

Научная статья  
УДК 551.466.2  
EDN PMPNVZ

## Характеристики штормового волнения в бухте Ласпи (Черное море) по результатам численного моделирования

А. Ю. Белоконь \*, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* e-mail: [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

### Аннотация

Исследуются характеристики штормового волнения в бухте Ласпи (Крымский полуостров) с использованием численной гидродинамической модели *SWASH* с пространственным разрешением 5 м. В качестве граничных условий задаются данные реанализа волнения, полученные на основе спектральной модели *SWAN*. Анализируются поля значимых высот волн  $h_s$  и скоростей волновых течений в бухте при штормах различной режимной обеспеченности. Установлено, что при штормах, возможных 1 раз в год, 1 раз в 5, 10 и 25 лет максимальные значения  $h_s$  в бухте могут достигать 2.5–3.0, 4.0–4.5, 5.0–5.5 и 6.0–6.5 м соответственно. При этом при штормах, возможных 1 раз в 25 лет, усиление волновых скоростей до 1.5–3.0 м/с происходит вблизи берега на глубинах менее 10 м. Влияние на волны защитного мола, построенного в 1980-х гг., является локальным и проявляется в формировании теневой зоны с его подветренной стороны. Обсуждаются вопросы возможного влияния штормового волнения на сокращение донной растительности в бухте Ласпи. Анализ волновой нагрузки на дно бухты показал, что в период экстремальных штормов в ее акватории наиболее подвержены воздействию волн оказываются склоны в области глубин от 2 до 12 м, где значения плотности кинетической энергии увеличиваются до 500–2000 Дж/м<sup>3</sup>. При этом в западной оконечности бухты плотность может достигать 3000–4500 Дж/м<sup>3</sup>. В средней части бухты значения энергетической нагрузки невелики. Поэтому к исчезновению здесь донной растительности могло привести не штормовое воздействие, а увеличение мутности воды, вызванное антропогенными факторами. Полученные результаты имеют большое практическое значение для безопасности мореплавания, проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры.

**Ключевые слова:** ветровое волнение, Черное море, Южный берег Крыма, бухта Ласпи, численное моделирование, *SWASH*

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы МГИ № FNNN-2021-0005 «Прибрежные исследования». Расчеты проводились на вычислительном кластере МГИ.

© Белоконь А. Ю., Фомин В. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Белоконов А. Ю., Фомин В. В. Характеристики штормового волнения в бухте Ласпи (Черное море) по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 2. С. 60–75. EDN PMPNVZ.

## Characteristics of Storm Waves in Laspi Bay (Black Sea) Based on Results of Numerical Modeling

A. Yu. Belokon, V. V. Fomin

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

### Abstract

This paper studies the characteristics of storm waves in Laspi Bay (Crimean Peninsula) using the numerical hydrodynamic model SWASH with a spatial resolution of 5 m. The wave reanalysis data obtained from the spectral model SWAN were set as boundary conditions. The fields of significant wave heights and wave current velocities in the bay were analyzed for storms of various regime conditions. It was established that the maximum values in the bay could reach 2.5–3.0 m, 4.0–4.5 m, 5.0–5.5 m and 6.0–6.5 m during storms that are possible once a year, once every 5, 10 and 25 years, respectively. An increase in wave velocities to 1.5–3.0 m/s occurred near the coast at depths of less than 10 m during storms that are possible once every 25 years. The influence of the protective breakwater, built in the 1980s, on the waves was local and manifested itself in the formation of a shadow zone on its downwind side. The possible influence of storm waves on the reduction of bottom vegetation in Laspi Bay was discussed. An analysis of the wave load on the bottom of the bay showed that during periods of extreme storms in its waters, the slopes most susceptible to the effects of waves were in the depth range from 2 to 12 m where the kinetic energy density increased to 500–2000 J/m<sup>3</sup>. At the same time, the density could reach 3000–4500 J/m<sup>3</sup> in the western end of the bay. The energy load values were low in the middle part of the bay. Therefore, the disappearance of bottom vegetation here could be not due to storm impact, but an increase in water turbidity caused by anthropogenic factors. The obtained results are of great practical importance for the safety of navigation, engineering and exploitation of coastal infrastructure.

**Keywords:** storm waves, Black Sea, Southern Coast of Crimea, Laspi Bay, numerical modeling, SWASH

**Acknowledgments:** The work was carried out under MHI topic no. FNNN-2021-0005 “Coastal Research”. Calculations were carried out on the MHI computing cluster.

**For citation:** Belokon, A.Yu. and Fomin, V.V., 2024. Characteristics of Storm Waves in Laspi Bay (Black Sea) Based on Results of Numerical Modeling. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 60–75.

### Введение

В последнее десятилетие во многих районах Южного берега Крыма (ЮБК) активно ведутся работы по проектированию, реконструкции имеющихся и строительству новых берегозащитных сооружений для развития рекреационной деятельности. Для проведения этих работ необходима режимно-климатическая информация о ветровом волнении и волновых течениях с высоким пространственным разрешением. Одним из таких районов ЮБК является бухта Ласпи.

Бухта Ласпи является одним из самых теплых участков ЮБК [1]. Это открытая бухта, которая расположена между мысами Айя и Сарыч, протяженность ее береговой линии составляет около 4 км. Район бухты Ласпи эстетически значим и привлекателен для развития рекреационной деятельности [2].

Берега бухты относятся к абразионному и абразионно-оползневому типам, для которых развиты гравитационные процессы. Побережье сложено довольно широким, около 20 м, галечным пляжем, к западу и югу маленькие пляжи чередуются с нагромождениями глыб. У берегов бухты расположены невысокие клифы [1]. Подводный склон приглубый, на большей его части выражен глыбовый бенч, который круто опускается на значительную глубину. Центральная часть бухты представляет собой наклонную равнину с песчаными и алевроитовыми отложениями [3]. В прибрежной зоне от мыса Айя до мыса Сарыч большую часть года формируются устойчивые вдольбереговые антициклонические течения со скоростями до 0.6 м/с. Гидрологический режим бухты Ласпи определяется влиянием этих течений, поступлением глубинных вод в поверхностные слои в процессе сгонно-нагонных явлений, водообменом с открытым морем [4].

В 1983 г., как показали натурные исследования [5], бухта Ласпи находилась в естественном или близком к нему состоянии, при котором поддерживалось экологическое равновесие береговой зоны. Бухта характеризовалась изобилием уникальных местообитаний донной растительности – цистозиры, филлофоры, взморника.

В конце 1980-х гг. в восточной части бухты Ласпи было построено гидротехническое сооружение, которое частично перекрыло вдольбереговые потоки наносов в ее вершине [6]. В 2009 г. в юго-восточной части бухты был построен гостиничный комплекс «Бухта Мечты». Строительство сопровождалось масштабными берегоукрепительными работами, которые привели к изменению конфигурации берега и подводного берегового склона. Однако после первых же сильных штормов набережная и волноотбойная стенка комплекса были частично разрушены [7]. Антропогенное воздействие привело к дополнительному поступлению терригенного материала и его оседанию в прибрежной области [2]. Как известно [8], строительство гидротехнических сооружений может приводить к нарушению гидродинамического режима и изменению участков абразии и аккумуляции. Например, исследования в заливе Петра Великого (Японское море) показали [8], что строительство гидротехнических сооружений привело к значительному сокращению донной растительности в береговой зоне.

Появление берегозащитного мола в бухте Ласпи и разрушение ее берегового склона в результате активной застройки побережья могло стать причиной нарушения гидродинамического режима бухты, что, в свою очередь, повлекло за собой размыв галечного бенча и дополнительное поступление терригенного материала, который образовался из-за строительства [2]. Во время исследований в вершине бухты в 1998 г. были выявлены илисто-песчаные донные отложения, начиная с глубины 3 м [6]. Бухта, которая в 1980-е гг. являлась эталоном природной экосистемы Черного моря, утратила этот статус. В ее центральной части сформировался донный природный комплекс, лишенный растительности [9]. За более чем 30-летний период в бухте произошли существенная структурная перестройка видового состава растительности и изменения в конфигурации

береговых границ [10]. В целом за это время в бухте запасы макрофитобентоса сократились в 1.5 раза, филлофоры – в 35 раз, zostеры – в 4 раза [9].

На формирование донных природных ландшафтов бухты Ласпи могли повлиять как хозяйственная деятельность на побережье, так и воздействие природных факторов. В климатическом аспекте подъем уровня Черного моря приводит к увеличению глубин у берега и усилению влияния на него волнения [11]. Среднегодовая штормовая активность в Черном море за период 1991–2016 гг. возросла на 10–15 % [12]. Экстремальный шторм, который произошел в ноябре 2007 г., также мог способствовать частичному уничтожению донной растительности бухты. В пользу этого предположения свидетельствует факт полного уничтожения растительности на глубинах до 10 м в период экстремального шторма в районе Карадага в 1992 г. [9]. Подобные последствия можно объяснить тем, что во время штормов сильные придонные волновые течения и интенсивное турбулентное перемешивание создают подвижки верхних слоев донного грунта, и укоренившиеся здесь растения постепенно вымываются из него [8, 13].

С учетом изложенного выше, целью настоящей работы является исследование волнового режима бухты Ласпи и степень его влияния на фитоценоз донной растительности. Следует отметить, что до настоящего времени подобные исследования не проводились.

В задачи работы входило получение и анализ полей высот волн и скоростей волновых течений в бухте Ласпи при штормах различной режимной обеспеченности. Расчеты проводились с учетом и без учета мола, построенного в конце 1980-х гг. Полученные волновые характеристики могут быть использованы при разработке рекомендаций по проведению хозяйственной деятельности в акватории бухты и оценке влияния штормового волнения на фитоценоз донной растительности.

### Математическая модель и входные данные

Моделирование волновых полей в акватории бухты Ласпи выполнялось с помощью двумерной версии численной волновой модели *Simulating Waves till SHore (SWASH)* [14]. Модель позволяет проводить расчеты гидродинамических полей в прибрежной зоне в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом нелинейности, рефракции, дифракции и отражения волн. Исходные уравнения модели имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left( \frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Здесь  $t$  – время;  $x, y$  – декартовы координаты; ось  $z$  направлена вверх;  $\zeta(x, y, t)$  – отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня;  $h = d + \zeta$  – полная глубина, равная сумме отклонения свободной поверхности и глубины  $d$  при невозмущенном состоянии жидкости;  $u$  и  $v$  – осредненные по глубине  $x$  и  $y$ -компоненты скорости;  $q(x, y, z, t)$  – негидростатическое давление;  $g$  – ускорение свободного падения;  $c_f = gm^2/h^{1/3}$  – коэффициент донного трения,  $m$  – параметр шероховатости Маннинга;  $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$  – компоненты тензора турбулентных напряжений;  $\nu_t$  – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости.

Для численного решения системы уравнений (1)–(3) была использована прямоугольная расчетная сетка глубин акватории бухты с разрешением 5 м, полученная на основе оцифровки навигационных карт. Размеры расчетной области составили  $3500 \times 2500$  м. Для оптимизации численного алгоритма применялась система координат, в которой ось  $x$  направлена с северо-запада на юго-восток (рис. 1).

На мористой границе расчетной области (при  $y = 0$ ) задавалась значимая высота волн  $h_s$  и средний период волн  $\bar{T}$ , возможные один раз в  $n$  лет. Эти параметры были получены на основе данных реанализа волнения за период 1979–2021 гг. с использованием спектральной модели SWAN [15, 16] (табл. 1).

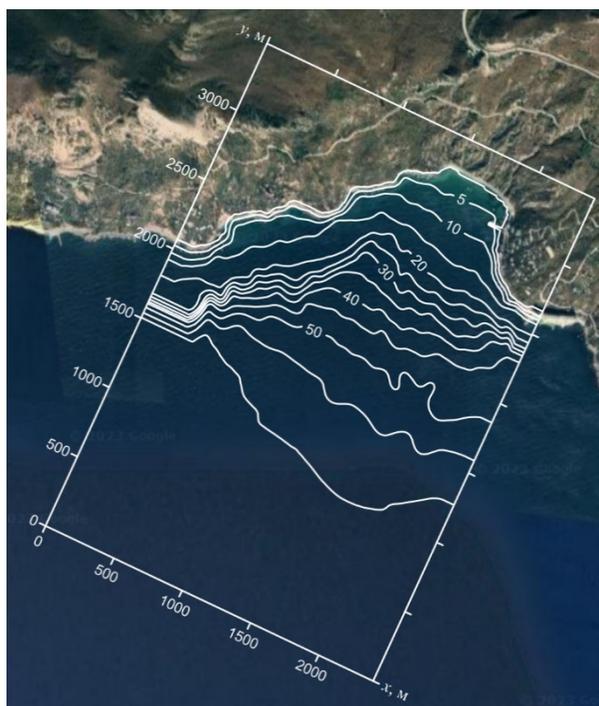


Рис. 1. Рельеф дна расчетной области (URL: <https://www.google.com/maps/@44.3927988,33.7329232,12998m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>)

Fig. 1. Bottom topography of the calculation area (available at: <https://www.google.com/maps/@44.3927988,33.7329232,12998m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>)

Таблица 1. Параметры волн

Table 1. Wave parameters

$T$ , год / $T$ , year	$\bar{h}$ , м / $\bar{h}$ , m	$h_s$ , м / $h_s$ , m	$\bar{\tau}$ , с / $\bar{\tau}$ , s
1	3.3	5.2	9.3
5	4.1	6.5	10.1
10	4.5	7.1	10.5
25	5.0	7.9	11.1

Примечание: Средняя высота волн  $\bar{h}$ , значимая высота волн  $h_s$  и средний период волн  $\bar{\tau}$  на взморье бухты Ласпи на глубине 65 м, возможные 1 раз в год, 1 раз в 5, 10 и 25 лет по данным ретроспективных расчетов волнения в Черном море за период 1979–2021 гг. [15, 16].

Note: Average wave height  $\bar{h}$ , significant wave height  $h_s$  and average wave period  $\bar{\tau}$  in the seaside of Laspi Bay at a depth of 65 m, possible once a year, once every 5, 10 and 25 years according to retrospective calculations of waves in the Black Sea for the period 1979–2021 [15, 16].

На жидких боковых границах расчетной области (при  $x = 0$  и  $x = 2500$  м) задавалось условие излучения. Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости определялся по формуле Смагоринского с константой  $C = 0.2$ . Параметр шероховатости Маннинга  $m = 0.022 \text{ с/м}^{1/3}$ . Шаг интегрирования по времени составлял 0.05 с.

### Результаты моделирования и обсуждение

В результате численных экспериментов получены значимые высоты волн и скорости волновых течений в бухте Ласпи при штормах различной режимной обеспеченности. Расчеты проводились с учетом и без учета защитного мола. Волновые поля построены по данным численного моделирования, осредненным по 100 периодам набегающей волны (~ 20 мин). В каждом расчетном узле значимая высота волн вычислялась по формуле:  $h_s = 4\sqrt{D}$ , где  $D$  – дисперсия возвышения свободной поверхности  $\zeta$ .

В результате анализа пространственной структуры  $h_s$  получено, что при штормах, возможных 1 раз в год, в 5, 10 и 25 лет значимые высоты волн могут достигать 2.5–3.0, 4.0–4.5, 5.0–5.5 и 6.0–6.5 м соответственно (рис. 2 и 3). При сравнении результатов расчетов, полученных с учетом и без учета защитного мола, видно, что сооружение оказывает локальное влияние на волновую динамику. Вблизи мола с его подветренной стороны формируется теневая зона размером около  $90 \times 110$  м. Значимые высоты волн в этой зоне составили 0.9 и 1.8 м при штормах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет соответственно. Во время шторма, возможного 1 раз в год, волны с наветренной стороны мола имеют высоты 3.5–4 м. В случае шторма, возможного 1 раз в 25 лет, высоты волн составили 4–6 м, а в зоне волновой тени высота волн уменьшается до 1.5–2.0 м.

Рассмотрены схемы волновых течений при штормах различной режимной обеспеченности в бухте Ласпи. На рис. 4 и 5 показаны скорость и направление волновых течений в бухте при штормах, возможных 1 раз в год и 1 раз в 25 лет. Видно, что зоны максимума волновых скоростей располагаются вдоль боковых границ бухты. При шторме, возможном 1 раз в год, на глубинах менее 10 м значения волновых скоростей составили 0.5–1.5 м/с.

При штормах, возможных 1 раз в 25 лет, в этих зонах может происходить увеличение скоростей до 1.5–3.0 м/с, а в теневых зонах волновые скорости не превышают 1 м/с. Таким образом, строительство защитного мола в бухте Ласпи привело к уменьшению волновых скоростей в восточной части ее вершины. Мол приводит к уменьшению в теневой зоне волновых скоростей в 4–6 раз.

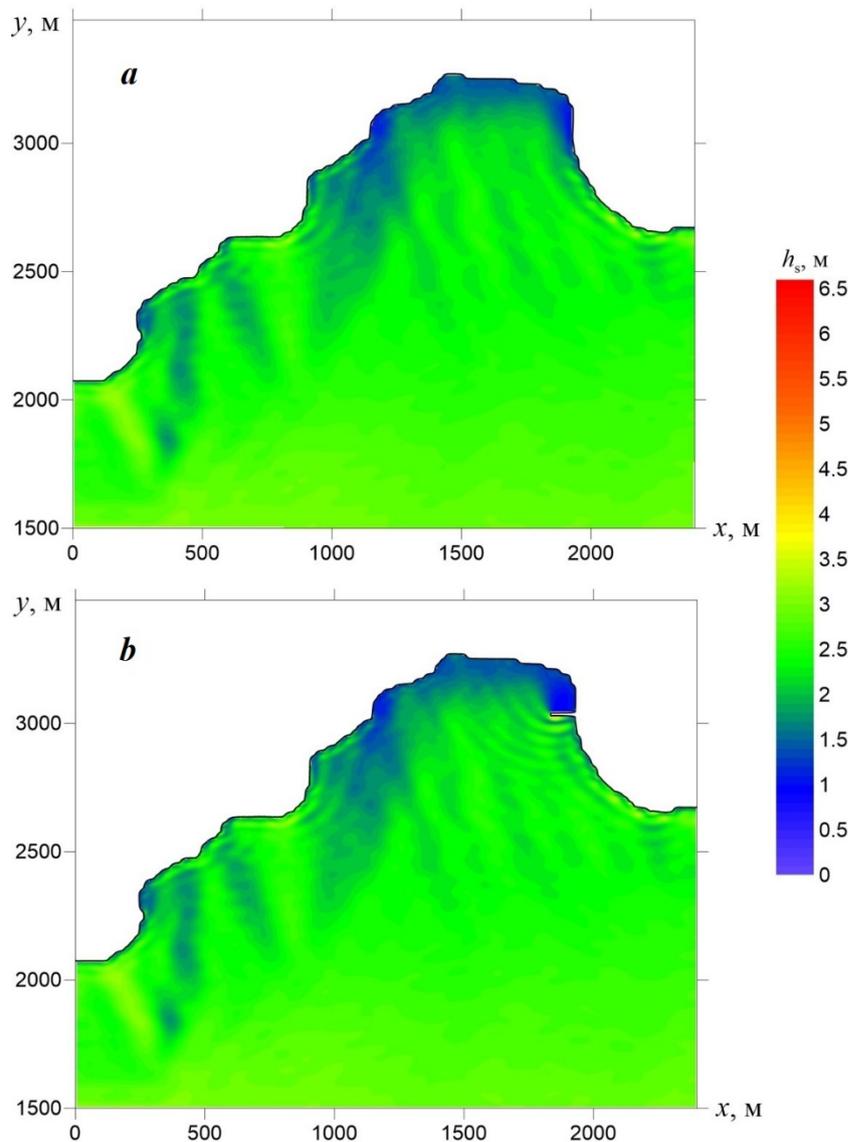


Рис. 2. Значимые высоты волн в бухте Ласпи при штормах, возможных 1 раз в год, без учета гидротехнического сооружения (а), с учетом гидротехнического сооружения (b)

Fig. 2. Significant wave heights in Laspi Bay for storms possible once a year: without taking into account the hydraulic structure (a); taking into account the hydraulic structure (b)

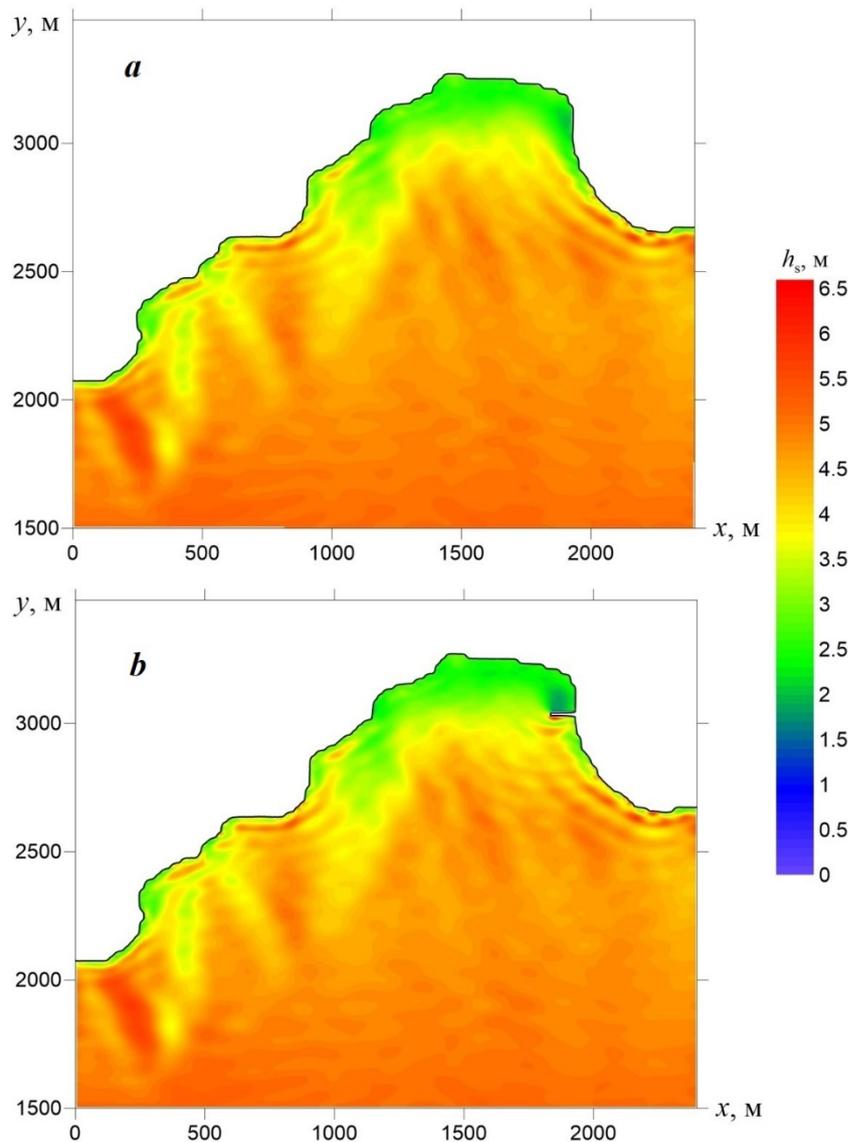
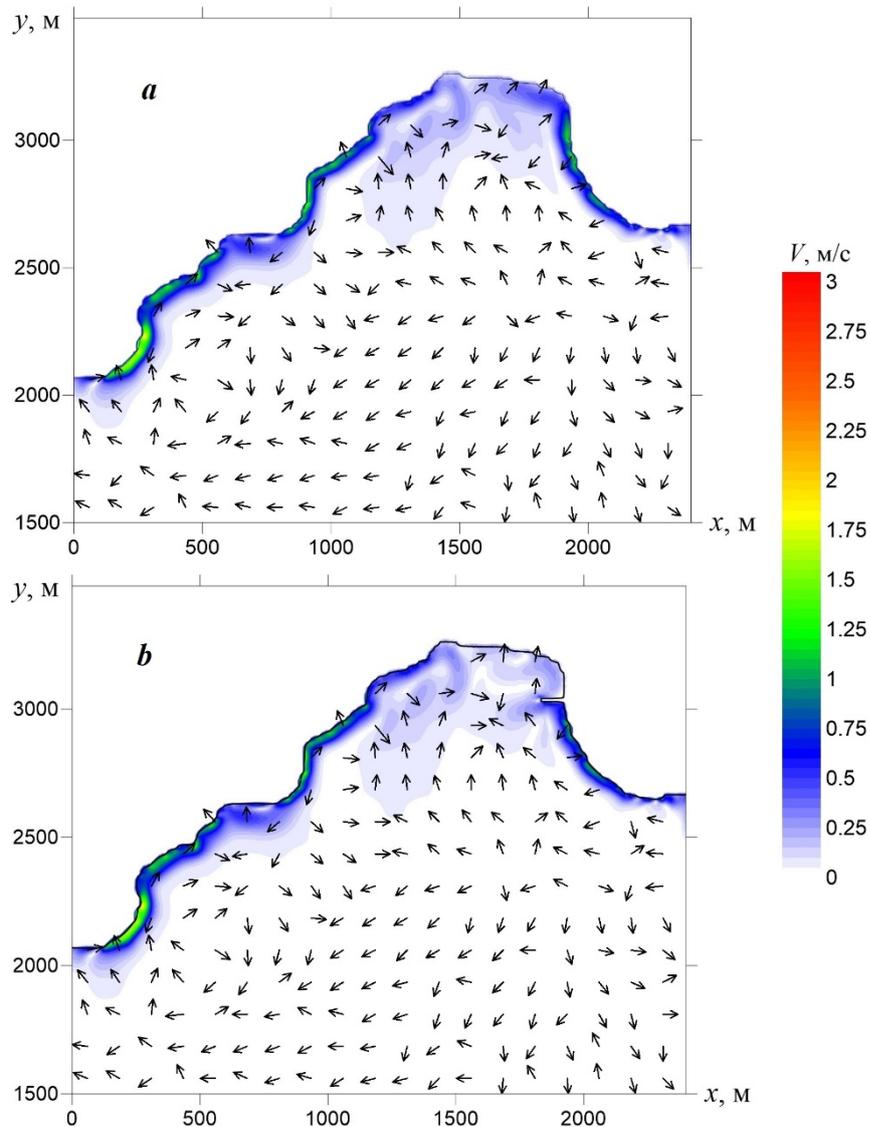


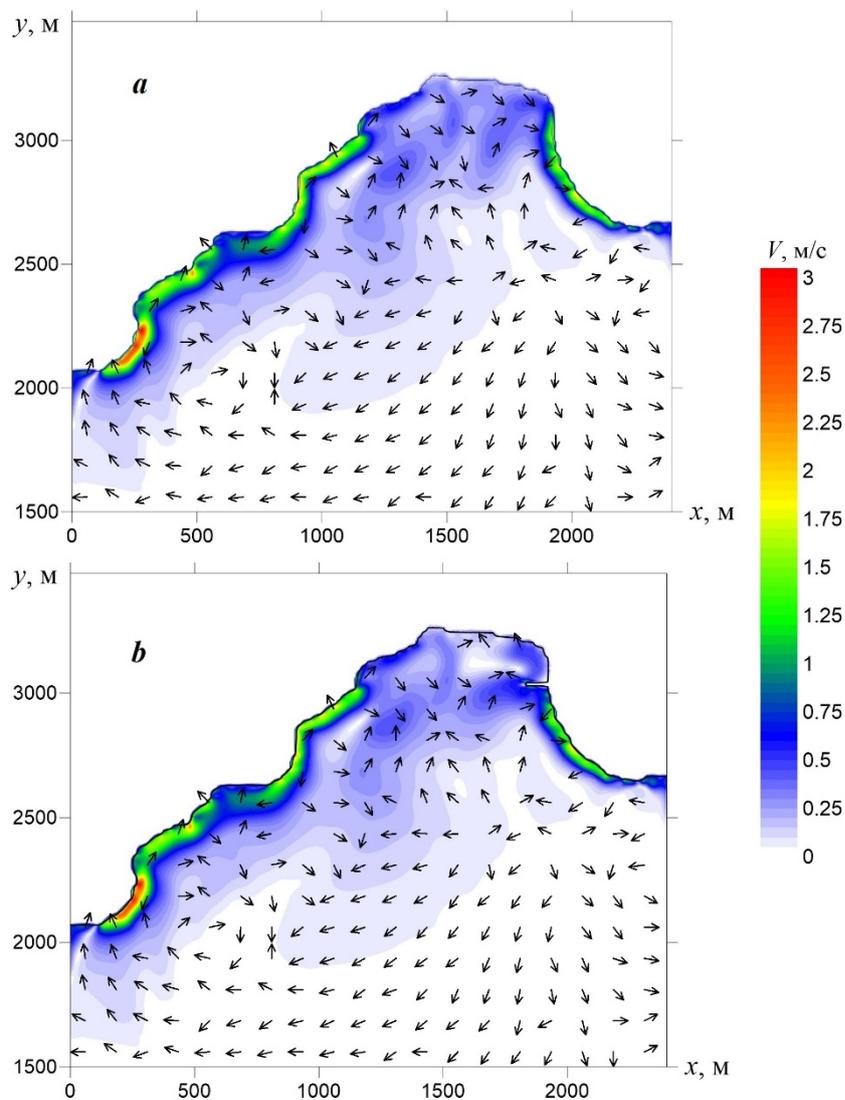
Рис. 3. Значимые высоты волн в бухте Ласпи при штормах, возможных 1 раз в 25 лет, без учета гидротехнического сооружения (а), с учетом гидротехнического сооружения (б)

Fig. 3. Significant wave heights in Laspi Bay for storms possible once every 25 years: without taking into account the hydraulic structure (a); taking into account the hydraulic structure (b)



Р и с . 4 . Волновые течения в бухте Ласпи при штормах, возможных 1 раз в год, без учета гидротехнического сооружения (a), с учетом гидротехнического сооружения (b)

Fig . 4 . Wave currents in Laspi Bay for storms possible once a year: without taking into account the hydraulic structures (a); taking into account the hydraulic structure (b)



Р и с . 5 . Волновые течения в бухте Ласпи при штормах, возможных 1 раз в 25 лет, без учета гидротехнического сооружения (а), с учетом гидротехнического сооружения (б)

Fig. 5. Wave currents in Laspi Bay for storms possible once every 25 years: without taking into account the hydraulic structures (a); taking into account the hydraulic structure (b)

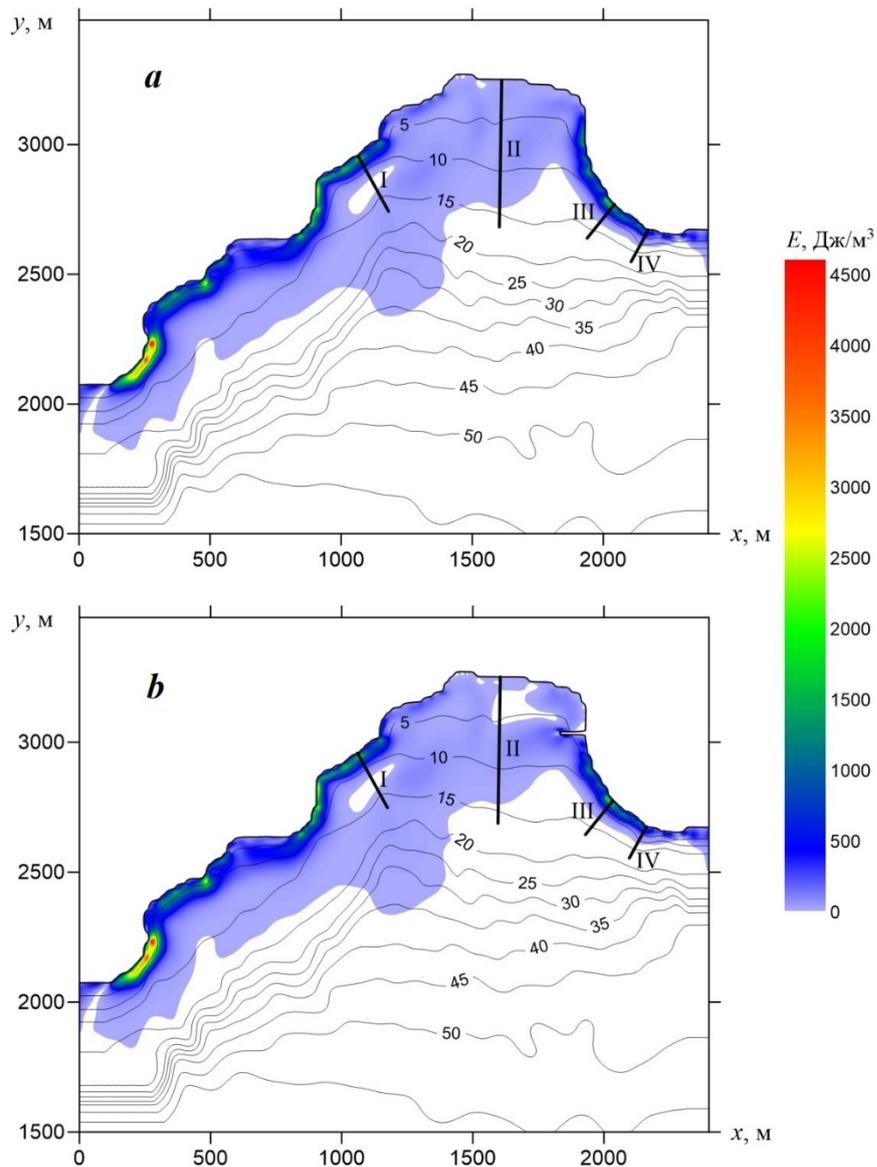
Проведена оценка волновой нагрузки на дно бухты Ласпи. Для этого были рассчитаны поля плотности кинетической энергии волнения  $E$ . Распределение плотности кинетической энергии в бухте при шторме, возможном 1 раз в 25 лет, показано на рис. 6. Как видно, интенсивность воздействия ветровых волн возрастает по мере уменьшения глубин. В областях с глубинами 10–20 м по всей акватории бухты Ласпи и в более мелководных областях в ее вершине, где глубина увеличивается относительно плавно, плотность кинетической энергии не превышает  $300 \text{ Дж/м}^3$ . Такие же значения плотности характерны и для центральной части бухты до глубин 35 м. Почти по всему периметру бухты на глубинах 2–7 м расположены крутые склоны. Здесь плотность кинетической энергии увеличивается до  $500\text{--}2000 \text{ Дж/м}^3$ , а в западной оконечности бухты она может достигать  $3000\text{--}4500 \text{ Дж/м}^3$ .

На рис. 6 жирными линиями показаны разрезы, на которых проводилось исследование придонных ландшафтов бухты Ласпи [2]. Разрезы расположены перпендикулярно к берегу и охватывают все типы ландшафтов, выделенные в бухте. Разрез I находится в западной части бухты, разрез II соединяет вершину и середину бухты, разрезы III и IV расположены в восточной части бухты. Для этих разрезов получены профили плотности кинетической энергии при шторме, возможном 1 раз в год, в 5, 10 и 25 лет (рис. 7–9). На этих же рисунках показан рельеф дна для каждого разреза и цифрами отмечены типы ландшафтов, исследованные в работе [2].

На рис. 7 показаны распределение плотности кинетической энергии и рельеф дна на разрезе I. Видно, что энергетические нагрузки для рассматриваемых штормов незначительны вблизи самого берега, где расположен глыбово-валунный бенч (цифра 1 на рис. 7) [2]. С увеличением глубины они резко возрастают и достигают максимального значения на расстоянии около 15 м от берега на глубинах 2–7 м. В этой области расположен крутой подводный абразионный береговой склон, где доминирует цистозира (цифра 3 на рис. 7) [2]. При штормах, возможных 1 раз в год, максимальная волновая нагрузка составляет  $\sim 500 \text{ Дж/м}^3$ ; 1 раз в 5 лет –  $\sim 1000 \text{ Дж/м}^3$ ; 1 раз в 10 лет –  $\sim 1300 \text{ Дж/м}^3$ ; 1 раз в 25 лет – около  $1700 \text{ Дж/м}^3$ . Затем при удалении от берега на 30 м и более на глубинах 7–12 м происходит постепенное снижение энергетической нагрузки в 2–3 раза. Здесь продолжается подводный береговой абразионный склон с преобладанием видов цистозеры и зостеры морской (цифра 4 на рис. 7) [2]. На глубинах более 12 м воздействие энергетической нагрузки незначительно.

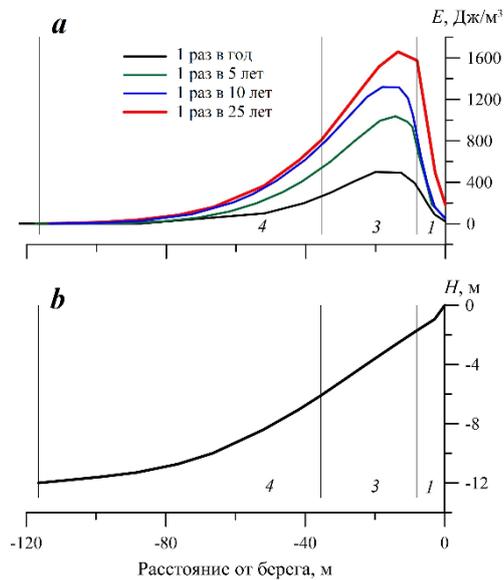
Энергетическая нагрузка на разрезе II, который расположен в вершине бухты Ласпи, минимальна вдоль всего профиля (рис. 8). Это связано с малыми уклонами дна, вследствие чего диссипация волновой энергии происходит на достаточно большом расстоянии от берега.

На разрезах III и IV (в восточной части бухты) (рис. 9) энергетическая нагрузка незначительная вблизи берега, затем она возрастает до максимальной на интервале глубин 2–6 м, где также расположен довольно крутой подводный склон с доминированием цистозеры (цифра 3 на рис. 9). На разрезе III в случае штормов, возможных 1 раз в год, максимальная энергетическая нагрузка составляет  $\sim 500 \text{ Дж/м}^3$ ; при штормах, возможных 1 раз в 5, 10, 25 лет она достигает 1100, 1300, 1600  $\text{ Дж/м}^3$  соответственно. В области разреза IV



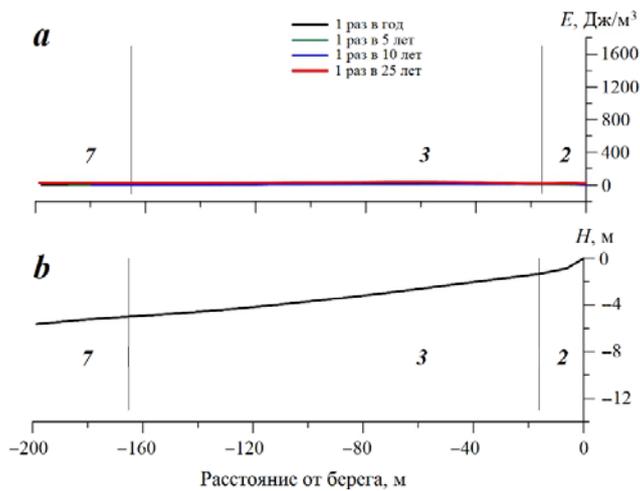
Р и с . 6 . Распределение плотности кинетической энергии в бухте Ласпи при шторме, возможном 1 раз в 25 лет, без учета гидротехнического сооружения (а), с учетом гидротехнического сооружения (б). Цифрами I–IV обозначены разрезы [2]

Fig. 6. Distribution of kinetic energy density in Laspi Bay for a storm possible once every 25 years: without taking into account the hydraulic structures (a); taking into account the hydraulic structure (b). Numbers I–IV indicate section numbers [2]



Р и с . 7 . Профили плотности кинетической энергии (а) и рельефа дна (b) на разрезе I. Цифрами обозначены донные природные комплексы согласно работе [2]

F i g . 7 . Profiles of kinetic energy density (a) and bottom topography (b) for section I. The numbers indicate bottom natural complexes from [2]



Р и с . 8 . Профили плотности кинетической энергии (а) и рельефа дна (b) на разрезе II. Цифрами обозначены донные природные комплексы согласно работе [2]

F i g . 8 . Profiles of kinetic energy density (a) and bottom topography (b) for section II. The numbers indicate bottom natural complexes from [2]

волновая нагрузка значительно уменьшается, при этом в случае шторма, возможного 1 раз в год, она составляет 150 Дж/м<sup>3</sup>, 1 раз в 5, 10, 25 лет – 500, 550, 700 Дж/м<sup>3</sup> соответственно.

Анализ всех полученных профилей плотности кинетической энергии волн (рис. 7–9) показал, что волновая нагрузка увеличивается при удалении от берега, достигая максимальных значений на интервале глубин 2–7 м. Затем на интервале глубин 7–12 м происходит постепенное снижение волновой нагрузки. На глубинах более 10–12 м волновая нагрузка резко уменьшается. Наибольшие значения волновой нагрузки получены для разрезов I и III, где они составили около 1600–1700 Дж/м<sup>3</sup>, несколько меньшие значения – в зоне разреза IV (около 700 Дж/м<sup>3</sup>). Минимальные значения волновой нагрузки получены для разреза II, где они не превысили 50 Дж/м<sup>3</sup>.

Можно сделать заключение, что в период экстремальных штормов в акватории бухты Ласпи наиболее сильное волновое воздействие возникает на глубинах до 10–12 м у береговых склонов с достаточно крутыми уклонами дна. Средняя часть бухты, лишенная донной растительности, является мелководной, но при этом она не подвержена интенсивному воздействию волн. Представляется, что причиной исчезновения донных природных комплексов в этой области может быть увеличение мутности воды, обусловленное увеличением поступления мелкодисперсных фракций вследствие антропогенного воздействия на берега бухты.

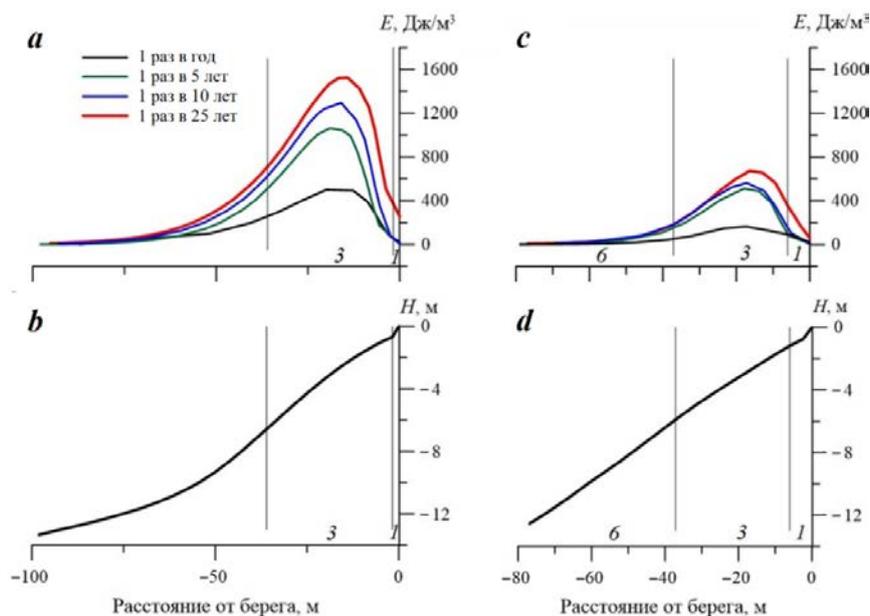


Рис. 9. Профили плотности кинетической энергии (a) и рельефа дна (b) на разрезе III; профили плотности кинетической энергии (c) и рельефа дна (d) на разрезе IV. Цифрами обозначены донные природные комплексы из работы [2]

Fig. 9. Profiles of kinetic energy density (a) and bottom topography (b) for section III; profiles of kinetic energy density (c) and bottom topography (d) for section IV. The numbers indicate bottom natural complexes from [2]

### Заклучение

С помощью численной модели *SWASH* выполнены расчеты волновых полей для акватории бухты Ласпи. На границе расчетной области задавались данные, полученные из реанализа волнения. В результате численных экспериментов получены значимые высоты волн и скорости волновых течений для штормов, возможных 1 раз в год, в 5, 10, 25 лет в бухте Ласпи. Расчеты проводились с учетом и без учета гидротехнического сооружения, построенного в конце 1980-х гг.

При штормах, возможных 1 раз в год, в 5, 10 и 25 лет значимые высоты волн в бухте могут достигать 2.5–3.0, 4.0–4.5, 5.0–5.5 и 6.0–6.5 м соответственно. Зоны максимума волновых скоростей расположены вдоль боковых границ бухты. При штормах, возможных 1 раз в 25 лет, усиление скоростей до 1.5–3.0 м/с происходит вдоль берега на глубинах менее 10 м. Максимумы волновой нагрузки на дно возникают на глубинах 2–7 м.

Оценка волновой нагрузки на дно бухты Ласпи показала, что во время штормов различной режимной обеспеченности наиболее подверженными воздействию волн оказываются береговые склоны в области глубин от 2 до 12 м, где значения плотности кинетической энергии увеличиваются до 500–2000 Дж/м<sup>3</sup>. При этом в западной оконечности бухты плотность может достигать 3000–4500 Дж/м<sup>3</sup>. В средней части бухты значения энергетической нагрузки невелики. Поэтому к исчезновению здесь донной растительности могло привести не штормовое воздействие, а увеличение мутности воды, вызванное антропогенными факторами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
2. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Пархоменко А. В. Донные природные комплексы бухты Ласпи (Черное море, г. Севастополь) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019. Т. 5 (15), № 4. С. 319–332. EDN WKIBET.
3. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Организация и оптимизация территориальной структуры природного заказника «Ласпи» (г. Севастополь) // Биота и среда заповедных территорий. 2018. № 4. С. 124–139. EDN VVMIQL.
4. Ациховская Ж. М., Чекменёва Н. И. Оценка динамической активности вод района бухты Ласпи (Черное море) // Экология моря. 2002. Вып. 59. С. 5–8. EDN WIAGPD.
5. Калугина-Гутник А. А. Изменение видового состава фитобентоса в бухте Ласпи за период 1964–1983 гг. // Экология моря. 1989. Вып. 31. С. 7–12. EDN XWPQUD.
6. Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Пространственно-временные изменения макрофитобентоса акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море) // Океанология. 2019. Т. 59, № 1. С. 93–107. EDN WOLBAE. <https://doi.org/10.31857/S0030-157459193-107>
7. Горячкин Ю. Н. Берегозащитные сооружения Крыма: Южный берег // Гидротехника. 2016. № 3(44). С. 34–39.
8. Преображенский Б. В., Жариков В. В., Дубейковский Л. В. Основы подводного ландшафтоведения (Управление морскими экосистемами). Владивосток : Дальнаука, 2000. 352 с.

9. *Миронова Н. В., Панкеева Т. В.* Долговременные изменения пространственного распределения запасов макрофитов в бухте Ласпи (Черное море) // *Экосистемы*. 2018. № 16 (46). С. 33–46. EDN YTUSBF.
10. *Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков Б. А.* Опыт картографирования донной растительности (на примере бухты Ласпи, Черное море) // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2020. Т. 6 (16), вып. 4. С. 154–169. <https://doi.org/10.37279/2309-7663-2020-6-4-154-169>
11. *Горячкин Ю. Н., Иванов В. А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее. Севастополь : Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2006. 210 с. EDN XXXSRN.
12. *Дивинский Б. В., Косьян Р. Д.* Климатические тенденции в волновом энергетическом потенциале Черного и Азовского морей по результатам численного моделирования // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. № 1. С. 14–21. EDN VUYZLN.
13. *Denny M.* Predicting physical disturbance: mechanistic approaches to the study of survivorship on wave-swept shores // *Ecological Monographs*. 1995. Vol. 65, iss. 4. P. 371–418. <https://doi.org/10.2307/2963496>
14. *Zijlema M., Stelling G., Smit P.* SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters // *Coastal Engineering*. 2011. Vol. 58, iss. 10. P. 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
15. Maximum Waves in the Black Sea / B. Divinskii [et al.] // *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, Turkey : Mediterranean Coastal Foundation (MEDCOAST Foundation), 2019. Vol. 2. P. 799–810. EDN VQHFAX.*
16. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // *Oceanologia*. 2020. Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>

Поступила 12.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.01.2024 г.; принята к публикации 27.03.2024 г.; опубликована 25.06.2024 г.

*Об авторах:*

**Белоконь Александра Юрьевна**, научный сотрудник, отдел вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 5633-9877**, **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983**, **ResearcherID: M-6839-2018**, [aleksa.44.33@gmail.com](mailto:aleksa.44.33@gmail.com)

**Фомин Владимир Владимирович**, главный научный сотрудник, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688**, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, **ResearcherID: H-8185-2015**, [v.fomin@ukr.net](mailto:v.fomin@ukr.net)

*Заявленный вклад авторов:*

**Белоконь Александра Юрьевна** – обзор литературы по проблеме исследования, обработка и описание результатов исследования, написание текста статьи

**Фомин Владимир Владимирович** – выполнение численных экспериментов, анализ результатов моделирования, написание текста статьи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*