

УДК: 551.466.2

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-16-31

Л.В. Харитонов¹, Д.В. Алексеев², В.В. Фомин³

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА БУХТЫ АЙ-ТОДОР

АННОТАЦИЯ

Исследование волнового режима прибрежных акваторий имеет большое практическое значение для безопасности мореплавания, проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры. В настоящей работе на основе математического моделирования определены статистические характеристики и пространственное распределение параметров ветрового волнения для района бухты Ай-Тодор, расположенной на Южном берегу Крыма в Черном море. Анализ параметров ветрового волнения за 1979–2017 гг. показал, что наибольшую повторяемость имеют волны с высотами 0,5 м, со средними периодами 3,0–3,5 с, приходящие от восточного направления; наиболее продолжительные штормовые ситуации образует волнение из сектора восток – юго-юго-запад в период с декабря по январь, среднее многолетнее значение длительности штилей составляет ~ 11 сут. Выполнены оценки экстремальных характеристик ветрового волнения (высот, периодов и длин волн) различной обеспеченности, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Для шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет средняя высота волн на подходе к бух. Ай-Тодор составляет 4,5 м, в системе этого шторма высота волн 1%-й обеспеченности достигает 9,6 м. Для ветра 4%-й режимной обеспеченности наиболее волноопасных направлений на основе модели SWAN и метода вложенных сеток произведены расчеты характеристик ветровых волн с высоким пространственным разрешением (~ 1,5 м). Проанализированы поля высот значительных волн, средних длин волн, придонных орбитальных скоростей и распределения зон интенсивности обрушения волн. Определено, что наиболее интенсивное волнение возникает при ветрах юго-восточного, восточного и южного направлений, максимальные придонные орбитальные скорости волновых течений достигают 2,5–3,5 м/с и прослеживаются вдоль берега на глубинах до 10 м. Модельные расчеты волновых течений по математической модели SWASH позволили выявить наличие в береговой зоне вблизи пляжа локального циклонического вихря, способствующего выносу взвешенного материала вдоль южной периферии вихря от пляжа в сторону моря.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ветровое волнение и течения, математическое моделирование, статистические характеристики, м. Ай-Тодор Крым, Черное море, SWAN, SWASH.

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия,
e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru

² Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия,
e-mail: d.alekseev@mhi-ras.ru

³ Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская, д. 2, 299011, Севастополь, Россия,
e-mail: v.fomin@ukr.net

Lyudmila V. Kharitonova¹, Dmitrii V. Alekseev², Vladimir V. Fomin³

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE AY-TODOR BAY WAVE REGIME

ABSTRACT

Investigation of wave regime of coastal water areas is practically important for safe shipping, constructing and using of coastal infrastructure objects. At the present paper statistical characteristics and space distribution of parameters of wind waves in the Ay-Todor Bay region placed on the Crimea South Coast of the Black Sea are obtained on the basis of mathematical simulation. Analysis of the wind wave parameters for the year diapason of 1979–2017 has shown that waves running from the east and having 0.5 m heights and 3.0–3.5 s mean periods are the most repeatable. The most durable storms are formed by waves coming from East – South - South-West sector in the period from December to January. The multiannual calm duration is equal to 11 days. Estimation of extremal characteristics (height, period and length) of wind waves of different probability, which possible one time in a year, 5, 10, 25, 50 and 100 years are made. For the storm probable one time in 25 years the mean wave height near the boundary of the Ay-Todor Bay is equal to 4.5 m. For this storm the wave height of 1% probability reaches 9.6 m. For the directions of winds of 4% regime probability which causes the most dangerous waves calculations of wave characteristics with high space resolution (~ 1,5 m) are carried out by using of SWAN model and nested grid technology. Fields of significant wave height, mean wave length, bottom wave orbital velocities and space distribution of wave breaking zones are analyzed. It is found that most intensive waves are generated by wind having south-east, east and south directions. Maximal bottom orbital velocities of wave current reaches of 2.5–3.5 m/s and occurs along the coast till 10 m depth. Model calculation of wave currents by using of SWASH model allowed obtained presence in the coastal zone near beach of local cyclonic eddy, which transport suspended sediments along its south edge from beach towards the sea.

KEYWORDS: wind wave and current, mathematical simulation, statistical characteristics, the Ay-Todor Bay of Crimea, the Black Sea, SWAN, SWASH.

ВВЕДЕНИЕ

Бухта Ай-Тодор расположена на Южном берегу Крымского побережья Черного моря между отрогами мыса Ай-Тодор – Аврориной скалой с юга и мысом Лимен-Бурун с северо-востока (рис. 1, *a*). На ее берегу построен пгт. Гаспра, относящийся к Городскому округу г. Ялта, и памятник архитектуры и истории Ласточкино гнездо. Акватория бухты с 1972 г. относится к особо охраняемой природной территории гидрологического профиля Памятника природы регионального значения «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Ай-Тодор» площадью 120 га⁴.

Район исследования представляет собой типичное абразионное побережье Южного берега Крыма. Форму берега моделируют выдвинутые в море сбросово-сдвиговые массивы прочных верхнеюрских известняков, образовавших мысы благодаря устойчивости к размыву [Зенкович, 1958]. Южный борт бухты образован Аврориной скалой, имеющей

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russian Federation, *e-mail*: l.kharitonova@mhi-ras.ru

² Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russian Federation, *e-mail*: d.alekseev@mhi-ras.ru

³ Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya str., Sevastopol, 299011, Russian Federation, *e-mail*: v.fomin@ukr.net

⁴ ООПТ России. Электронный ресурс: <http://www.oopt.aari.ru/> (дата обращения 29.04.2021).

высоту до 40 м. К морю мыс обрывается отвесными скалами, под водой породы продолжают опускаться под большим углом, образуя очень приглубый подводный склон. На расстоянии 8 м от уреза глубины достигают 6 м, уклон составляет 0,75. С северо-востока бухта ограждена мысом Лимен-Бурун высотой до 82 м. Скалы также обрывом спускаются к морю, однако, подводный склон здесь более пологий, чем у южного мыса, уклон принимает значения до 0,2. В вершине бухты расположен искусственный галечный пляж (длиной 80 м, шириной до 25 м) неполного профиля в комплексе с гидротехническими сооружениями – монолитным бетонным пирсом, теньевыми навесами с лодочной станцией и подсобными помещениями (рис. 1, б). В естественных условиях, до строительства гидротехнических сооружений, в бух. Ай-Тодор существовал карманный мелкогалечный пляж с глыбовыми навалами в основании (рис. 1, в). Подводный склон приглубый, уклон подводного берегового склона перед пляжем составляет 0,07.

В настоящее время в береговой зоне Крыма активно ведутся работы по реконструкции берегозащитных сооружений, а также по проектированию и строительству новой инфраструктуры для развития рекреационной деятельности. Для подобных работ необходимы сведения о режимно-климатических особенностях ветрового волнения прибрежной акватории Крыма с высоким пространственным разрешением, однако, региональных работ по исследованию волнового режима в рассматриваемом районе практически нет.

Для района акватории Черного моря вдоль южного берега Крыма сведения о ветро-волновом режиме имеются в справочных материалах¹ [Ефимов, Комаровская, 2009], где все море разбито на большие области с характерными характеристиками. Анализу данных на гидрометеорологических станциях посвящены работы [Репетин, 2003; Горячкин, Репетин, 2009]. Анализу волнового климата прибрежной зоны на основе результатов математического моделирования посвящена работа [Divinsky, Kosyan, 2018], однако ближайшие анализируемые точки расположены в районе м. Сарыч и г. Алушта (в 30 км от района исследований).

Целью работы – на основе результатов математического моделирования исследовать статистические характеристики и пространственную структуру ветрового волнения в районе бухты Ай-Тодор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета параметров ветрового волнения в прибрежной зоне бух. Ай-Тодор применялась численная спектрально-дискретная модель SWAN (Simulating Waves Nearshore)² [Booij et al., 1999]. Модель SWAN учитывает генерацию волн приземным ветром, рефракцию на неоднородностях рельефа дна, донное трение и обрушение волн на критических глубинах.

Первым этапом работы было получение статистических характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне района исследований. Из-за отсутствия наблюдений статистическому анализу подвергались результаты модельных расчетов ветрового волнения для всего Черного моря, полученные с помощью модели SWAN за 1979–2017 гг. на неструктурированной сетке [Divinskii et al., 2019]. Валидация модели была проведена на основе данных измерений волнения на морской платформе в Каркинитском заливе Черного моря [Полонский и др., 2011]. В качестве входных данных использовались поля приземного

¹ Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземноморского морей. Под ред. Л.И. Лопатухина, А.В. Буханского, С.В. Иванова, Е.С. Чернышевой. СПб., Российский морской регистр судоходства, 2006. 334 с.

² SWAN Cycle III version 41.20, User Manual, Delft University of Technology. Netherlands, 2018. 121 p.

ветра ERA-Interim и ERA5 с пространственным разрешением $0,25^{\circ 1}$. Для оценки статистических характеристик волнения из расчетного массива выбрана ближайшая к прибрежной зоне бух. Ай-Тодор точка на изобате ~ 100 м, для которой были сформированы временные ряды волновых параметров длиной 39 лет с дискретностью 1 ч. Далее для ссылки на этот массив параметров ветрового волнения в статье используется аббревиатура SWAN-ERA1.

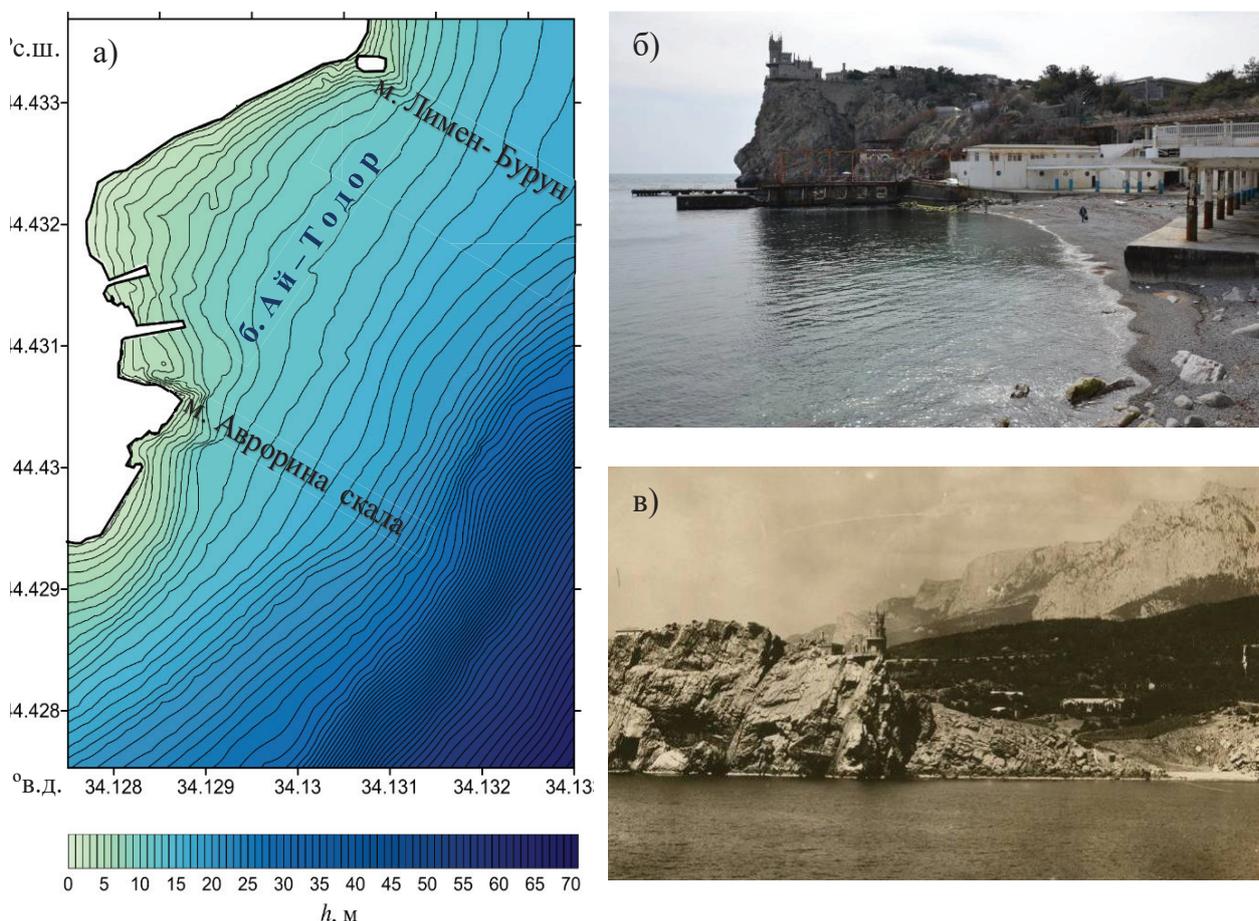


Рис. 1. Модельный рельеф дна (м) береговой зоны в районе бух. Ай-Тодор (а), пляж в бух. Ай-Тодор 22.03.2019 (б), побережье у бух. Ай-Тодор, снимок 1918 г. (в)

Fig. 1. Model bottom relief (m) of coastal zone in the Ay-Todor Bay region (a), beach in the Ay-Todor Bay on 22.03.2019 (b), coastal region of the Ay-Todor Bay in 1918 (c)

Для оценки экстремальных характеристик ветрового волнения применялся метод годовых максимумов, базирующийся на двухпараметрическом экстремальном распределении Гумбеля [Lopatoukhin et al., 2000]. Из массива волновых характеристик SWAN-ERA1 были выделены ряды годовых максимумов средних высот и средних периодов, и далее методом наименьших квадратов определены соответствующие параметры распределения Гумбеля. На основе полученных распределений были вычислены средние значения высот волн (\bar{h}) и средние значения периодов волн ($\bar{\tau}$), возможных 1 раз в заданное количество лет, на основе которых по распределению Глуховского [Крылов, 1966] были получены оценки высот и периодов волн различной обеспеченности.

¹ Advancing global NWP through international collaboration. Электронный ресурс: <http://www.apps.ecmwf.int/> (дата обращения 29.04.2021).

Моделирование ветрового волнения непосредственно в береговой зоне бух. Ай-Тодор проводилось с помощью модели SWAN и 5-шагового метода вложенных сеток. На первом шаге моделировались поля волнения во всем Черноморском бассейне на сетке с разрешением $4,5 \text{ км} \times 4,5 \text{ км}$ (246×160 узлов). На втором шаге на сетке $\sim 800 \text{ м} \times 1120 \text{ м}$ (234×122 узла) волнение рассчитывалось для области, включающей район южного берега Крыма. Расчеты на третьем и четвертом шагах выполнялись с разрешением $\sim 95 \text{ м} \times 150 \text{ м}$ (500×300 узлов) и $\sim 39 \text{ м} \times 56 \text{ м}$ (750×300 узлов), соответственно. На пятом шаге с разрешением $\sim 1,2 \text{ м} \times 1,7 \text{ м}$ (400×400 узлов) рассчитывались поля волн непосредственно в береговой зоне бух. Ай-Тодор (рис. 1а). На втором, третьем, четвертом и пятом шагах параметры волн на жидких границах определялись интерполяцией модельных данных, полученных на предыдущих шагах. Угловое разрешение волновой модели составляло 10° . По частотной координате, изменяющейся от 0,02 до 2 Гц, использовалась неравномерная сетка, имеющая 31 узел. Для построения рельефа дна первых четырех областей проводилась оцифровка крупномасштабных навигационных карт Черного моря. Рельеф дна пятой области (рис. 1а) строился на основе данных батиметрической съемки.

В численных экспериментах рассматривалась ситуация, когда на поверхность Черного моря воздействует неменяющийся во времени и однородный по пространству ветер заданного направления. Величина скорости ветра задавалась на основе режимных данных для исследуемого района, полученных в результате статистической обработки данных реанализа. Большинство расчетов проведено для ветра 4%-й режимной обеспеченности (22 м/с) и наиболее волноопасных направлений.

Для расчета волновых течений в береговой зоне бух. Ай-Тодор использовалась численная гидродинамическая модель SWASH (Simulating WAVes till SHore)¹. Модель позволяет проводить моделирование гидродинамических процессов в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом рефракции, дифракции и отражения волн. В модели также учитывается турбулентное перемешивание, донное трение, обрушение волн на критических глубинах, процессы затопления-осушения береговой зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведены расчеты статистических характеристик ветрового волнения по данным массива волновых характеристик SWAN-ERA1 [Divinskii et al., 2019; Divinskii et al., 2020] в точке на изобате $\sim 100 \text{ м}$ на траверзе бух. Ай-Тодор. Исходные временные ряды имеют следующие максимальные значения: высота значительных волн составляет 7,7 м; средний период – 11,4 с; энергия волн – 310 кВт/м.

На рис. 2а – 2в приведены графики повторяемости (%) высот значительных волн, средних периодов и среднего направления волнения. Как видно, с увеличением высоты волн их повторяемость уменьшается. Причем наибольшую повторяемость ($\sim 20\%$) имеют волны с высотами 0,5 м.

Максимальную повторяемость (более $\sim 14\%$) имеют волны со средними периодами 3,0–3,5 с. Наиболее часто (не менее 12%) волны приходят от трех направлений: 90° – восток; $67,5^\circ$ – восток-северо-восток; 225° – юго-запад. Анализ совместной повторяемости высоты значительных волн (h_s) и среднего направления волн ($\bar{\theta}$) в прибрежной зоне показал, что наиболее интенсивное ветровое волнение ($h_s \geq 5 \text{ м}$) в исследуемом районе соответствует четырем направлениям: 90° – восток; $112,5^\circ$ – восток-юго-восток; 180° – юг; $202,5^\circ$ – юго-юго-запад.

¹ SWASH. User Manual. The SWASH team. Delft University of Technology. Netherlands, 2012. V. 1.10A. 91 p.

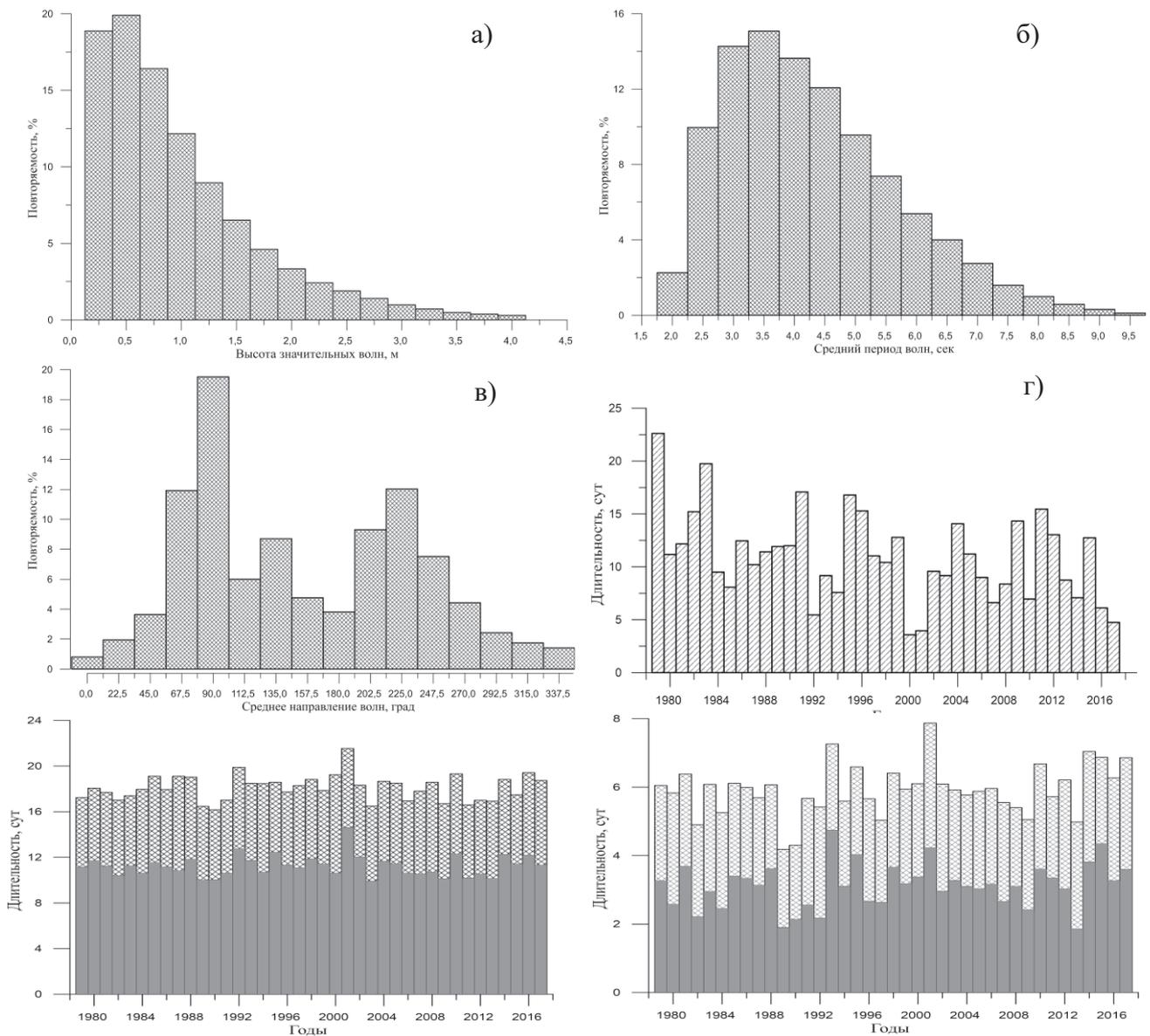


Рис. 2. Характеристики ветрового волнения на изобате ~ 100 м у бух. Ай-Тодор по данным SWAN-ERA1: повторяемость (%) высот значительных волн (а); повторяемость (%) средних периодов волн (б); повторяемость (%) среднего направления волнения (°) (в); распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ($h_{3\%} \leq 0,25$ м) (г), штормовых ситуаций для $h_{3\%} \geq 1,25$ м и $h_{3\%} \geq 2$ м (серый цвет) (д) и для $h_{3\%} \geq 3$ м и $h_{3\%} \geq 4$ м (серый цвет) (е)

Fig. 2. Wind wave parameters on ~ 100 m isobath near the Ay-Todor Bay according to SWAN-ERA1 data: significant wave repeatability (%) (a); wave mean period repeatability (%) (b); wave mean direction repeatability (%) (c); distribution by years of durations (day) of calm situations ($h_{3\%} \leq 0,25$ m) (d), of storms situations ($h_{3\%} \geq 1,25$ m and $h_{3\%} \geq 2$ m (grey color)) (e), of storms situations ($h_{3\%} \geq 3$ m and $h_{3\%} \geq 4$ m (grey color)) (f)

Для исследуемого района были также рассчитаны длительности штилевых и штормовых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок длительности использовались значения высот волн 3 %-й обеспеченности в системе шторма ($h_{3\%}$).

На рис. 2г представлено распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ($\leq 0,25$ м) в прибрежной зоне по данным SWAN-ERAI. Среднее многолетнее значение длительности штилей в исследуемом районе составляет ~ 11 сут.

Длительность (сут) штормовых ситуаций различной интенсивности определялась следующими критериями: $h_{3\%} \geq 1,25$ м; $h_{3\%} \geq 2$ м; $h_{3\%} \geq 3$ м; $h_{3\%} \geq 4$ м; $h_{3\%} \geq 5$ м; $h_{3\%} \geq 6$ м. В таблице 1 приведена средняя длительность по месяцам штормовых ситуаций и средние многолетние значения. Как видно, наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе.

В таблице 2 приведены оценки высот, периодов и длин волн различной обеспеченности, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет.

Табл. 1. Средняя длительность (сут) по месяцам и средние многолетние штормовых ситуаций на изобате ~ 100 м у бух. Ай-Тодор по данным SWAN-ERAI

Table 1. Mean duration (day) for each month and for many years of storms on isobaths ~ 100 m in the Ay-Todor Bay according to SWAN-ERAI data

Месяцы	$h_{3\%} \geq 1,25$ м	$h_{3\%} \geq 2$ м	$h_{3\%} \geq 3$ м	$h_{3\%} \geq 4$ м	$h_{3\%} \geq 5$ м	$h_{3\%} \geq 6$ м
1	24,5	17,5	10,4	5,7	3,1	1,8
2	22,1	15,6	9,7	5,7	3,2	1,6
3	22,7	15,5	8,5	4,4	2,2	1,0
4	18,5	10,8	4,9	2,4	1,1	0,5
5	13,1	6,4	2,5	1,0	0,4	0,1
6	9,8	4,0	1,6	0,6	0,3	0,1
7	11,7	5,1	1,8	0,8	0,3	0,1
8	13,6	6,7	2,8	0,9	0,3	0,1
9	14,9	8,5	4,1	2,0	1,0	0,5
10	19,5	12,2	6,2	3,3	1,7	0,9
11	22,3	14,7	8,0	3,4	2,5	1,3
12	24,6	17,8	10,5	6,4	3,8	2,1
среднее многолетнее	18,1	11,3	5,9	3,1	1,7	0,8

Табл. 2. Средняя высота волн (\bar{h}), средний период ($\bar{\tau}$), средняя длина волн ($\bar{\lambda}$) и высоты волн 50%, 13%, 3%, 1%-й обеспеченности (м), возможные 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет на изобате ~ 100 м у бух. Ай-Тодор по данным SWAN-ERA1

Table 2. Mean wave height (\bar{h}), mean period ($\bar{\tau}$), mean wavelength ($\bar{\lambda}$) and wave heights (m) having 50%, 13%, 3%, 1% probability, which possible one time in a year, 5, 10, 25, 50 and 100 years on isobaths ~ 100 m near the Ay-Todor Bay according to SWAN-ERA1 data

T, годы	\bar{h} , м	$\bar{\tau}$, с	$\bar{\lambda}$, м	$h_{50\%}$, м	$h_{13\%}$, м	$h_{3\%}$, м	$h_{1\%}$, м
1	3,2	9,4	136	3,0	5,0	6,6	7,5
5	3,9	10,2	163	3,7	6,1	8,0	9,1
10	4,2	10,7	178	4,0	6,7	8,7	9,9
25	4,6	11,3	197	4,4	7,4	9,6	10,9
50	5,0	11,7	211	4,7	7,9	10,2	11,6
100	5,3	12,1	226	5,0	8,4	10,8	12,3

Следующим этапом работы было определение пространственной структуры ветрового волнения для наиболее волноопасных направлений. На рис. 3 показаны пространственные распределения высоты значительных волн (h_s) и среднего направления волнения в бух. Ай-Тодор для разных направлений ветра. Волновые поля соответствуют скорости ветра 4%-й обеспеченности (22 м/с). Как показали расчеты, наиболее интенсивное волнение в исследуемом районе возникает при ветрах юго-восточного, восточного и южного направлений, что связано с максимальными разгонами ветра. Юго-восточный ветер генерирует волны с высотами 6,0–6,5 м. При ветрах северо-западного и северного направлений в бух. Ай-Тодор формируется зона волновой тени, в которой интенсивность волнения снижается до 1–2 м. Направление распространения волнения не совпадает с направлением ветра, что связано с рефракцией, которая разворачивает волны в сторону берега. При западном и юго-западном ветрах волнение отклоняется на север, при южном, юго-восточном и восточном ветрах – на северо-запад. Северо-восточный и северный ветры отклоняют волны на запад, а при северо-западном ветре волнение разворачивается в противоположном направлении. Вблизи пирсов наблюдается формирование теневых зон, располагающихся с подветренной стороны берегозащитных сооружений. С наветренной стороны пирсов подходящие волны имеют высоты 2–4 м, а в зоне тени происходит снижение интенсивности волнения до 0,2–1,0 м.

При юго-восточном, восточном и южном ветрах в открытом море генерируются волны с длинами 100–120 м (рис. 4). При подходе к берегу длины волн уменьшаются. Наименьшие длины волн генерируются при северном и северо-западном ветрах (до 30 м).

Далее был проведен анализ волновых характеристик, оказывающих прямое влияние на морфодинамические процессы в рассматриваемом районе. На мелководье волны проникают до дна и взвешивают донный материал. Обрушение волн сопровождается дополнительным перемешиванием вод, что также способствует переходу донных отложений во взвесь. Фактором, определяющим потери волновой энергии за счет донного трения, является максимальная амплитуда орбитальной скорости волнового движения у дна V_b (м/с). На рис. 5 видно, что максимальные придонные орбитальные скорости наблюдаются при юго-западном, южном, юго-восточном и восточном направлениях ветра. Усиление скоростей до 2,5–3,5 м/с прослеживается вдоль берега на глубинах до 10 м. В теневых зонах величины придонных орбитальных скоростей не превышают 1 м/с.

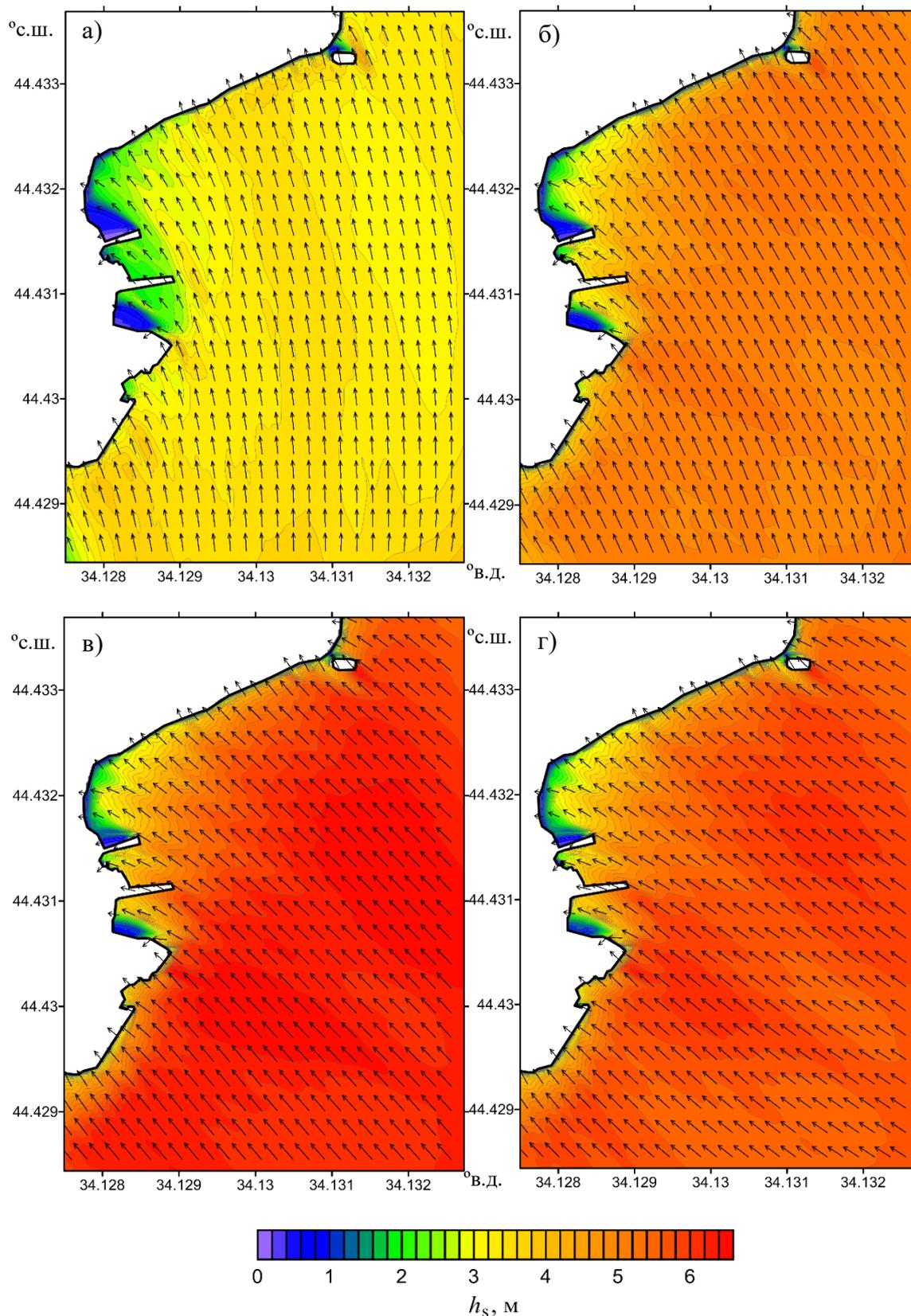


Рис. 3. Высота значительных волн (м) и среднее направление волнения в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности: а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном
 Fig. 3. Significant wave height (m) and mean wave direction in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a) south-west, b) south, c) south-east, d) east direction

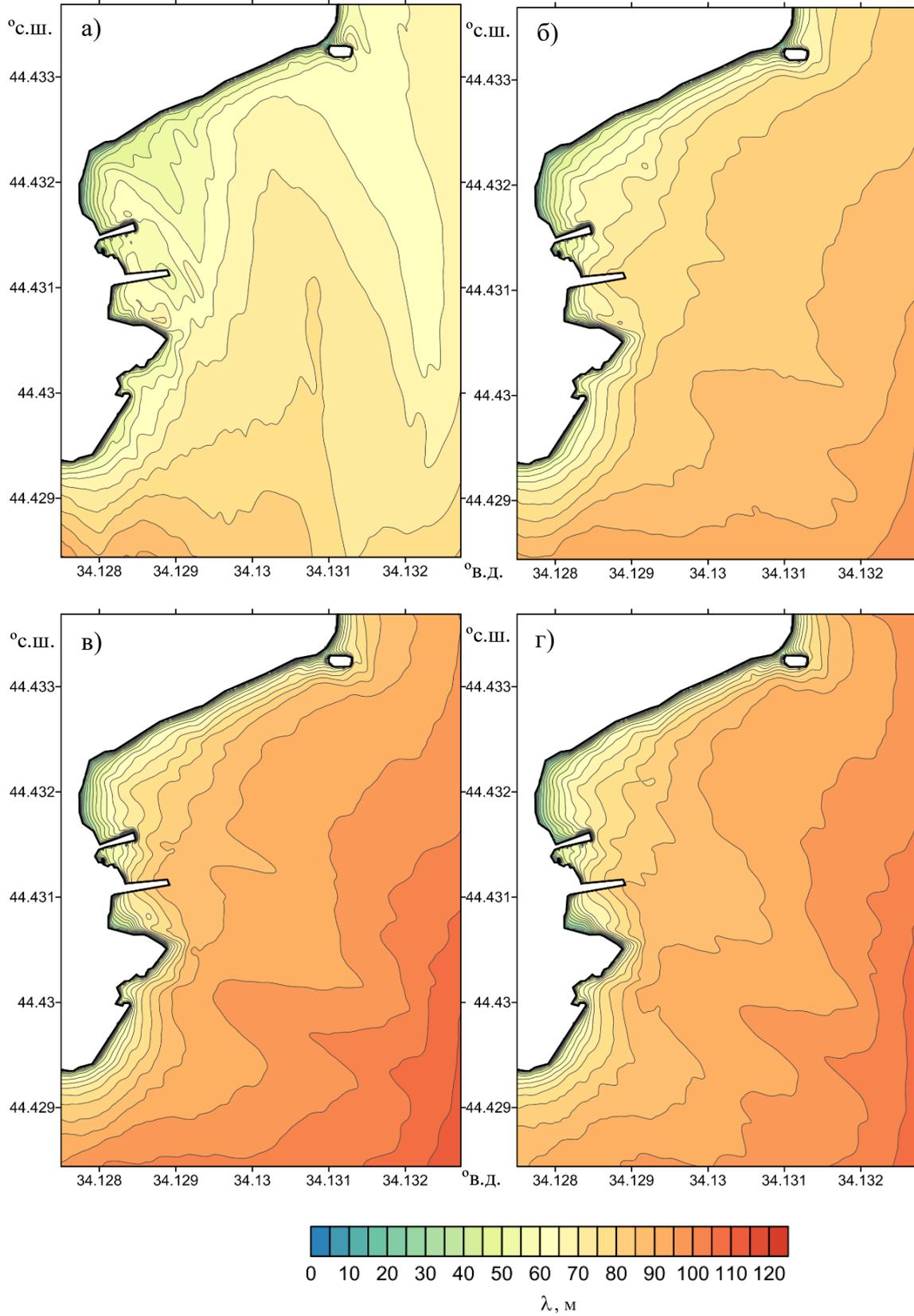


Рис. 4. Средняя длина волн (м) в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности:
 а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном

Fig. 4. Mean wavelength (m) in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a)
 south-west, b) south, c) south-east, d) east direction

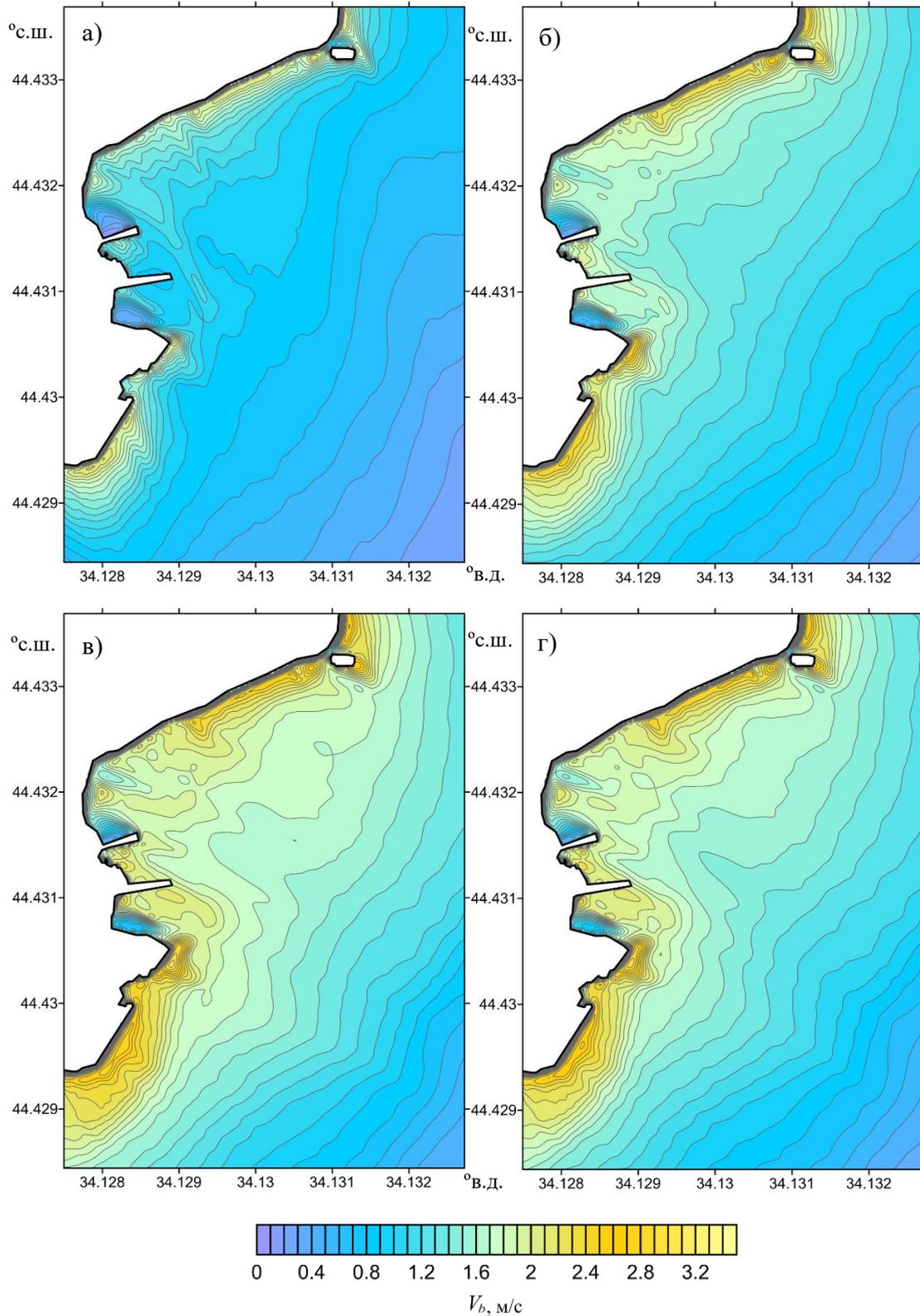


Рис. 5. Придонная орбитальная скорость (м/с) в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности: а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном
Fig. 5. Orbital velocity in the bottom (m/s) in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a) south-west, b) south, c) south-east, d) east direction

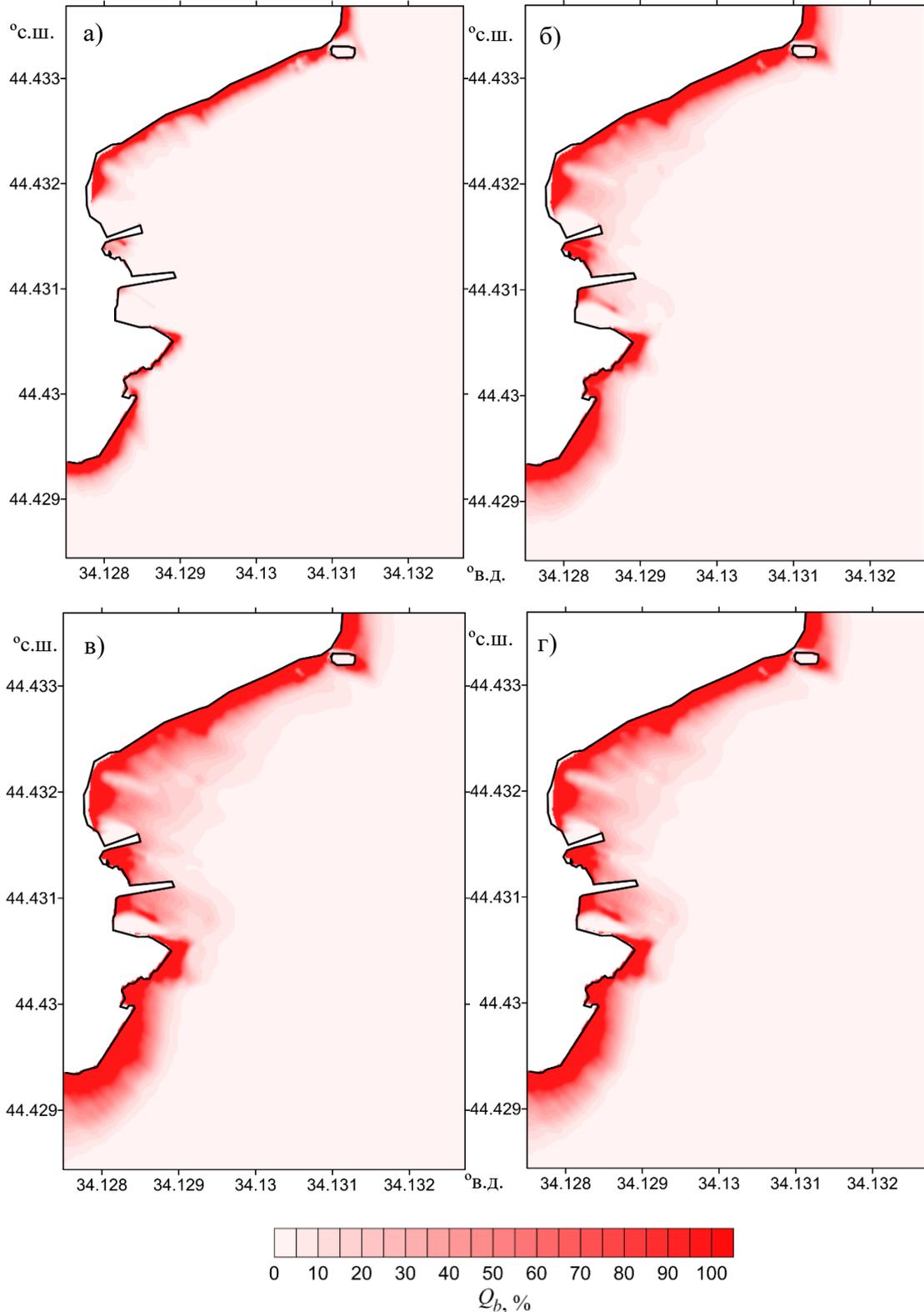


Рис. 6. Распределение зон интенсивности обрушения волн в бух. Ай-Тодор при ветре 4%-й обеспеченности: а) юго-западном, б) южном, в) юго-восточном, г) восточном

Fig. 6. Distribution of zones of wave breaking intensity in the Ay-Todor Bay in case of wind having 4% probability and a) south-west, b) south, c) south-east, d) east direction

О потерях волновой энергии за счет обрушения волн позволяет судить пространственное распределение зон обрушения. Количественным критерием обрушения является доля разрушающихся волн Q_b (%). Как показывает анализ зон обрушения волн в береговой зоне (рис. 6), величина Q_b возрастает с уменьшением глубины. При юго-восточном и восточном ветрах формируются наибольшие по площади зоны обрушения, что обусловлено максимальной интенсивностью волнения при этих направлениях ветра.

С использованием модели SWASH был выполнен численный эксперимент по расчету волновых течений в бух. Ай-Тодор, генерируемых набегающими волнами. На восточной границе расчетной области (рис. 7а) характеристики волнения задавались на основе спектра JONSWAP, включающего в качестве входных параметров высоту значительных волн $h_s = 1,5$ м и пиковый период волн $\tau_p = 10$ с. На южной и северной границах расчетной области задавалось условие излучения. Время действия волнения составляло 10 мин. Схема волновых течений при $t = 10$ мин. для юго-восточного направления волнения приведена на рис. 7а. Изолиниями показано поле глубин (м).

Как видно, вблизи существующего пляжа формируется локальный циклонический вихрь, в котором течение направлено против часовой стрелки (границы вихря показаны на рис. 7а красными окружностями). Возникновение вихря обусловлено конфигурацией береговой линии и блокирующим влиянием монолитного пирса. Необходимо отметить, что такой характер волновых течений способствует выносу взвешенного материала на южной периферии циклона от пляжа в сторону моря. Эта особенность динамики прослеживается также на космических снимках, Типичный пример выноса взвешенных веществ показан на рис. 7б.

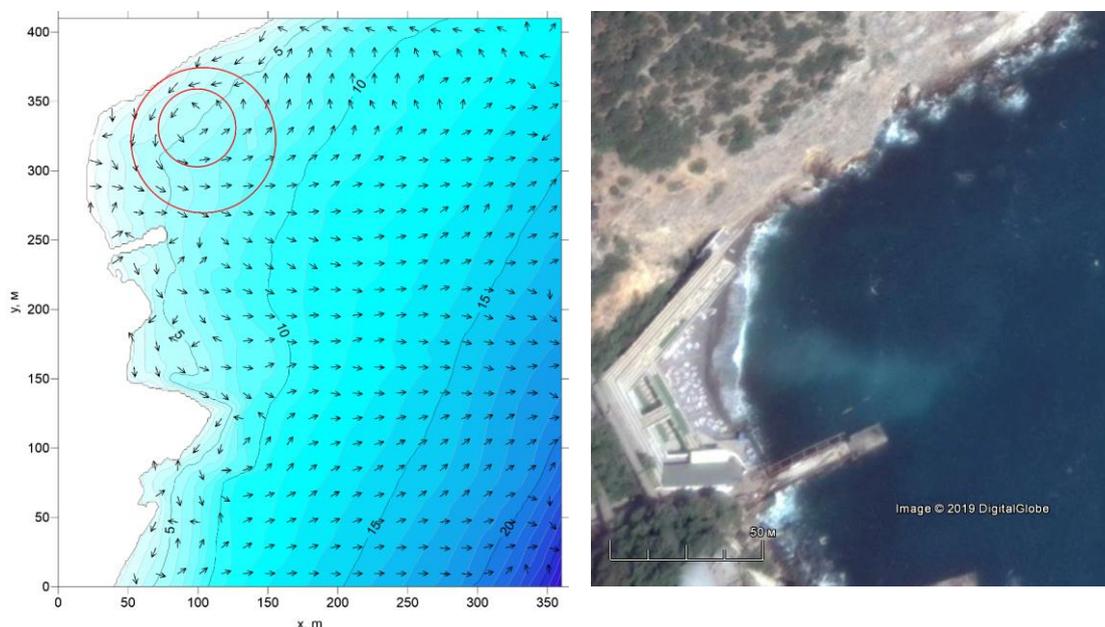


Рис. 7. Бухта Ай-Тодор: а) схема волновых течений при юго-восточном направлении волн (изолинии – поле глубин (м), стрелки – направления течений; красные окружности – локальный циклонический вихрь); б) космический снимок от 13.09.2016¹

Fig. 7. The Ay-Todor Bay: a) wave currents chart in case of south-east wave direction (depth field (m) is depicted by isolines; direction of currents is depicted by arrows; red circle shows the local cyclonic eddy); b) satellite snapshot on 13.09.2016¹²

¹ Google Earth. Электронный ресурс: <http://www.google.com/intl/ru/earth/> (дата обращения 29.04.2021).

ВЫВОДЫ

Проведено математическое моделирование ветрового волнения и течений, определены статистические характеристики и пространственное распределение параметров ветрового волнения для района бухты Ай-Тодор.

Установлено, что за период с 1979 по 2017 гг. наибольшую повторяемость имеют волны с высотами 0,5 м (~ 20 %), со средними периодами 3,0–3,5 с (более ~ 14 %), приходящие от восточного направления (19 %). Наиболее продолжительные штормовые ситуации образует волнение из сектора восток – юго-юго-запад в период с декабря по январь. Среднее многолетнее значение длительности штилей составляет ~ 11 сут. Получены оценки высот, периодов и длин волн различной обеспеченности, возможных 1 раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Для шторма повторяемостью 1 раз в 25 лет средняя высота волн на подходе к бух. Ай-Тодор составляет 4,5 м, в системе этого шторма высота волн 1 %-й обеспеченности достигает 9,6 м.

На основе модели SWAN и метода вложенных сеток выполнено математическое моделирование полей ветровых волн в акватории бух. Ай-Тодор с высоким пространственным разрешением (~ 1,5 м) для направлений ветра 4 %-й режимной обеспеченности. Как показали расчеты, наиболее интенсивное волнение возникает при ветрах юго-восточного, восточного и южного направлений, что связано с максимальными разгонами волн. При юго-восточном ветре генерируются волны с высотами более 6 м. Максимальные придонные орбитальные скорости волновых течений достигают 2,5–3,5 м/с и прослеживаются вдоль берега на глубинах до 10 м. В теневых зонах величины придонных орбитальных скоростей не превышают 1 м/с.

Модельные расчеты волновых течений по математической модели SWASH позволили выявить наличие в береговой зоне вблизи пляжа локального циклонического вихря, способствующего выносу взвешенного материала вдоль южной периферии вихря от пляжа в сторону моря. Этот эффект прослеживается на космических снимках и обусловлен конфигурацией береговой линии и распределением глубин в районе пляжа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке государственного задания Морского гидрофизического института РАН, тема № 0555-2021-0005 шифр «Прибрежные исследования».

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by government task, theme No 0555-2021-0005 “Coastal Research” code.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69.
2. *Ефимов В.В., Комаровская О.И.* Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь: МГИ НАНУ, 2009. 59 с.
3. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей. Москва: Географгиз, 1958. 374 с.
4. *Крылов Ю.М.* Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 255 с.

5. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря. Доклады Национальной академии наук Украины. 2011. № 8. С. 108–112.
6. 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. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. Вып. 9. С. 13–28.
7. 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. 104(C4). P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>.
8. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R. and Lazorenko, D., 2019. Maximum Waves in the Black Sea. In: MEDCOAST Foundation, 2019. Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, 2019. Turkey: MEDCOAST Foundation. V. 2. P. 799–810.
9. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2018. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. Physical Oceanography, [e-journal]. V. 25(2). P. 93–101. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-2-93-101.
10. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. Oceanologia, 62(1), P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>.
11. 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. No 1041. 2000.

REFERENCES

1. 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. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>.
2. Divinskii, B., Fomin, V., Kosyan, R. and Lazorenko, D., 2019. Maximum Waves in the Black Sea. In: MEDCOAST Foundation, 2019. Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 2019 (Marmaris, Turkey, 22–26 October 2019). Mugla, 2019. Turkey: MEDCOAST Foundation. V. 2. P. 799–810.
3. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2018. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. Physical Oceanography, [e-journal]. V. 25(2). P. 93–101. DOI: 10.22449/1573-160X-2018-2-93-101.
4. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. Oceanologia, 62(1). P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>.
5. Efimov V.V., Komarovskaya O.I. Atlas of extreme wind waves of the Black Sea. Sevastopol: MGI NASU. 2009. 59 p. (in Russian).
6. Goryashkin, Yu.N. and Repetin, L.N. Storm Wind and Wave Regime Near the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2009. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources. Sevastopol: MHI, 2009. Iss. 19. P. 56–69 (in Russian).
7. Krylov, Yu.M. Spectral Methods for Investigation and Calculation of Wind Waves. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966. 258 p. (in Russian).

8. *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. No 1041. 2000.
 9. *Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V.* Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (8). 2011. P. 108–112.
 10. *Repetin L.N., Belokopytov V.N., Lipchenko M.M.* Winds and waves in the coastal zone of the southwestern part of Crimea. Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics, 2003. Issue 9. P. 13–28 (in Russian).
 11. *Zenkovich V.P.* Shores of the Black and Azov seas. Moscow, Geografiz: 1958. 374 p. (in Russian).
-