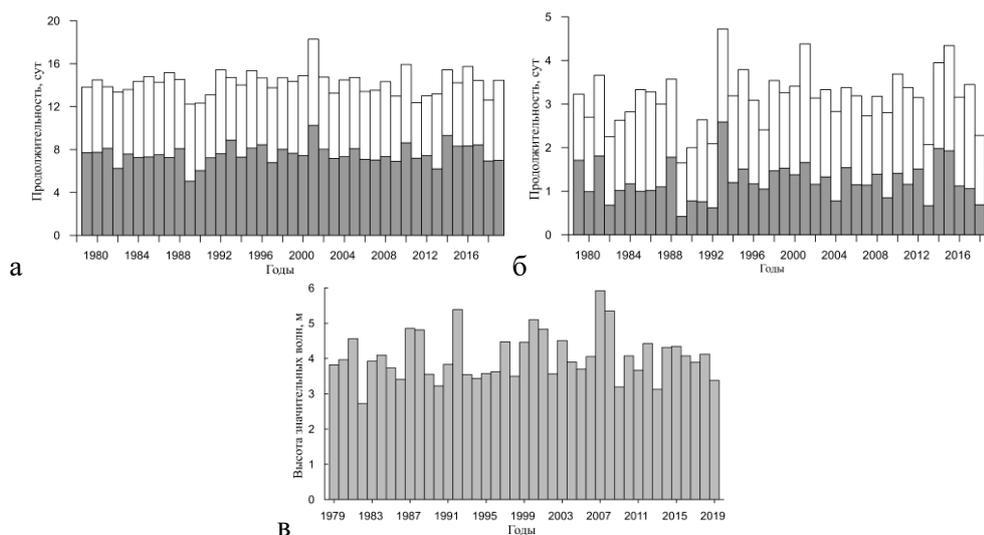


Рис. 4 Распределение по годам длительности (сут) штормовых ситуаций для  $h_{3\%} \geq 1,25 \text{ м}$  и  $h_{3\%} \geq 2 \text{ м}$  (серый цвет) (а) и для  $h_{3\%} \geq 3 \text{ м}$  и  $h_{3\%} \geq 4 \text{ м}$  (серый цвет) (б) и годовых максимумов высоты значительных волн  $h_s$  (в) на изобате 45 м в районе г. Судак по данным SWAN-ERA1

Составлено авторами.

ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ Г. СУДАК  
(ЧЕРНОЕ МОРЕ)

---

Для оценки максимумов средних высот волн  $\bar{h} = 0,63 \cdot h_s$  и средних периодов волн  $\bar{\tau}$  в прибрежной зоне г. Судак использовался метод годовых максимумов, базирующийся на 2-параметрическом экстремальном распределении Гумбеля [36]. Из массива волновых характеристик SWAN-ERA1 выделены ряды годовых максимумов средних высот и средних периодов. Далее методом наименьших квадратов определены соответствующие параметры распределения Гумбеля, построены биплоты годовых максимумов. На основе полученных распределений Гумбеля вычислены средние значения высот волн и средние значения периодов волн, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Далее на основе этих средних значений с помощью распределения Глуховского [37] получены оценки высот и периодов волн различной обеспеченности в системе, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет (табл. 3).

Скорость, направление и время действия ветра, особенности рельефа дна, конфигурация берега и значения эффективных разгонов определяют характер пространственной структуры ветрового волнения в береговой зоне. Район г. Судак характеризуется довольно прямолинейным берегом с уклоном дна  $\sim 0,02-0,05$  м, следовательно, волновые поля на большей части исследуемой акватории будут относительно однородными. Исключение составляет восточная часть расчетной области, включающая выдвинутый в море на 500 м приглубый берег у м. Алчак (уклон составляет  $\sim 0,16$ ) (рис. 1). Вместе с мысом Меганом, расположенным на юго-востоке Судакской бухты, м. Алчак оказывает экранирующее действие для волнения от северо-востока. Таким образом, наиболее волноопасными направлениями для исследуемого района являются волны, приходящие из сектора запад — юго-восток.

Таблица 3.

Высота значительных волн  $h_s$ , средняя высота волн  $\bar{h}$ , средний период волн  $\bar{\tau}$ , средняя длина волн  $\bar{\lambda}$ , высота волн 50% ( $h_{50\%}$ ), 13% ( $h_{13\%}$ ), 3% ( $h_{3\%}$ ) и 1% ( $h_{1\%}$ ) обеспеченности в системе шторма, возможного в береговой зоне г. Судак 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет

Т, годы	$h_s$ , м	$\bar{h}$ , м	$\bar{\tau}$ , с	$\bar{\lambda}$ , м	$h_{50\%}$ , м	$h_{13\%}$ , м	$h_{3\%}$ , м	$h_{1\%}$ , м
1	4,5	2,3	8,4	107	2,2	3,7	4,8	5,5
5	5,4	2,9	9,2	128	2,7	4,5	5,8	6,6
10	5,9	3,1	9,6	139	3,0	4,9	6,3	7,2
25	6,5	3,4	10,1	152	3,3	5,4	6,9	7,9
50	6,9	3,7	10,5	162	3,5	5,8	7,4	8,4
100	7,3	3,9	10,9	172	3,7	6,1	7,9	8,9

Составлено авторами.

Остановимся на рассмотрении волновых полей, полученных для расчетных скоростей ветра 4%-ной режимной обеспеченности (для скоростей возможных 1 раз в 25 лет) и соответствующих моменту времени 16 ч. Анализ результатов расчетов для

штормов режимной обеспеченности 10%, 2% и 1% показал, что конфигурация волновых полей для этих ситуаций качественно не меняется.

На рис. 5 показаны пространственные распределения высоты значительных волн  $h_s$  и среднего направления волнения в исследуемом районе для западного, юго-западного, южного, юго-восточного, восточного и северо-восточного направлений ветра.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее сильное волнение с высотами 8–10 м в мористой части расчетной области формируется при юго-западном, южном и юго-восточном ветрах (рис. 5, б, в, г), что обусловлено наибольшей скоростью используемого расчетного ветра (таблица 1), большими разгонами волнения в акватории Черного моря и открытостью акватории.

При действии западного и восточного ветров в исследуемую область приходят волны с высотами около 7 м (рис. 5, а). По мере приближения волн к набережной их высоты постепенно уменьшаются до величин 1,5–2,0 м в районе оконечности бун. Отметим, что для всех рассмотренных выше случаев структура волновых полей, начиная с изобаты 5 м и меньше, имеет идентичные значения высот волн и практически не зависит от направления генерирующего их ветра. Таким образом, при глубинах  $\leq 10$  м высоты волн определяются, в первую очередь, распределением глубин.

Поля волнения, формируемые ветрами от северных румбов, имеют иную структуру. При действии северо-восточного ветра в расчетную область приходят трансформированные за счет рефракции волны открытого моря юго-восточного направления с высотами  $\sim 3,5$  м (рис. 5, е). Северный и северо-западный ветра дуют с берега и в исследуемой области не формируют значимого волнения.

Из-за относительной мелководности бухты существенное влияние на распространении волн оказывает рефракция. На взморье направление распространения волн отличается от направления ветра (рис. 5). Само явление рефракции штормовых волн на подходе к берегу возникает вследствие того, что длина подходящих волн существенно превышает глубину моря в прибрежной зоне. Вблизи набережной г. Судак волны в большинстве случаев имеют направление  $\sim 45^\circ$ .

Важным фактором, определяющим потери волновой энергии за счет донного трения, является амплитуда орбитальной скорости волнового движения у дна  $V_b$  (м/с). Этот параметр оказывает непосредственное влияние на морфодинамические процессы в акватории. На мелководье волны проникают до дна и взвешивают донный материал, при этом доля кинетической энергии волн переходит частично в работу по взвешиванию и перемещению донного материала и частично в формирование турбулентных вихрей, образующихся при обтекании мелкомасштабных неровностей рельефа дна, формируя механизм донного трения. Зоны максимумов  $V_b$  соответствуют зонам потенциального размыва дна, при условии наличия на дне подвижных наносов.

На рис. 6 представлены расчетные поля скоростей придонных волновых течений для 6 рассматриваемых направлений ветра 4 %-ной режимной обеспеченности в прибрежной зоне г. Судак. Видно, что максимальные придонные орбитальные скорости наблюдаются при южном (рис. 6, б) и юго-восточном (рис. 6, в) ветрах.

ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ Г. СУДАК  
(ЧЕРНОЕ МОРЕ)

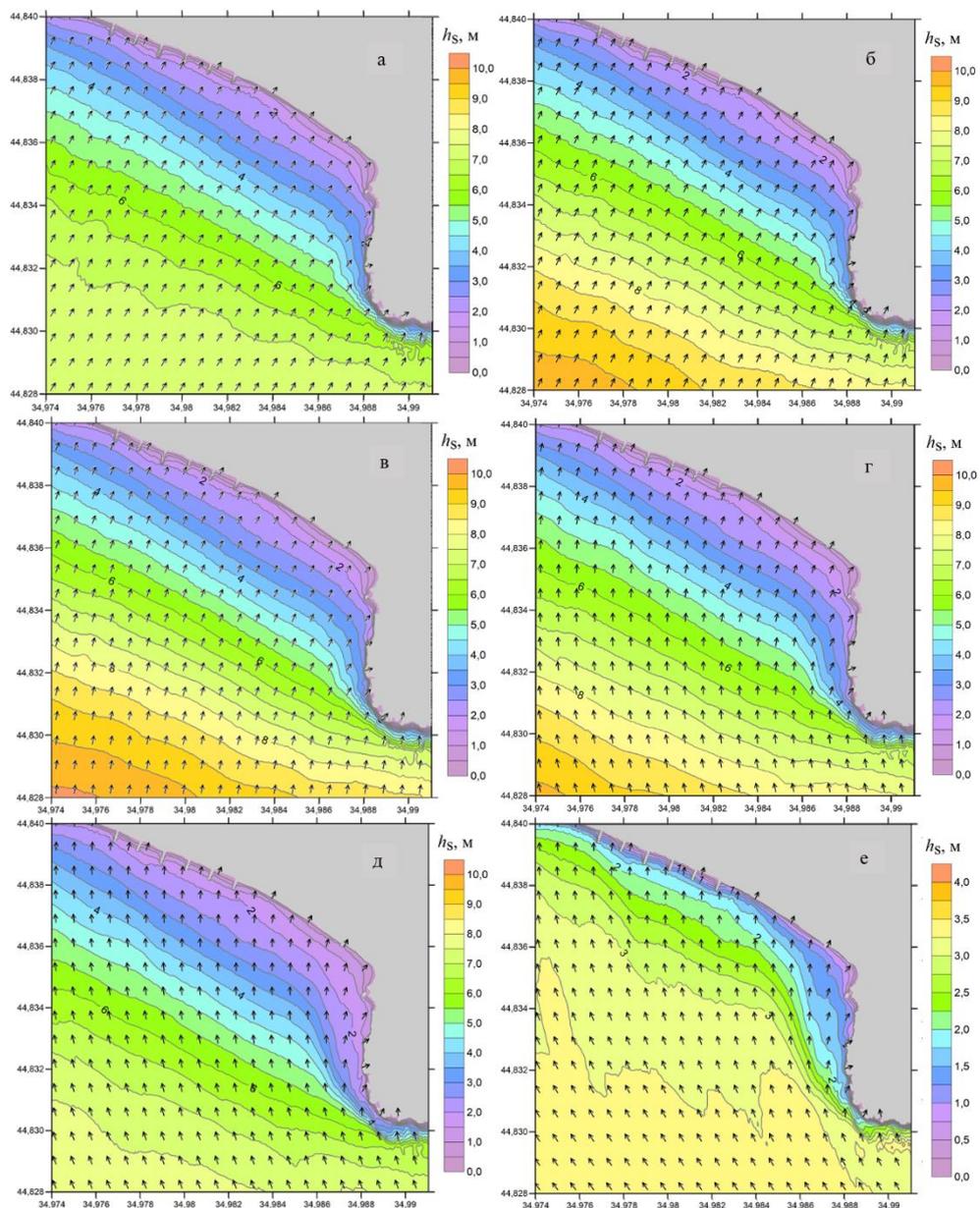


Рис. 5. Высота значительных волн ( $h_s$ ) и среднее направление волнения при западном (а), юго-западном (б), южном (в), юго-восточном (г), восточном (д) и северо-восточном (е) ветре 4 %-ной режимной обеспеченности в прибрежной зоне г. Судак  
Составлено авторами.

На большей части акватории величины скоростей лежат в пределах от 1,4 до 2,2 м/с. Вблизи берега характерными для  $V_b$  являются значения 0,8–1,2 м/с. Общей

особенностью всех рассмотренных случаев является наличие зоны интенсификации придонных волновых течений в береговой зоне м. Алчак, где наблюдается резкое увеличение значений придонных скоростей до величин 2,8–3,0 м/с.

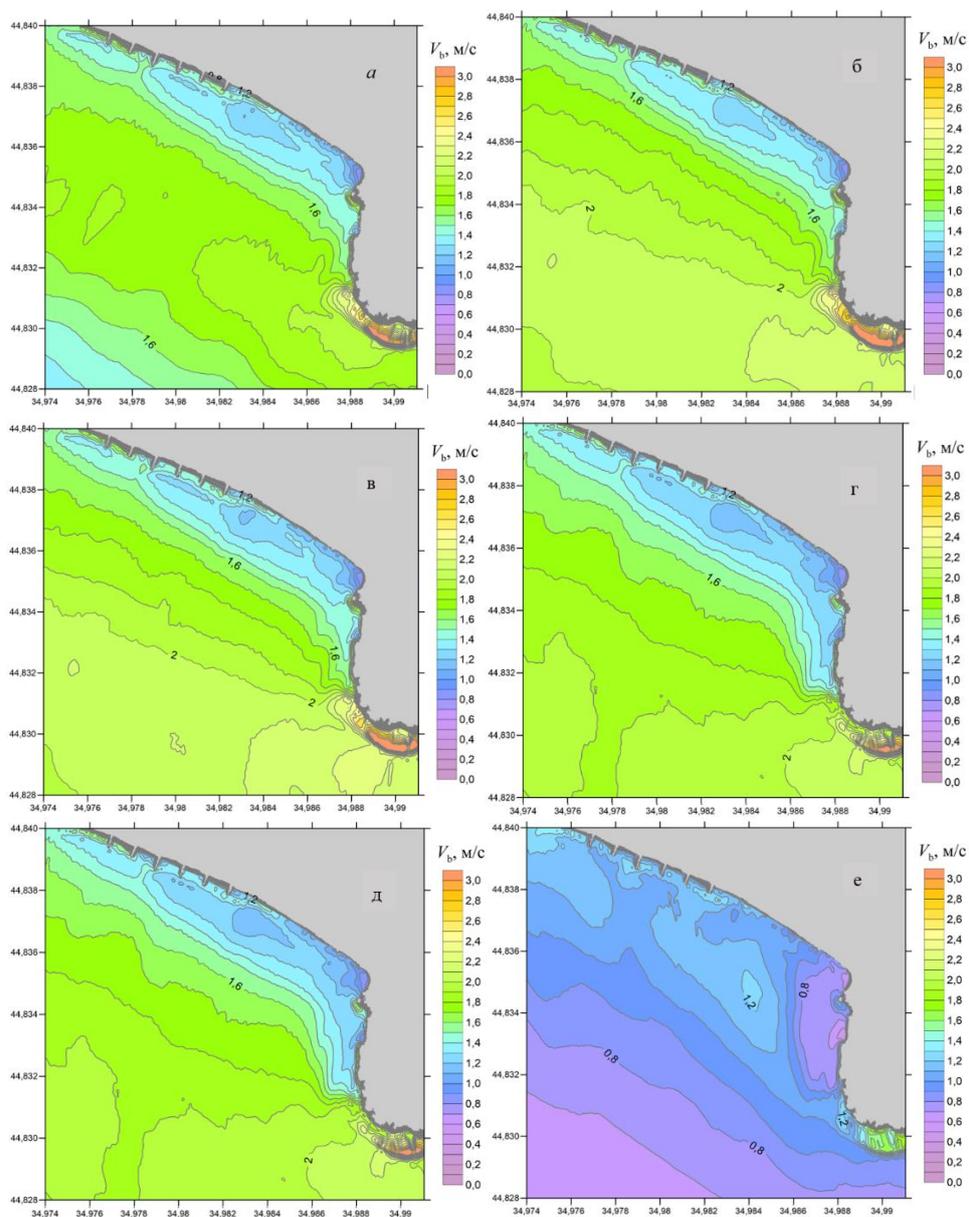


Рис. 6 Скорость придонных волновых течений (м/с) при западном (а), юго-западном (б), южном (в), юго-восточном (г), восточном (д) и северо-восточном (е) ветре 4 %-ной режимной обеспеченности в прибрежной зоне г. Судак

Составлено авторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование статистических характеристик и пространственной структуры ветрового волнения в акватории Черного моря в районе г. Судак на основе методов статистического анализа и математического моделирования.

Для точки, расположенной на глубине 45 м на траверзе набережной г. Судак выполнен статистический анализ ретроспективных расчетов ветрового волнения за 1979–2019 гг. по данным SWAN-ERA1.

Выявлено, что волнение с высотами  $h_s \leq 0,5$  м составляет более 49% всех случаев; волны высотой  $h_s = 1$  м возникают в 8% случаев, а повторяемость волн высотой  $h_s \geq 2,5$  м составляет 0,9%. Во временной интервал 2,5–3,5 с входит более 45% всех значений средних периодов волн. В большинстве случаев волны в исследуемый район приходят с востока-юго-востока и юго-юго-запада. Наиболее высокие волны в исследуемый район приходят от востока-юго-востока, юга и юго-юго-запада.

Анализ распределения по годам длительности штормов для следующих градаций интенсивности  $h_{3\%} > 1,25$  м;  $h_{3\%} > 2$  м;  $h_{3\%} > 3$  м;  $h_{3\%} \geq 4$  м показал, что их средние многолетние значения равны 14,2 сут; 7,6 сут; 3,1 сут; 1,2 сут соответственно. В течение года наиболее продолжительные штормы возникают в декабре – январе, минимальная длительность штормов отмечается в июне – июле.

На основе метода годовых максимумов и экстремального распределения Гумбеля определены высоты, периоды и длины волн в системе расчетных штормов, возможных 1 раз в  $n$  лет. Для шторма возможного 1 раз в 25 лет получены следующие значения волновых параметров: высота значительных волн  $h_s = 6,5$  м, средняя высота волн  $\bar{h} = 3,4$  м, средний период  $\bar{\tau} = 10,1$  с, средняя длина волн  $\bar{\lambda} = 152$  м, высота волн 1%-ной обеспеченности в системе шторма  $h_{1\%} = 7,9$  м.

На основе модели SWAN с высоким пространственным разрешением выполнено математическое моделирование полей ветровых волн для расчетных штормов возможных 1 раз в 25 лет. Получено, что наиболее сильное волнение с высотами 8–10 м в мористой части расчетной области формируется при юго-западном, южном и юго-восточном ветрах. Выявлено, что, начиная с изобаты в 5 м, структура волновых полей практически не зависит от направления генерирующего их ветра и определяется только рельефом дна акватории. Существенное влияние на распространении волн оказывает рефракция, вследствие которой вблизи набережной г. Судак волны в большинстве случаев имеют направление  $\sim 45^\circ$ . Определено, что на большей части акватории величины придонных орбитальных скоростей  $V_b$  лежат в пределах от 1,4 до 2,2 м/с; вблизи берега характерными для  $V_b$  являются значения 0,8–1,2 м/с; у мыса Алчак наблюдается резкое увеличение значений придонных скоростей до величин 2,8–3,0 м/с.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Исследование выполнено при финансовой поддержке темы государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FNNN-2024-0016. Модельные расчеты проводились на вычислительном кластере МНИ (<http://www.hpc-mhi.org>).

## **Список литературы**

1. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Морские берега Крыма. Севастополь: Колорит, 2019. 256 с.
2. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // Доповіді Національної Академії наук України. 2011. № 8. С. 108–112.
3. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K. P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014. №14. P. 2883–2897. DOI: 10.5194/nhess-14-2883-2014.
4. Гиппиус Ф.Н., Архипкин В.С. Многолетняя изменчивость штормового волнения на Черном море по результатам моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. №1(1). С. 38–47.
5. Fomin V.V. Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // *Journal of Physics: Conf. Series.* 2017. № 899. P. 052005. DOI: 10.1088/1742-6596/899/5/052005.
6. Divinskii B., Fomin V., Kosyan R., Lazorenko D. Maximum Waves in the Black Sea // *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Con-servation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019). Mugla, Turkey: Mediterranean Coastal Foundation (MEDCOAST Foundation).* 2019. Vol. 2. P. 799–810.
7. Дивинский Б.В., Фомин В.В., Лазоренко Д.И. Максимальные волны на акватории Черного моря по результатам численного моделирования // *Экология гидросферы.* 2024. №2 (12). С. 68–80. DOI: 10.33624/2587-9367-2024-2(12)-68-80.
8. Divinsky B.V., Fomin V.V., Kosyan R.D., Ratner Y.B. Extreme wind waves in the Black Sea // *Oceanologia.* 2020. V. 62, Iss. 1. P. 23–30. DOI: 10.1016/j.oceano.2019.06.003.
9. Bernardino M., Rusu L., Guedes Soares Evaluation of extreme storm waves in the Black Sea // *Journal of Operational Oceanography.* 2020. Vol. 14(2). P. 114–128. DOI: 10.1080/1755876X.2020.1736748.
10. Akpinar A., Ihsan 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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.005.
11. 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. DOI: 10.3390/en80910370.
12. Дулов В.А., Юровская М.В., Фомин В.В., Шокуров М.В., Юровский Ю.Ю., Барабанов В.С., Гармашов А.В. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года // *Морской гидрофизический журнал.* 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347.
13. Valchev N.N., Trifonova E.V., Andreeva N.K. Past and recent trends in the western Black Sea storminess // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12. P. 961–977. DOI: 10.5194/nhess-12-961-2012, 2012.
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. С. 61–71.
15. Дивинский Б.В., Косьян Р.Д. Волновой климат прибрежной зоны Крымского полуострова // *Морской гидрофизический журнал.* 2018. Т. 34. № 2. С. 101–110. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-2-101-110.
16. Galabov V., Chervenkov H. Study of the Western Black Sea Storms with a Focus on the Storms Caused by Cyclones of North African Origin // In: Vilibić I., Horvath K., Palau J. (eds). *Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas. Pageoph Topical Volumes.* Birkhäuser, Cham. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11958-4\_5.
17. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Под ред. Л.И. Лопатухина, А.В. Бухановского, С.В. Иванова, Е.С. Чернышевой. С-Пб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. 450 с.
18. Ефимов В.В., Комаровская О.И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь: МГИ НАНУ, 2009. 59 с.

## ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ Г. СУДАК (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

19. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н., Липченко М.М. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2003. Вып. 9. С. 13–28.
20. Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н. Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. // 2009. Вып.19. С.56–69.
21. Fomin V.V., Alekseev D.V., Ivancha E.V. Modeling of Wind Waves in the Bays of South-West Part of the Crimea Peninsula // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2012. Vol. 12. С. 363–369. DOI: 10.4194/1303-2712-v12\_2\_23.
22. Алексеев Д.В., Фомин В.В., Иванча Е.В., Харитоновна Л.В., Черкесов Л.В. Математическое моделирование ветрового волнения в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 1. С. 75–84. EDN TGLDOV.
23. Алексеев Д.В., Иванов В.А., Иванча Е.В., Фомин В.В., Черкесов Л.В. Оценка защитных молов на характеристики ветрового волнения в Севастопольской бухте // Метеорология и гидрология. 2013. №4. С. 47–57.
24. Фомин В.В., Полозок А.А. Режим ветрового волнения в районе Балаклавской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 53–67.
25. Фомин В.В., Полозок А.А. Особенности ветрового волнения в Балаклавской бухте в экстремальных ветровых условиях // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. №1. С. 5–22. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-1-5-22.
26. Харитоновна Л.В., Алексеев Д.В., Фомин В.В. Комплексное исследование волновых и литодинамических процессов в береговой зоне п. Морское (Восточный Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 5–22. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-3-5-22.
27. Харитоновна Л. В., Алексеев Д.В., Фомин В.В. Математическое моделирование волнового режима бухты Ай-Тодор // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27, № 3. С. 16–31. DOI 10.35595/2414-9179-2021-3-27-16-31.
28. Фомина И.Н., Полозок А.А., Фомин В.В. Режим ветрового волнения в районе Гурзуфа (южное побережье Крыма) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2023. Выпуск 8. С. 57–62.
29. Fomin V.V., Polozok A.A., Fomina I.N. Wind Wave Regime in the Alupka Area. // In: Karev V. (eds). Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes. PMMEEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-54589-4\_54.
30. Kharitonova L.V., Fomin V.V., Alekseev D.V. Wave Climate of Koktebel Bay of the Black Sea // In: Chaplina, T. (eds). Processes in GeoMedia. Springer Geology. Springer, Singapore. 2024. V. VIII. DOI: 10.1007/978-981-97-6627-7\_28.
31. Харитоновна Л.В., Фомин В.В., Горячкин Ю.Н., Алексеев Д.В. Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в бухте Коктебель (Черное море) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2024. Т. 10. № 2. С. 75–90.
32. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104 (4). P. 7649–7666. DOI: 10.1029/98JC02622
33. SWAN User Manual. Cycle III version 41.20. Delft University of Technology, Netherlands, 2018. 121 p.
34. Михайличенко С.Ю., Гармашов А.В., Фомин В.В. Верификация модели ветрового волнения SWAN по наблюдениям на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона РАН // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. № 2. С. 52–57.
35. Forecast | ECMWF [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts> (дата обращения: 15.05.2020).
36. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights // World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD. 2000. No. 1041. DOI: 10.25607/OBP-1495.
37. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Ленинград: Гидрометеоздат, 1966, 255 с.

**WAVE CLIMATE OF THE COASTAL WATER AREA OF SUDAK  
(BLACK SEA)**

***Kharitonova L. V.<sup>1</sup>, Mikhailichenko S. Yu.<sup>2</sup>, Alekseev D. V.<sup>3</sup>, Fomin V. V.<sup>4</sup>***

*<sup>1,2,3,4</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russian Federation*

*E-mail: <sup>1</sup>kharitonova.dntmm@gmail.com, <sup>2</sup>liham1984@rambler.ru, <sup>3</sup>fomin.dntmm@gmail.com,*

*<sup>4</sup>d.alekseev@mhi-ras.ru*

This study is devoted to a comprehensive analysis of the wave climate in the coastal waters of the city of Sudak (the Black Sea). The relevance of the study stems from the need to reconstruct the coastal protection structures of this resort city, which necessitates obtaining detailed data on the wind and wave regime with high spatial resolution. Despite of numerous studies of the wave climate of the Black Sea as a whole, the Sudak Bay region has not previously been the subject of such close regional study, which determines the novelty and practical significance of this work.

The study is based on a combination of statistical analysis and mathematical modeling. At the first stage, a statistical analysis of SWAN-ERAI model retrospective data was carried out over a 40-year period (1979–2019) for a point placed on the 45-meter isobath. Operational (background) and extreme wave characteristics were calculated, including the duration of storms and the repeatability of wave heights and periods. The Gumbel distribution was used to estimate extreme wave parameters (heights, periods, and wavelengths) with a repeatability from 1 to 100 years. At the second stage, detailed mathematical modeling was made using the SWAN spectral wave model for eight main wind directions with varying regime repeatability (10%, 4%, 2%, and 1%). To achieve high accuracy in the coastal zone, a five-step nested grid method was used, which allowed to obtain results with a spatial resolution of approximately 2 meters in the final computational domain of  $1.5 \times 2$  km, including Cape Alchak and the city embankment.

It was established that waves with significant wave heights less than 0.5 m and average periods of 2.5–3.5 s account for 49% of all cases; the repeatability of waves with heights of 1.0 m and more than 2.5 m is 8% and 1%, respectively. For the study area, storm waves are most likely to propagate from the east-southeast (repeatability is 14%) and south-southwest (repeatability is 14%). The average long-term storm duration is 14.2 days, the total value by year varies from 5.5 to 172.4 days. The longest storm situations occur from December to January, while the minimum storm duration is observed in June–July. Wave parameters for storms of varying repeatability were calculated using the Gumbel distribution. For example, for a storm that is possible once in 25 years, the height of significant waves will be 6.5 m, and the height of waves with a 1% probability in the storm system will reach 7.9 m.

Modeling of the spatial structure of wave fields revealed that the strongest waves, with heights of 8–10 m, in the seaward part of the computational domain are formed by southwest, south, and southeast winds. Starting from the 5–10 m isobath, the distribution of wave heights is practically independent on wind direction and is determined primarily by the bottom topography. Refraction plays a significant role, leading to the fact that near the shore, waves in most cases approach the shore at an angle of approximately  $45^\circ$ . Analysis of the fields of bottom orbital velocities is important for assessing bottom erosion and

lithodynamic processes. It was determined that over most of the water area, the values of bottom orbital velocities lie in the range from 1.4 to 2.2 m/s; near the shore, typical values are 0.8–1.2 m/s; near Cape Alchak, a sharp increase in bottom velocities to values of 2.8–3.0 m/s is observed.

This investigation provides, for the first time, such a detailed characterization of the wave climate in the coastal waters of Sudak. The obtained quantitative data on operational and extreme wave loads, as well as the spatial distribution of wave parameters and bottom velocities, provide the basis for: designing and reconstructing coastal protection structures (embankments, groins); assessing the risks of coastal and bottom erosion; forecasting lithodynamic processes and sediment transport; and ensuring the safety of maritime activities in this area. The results of this study fill an existing gap in regional research on the Black Sea coast of Crimea and can be used by government agencies, design organizations, and scientific organizations.

**Keywords:** Wave climate, wind waves, the Black Sea, Sudak, mathematical modeling, SWAN, extreme characteristics, near-bottom velocities, coastal zone.

### References

1. Goryachkin, Yu.N., Dolotov, V.V. *Morskije berega Kryma (Sea Coasts of Crimea)*. Sevastopol: Colorit, 2019, 256 p. (in Russian).
2. Polonsky, A.B., Fomin, V.V., Garmashov, A.V., 2011. *Harakteristiki vetrovogo volneniya Chernogo morya (Characteristics of wind waves of the Black Sea)*. Rep. National Academy of Sciences of Ukraine, (8), pp.108–112 (in Russian).
3. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K. P., Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 2014, №14, pp. 2883–2897. DOI: 10.5194/nhess-14-2883-2014.
4. Gippius F.N., Arkhipkin V.S. *Mnogoletnyaya izmenchivost' shtormovogo volneniya na Chernom more po rezul'tatam modelirovaniya (Interannual variability of storm waves in the Black sea according to numerical modelling results)*. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2017, no. 1(1), pp. 38–47. (in Russian).
5. Fomin V.V. Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones. *Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, № 899, pp. 052005. DOI: 10.1088/1742-6596/899/5/052005.
6. Divinskii B., Fomin V., Kosyan R., Lazorenko D. Maximum Waves in the Black Sea, in *Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Con-servation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22-26 October 2019)*. Mugla, Turkey: Mediterranean Coastal Foundation (MEDCOAST Foundation). 2019. Vol. 2. P. 799–810.
7. Divinsky B.V., Fomin V.V., Lazorenko D.I. *Maksimal'nye volny na akvatorii Chernogo morya po rezul'tatam chislenogo modelirovaniya (Maximum waves in the Black Sea based on the results of numerical modeling)*. *Hydrosphere Ecology*, 2024, №2 (12), pp. 68–80 (in Russian).
8. Divinsky B.V., Fomin V.V., Kosyan R.D., Ratner Y.B. Extreme wind waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 2020, V. 62, Iss. 1, pp. 23–30. DOI: 10.1016/j.oceano.2019.06.003.
9. Bernardino M., Rusu L., Guedes Soares Evaluation of extreme storm waves in the Black Sea. *Journal of Operational Oceanography*, 2020, Vol. 14(2), pp. 114–128. DOI: 10.1080/1755876X.2020.1736748.
10. 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, pp. 502–512. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.06.005.
11. 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, pp. 10370–10388. DOI: 10.3390/en80910370.
12. Dulov, V.A., Yurovskaya, M.V., Fomin, V.V., Shokurov, M.V., Yurovsky, Yu.Yu., Barabanov, V.S. and Garmashov, A.V. Extreme Black Sea Storm in November, 2023. *Physical Oceanography*, 2024, 31(2), pp. 295–316.

13. Valchev N.N., Trifonova E.V., Andreeva N.K. Past and recent trends in the western Black Sea storminess. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2012, 12, pp. 961–977. DOI: 10.5194/nhess-12-961-2012.
14. Myslenkov S.A., Shestakova A.A., Toropov P.A. Chislennoe modelirovanie shtormovogo volneniya u severo-vostochnogo poberezh'ya Chernogo moraya (Numerical Modeling of Storm Surges on the Northeastern Coast of the Black Sea). *Meteorology and Hydrology*, 2016, no. 10, pp. 61–71 (in Russian).
15. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. *Physical Oceanography*, 2018, 25(2), pp. 93–101. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-2-93-101>
16. Galabov V., Chervenkov H. Study of the Western Black Sea Storms with a Focus on the Storms Caused by Cyclones of North African Origin, in: Vilibić I., Horvath K., Palau J. (eds). *Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas. Pageoph Topical Volumes*. Birkhäuser, Cham, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11958-4\_5.
17. Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Baltijskogo, Severnogo, Chernogo, Azovskogo i Sredizemnogo morej (Reference Data on the Wind and Wave Regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas). Lopatoukhin LI, Bukhanovsky AV, Ivanov SV, Chernyshova ES (Eds.). *Russian Maritime Register of Shipping: St. Petersburg, Russia*, 2006, 452 p. (in Russian).
18. Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Atlas ekstremalnogo vetrovogo volneniya Chernogo morya (Atlas of Extreme Wind Waves of the Black Sea). Sevastopol: MGI NASU, 2009. 59 p. (in Russian).
19. Repetin L.N., Belokopytov V.N., Lipchenko M.M. Vetry i volnenie v pribrezhnoj zone yugo-zapadnoj chasti Krym (Winds and Waves in the Coastal Zone of the Southwestern Part of Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*, 2003, Issue 9, pp. 13–28 (in Russian).
20. Goryachkin Yu.N., Repetin L.N. Storm Shtormovoj vetro-volnovoj rezhim u Chernomorskogo poberezh'ya Kryma (Wind-Wave Regime off the Black Sea Coast of Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*, 2009, Issue 19, pp. 56–69 (in Russian).
21. Fomin V.V., Alekseev D.V., Ivancha E.V. Modeling of Wind Waves in the Bays of South-West Part of the Crimea Peninsula. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2012, Vol. 12, pp. 363–369. DOI: 10.4194/1303-2712-v12\_2\_23.
22. Alekseev, D.V., Fomin, V.V., Ivancha, E.V., Kharitonova, L.V. and Cherkesov, L.V. Matematicheskoe modelirovanie vetrovogo volneniya v Sevastopol'skoj buhte (Mathematical simulation of wind waves in the Sevastopol Bay). *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 2012, no. 1, pp. 75–84 (in Russian).
23. Alekseev D.V., Ivanov V.A., Ivancha E.V., Fomin V.V., Cherkesov L.V. Ocenka zashchitnyh molov na harakteristiki vetrovogo volneniya v Sevastopol'skoj buhte (Assessment of Protective Breakwaters on Wind Wave Characteristics in Sevastopol Bay). *Meteorology and Hydrology*, 2013, no. 4, pp. 47–57 (in Russian).
24. Fomin V.V., Polozok A.A. Rezhim vetrovogo volneniya v rajone Balaklavskoj buhty (Wind Wave Regime in the Area of Balaklava Bay). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2020, no. 2, pp. 53–67. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-2-53-67 (in Russian).
25. Fomin V.V., Polozok A.A. Osobennosti vetrovogo volneniya v Balaklavskoj buhte v ekstremal'nyh vetrovyh usloviyah (Wind Waves in the Balaklava Bay under Extreme Wind Conditions). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2021, no. 1, pp. 5–22. DOI: 10.22449/2413-5577-2021-1-5-22 (in Russian).
26. Kharitonova, L.V., Alekseev, D.V. and Fomin, V.V. Kompleksnoe issledovanie volnovykh i litodinamicheskikh processov v beregovoj zone p. Morskoe (Vostochnyj Krym) (Comprehensive Study of Wave and Lithodynamic Processes in the Coastal Area of the Village of Morskoye (Eastern Crimea)). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2021, no. 3, pp. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-5-22 (in Russian).
27. Kharitonova L.V., Alekseev D.V., Fomin V.V. Matematicheskoe modelirovanie volnovogo rezhima buhty Aj-Todor (Mathematical Modeling of the Wave Regime in Ay-Todor Bay). *InterCarto. InterGIS*, 2021, Vol. 27, no. 3, pp. 16–31. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-16-31. EDN ILCROO (in Russian).
28. Fomina I.N., Polozok A.A., Fomin V.V. Rezhim vetrovogo volneniya v rajone Gurzufa (yuzhnoe poberezh'e Kryma) (Wind Wave Regime in the Gurzuf Area (Southern Coast of Crimea)). *Ecology. Economy. Informatics. Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems*, 2023, Issue 8, pp. 57–62. DOI: 10.23885/2500-395X-2023-1-8-57-62 (in Russian).
29. Fomin V.V., Polozok A.A., Fomina I.N. Wind Wave Regime in the Alupka Area, in: Karev V. (eds). *Proceedings of the 9th International Conference on Physical and Mathematical Modelling of Earth and Environmental Processes. PMMEEP 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-54589-4\_54.

ВОЛНОВОЙ КЛИМАТ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ Г. СУДАК  
(ЧЕРНОЕ МОРЕ)

---

30. Kharitonova L.V., Fomin V.V., Alekseev D.V. Wave Climate of Koktebel Bay of the Black Sea, in: Chaplina, T. (eds). Processes in GeoMedia. Springer Geology. Springer, Singapore, 2024, V. VIII. DOI: 10.1007/978-981-97-6627-7\_28.
31. Kharitonova L.V., Fomin V.V., Goryachkin Yu.N., Alekseev D.V. Mezhdogovaya izmenchivost' vdol' beregovogo potoka nanosov v buhte Koktebel' (Chernoe more) (Interannual variability of the alongshore sediment flux in Koktebel bay (the Black Sea)). Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology, 2024, Vol. 10, no. 2, pp. 75–90. EDN JECMHU (in Russian).
32. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 1999, V. 104 (4), pp. 7649–7666. DOI: 10.1029/98JC02622.
33. SWAN User Manual. Cycle III version 41.20. Delft University of Technology, Netherlands, 2018, 121 p.
34. Mikhailichenko, S.Yu., Garmashov, A.V. and Fomin, V.V. Verifikaciya modeli vetrovogo volneniya SWAN po nablyudeniya na stacionarnoj okeanograficheskoy platforme gidrofizicheskogo poligona RAN (Verification of the Swan Wind Waves Model by Observations on the Stationary Oceanographic Platform of the Black Sea Hydrophysical Polygon of RAS). Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea, 2016, no. 2, pp. 52-57 (in Russian).
35. Forecast | ECMWF [Electronic resource]. Access mode: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts> (accessed: 15.05.2020).
36. Lopatoukhin L.J., Rozhkov V.A., Ryabinin V.E., Swail V.R., Boukhanovsky A.V., Degtyarev A.B. Estimation of extreme wind wave heights. World Meteorological Organisation. JCOMM Technical Report WMO/TD, 2000, no. 1041. DOI: 10.25607/OBP-1495.
37. Krylov Yu.M. Spektral'nye metody issledovaniya i rascheta vetrovyh voln (Spectral Methods for the Study and Calculation of Wind Waves). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 255 p. (in Russian)

*Поступила в редакцию 19.11.2025 г.*