

## Комплексное исследование волновых и литодинамических процессов в береговой зоне п. Морское (Восточный Крым)

Л. В. Харитонова \*, Д. В. Алексеев, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\* e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru

Поступила 28.07.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

Ветровое волнение может оказывать существенное влияние на объекты прибрежной инфраструктуры. Цель работы – комплексное исследование региональных характеристик ветрового волнения в районе п. Морское (юго-восточное побережье Крыма), необходимых для разработки проекта реконструкции транспортной магистрали, примыкающей к береговой зоне. На основе космических снимков и картографической информации изучена динамика пляжа в исследуемом районе. Показано, что до строительства берегозащитных сооружений ширина пляжа на исследуемом участке составляла 25–30 м, после строительства – уменьшилась до 15–25 м. На основе данных реанализа ветрового волнения, полученных с использованием спектральной модели *SWAN* и полей приземного ветра *ERA-Interim* за 1979–2017 гг., проведены расчеты режимных характеристик волнения в прибрежной зоне п. Морское. Установлено, что максимальную повторяемость (более 16 %) имеют волны со средними периодами 3.0–3.5 с. Наибольшую повторяемость имеют ветровые волны, приходящие из сектора юго-восток – юго-юго-восток. Получены оценки экстремальных характеристик ветрового волнения, возможных один раз в заданное количество лет. С помощью гидродинамической модели *SWASH* выполнено математическое моделирование наката волн на береговую зону. В расчетах использовалась регулярная сетка рельефа береговой зоны с высоким пространственным разрешением, построенная на основе интерполяции результатов топогеодезической и батиметрической съемок. Набегающая волна задавалась в виде солитона высотой 2.0; 3.0 и 3.4 м. Получено, что при высоте набегающей волны 2.0 м вертикальный волновой заплеск в исследуемом районе изменяется в пределах 1.7–2.2 м. При высоте 3.4 м заплеск достигает 1.8–2.9 м. В этом случае происходит полное затопление пляжа. При накате скорости волновых течений достигают 5 м/с. Вдоль нижней границы клифа придонная максимальная скорость течения достигает 1.5–1.75 м/с. При таких скоростях у клифа возможен размыв пляжа, состоящего из материала крупностью до 60–90 мм.

**Ключевые слова:** ветровое волнение, накат волн, математическое моделирование, статистические характеристики, Черное море, Крым, *SWAN*, *SWASH*.

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

© Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Фомин В. В., 2021



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:** Харитонов 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

## **Comprehensive Study of Wave and Lithodynamic Processes in the Coastal Area of the Village of Morskoye (Eastern Crimea)**

**L. V. Kharitonova \*, D. V. Alekseev, V. V. Fomin**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: l.kharitonova@mhi-ras.ru*

Submitted 28.07.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

Wind waves can have a significant impact on the coastal infrastructure. The paper aims at a comprehensive study of regional characteristics of wind waves near the village of Morskoye (south-eastern coast of Crimea), which are necessary to develop a project of reconstruction of the highway adjacent to the coastal area. Space images and cartographic information were used to study the beach dynamics in the studied area. It is shown that before construction of the coast protection structures the beach width in the studied area was 25–30 m, whereas after the construction it narrowed down to 15–25 m. Based on the wind wave reanalysis data obtained using SWAN spectral model and ERA-Interim surface wind fields for 1979–2017, regime characteristics of waves in the coastal zone of Morskoye were calculated. It was found that waves with average periods of 3.0–3.5 s have the maximum recurrence (over 16 %). Wind waves coming from SE-SSE sector have the highest recurrence rate. Estimates were obtained for the extreme characteristics of wind waves that may occur once in a given number of years. The SWASH hydrodynamic model was used to perform mathematical modelling of wave run-up on the coastal area. In their calculations the authors used a regular grid of the coastal relief with high spatial resolution based on the interpolation of topo-geodetic and bathymetric survey results. An incoming wave was given as a soliton of 2.0; 3.0 and 3.4 m high. It was found that with the incoming wave height of 2.0 m, the vertical wave splash in the studied area varies within 1.7–2.2 m. At a height of 3.4 m, the splash reaches 1.8–2.9 m. In this case the beach is flooded completely. During the run-up, wave current velocity amounts up to 5 m/s. Along the lower boundary of the cliff the bottom maximum current velocity reaches 1.5–1.75 m/s. At such velocities near the cliff, the beach consisting of material with the grain size up to 60–90 mm can be eroded.

**Keywords:** wind waves, wave run-up, mathematical modelling, statistical characteristics, Black Sea, Crimea, SWAN, SWASH.

**Acknowledgements:** the work was performed under state task of MHI, topic no. 0555-2021-0005, code “Coastal studies”.

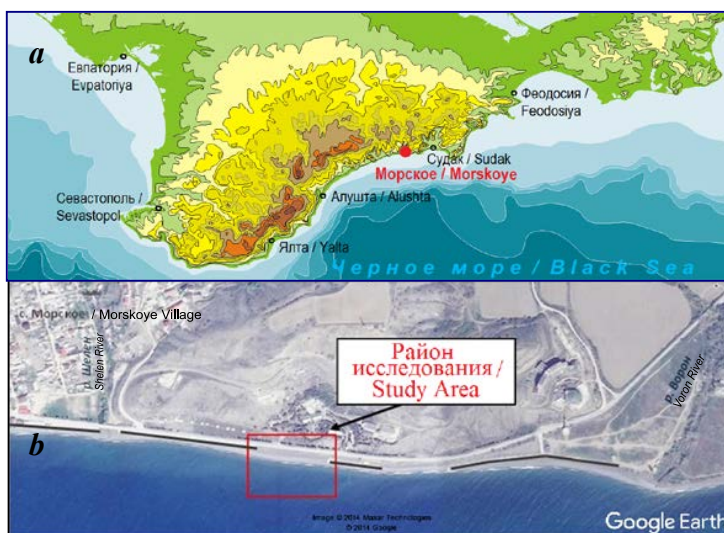
**For citation:** Kharitonova, L.V., Alekseev, D.V. and Fomin, V.V., 2021. Comprehensive Study of Wave and Lithodynamic Processes in the Coastal Area of the Village of Morskoye (Eastern Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 5–22. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-5-22 (in Russian).

## Введение

На восточном побережье Черного моря в районе п. Морское (городской округ Судак) в середине 90-х гг. XX в. велись работы по строительству гидротехнических сооружений (волноотбойных стенок, лестничных набережных) для защиты автодороги Алушта – Судак – Феодосия от размыва. Однако полностью проект берегоукрепления не был осуществлен, и строительство прекратилось. В отсутствие должного ухода и подсыпки материала гидротехнические сооружения региона в настоящее время находятся в неблагоприятном состоянии [1, 2]. Значительные по протяженности участки берега так и остались незакрепленными (рис. 1). В настоящее время на участках незакрепленного обрыва активный клиф вплотную приблизился к полотну автодороги. В конце июня 2018 г. в восточной части п. Морское был поврежден 200-метровый участок дороги.

Для создания схем инженерной защиты берегов, а также для обоснования проектных решений по реконструкции существующих берегозащитных сооружений необходимо гидрометеорологическое обеспечение работ. Обеспеченность района работ натурными данными неудовлетворительная, ближайший пост наблюдения расположен на МГ Ялта [3]. Сведения о ветроволновом режиме в районе акватории Черного моря вдоль восточного берега Крыма имеются в справочных материалах [4], в которых характеристики волнения представлены для типичных больших областей моря.

Наиболее современным методом исследования гидродинамических процессов с высоким пространственным разрешением является математическое моделирование. В последнее время опубликован ряд работ по моделированию реанализа ветрового волнения в береговой зоне Черного моря [5–9].



Р и с . 1 . Расположение района исследования на карте Крыма (а) и снимке с ресурса *Google Earth* 18.04.2014 (b) (черные линии – берегозащитные сооружения)

F i g . 1 . Location of the studied area on the map of Crimea (a) and on the *Google Earth* image as of 18 April 2014 (b) (black lines are for coast protection structures)

Динамические процессы в береговой зоне в значительной мере определяются ветровым волнением. Накат ветровых волн на береговой склон является одним из определяющих факторов, приводящих к абразии и аккумуляции наносов на берегах, разрушению береговой инфраструктуры.

Целью настоящей работы является изучение трансформации одиночной волны над реальным береговым склоном и оценка влияния наката ветровых волн на рельеф береговой зоны с использованием численного моделирования. Для исследования был выбран участок берега длиной 210 м в районе п. Морское. Для указанного района имеются данные топогеодезической и батиметрической съемок высокого разрешения, позволившие построить расчетную сетку, отражающую особенности рельефа береговой зоны.

### **Материалы и методы исследования**

Первым этапом работы стал анализ современного состояния и динамики береговой зоны в районе п. Морское на основе литературных источников, архивных фотоматериалов и спутниковых снимков.

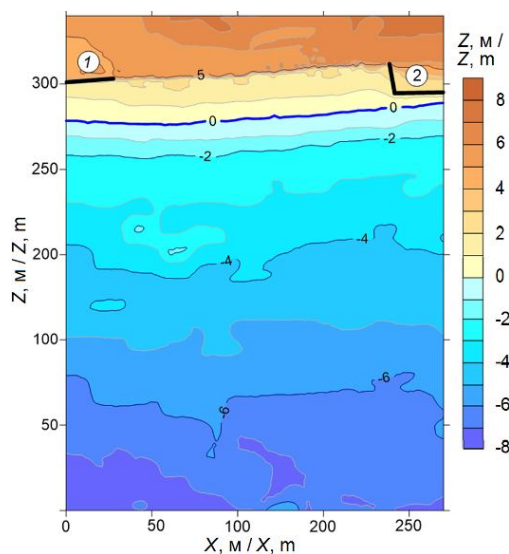
Далее были получены статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне района исследований. Из-за отсутствия натурных наблюдений статистическому анализу подвергались результаты модельных расчетов ветрового волнения для всего Черного моря, полученные с помощью модели *SWAN (Simulating WAves Near shore)* за 1979–2017 гг. на неструктурированной сетке [9]. В качестве входных данных использовались поля приземного ветра *ERA-Interim* и *ERA5* с пространственным разрешением  $0.25^\circ$  (URL: <http://www.apps.ecmwf.int/>). Математическое моделирование выполнялось на период времени 120 с. Расчетные данные выдавались с дискретностью 1 с. Валидация модели была проведена на основе данных измерений волнения на морской платформе в Каркинитском заливе Черного моря [10]. Далее полученный массив параметров ветрового волнения будем обозначать *SWAN-ERA1*. Для оценки оперативных характеристик волнения в исследуемом районе из массива данных *SWAN-ERA1* выбрана ближайшая к прибрежной зоне п. Морское точка на изобате ~ 20 м. Для этой точки сформированы временные ряды волновых параметров длиной 39 лет с дискретностью 1 ч.

На следующем этапе работы выполнено математическое моделирование гидродинамики береговой зоны в районе п. Морское с помощью численной модели *SWASH*<sup>1)</sup> (*Simulating WAves till SHore*) [11], основанной на нелинейных уравнениях мелкой воды, включающих слагаемое с негидростатическим давлением. Модель позволяет проводить моделирование гидродинамических процессов в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом рефракции, дифракции и отражения волн. В модели также учитываются турбулентное перемешивание, донное трение, обрушение волн на критических глубинах, процессы затопления/осушения береговой зоны.

Для расчетов была создана регулярная расчетная сетка рельефа береговой зоны (суши и прилегающей акватории) высокого пространственного

---

<sup>1)</sup> SWASH. User Manual / The SWASH team. Delft, The Netherlands : Delft University of Technology, 2012. Vol. 1. 91 p.



Р и с . 2 . Карта-схема моделируемого участка береговой зоны п. Морское. Черными кривыми обозначены берегозащитные сооружения: 1 – откосная стенка; 2 – лестничная набережная

Fig. 2. Schematic map of the modelled area of the village of Morskoye coastal zone. The black curves are for coast protection stairs: 1 – head wall; 2 – seafront stairs

разрешения (рис. 2), построенная на основе интерполяции результатов промеров. Топографическая и батиметрическая съемки выполнены в осенний период 2018 г. Размеры расчетной области составляли  $220 \times 290$  м. Ось  $x$  направлена вдоль параллели с запада на восток. Шаги расчетной сетки по координатам  $x$  и  $y$  составляли  $\Delta x = 1$  м,  $\Delta y = 0.5$  м.

Возмущение уровня на мористой границе расчетной области ( $y = 0$ ) задавалось в виде одиночной волны (солитона) [12]:

$$\zeta(0, y, t) = \zeta_0 \cosh^{-2} \left( \frac{y - ct}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где  $\zeta_0$  – высота волны;  $t$  – время;  $\lambda = 2H \sqrt{H/3\zeta_0}$  – длина волны;  $H = 8$  м – глубина на входе расчетной области;  $c = c_0(1 + \zeta_0/2H)$  – фазовая скорость волны;  $c_0 = \sqrt{gH}$ .

### Современное состояние и динамика береговой зоны п. Морское

Береговая зона п. Морское городского округа Судак Республики Крым расположена на крымском побережье Черного моря в Капсихорской бухте между мысами Башенным и Ай-Фока. Исследуемый участок лежит в восточной части села между устьевыми участками рек Шелен и Ворон (рис. 1).

В геологическом строении побережья выделяются сильно перемятые и раздробленные, часто рыхлые флишеидные таврические сланцы, состоящие из перемежающихся пластов песчаников и уплотненных глин. Основные черты береговой полосы (направление и крупные элементы) связаны со сбросовой тектоникой, что отражено в сходстве очертаний современной береговой полосы и контуров уступа морского дна. Ширина абразионной подводной террасы до изобаты 20 м составляет 850 м и имеет уклон 0.02. Далее идет крутой свал глубин. Характерной морфологической особенностью описываемого района является террасированность береговой полосы, однако большинство террас плохо сохранились и представлены в виде небольших участков. Автодорога Алушта – Судак – Феодосия в пределах рассматриваемого участка пролегает по одной из таких реликтовых террас высотой 4.5–6.5 м над уровнем моря, состоящей из темноцветного грунта делювиального происхождения с включениями гальки и щебня.

Для района исследования характерно однообразное строение береговой зоны с выровненным абразионным профилем и прислоненными гравийно-галечными песчанико-известняковыми пляжами. У уреза воды располагается галька, гравий, далее крупный песок с примесью плоской гальки песчаника, а также известняка и конгломератов. Материал, формирующий пляжи, в основной массе аллювиальный, поступает в береговую зону с селевыми потоками рек Шелен и Ворон. Частичное пополнение пляжевого материала осуществляется вследствие процесса абразии прилежащих участков берега и выброса материала со дна.

По данным Института минеральных ресурсов (г. Симферополь), до строительства берегозащитных сооружений в районе п. Морское ширина пляжей составляла в среднем 25–30 м. За период с 1992 по 2014 г. она сократилась на 10–12 м на отдельных участках (рис. 3). Средняя многолетняя величина абразии до 1988 г. составляла ~ 0.35 м, современные скорости отступления клифа – 0.5–1.0 м/год [1].

Динамика береговой линии анализировалась по историческим спутниковым снимкам ресурса *Google Earth* с 2007 по 2017 г. (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>). За рассмотренный 10-летний период очертания береговой линии района почти не менялись. Изменения в пределах 1–4 м фиксировались от сезона к сезону и зависели от состояния моря в момент съемки (штиль или слабое волнение). Ширина пляжа на расчетном участке составляет 17–24 м (рис. 4, *a*). Пляжи с минимальной шириной расположены на участках берега с бетонными гидротехническими сооружениями – откосными стенками и лестницами. Так, к западу от участка вдоль откосной бетонной волноотбойной стенки ширина пляжа достигает минимума (5–8 м) на расстоянии 150–200 м (рис. 4, *c*). Далее к устью р. Шелен пляж вновь расширяется до 20–22 м. У лестничной набережной, примыкающей с востока к исследуемому участку, пляж имеет ширину от 6 до 12 м (рис. 4, *b*). Восточнее набережной расположен участок берега с новыми гидротехническими сооружениями, защищающими от размыва автодорогу (рис. 4, *d*). Далее по мере приближения к устью р. Ворон ширина пляжа вновь увеличивается до 20–25 м, достигая непосредственно в приустьевой зоне 30–50 м.



Р и с . 3 . Берег у п. Морское: *a* – 1968 г.; *b* – 2015 г.

F i g . 3 . Coast at the village of Morskoye: *a* – 1968; *b* – 2015





Рис. 4. Берег в районе участка исследования у п. Морское (03.07.2019 г.): *a* – общий вид с запада; *b* – восточная часть; *c* – участок берега, примыкающий с запада к исследуемому участку; *d* – новые берегозащитные сооружения к востоку

Fig. 4. Coast in the studied area near the village of Morskoye (3 July 2019): *a* – general view from the west; *b* – eastern part; *c* – coastal area adjacent to the studied area from the west; *d* – new coast protection structures to the east

Наиболее интересным для анализа воздействия штормовых волн на берег исследуемого района явился спутниковый снимок от 01 апреля 2012 г. (рис. 5). Волны подходили с юго-юго-восточного направления. В момент съемки на метеостанции в п. Курортное наблюдался ветер восточного направления 5 м/с, в предыдущие сутки ветер дул с северо-северо-востока и северо-востока со скоростью 7–8 м/с (URL: <https://tr5.ru/>). На снимке зафиксирован момент удара волн о бетонные гидротехнические сооружения на участках западнее и восточнее расчетного. Малая ширина пляжей (в штилевых условиях от 5 до 10 м) не обеспечивает гашение волн. На поверхности пляжа исследуемого участка прослеживаются следы заплеска волн, не достигающие берегового обрыва (клифа) в западной и восточной частях участка на 4–5 м и в центральной части – на 8–10 м.

Современное состояние рельефа береговой зоны анализировалось на основе имеющейся в нашем распоряжении топографической съемки района работ, выполненной в осенний период 2018 г. Стоит отметить, что общий характер положения береговой линии в районе п. Морское не изменился по сравнению с периодом 2007–2017 гг. Наименьшая ширина пляжа соответствует участкам, расположенным у волноотбойных стенок и лестниц. Так, на участке западнее расчетного ширина пляжа на момент промеров достигала минимального значения 2 м, а его высота – 0.5 м. На восточной границе исследуемого участка вдоль бетонных лестниц ширина пляжа колебалась



Р и с . 5 . Береговая зона восточной части п. Морское на снимке от 01.04.2012 г. (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

Fig. 5. Coastal area of the eastern part of the village of Morskoye at the image as of 1 April 2012 (URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/>)

от 2 до 4 м. На участке, не закрепленном гидротехническими сооружениями, она составляет 25 м в восточной части и 28 м в центральной и западной. Высота пляжа составляет от 2 м в западной части до 3 м в восточной части участка. Уклон пляжа – 0.07 и 0.12 соответственно. Высота клифа также увеличивается в восточной части от 5 до 7 м в абсолютных отметках относительно уровня моря. Участки наибольшего разрушения бровки клифа находятся в зонах сопряжения бетонных стенок и незащищенного склона. В западной части участка подмыв и разрушение дорожного полотна, в результате которого кромка обрыва отступила на расстояние до 3 м, произошли именно на границе сочленения бетонной стенки и незащищенного склона.

Ширина пляжа на расчетном и прилегающих к нему участках недостаточна для предотвращения размыва клифа. Ее не хватает для полного гашения энергии штормовых волн. Преодолев пляж, волна ударяется о клиф и способствует его разрушению.

#### **Статистические характеристики волнения**

Статистический анализ параметров волнения проводился для выбранной из массива *SWAN-ERA1* точки на изобате ~ 20 м. Исходные временные ряды данных имеют следующие максимальные значения: высота значительных волн – 5.1 м; средний период – 10.5 с; энергия волн – 140 кВт/м.

На рис. 6 приведены гистограммы повторяемости (%) высот значительных волн (м), средних периодов (с) и среднего направления волнения (°) в прибрежной зоне п. Морское. Как видно, с увеличением высоты волн их повторяемость монотонно уменьшается. Максимальную повторяемость (более 16 %) имеют волны со средними периодами 3.0–3.5 с. Наиболее часто повторяются волны трех направлений: юго-восточного (135°); южного (180°); юго-юго-западного (202.5°). Анализ совместной повторяемости (%) высоты значительных волн и среднего направления волн в прибрежной зоне п. Морское показал, что наиболее интенсивное ветровое волнение (более 3 м) соответствует трем направлениям: юго-востоку (135°); югу (180°); юго-юго-западу



Р и с. 6. Повторяемость (%) характеристик ветрового волнения на изобате  $\sim 20$  м у п. Морское по данным *SWAN-ERA1*: *a* – высоты значительных волн; *b* – средних периодов волн; *c* – среднего направления волнения ( $^{\circ}$ )

Fig. 6. Recurrence (%) of wind wave characteristics along the isobath of  $\sim 20$  m at the village of Morskoye according to *SWAN-ERA1* data: *a* – significant wave height; *b* – mean wave periods; *c* – average wave direction ( $^{\circ}$ )

(202.5 $^{\circ}$ ). Причем максимальные высоты штормовых волн соответствуют южному направлению.

Для исследуемого района также рассчитана длительность штилевых и штормовых ситуаций. В соответствии с общепринятой практикой для оценок длительности использовались значения высот волн 3%-ной обеспеченности в системе ( $h_{3\%}$ ). В табл. 1 приведены значения длительности (сут) штилевых и штормовых ситуаций в прибрежной зоне п. Морское. Длительность штилевых ситуаций определялась условием  $h_{3\%} < 0.25$  м. Длительность штормовых ситуаций определялась условиями  $h_{3\%} > 1.25$  м;  $h_{3\%} > 2$  м;  $h_{3\%} > 3$  м. Как видно из таблицы, наиболее продолжительные штилевые ситуации имеют место в июле – августе, а наиболее продолжительные штормовые ситуации – в декабре – январе.

На рис. 7, *a* дано распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ( $h_{3\%} < 0.25$  м) в прибрежной зоне п. Морское по данным *SWAN-ERA1*. Среднее многолетнее значение длительности штилей в исследуемом районе составляет 27.5 сут.

На рис. 7, *b, c* приведены распределения по годам длительности (сут) штормов для четырех вариантов:  $h_{3\%} > 1.25$  м;  $h_{3\%} > 2$  м;  $h_{3\%} > 3$  м;  $h_{3\%} > 4$  м. Средние многолетние значения длительности штормов соответственно равны: 13.3; 6.5; 2.2; 0.6 сут.

Для оценки экстремальных характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне п. Морское использовался метод годовых максимумов, базирующийся на 2-параметрическом экстремальном распределении Гумбеля [13]. Из массива волновых характеристик *SWAN-ERA1* выделены ряды годовых максимумов средних высот и средних периодов. Далее методом наименьших

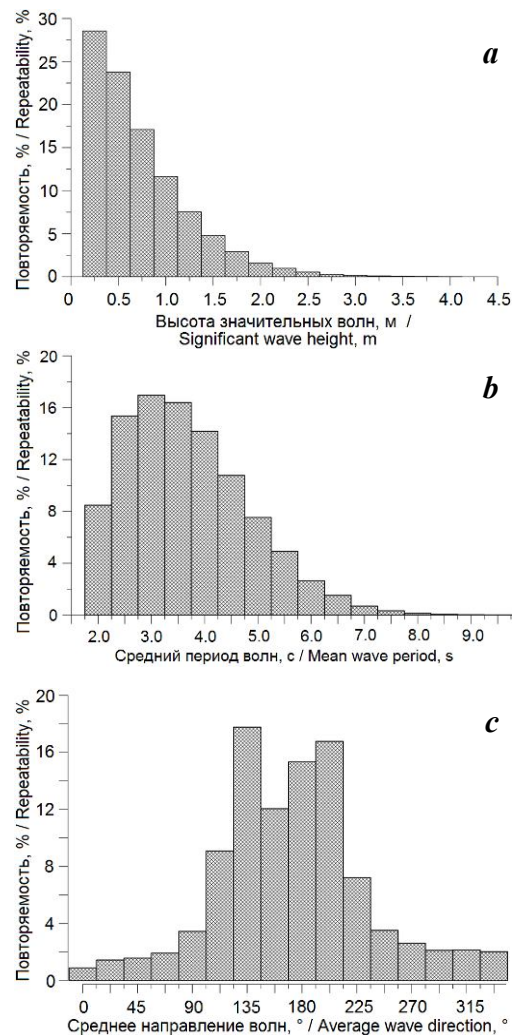


Таблица 1. Средняя длительность (сут) по месяцам штилевых и штормовых ситуаций в прибрежной зоне п. Морское по данным SWAN-ERA1

Table 1. Mean duration (days) of calm and storm situations by months in the offshore area of the village of Morskoye according to SWAN-ERA1 data

Месяцы / Months	$h_{3\%} < 0.25 \text{ м} /$ $h_{3\%} < 0.25 \text{ m}$	$h_{3\%} > 1.25 \text{ м} /$ $h_{3\%} > 1.25 \text{ m}$	$h_{3\%} > 2 \text{ м} /$ $h_{3\%} > 2 \text{ m}$	$h_{3\%} > 3 \text{ м} /$ $h_{3\%} > 3 \text{ m}$
1	0.7	19.4	11.0	4.4
2	0.7	17.6	10.6	4.0
3	1.0	18.0	9.7	3.4
4	1.4	13.9	6.3	1.7
5	3.2	8.8	3.1	0.6
6	4.4	6.0	2.0	0.4
7	5.0	6.6	2.0	0.4
8	4.8	7.8	2.6	0.3
9	3.1	9.8	4.2	1.1
10	1.8	14.1	6.6	1.8
11	0.9	16.9	8.7	3.2
12	0.7	20.0	11.3	4.6

квадратов определены соответствующие параметры распределения Гумбеля, построены биплоты годовых максимумов. На основе полученных распределений Гумбеля вычислены средние значения высот и периодов волн, возможных один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Далее на основе этих средних значений с помощью распределения Глуховского [14] получены оценки высот и периодов волн различной обеспеченности в системе, возможных один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет (табл. 2).

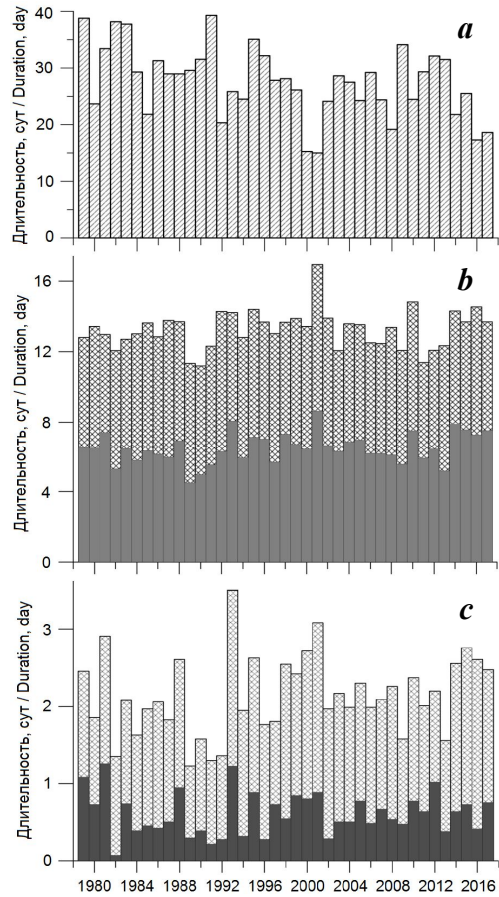
Таблица 2. Средняя высота волн ( $\bar{h}$ ), средний период ( $\bar{\tau}$ ), средняя длина волн ( $\bar{\lambda}$ ) и высоты волн 50, 13, 5, 3, 1 и 0.1%-ной обеспеченности (м), возможные один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет в прибрежной зоне п. Морское

Table 2. Mean wave height ( $\bar{h}$ ), mean period ( $\bar{\tau}$ ), mean wave length ( $\bar{\lambda}$ ) and heights of wave of 50, 13, 5, 3, 1, and 0.1% probability (m) with 1, 5, 10, 25, 50, and 100 year period of return in the coastal area of the village of Morskoye

$T$ , годы / $T$ , years	$\bar{h}$ , м / $\bar{h}$ , m	$\bar{\tau}$ , с / $\bar{\tau}$ , s	$\bar{\lambda}$ , м / $\bar{\lambda}$ , m	$h_{50\%}$ , м / $h_{50\%}$ , m	$h_{13\%}$ , м / $h_{13\%}$ , m	$h_{5\%}$ , м / $h_{5\%}$ , m	$h_{3\%}$ , м / $h_{3\%}$ , m	$h_{1\%}$ , м / $h_{1\%}$ , m	$h_{0.1\%}$ , м / $h_{0.1\%}$ , m
1	2.0	5.9	53	1.9	3.2	3.8	4.1	4.6	5.5
5	2.5	6.7	68	2.4	3.9	4.6	4.9	5.5	6.6
10	2.7	7.0	76	2.6	4.2	5.0	5.3	6.0	7.2
25	3.0	7.5	86	2.9	4.6	5.5	5.9	6.6	7.8
50	3.2	7.9	95	3.1	5.0	5.8	6.2	7.0	8.3
100	3.4	8.2	103	3.3	5.3	6.2	6.6	7.4	8.8

Рис. 7. Распределение по годам длительности (сут) штилевых ситуаций ( $h_{3\%} \leq 0.25$  м) (а), штормовых ситуаций для  $h_{3\%} \geq 1.25$  м и  $h_{3\%} \geq 2$  м (серый цвет) (b) и для  $h_{3\%} \geq 3$  м и  $h_{3\%} \geq 4$  м (серый цвет) (c) на изобате  $\sim 20$  м у п. Морское по данным SWAN-ERA1

Fig. 7. Yearly duration (days) of calm situations ( $h_{3\%} \leq 0.25$  m) (a), storm situations for  $h_{3\%} \geq 1.25$  m and  $h_{3\%} \geq 2$  m (grey colour) (b) and for  $h_{3\%} \geq 3$  m and  $h_{3\%} \geq 4$  m (grey colour) along the isobath of  $\sim 20$  m near the village of Morskoye according to SWAN-ERA1 data



### Эволюция пространственной структуры волнового поля

При моделировании гидродинамики береговой зоны с помощью численной модели SWASH в районе п. Морское для задания профиля набегающей волны (1) из табл. 2 выбирались три значения высот волн:  $\zeta_0 = 2.0$  м – средняя высота волны, возможная один раз в год;  $\zeta_0 = 3.0$  м – средняя высота волны, возможная один раз в 25 лет;  $\zeta_0 = 3.4$  м – средняя высота волны, возможная один раз в 100 лет. Профиль волны (1) для трех значений  $\zeta_0$  показан на рис. 8.

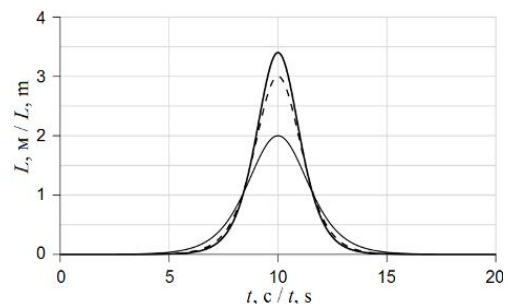
Рассмотрим эволюцию пространственной структуры волны при прохождении над подводным береговым склоном. На рис. 9 показаны различные фазы распространения волны (1) в исследуемой береговой зоне при  $\zeta_0 = 3.4$  м. Как известно [15], режим разрушения волн при набегании на береговой склон характеризуется безразмерным числом Ирибаррена:

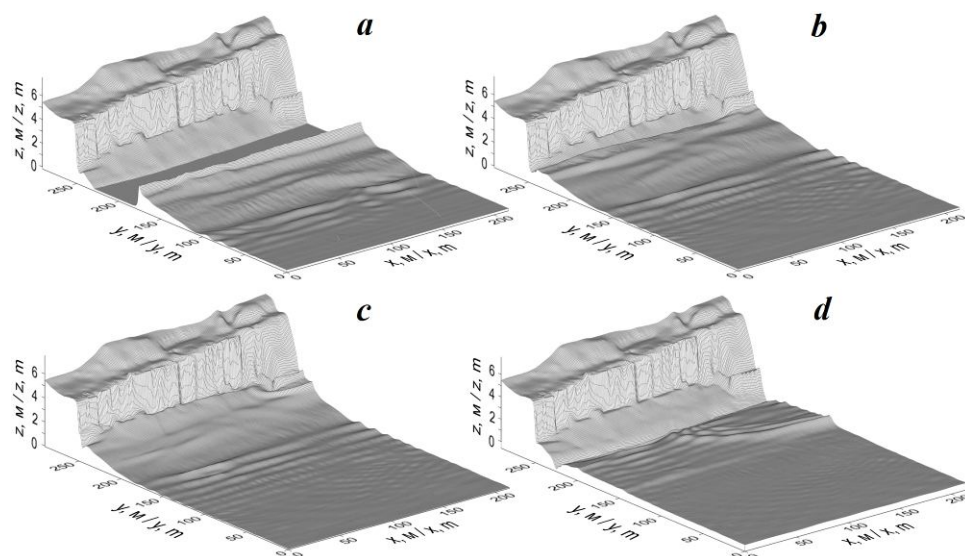
$$\xi = m / \sqrt{\zeta_0 / \lambda}, \quad (2)$$

где  $m$  – средний уклон дна. Для рассматриваемого района  $m = 0.035$  и, соответственно,  $\xi = 0.07$ . При таком значении  $\xi$  разрушение волны на береговом

Рис. 8. Профиль одиночной волны вида (1) на мористой границе расчетной области при  $\zeta_0$ , равной 2.0; 3.0; 3.4 м

Fig. 8. Soliton profile in the form of (1) at the seaward boundary of the calculated area at  $\zeta_0$  equaling 2.0 m; 3.0 m; 3.4 m





Р и с . 9 . Уровень моря в береговой зоне п. Морское при высоте набегающей волны 3.4 м в моменты времени 50 с (а), 70 с (b), 77 с (c), 100 с (d)

Fig. 9. Sea level in the coastal area of the village of Morskoye at an incoming wave height of 3.4 m at 50 s (a), 70 s (b), 77 s (c), 100 s (d)

откосе должно происходить в режиме скользящей волны, то есть достаточно плавно.

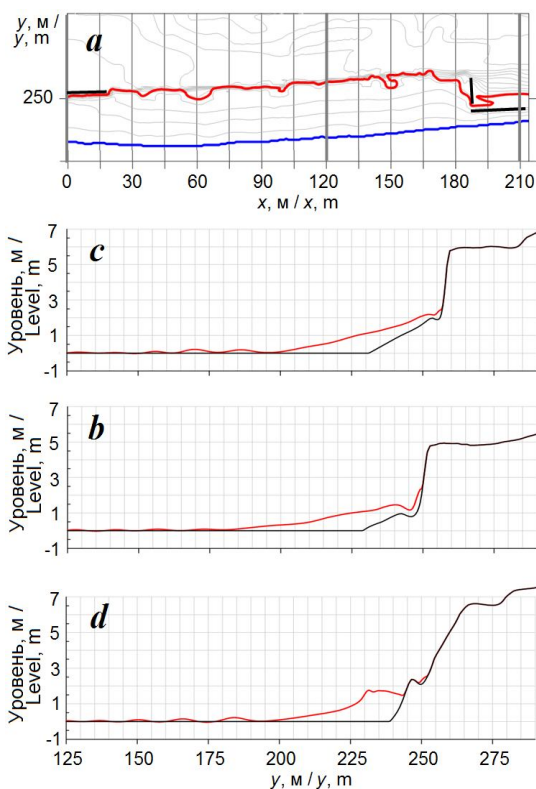
В проведенных модельных экспериментах получено, что по мере приближения волны к берегу происходит ее трансформация. Из-за особенностей рельефа дна профиль волны деформируется. Волна начинает расплываться, и за ней формируется осциллирующий хвост (рис. 9, а). Вследствие уменьшения глубины и увеличения диссипации волновой энергии высота волны на подходе к берегу уменьшается, а ее передний склон становится все более крутым. В момент времени  $\sim 70$  с начинается накат волны на берег (рис. 9, b). Этот накат вызывает затопление пляжа (рис. 9, c). Из-за неоднородности береговой зоны затопление пляжа происходит неравномерно. Набегающая волна достигает подножия клифа и поднимается вверх по клифу, создавая накат высотой примерно 2.5 м. В восточной части области прослеживается эффект отражения волны от пологой бетонной стенки (лестничной набережной), выдвинутой ближе к урезу (рис. 9, c, d).

Для более детального исследования величины вертикального заплеска проанализированы перпендикулярные берегу профили. Было выбрано 15 разрезов, проведенных через 15 м по оси  $x$  (рис. 10, а). Для этих разрезов строились профили набегающей волны для моментов времени, соответствующих максимальным вертикальным заплескам. Как показывает анализ, при  $\zeta_0 = 2.0$  м вертикальный заплеск меняется вдоль побережья в пределах 1.7–2.2 м, а при  $\zeta_0 = 3.4$  м диапазон изменений заплеска больше и составляет уже 1.8–2.9 м (рис. 10, b – d).

На рис. 10, а показана граница максимального горизонтального наката на берег при начальной высоте волны  $\zeta_0 = 3.4$  м. Как видно, на большей части

Рис. 10. Схема положения разрезов вдоль оси  $y$ , на которых оценивалась величина максимальных вертикальных заплесков (*a*) (красная линия – граница наката; синяя – урез воды; черные – берегозащитные сооружения); профили набегающей волны в момент максимального заплеска  $t$ : на разрезе  $x = 0$  м при  $\zeta_0 = 2$  м,  $t = 84$  с (*b*); на разрезе  $x = 120$  м при  $\zeta_0 = 3.4$  м,  $t = 81$  с (*c*); на разрезе  $x = 210$  м при  $\zeta_0 = 3.4$  м,  $t = 79$  с (*d*)

Fig. 10. Chart of position of sections along the  $y$ -axis where the level of maximal vertical splashes (*a*) (red line is for the run-up boundary; blue line is for the water edge; black lines are for coast protection structures); incoming wave profiles at the moment of the maximal splash  $t$ : at section  $x = 0$  m at  $\zeta_0 = 2$  m,  $t = 84$  s (*b*); at section  $x = 120$  m at  $\zeta_0 = 3.4$  m,  $t = 81$  s (*c*); at section  $x = 210$  m at  $\zeta_0 = 3.4$  m,  $t = 79$  s (*d*)



берега ширина зоны наката составляет  $\sim 25$  м. В восточной части береговой зоны (в районе подпорной стенки) вследствие сужения пляжа ширина зоны наката уменьшается до 10–15 м. В целом можно отметить, что зона наката достигает границы клифа, т. е. затоплению подвержена вся пляжная зона.

При набегании волны на берег формируются интенсивные течения, способные вызывать размыв пляжа. На рис. 11, *a – c* по результатам численного моделирования представлены поля максимумов скорости волновых течений  $U$  (м/с) для трех значений высот набегающей волны ( $\zeta_0$ ). Анализ полей волновых течений для этих значений  $\zeta_0$  показал, что скорость пропорциональна высоте волны. При этом скорости волновых течений достигают своих максимальных значений ( $\sim 5$  м/с) в зоне наката (выше границы уреза воды).

На рис. 11, *c* видно, что для самого критического случая придонная максимальная скорость волнового течения вдоль нижней границы клифа изменяется в пределах 1.5–1.75 м/с. Проведенный согласно СП 38.13330.2012<sup>2)</sup> расчет позволил выявить, что при таких скоростях у клифа возможен размыв пляжевого материала, состоящего из фракций крупностью до 60–90 мм.

<sup>2)</sup> Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) : СП 38.13330.2012 : свод правил : актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\* : утв. приказом Министерства регионального развития Рос. Федерации от 29.12.2011 г. № 635/12 : введ. в действие 01.01.2013. М., 2012. 142 с.



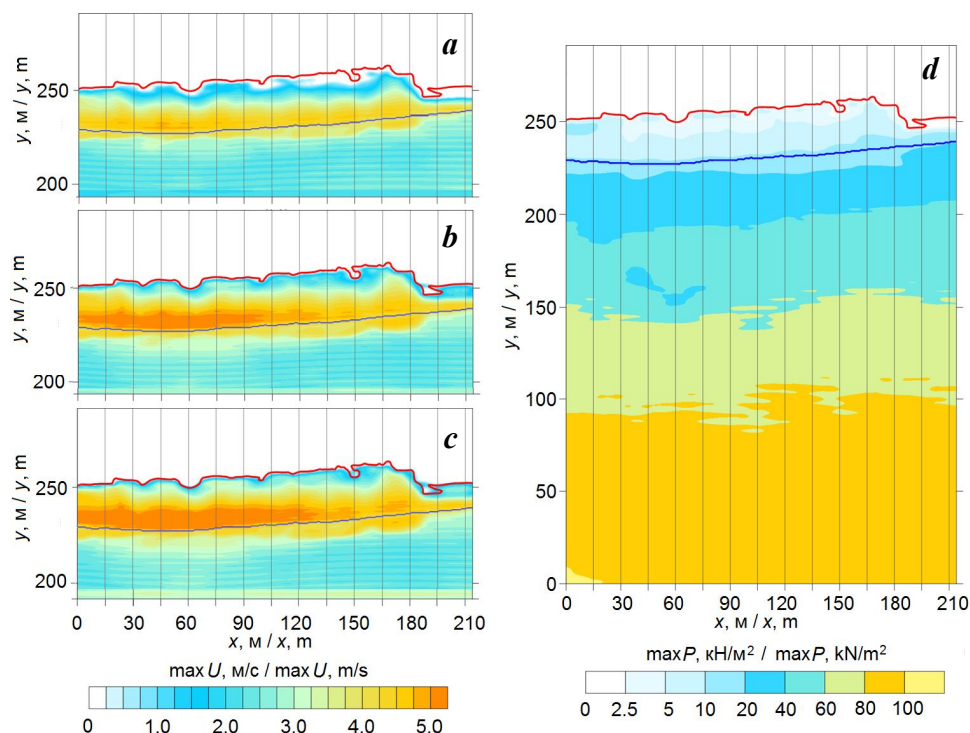


Рис. 11. Поле максимумов скорости волновых течений (м/с) при высоте набегающей волны  $\zeta_0$ , равной 2.0 м (а), 3.0 м (б) и 3.4 м (в); поле максимумов волнового давления ( $\text{кН/м}^2$ ) (д) при высоте набегающей волны  $\zeta_0$ , равной 3.4 м (красная кривая – граница наката; синяя – урез воды)

Fig. 11. Field of wave current velocity maxima (m/s) at an incoming wave height  $\zeta_0$  of 2.0 m (a), 3.0 m (b), and 3.4 m (c); field of wave pressure ( $\text{kN/m}^2$ ) (d) at an incoming wave height  $\zeta_0$  of 3.4 m (red curve is for the run-up boundary; blue curve is for the water edge)

Анализировалось также волновое давление  $P$ , которое в набегающей волне складывается из суммы гидростатической и гидродинамической компонент. При накате волны на берег основной вклад дает вторая компонента. На рис. 11, *d* представлено модельное поле максимумов волнового давления ( $\text{кН/м}^2$ ) для самого критического случая (высота волны  $\zeta_0 = 3.4$  м). Здесь прилегающая к клифу красная кривая соответствует границе максимального наката. Как видно, максимальное значение волнового давления у подножия клифа и непосредственно на самом клифе меняется в пределах 5–8  $\text{кН/м}^2$ .

### Заключение

На основе анализа космических снимков и картографической информации выявлено, что за последние 10 лет существенных изменений очертания береговой линии в районе п. Морское не произошло. В отдельные годы фиксировались изменения береговой линии в пределах 1–4 м, связанные с внутригодовой изменчивостью ветрового волнения. На исследуемом участке пляж имеет ширину 15–25 м, что недостаточно для предотвращения размыва клифа. На прилегающих участках берега с бетонными откосными стенками

она колеблется от 5 до 16 м. До строительства берегозащитных конструкций ширина пляжа на участках в среднем составляла 25–30 м. Ее сокращение связано с размывом пляжа в результате усиления обратного волнового потока при ударе о жесткую стенку

По данным массива *SWAN-ERAI* проведены расчеты режимных и экстремальных характеристик ветрового волнения в прибрежной зоне п. Морское на изобате 20 м за 1979–2017 гг.

Наиболее продолжительные штилевые ситуации имеют место в июле – августе, а наиболее продолжительные штормовые ситуации – в декабре – январе. Максимальные штормовые волны приходят с южного направления. Наибольшую повторяемость имеют ветровые волны, подходящие к береговой линии исследуемого района с юго-востока, юга и юго-юго-востока. Получены оценки высот, периодов и длин волн различной обеспеченности, возможных один раз в заданное количество лет. Для шторма повторяемостью один раз в 100 лет средняя высота волн составляет 3.4 м. В системе этого шторма высота волн 1%-ной обеспеченности достигает 7.4 м.

С помощью гидродинамической модели *SWASH* выполнено математическое моделирование наката волн на береговую зону, примыкающую к разрушенному участку автомобильной дороги. В расчетах использовалась регулярная сетка рельефа береговой зоны с высоким пространственным разрешением, построенная на основе интерполяции результатов топогеодезической и батиметрической съемок. Набегающая волна задавалась в виде солитона. Расчеты проводились для трех вариантов высот набегающей волны  $\zeta_0$ : 2.0, 3.0 и 3.4 м. Получено, что при высоте набегающей волны 2.0 м вертикальный волновой заплеск в исследуемом районе изменяется в пределах 1.7–2.2 м. При высоте волны 3.4 м заплеск достигает 1.8–2.9 м. В этом случае происходит полное затопление пляжа. При накате скорости волновых течений достигают 5 м/с. Вдоль нижней границы клифа придонная максимальная скорость течения изменяется в пределах 1.5–1.75 м/с. При таких скоростях у клифа возможен размыв пляжа, состоящего из материала крупностью до 60–90 мм. Максимальное значение волнового давления у подножия клифа и непосредственно на самом клифе при накате достигает 5–8 кН/м<sup>2</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 256 с.
2. Goryachkin Yu. N., Kharitonova L. V. Changes of the Crimean coast in the last century // Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017 (Mellieha, Malta, 31 October – 04 November 2017). Dalyan, Muğla, Turkey : Mediterranean Coastal Foundation, 2017. Vol. 2. P. 861–870.
3. 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.
4. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь : МГИ НАНУ, 2009. 59 с.

5. 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>
6. *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
7. Wind Waves in the Black Sea: Results of a Hindcast Study / V. S. Arkhipkin [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 14, iss. 11. P. 2883–2897. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
8. *Gippius F. N., Myslenkov S. A.* Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 218. 108199. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108199>
9. 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)*. Muğla, Turkey : MEDCOAST Foundation, 2019. Vol. 2. P. 799–810.
10. *Полонский А. Б., Фомин В. В., Гармашов А. В.* Характеристики ветрового волнения Черного моря // *Доповіді Національної академії наук України*. 2011. № 8. С. 108–112.
11. *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>
12. *Куркин А. А.* Нелинейная и нестационарная динамика длинных волн в прибрежной зоне. Нижний Новгород : Тип. ННГУ, 2005. 329 с.
13. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. World Meteorological Organisation, 2000. 70 p. (JCOMM Technical Report ; No. 9 ; WMO/TD-No. 1041).
14. *Крылов Ю. М.* Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л. : Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
15. *Gourlay M.* Wave set-up, wave run-up and beach water table: Interaction between surf zone hydraulics and groundwater hydraulics // *Coastal Engineering*. 1992. Vol. 17, iss. 1–2. P. 93–144. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(92\)90015-M](https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90015-M)

*Об авторах:*

**Харитоновна Людмила Викторовна**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, [l.kharitonova@mhi-ras.ru](mailto:l.kharitonova@mhi-ras.ru)

**Алексеев Дмитрий Владимирович**, ученый секретарь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 767-834**, **ResearcherID: I-3548-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4006-0967**, **Scopus Author ID: 8284177400**, [dalexeev@rambler.ru](mailto:dalexeev@rambler.ru)

**Фомин Владимир Владимирович**, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, [fomin.dntmm@gmail.com](mailto:fomin.dntmm@gmail.com)

*Заявленный вклад авторов:*

**Харитоновна Людмила Викторовна** – сбор, систематизация и анализ литературных источников, фотоматериалов и спутниковых снимков, подготовка входных параметров для математического моделирования, текста статьи и графических материалов

**Алексеев Дмитрий Владимирович** – подготовка входных параметров, обработка результатов математического моделирования, подготовка текста статьи и списка литературы

**Фомин Владимир Владимирович** – постановка проблемы, проведение математического моделирования, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Goryachkin, Yu.N. and Dolotov, V.V., 2019. *Sea Coasts of Crimea*. Sevastopol: Colorit, 256 p. (in Russian).
2. Goryachkin, Yu.N. and Kharitonova, L.V., 2017. Changes of the Crimean Coast in the Last Century. In: E. Özhan, ed., 2017. *Proceedings of the Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation MEDCOAST 17 (Mellieha, Malta, 31 October – 04 November 2017)*. Dalyan, Muğla, Turkey: Mediterranean Coastal Foundation. Vol. 2, pp. 861–870.
3. Goryachkin, Yu.N. and Repetin, L.N., 2009. Storm Wind and Wave Regime near the Black Sea Coast of Crimea. In: MHI, 2009. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol, MHI. Iss. 19, pp. 56–69 (in Russian).
4. Efimov, V.V. and Komarovskaya, O.I., 2009. [Atlas of Extreme Wind Waves of the Black Sea]. Sevastopol: MHI NANU, 59 p. (in Russian).
5. Divinsky, B.V., Fomin, V.V., Kosyan, R.D. and Ratner, Y.D., 2020. Extreme Wind Waves in the Black Sea. *Oceanologia*, 62(1), pp. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
6. Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2018. Wave Climate of the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. *Physical Oceanography*, 25(2), pp. 93–101. doi:10.22449/1573-160X-2018-2-93-101
7. Arkhipkin, V.S., Gippius, F.N., Koltermann, K.P. and Surkova, G.V., 2014. Wind Waves in the Black Sea: Results of a Hindcast Study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), pp. 2883–2897. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2883-2014>
8. Gippius, F.N. and Myslenkov, S.A., 2020. Black Sea Wind Wave Climate with a Focus on Coastal Regions. *Ocean Engineering*, 218, 108199. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108199>
9. 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)*. Muğla, Turkey: MEDCOAST Foundation. Vol. 2, pp. 799–810.
10. Polonsky, A.B., Fomin, V.V. and Garmashov, A.V., 2011. Characteristics of Wind Waves of the Black Sea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (8), pp. 108–112 (in Russian).

11. Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. SWASH: An Operational Public Domain Code for Simulating Wave Fields and Rapidly Varied Flows in Coastal Waters. *Coastal Engineering*, 58(10), pp. 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>
12. Kurkin, A.A., 2005. *Non-Linear and Non-Stationary Dynamics of Long Waves in the Coastal Area*. Nizhniy Novgorod: NGTU, 330 p. (in Russian).
13. Lopatoukhin, L.J., Rozhkov, V.A., Ryabinin, V.E., Swail, V.R., Boukhanovsky, A.V. and Degtyarev, A.B., 2000. *Estimation of Extreme Wind Wave Heights*. JCOMM Technical Report No. 9. WMO/TD-No. 1041. WMO, 70 p.
14. Krylov, Yu.M., 1966. [*Spectral Methods to Study and Calculate Wind Waves*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 258 p. (in Russian).
15. Gourlay, M., 1992. Wave Set-Up, Wave Run-Up and Beach Water Table: Interaction between Surf Zone Hydraulics and Groundwater Hydraulics. *Coastal Engineering*, 17(1–2), pp. 93–144. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(92\)90015-M](https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90015-M)

*About the authors:*

**Ludmila V. Kharitonova**, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, [l.kharitonova@mhi-ras.ru](mailto:l.kharitonova@mhi-ras.ru)

**Dmitry V. Alekseev**, Scientific Secretary, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **SPIN-code: 767-834**, **ResearcherID: I-3548-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4006-0967**, **Scopus Author ID: 8284177400**, [dalexevev@rambler.ru](mailto:dalexevev@rambler.ru)

**Vladimir V. Fomin**, Head of Department of Computer Engineering and Mathematical Modeling, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, [v.fomin@ukr.net](mailto:v.fomin@ukr.net)

*Contribution of the authors:*

**Ludmila V. Kharitonova** – collection, classification and analysis of literature sources, photographic materials and satellite images, preparation of input parameters for mathematical modelling, preparation of the article text and graphical materials

**Dmitry V. Alekseev** – preparation of input parameters, mathematical modelling result processing, preparation of the article text and list of references

**Vladimir V. Fomin** – problem statement, mathematical modelling, study result processing, analysis and description, preparation of the article text and graphical materials

*All the authors have read and approved the final manuscript.*