

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 627.521.1 (262.5)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ШТОРМА 26–27 НОЯБРЯ 2023 Г. НА ПОБЕРЕЖЬЕ КРЫМА

Ю. Н. Горячкин¹✉, А. А. Марков², В. В. Фомин³

^{1, 2, 3} Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия, yngor@mhi-ras.ru

Аннотация. Рассмотрены хронология экстремальных штормов в последние 170 лет и особенности протекания шторма 26–27 ноября 2023 г., названного в СМИ «штормом века», определены параметры волнения. Цель работы — оценка влияния этого шторма на инфраструктуру Черноморского побережья Крыма, определение возможных причин повреждений и места шторма в ряду экстремальных, ранее наблюдавшихся. Использовались материалы обследований берега и гидротехнических сооружений на характерных участках побережья Крыма, данные гидрометеорологических станций, математическое моделирование, привлекались архивные и литературные источники.

Результаты проведенного анализа дают основания считать, что так называемый «шторм века» 2023 г. для Крымского п-ова таковым не являлся. Большая часть берегозащитных сооружений, в том числе построенных еще при СССР, не пострадала. Имевшие место повреждения и разрушения прибрежной инфраструктуры обусловлены в большей степени изношенностью защитных сооружений, а также ошибками в их проектировании и эксплуатации. Отмечено ненадлежащее обслуживание сооружений (несвоевременное пополнение пляжа материалом, отсутствие текущего ремонта), что привело к дальнейшему разрушению уже поврежденных сооружений, заплеску на набережные и повреждению расположенных здесь объектов. Обращено внимание на то, что отдельные сооружения и конструкции не были рассчитаны на экстремальный шторм. Подтоплению территорий и повреждению пляжных сооружений способствовали планировка песчаных и песчано-гравийных свободных пляжей, а также уничтожение природных дюн. Показано, что значительный ущерб связан с воздействием волн на рекреационные объекты, размещенные непосредственно на пляжах.

Ключевые слова: Крымское побережье, берегоукрепительные сооружения, воздействие шторма, математическое моделирование

Для цитирования: Горячкин Ю. Н., Марков А. А., Фомин В. В. Воздействие шторма 26–27 ноября 2023 г. на побережье Крыма // Гидротехника. 2025. № 1. С.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания № FNNN-2024–0016.

SCIENTIFIC ARTICLE

IMPACTS OF THE NOVEMBER 26–27, 2023 STORM ON THE COAST OF CRIMEA

Yu. N. Goryachkin¹✉, A. A. Markov², V. V. Fomin³

^{1, 2, 3} Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia, yngor@mhi-ras.ru

Abstract. The paper considers the chronology of extreme storms for the last 170 years and peculiarities of the “storm of the century” on November 26–27, 2023 as well as determines the wave parameters. The work aims to assess the impact of this storm on the infrastructure of the Black Sea coast of Crimea, determine the possible causes of damage and locate this storm in the series of other extreme storms observed previously. We used the materials of surveys of the coast and hydraulic structures on the characteristic areas of the Crimean coast, data of hydrometeorological stations, mathematical modeling as well as archival and literary sources.

The results of the analysis suggest that the so-called 2023 storm of the century was not the one for the Crimean Peninsula. Most of the coastal protection structures, including those built during the USSR, were not damaged. The damage and destruction of the coastal infrastructure were mainly due to the wear and tear of the protective structures as well as errors in their design and operation. Improper maintenance of the structures was noted (untimely

replenishment of the beach with materials, lack of current repairs), which led to further destruction of already damaged structures, to splashing on the seafronts and to damage to the objects located there. The paper focuses attention on the fact that some structures and constructions were not designed to withstand extreme storms. Flooding of territories and damage to beach structures were facilitated by the layout of sandy and sandy-gravel free beaches and destruction of natural dunes. It is shown that the significant damage is associated with the impact of waves on recreational facilities located directly on the beaches.

Keywords: Crimean coastline, coastal protection, storm impact, mathematical modeling.

For citation: Goryachkin Yu. N., Markov A. A., Fomin V. V. Impacts of the November 26–27, 2023 storm on the coast of Crimea // *Hydrotechnika*. 2025. № 1. Pp.

Acknowledgments. The work was carried out under state assignment № FNNN-2024–0016.

Введение

В период 26–27 ноября 2023 г. в Черном море сформировался экстремальный шторм, который оказал существенное воздействие на побережье Крыма. С подачи органов местной власти средства массовой информации назвали его «штормом века». Ущерб от стихии (без учета Севастополя) оценивался МЧС Крыма в 39,7 млрд руб., из которых 34,0 млрд — ущерб берегоукрепительным сооружениям (пирсам, причалам, подпорным стенам и т.п.). Сумма со временем возрастала, так, уже весной 2024 г. председатель крымского правительства говорил об ущербе в размере 68 млрд руб. Для сравнения: бюджет Республики Крым на 2024 г. составлял 204 млрд руб. В Севастополе финансовые потери оценивались в 6,5 млрд руб. (бюджет — 65 млрд руб.). Такой небывалый ущерб (от 10 до 35% годового бюджета регионов) требует, как минимум, внимательного анализа с целью минимизации последствий стихии в будущем.

Описание характеристик полей ветра и волн для шторма ноября 2023 г. на основе модельных расчетов, спутниковых данных и натурных измерений на океанографической платформе (ОП) близ Ялты содержится в работе [1]. Отмечается, что совокупность данных позволяет утверждать, что максимальные высоты волн на глубокой воде превышали 9 м. На глубине 28 м, по данным измерений на ОП, максимальная высота волн достигала 4,2 м, при этом максимальная скорость ветра составляла 28 м/с. Что касается зафиксированных разрушений, то в данной работе приводятся общие сведения, взятые из СМИ. В [2] рассмотрена трансформация пере-

сыпи оз. Богайлы (Западный Крым) под воздействием рассматриваемого шторма.

Цель настоящей работы — оценка штормового воздействия на береговую зону Крыма и имеющиеся там гидротехнические сооружения (ГТС) в результате шторма 26–27.11.2023 г., определение возможных причин повреждений и места этого шторма в ряду экстремальных, ранее наблюдавшихся.

Использованные материалы

В ноябре-декабре 2023 г. были обследованы берега и ГТС на характерных участках побережья Крыма, дана оценка их состоянию, выявлены последствия, имевшие место в результате штормового воздействия. Кроме

этого, использовались материалы наблюдений семи морских гидрометеостанций (МГ) на побережье Крыма и результаты численного моделирования шторма 26–27 ноября 2023 г. Привлекались архивные и литературные источники. Также были проанализированы десятки видеороликов, снятых в период и после шторма в различных местах побережья Крыма, размещенных в открытом доступе на видеохостингах.

Ретроспектива штормов

Напомним, что, согласно шкале Бофорта [3], различают *шторм* (скорость ветра 20,8–24,4 м/с, 9 баллов), *сильный шторм* (24,5–28,4 м/с, 10 баллов) и *жестокий шторм* (28,5–32,6



Рисунок 1

Максимальные в срок скорости ветра 26–27 ноября 2023 г. (в скобках максимальное значение порывов ветра между сроками), по данным МГ Черноморское, Евпатория, Херсонесский маяк, Кацивели, Ялта, Курортное, Феодосия

Figure 1

Maximum on-time wind speeds on November 26–27, 2023 (maximum value of wind gusts between the dates are given in parentheses) from the data of the offshore hydrometeorological stations of Chernomorskoe, Evpatoria, Chersonese Lighthouse, Katsiveli, Yalta, Kurortnoe, Feodosiya

м/с, 11 баллов), переходящий в ураган (32,7 м/с и более, 12 баллов). Согласно этой шкале, шторм 26–27 ноября 2023 г. можно отнести в целом по Крыму, скорее, к категории сильного шторма (рис. 1). По IX-балльной шкале степени волнения его можно классифицировать как VII-балльный (очень сильное волнение, высота максимальных волн 6,0–8,5 м). Согласно [4], ветер 25 м/с и высоты волн от 6,0 м для Черного моря относятся к опасному явлению (ОЯ). Возникают вопросы: какое место занимает «шторм века» в ряду ранее наблюдавшихся и как часто такое явление повторяется?

О штормовой активности на Крымском побережье есть соответствующая литература, посвященная, главным образом, статистическим характеристикам и физике процесса, гидрометеорологическим условиям возникновения экстремальных штормов, в ней содержатся и некоторые сведения о разрушениях [5–10]. Вместе с тем статьи посвящены в основном штормам, зарегистрированным в последние десятилетия. Данные о ветре и волнении на отдельных МГ Крыма есть, начиная с 1940-х гг. Однако интересно проследить статистику на более длинном историческом отрезке. Для этого авторы изучили все журналы «Морской сборник» и крымские газеты, начиная с середины XIX в., что позволило получить больше информации. К сожалению, значительная часть этой информации содержит эмоциональные оценки, а не конкретные сведения, тем не менее она расширяет представления о бушевавшей некогда стихии. Характерно, что в эпоху парусного флота главными пострадавшими от воздействия штормов были корабли. Прибрежная инфраструктура была развита слабо, поэтому сведений о ее разрушении почти нет, за исключением отдельных портов.

Как правило, статистику штормов отсчитывают от «Балаклавской бури» 2 (14) ноября 1854 г., хотя в краеведческой литературе есть свидетельства о «страшном урагане» 1 (12) ноября 1824 г. Описание шторма 2 (14) ноября 1854 г. содержится в работе [11], хотя это фактически перевод работы французского инженера-гидрографа

Келлера, который обобщил разные описания шторма и записи судовых журналов и первым высказал предположение о единой природе этого шторма и тропических ураганов. По данным свидетельствам, максимальная скорость ветра — 35 м/с была зарегистрирована корветом Napoleon, стоявшим на входе в Севастопольской рейд. Судя по описаниям волнения в судовых журналах, по шкале состояния поверхности моря этот шторм можно отнести к VII-балльному (очень сильное волнение, высота волны 6,0–8,5 м). Шторм привел к гибели около 1500 человек (из них примерно треть — экипажи судов), разметал палатки и легкие строения лагеря англо-французских войск. Из погибших в Севастополе и Евпатории 34 кораблей практически все были парусные, основная причина гибели — срыв с якорей и выброс на берег.

На наш взгляд, существует некоторое преувеличенное представление о силе этого шторма. Оно связано

с тем, что воздействие шторма было оказано на небывалую ранее высокую концентрацию кораблей, войск и материальных ценностей на небольшой акватории и территории, что было связано с военными действиями. Так, например, современники говорили о шторме 23–24 ноября (5–6 декабря) 1861 г. как о более сильном, чем балаклавский шторм [12, 13]. «Сильный юго-западный ветер перегонял через Сакскую косу в озеро морские волны такой высоты, что вместе с волной туда попало из моря судно, не говоря уже о массе судов, выброшенных в южной Севастопольской бухте» [12]. В табл. 1 приведена краткая хроника штормов в Крыму в первой половине XX в., которая свидетельствует о том, что сильные шторма не такие уж редкие события. В отличие от первой половины XX в., штормы второй половины хорошо задокументированы, имеются данные наблюдений и фотофиксация некоторых последствий. Вместе с тем полная информация об

Таблица 1
Хроника штормов в Крыму в первой половине XX века
Table 1

Timeline of storms in the Crimea in the first half of the 20th century

Дата	Событие
Декабрь 1903 г.	Две недели на Черном море бушует необычайно жестокая буря, исключая всякую возможность плавания, суда не выходят из портов
Начало декабря 1907 г.	Сильнейший шторм, суда не выходят в море. Ветром и огромными волнами уничтожены соляные прииски на Сиваше
10–11 (23–24) января 1911 г.	
	В Севастополе ураган разбил городскую набережную и все ялики, шаланды и лодки, стоявшие в Южной бухте. В здании Аквариума выбило окна, погибли многие его обитатели. Ветер вырывал деревья и телеграфные столбы. Погибло и пострадало полтора десятка судов
Ноябрь 1912 г.	Мощные бури стали причиной гибели десятков судов в Черном и Азовском морях
Декабрь 1912 г.	На Южном берегу Крыма (ЮБК) разбиты суда, порваны провода, повреждены крыши домов, уничтожены фруктовые сады
12 (25) сентября 1913 г.	В Евпатории разбиты 9 парусных судов, груженных десятками тысяч пудов зерна и камня. На берег выброшено 5 судов, 13 баркасов и 29 шлюпок. В волнах погиб катер торгового управления. Большая часть городских купален и причалов разрушена до основания. Весь берег на протяжении представляет ужасную картину разрушения
Январь 1914 г.	Сильный ветер и волны повредили пристань в Евпатории
2 (15) февраля 1917 г.	В Крыму разразился жестокий шторм; поломано много столетних деревьев, унесены большие скирды сена, соломы, сорваны крыши со строений, повреждены телеграфные провода. Шторм причинил большие убытки
19–21 января 1931 г.	Буря у ЮБК. Волны (достигали 13 м) разрушили здание водолечебницы у Симеиза, разбили берегоукрепительные сооружения. Валились порталы краны
11–12 октября 1943 г.	В Ялте небывалый за 12 лет шторм

ущербе в большинстве случаев была закрыта для свободного доступа.

За период 1954–2008 гг. на побережье Крыма было отмечено восемь случаев штормов, которые относятся к стихийным гидрометеорологическим явлениям [4]. Отметим из них четыре, наиболее резонансных, при этом последствия приведем только для Крыма. Авторы статьи сами были современниками и свидетелями этих штормов.

Одним из самых жестоких по силе (9 баллов), продолжительности, территориальной протяженности и последствиям был шторм 28–29 января 1968 г. Днем 28 января у ЮБК скорость ветра достигала 35 м/с. В Ялте был разбит мол, на причале волнами сбросило со ступеней теплоходы, некоторые из них утонули. Ветер повалил порталы краны, свернул столбы, вывернул кустарники и деревья. В Евпатории и Феодосии были разрушены набережные, море выбросило на берег несколько мелких плавсредств.

Шторм 9–11 ноября 1981 г. в наибольшей степени повлиял на западное побережье Крыма. При максимальном разгоне волн и продолжающемся в течение двух суток юго-западном ветре скоростью 22–24 м/с волнение у западного побережья Крыма было экстремальным. На МГ Херсонесский маяк при скорости юго-западного ветра 30 м/с зафиксированы волны высотой 7,3 м. В районе м. Тарханкут повреждены несколько нефтегазодобывающих платформ, разбито несколько домов и хозяйственных построек Тарханкутского маяка. В Евпатории повреждена набережная, повален порталый кран у набережной. Здесь же, на пересыпи оз. Сасык, штормовые волны затопили жилые дома и выбросили на берег судно водоизмещением в 5 тыс. т. Значительно пострадал только что сооруженный мол на входе в Севастопольскую бухту.

В период экстремального шторма 14–15 ноября 1992 г. в районе юго-западного и южного побережья Крыма максимальной силы достигал ветер западного и юго-западного направлений скоростью 30–40 м/с. Наибольшие волны, зафиксированные на океанографической платформе МГИ РАН

в районе Симеиза, достигали 8–10 м [10]. Сама платформа сильно пострадала и накренилась. Шторм повредил нефтегазодобывающие платформы у м. Тарханкут. Но в наибольшей степени пострадал ЮБК. Ветер валил деревья, телефонные будки, обрывал провода. Погибло несколько судов, была повреждена набережная и почти построенный грузовой порт Ялты. На ЮБК был разрушен целый ряд незаконченных строительством берегозащитных сооружений. По нашему мнению, это был самый разрушительный шторм в Крыму в XX в.

Во время шторма 11 ноября 2007 г. скорости западного ветра в зоне юго-западного Крыма составляли 25–32 м/с, а высота волн, распространявшихся от юго-запада, достигала у м. Херсонес 5 м. В Севастополе были нанесены повреждения зданию Аквариума, сильно пострадала набережная, на ней были уничтожены все коммерческие киоски. В Казачьей бухте затонуло судно, перевозившее металлолом. Разрушения были зафиксированы и на ЮБК. Но больше всего шторм наделал бед в Керченском проливе. За один день затонули четыре судна, еще шесть сели на мель, получили повреждения два танкера, погибли 23 моряка. В Керченском проливе в воду вылилось около 2 тыс. тонн мазута, нефтяное пятно разлилось на 100 км². В воду попало 6 тыс. т серы. Протяженность береговой полосы загрязнения составила более 50 км, погибли тысячи птиц, большое количество промысловых видов рыб.

Как отмечено выше, экстремальные штормы, приводящие к значительным разрушениям прибрежной инфраструктуры, не являются в Крыму редким событием. Глубокие осенние циклоны образуются, как правило, один раз в 7–10 лет и отличаются от обычных циклонов. Их особенность состоит в том, что они проходят над Черным морем в период осеннего похолодания, когда некоторое время сохраняется относительно высокая температура воды, что по механизму образования позволяет считать их аналогами тропических ураганов.

Результаты обследования берегов

Рассмотрим конкретное воздействие шторма 26–27 ноября 2023 г. на побережье Крыма. Поскольку интенсивность шторма на побережье была различна, рассмотрим воздействие на отдельных участках, положение которых приведено на рис. 1.

Участок 1 (от с. Портовое на северо-западе Крыма до г. Севастополя). В с. Портовое сильно пострадали временные постройки на песчаном пляже. В западной части Бакальской косы размыва пересыпь, эта ветвь косы отступила на восток на 20–30 м. В бухтах Ярлгачская, Узкая и Караджинская (соответственно, с. Межводное, пгт Черноморское и с. Оленевка) зафиксированы повреждения инфраструктуры (навесы, раздевалки и т.п.), построенной непосредственно на пляже; материал (песок) переместился в тыл пляжа. В Черноморском разрушен деревянный настил пирса портофлота, в западной части бухты глинистый клиф высотой до 1 м размыв и отступил на 3–5 м. Частично размыва пересыпь оз. Караджинское. Отмечено также разрушение лестниц и причалов на м. Тарханкут, уничтожено рыбацкое оборудование в море.

Наблюдалось повсеместное повреждение инфраструктуры, построенной непосредственно на пляже, тем большее, чем уже пляж. На пересыпи оз. Ойбурское через образовавшийся проран шириной до 200 м морская вода поступала в озеро. В районе южной косы Донузлава в результате штормового нагона затопило береговую зону на расстоянии до 300 м, особенно это касается участков, где естественный рельеф пляжа был искусственно вымощен. Пересыпь оз. Сасык — Сиваш затопливалась в западной и восточной частях в местах, где спланированы дюны. Вода залила шоссе Евпатория — Симферополь (до 200 м).

Конфигурация и рельеф пересыпи оз. Богайлы были полностью изменены, произошло смещение аккумулятивного тела в акваторию озера, что подробно изложено в [2]. В пгт Николаевка частично уничтожена пляжная инфраструктура, разрушены элементы ранее поврежденной набережной. В пгт Кача был полностью смыт пляж

у комплекса «Наш Парус», имели место незначительные повреждения ГТС. В районе Любимовка-Учкуевка (г. Севастополь) разрушена пляжная инфраструктура, частично повреждено обветшавшее ГТС, из-за штормового нагона и разлива р. Бельбек подтоплены дома. После шторма отмечено усиление обвальной деятельности, активизировался Учкуевский оползень.

Участок 2 (от г. Севастополь до г. Алушка). В Севастополе частично разрушена набережная на м. Хрустальный и Приморском бульваре, смыто ее покрытие (плитка), которое не выдерживает даже шторма средней силы, но неизменно восстанавливается. Разрушены лестницы к пляжам на южной стороне Гераклеяского полуострова. Частично разрушена инфраструктура на пляжах, где повсеместно наблюдалось большое количество материала, выброшенного со дна. Пляжи, прилегающие к Балаклавской бухте, сохранились в прежних габаритах. Деревянные площадки для отдыха на стойках габионов и тентовые навесы полностью уничтожены.

В пгт Форос (санаторий «Форос») на западном участке отмечены повреждения мола, а также разрушение ларьков и кафе, расположенных на набережной. На восточном участке произошло повреждение верхнего строения мола и эллинга. В пгт Парковое после шторма видимых существенных повреждений не зафиксировано. На курорте премиум-класса Mriya Resort отмечено разрушение вдольберегового участка оградительного мола, существенная потеря пляжа, повреждение конструкций на пляже, элементов благоустройства на набережной и помещений в тылу набережной. В пгт Симеиз выявлены разрушение надводной части восточного надводного волнолома, повреждение надводной части западного волнолома, потеря пляжа протяженностью около 40 м на участке примыкания к буне пирсу. Произошло смещение наброски искусственного мыса к востоку.

Участок 3 (от г. Алушка до г. Алушта). В районе пгт Мисхор, пансионат «Актер», частично разрушен солярий на южной буне. Повреждена южная

часть корпуса, расположенного у центральной буны, и павильоны на набережной. В пгт Гаспра, санаторий «Днепр», сброшены головные массивы на одной из бун (эти массивы были незначительно смещены в плане до начала шторма), по остальным бунам видимых повреждений нет. Повреждены конструкции и сооружения, расположенные на набережной.

В Ялте на Массандровском пляже повреждений берегозащитных сооружений и строений, расположенных на набережной, не зафиксировано. Имели место незначительные повреждения деревянных обвесов на соляриях. Также в Ялте на пляже пансионата «Донбасс» в целом существенного негативного влияния на берегозащитные сооружения шторм не оказал. Произошло смещение оголовка стены набережной, часть пляжного материала была заброшена на набережную.

В пгт Отрадное существенного негативного влияния шторм на берегозащитные сооружения не оказал. Повреждены консольное расширение набережной, покрытие и навесы на набережной.

Участок 4 (г. Алушка — Феодосийский залив — с. Морское). В результате воздействия шторма на центральном участке берегозащитных сооружений, защищающих дорогу Алушта — Судак, повреждено полотно дороги на участке укрепления откоса плитами (250 м); на неукрепленном участке (200 м); на участке западнее устья р. Шелен (100 м), где берег защищала вертикальная гравитационная стена. Также размыт западный торец откосно-ступенчатого укрепления на восточном участке. Откосно-ступенчатые укрепления на западном участке и основная часть на восточном участке не пострадали.

В Феодосии на пляже «Ривьера» имеется свободный песчаный участок шириной около 80 м, защищающий проходящую в его тылу дорогу Феодосия — Керчь. До 2020 г. вдоль дороги были природные дюны с отметками выше полотна дороги, позже дюны были спланированы, растительность на них уничтожена. Было выполнено так называемое благоустройство прибрежной зоны с устройством навесов, бунгало и пляжных дорожек.

При шторме объекты благоустройства были повреждены и частично уничтожены, а пляж и дорога подтоплены.

Численное моделирование волнения в период шторма 26–27 ноября 2023 г.

Ниже представлены некоторые результаты численного моделирования ветрового волнения в Азово-Черноморском бассейне в период экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. Как упоминалось выше, в [1] проводился расчет волновых полей для этого экстремального шторма по спектральной модели SWAN [15]. В качестве атмосферного форсинга использовались данные региональной атмосферной модели, а также данные различных атмосферных ре-анализов. Получено, что максимальные высоты волн в Черном море в период шторма достигали 9 м. Результаты модельных расчетов сопоставлялись со спутниковыми данными, доступными на период шторма.

В работе [1] расчеты волновых полей проводились на прямоугольной сетке с грубым пространственным разрешением (~4 км). Поэтому представляет интерес провести математическое моделирование этого шторма с более высоким пространственным разрешением. Для повышения точности численного моделирования также представляется целесообразным использовать модель, учитывающую взаимодействия между ветровыми волнами и течениями.

С учетом вышеизложенного для моделирования шторма была использована совместная конечно-элементная модель SWAN+ADCIRC [16–18]. Она объединяет модели SWAN [15] и ADCIRC [19], которые широко применяются для расчета штормовых нагонов и ветрового волнения. В этих моделях для аппроксимации по пространственным переменным используется метод конечных элементов, позволяющий использовать неструктурированные расчетные сетки в виде треугольных элементов. Аппроксимация по времени проводится методом конечных разностей. Численное моделирование выполнялось для всего Азово-Черноморского бассейна

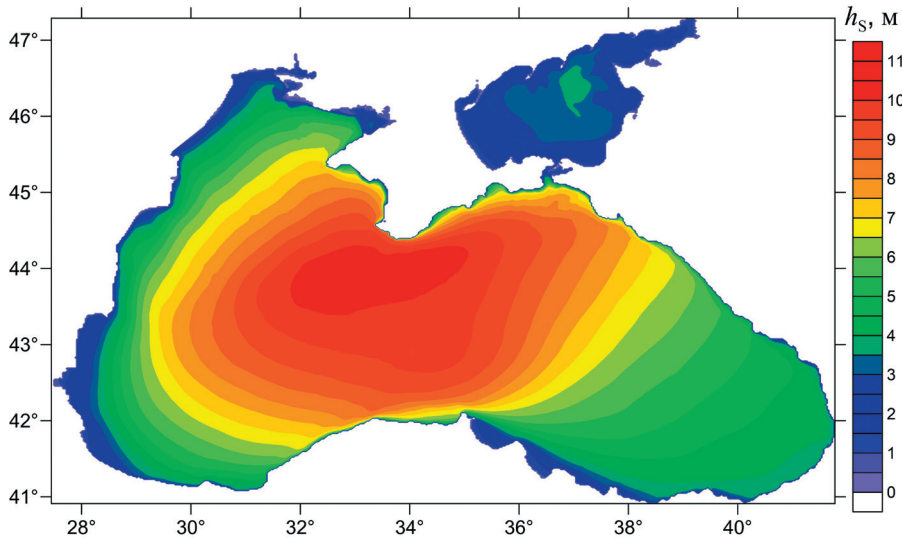


Рисунок 2
Максимальные значения высоты значительных волн h_s в Азово-Черноморском бассейне в период экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. по данным численной модели SWAN+ADCIRC

Figure 2
Maximum values of significant wave heights h_s in the Azov-Black Sea basin during the extreme storm on November 26–27, 2023 according to the numerical model SWAN+ADCIRC data

на неструктурированной расчетной сетке из ~158 тыс. узлов со сгущением в прибрежной зоне. В совместную модель включена модель SWAN версии 41.31. Использовались рекомендованные для этой версии модели настройки (swanmodel.sourceforge.io/settings/settings.htm). В SWAN шаг интегрирования по времени составлял 20 мин., в ADCIRC — 1 сек. Моделирование выполнялось в режиме параллельных вычислений. Шторм рассчитывался по данным мезомасштабной атмосферной модели SKIRON [20]. Расчет шторма проводился на период с 00:00 24 ноября 2023 г. по 00:00 29 ноября 2023 г. Пик шторма приходился

на конец 26 ноября.

На **рис. 2** показано поле максимальных значений высоты значительных волн h_s в Азово-Черноморском бассейне в период шторма 26–27 ноября 2023 г. Область наибольших высот волн расположена в глубоководной части Черного моря ближе к Крыму. Абсолютный максимум h_s всей акватории составляет 10,35 м. Это примерно на 1,5 м больше, чем получено в работе [1]. По своей конфигурации рассматриваемый шторм близок к шторму, возникшему в Черном море 9–11 ноября 2007 г. Оба шторма сформировались под воздействием одноподобных атмосферных циклонов при-

мерно одинаковой интенсивности. Отличие в том, что циклон 26–27 ноября 2023 г. был несколько больше по размерам, двигался медленнее, и его траектория была ближе к зональной.

Обсуждение результатов

Согласно СП 38.13330.2018 «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)», расчетным штормом для берегоукрепительных сооружений является, в зависимости от класса сооружений: шторм повторяемостью 1 раз в 100 лет (класс I), 1 раз в 50 лет (класс II), 1 раз в 25 лет (класс III).

За редкими исключениями, касающимися объектов критической инфраструктуры, берегоукрепительные сооружения Крыма относятся к классу III. При их проектировании рассчитываются параметры штормов повторяемостью 1 раз в 25 лет. В начале определяются волноопасные направления, а затем для этих направлений проводится расчет устойчивости сооружений. Интенсивность волнового воздействия на сооружения определяется как высотой, длиной и периодом волн, так и направлением их подхода. Очевидно, что для каждого конкретного шторма при разной ориентации береговой полосы на одном участке волновые параметры могут быть экстремальными, а на другом участке — ординарными.

Таким образом, оценку воздействия шторма невозможно дать для всего побережья. При необходимости, в случае возникновения повреждений, необходимо рассматривать волновое воздействие на каждый участок в отдельности, чтобы определить причину этих повреждений.

Для сравнения интенсивности шторма 26–27 ноября по модельным данным с интенсивностью расчетного шторма, возможного 1 раз в 25 лет, использовались результаты гидрометеорологических изысканий, выполненных в период с 2015–2022 гг. для объектов берегозащиты, расположенных на побережье Крыма. В **табл. 3** представлены расчетные значения высот, периодов и длин волн по линии первого обрушения, рассчитанные для шторма повторяемостью 1 раз

Таблица 2
Максимальные значения волновых параметров в прибрежных районах п-ова Крым в период экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. по данным модели SWAN+ADCIRC
Table 2
Maximum values of wave parameters in the coastal areas of the Crimean Peninsula during the extreme storm on November 26–27, 2023 according to SWAN+ADCIRC model data

№	Населенный пункт	d , м	h_s , м	hm , м	$h_{1\%}$, м	T_m , сек	λ_m , м	θ_s , °	θ_n , °
1	г. Евпатория, пляж «Золотые пески»	14,7	5,42	3,40	6,94	10,9	120	225	33
2	г. Саки, с. Прибрежное	10,0	4,04	2,53	5,08	10,9	102	230	1
3	г. Саки, пгт Новофедоровка	10,4	4,42	2,77	5,50	11,1	105	238	0
4	г. Севастополь, пгт Кача	11,0	5,39	3,38	6,49	11,5	112	255	2
5	г. Ялта, Mriya Resort	12,6	6,19	3,88	7,45	11,9	124	205	0
6	г. Ялта, пгт Симеиз	10,2	5,25	3,29	6,24	11,8	112	198	0
7	г. Ялта, пгт Ливадия	13,8	4,17	2,61	5,51	11,6	126	158	49
8	г. Ялта, «Ялта-Интурист»	10,7	4,56	2,86	5,67	11,2	108	182	13
9	г. Алушта, «Рабочий уголок»	21,4	3,47	2,17	4,90	9,3	112	159	42

Таблица 3

Волновые характеристики для расчетного шторма юго-западного, юго-юго-западного направлений повторяемостью 1 раз в 25 лет по линии первого обрушения

Table 3

Wave characteristics for a design southwesterly, south-south-westerly storm with a recurrence of once in 25 years along the first wave break line

Наименование объекта	d , м	$h_{1\%}$, м	T_m , сек	λ_m , м
г. Евпатория, наб. В. Терешковой	7,22	5,54	10,1	100
Ялта, пгт Симеиз, санаторий «Пионер»	10,14	7,79	10,7	121
г. Ялта, Никитский ботанический сад	8,75	6,67	9,83	104

в 25 лет, в соответствии с требованиями СП 38.13330.2018. Как видно, расчетные значения параметров волн в целом близки к тем значениям, которые были получены для шторма 26–27 ноября по результатам численного моделирования (табл. 2).

Таким образом, шторм 26–27 ноября 2023 года был близок к расчетному шторму на участках берега, для которых генеральное направление шторма было волноопасным. При этом необходимо отметить, что большая часть берегозащитных сооружений, в том числе построенных еще при СССР, не пострадала.

Предварительно можно выделить следующие *основные причины* повреждений сооружений и конструкций, находившихся в зоне волнового воздействия шторма 26–27 ноября 2023 года:

- ненадлежащее обслуживание сооружений (несвоевременное пополнение пляжа материалом, отсутствие текущего ремонта) привело к дальнейшему разрушению уже поврежденных сооружений, к заплеску на набережную и повреждению расположенных здесь объектов;

- ввиду низких отметок набережных и отсутствия волноотбойного парапета построенные на набережных сооружения были повреждены;

- планировка песчаных и песчано-гравийных свободных пляжей и уничтожение природных дюн способствовало подтоплению территорий и повреждению пляжных сооружений;

- не были должным образом защищены и заглублены основания стен, располагающихся в зоне волнового воздействия, что вызвало вымыв постели и деформации стен;

- сооружения и отдельные конструкции не были рассчитаны на экстремальный шторм;

- размещение рекреационных объектов непосредственно на пляжах.

Выводы

Полученные результаты позволяют заключить, что шторм 26–27 ноября 2023 г. не следует оценивать как «шторм века», но он был близок к шторму повторяемостью 1 раз в 25 лет для участков берега, для которых направления ЮЗ, ЮЗЗ и З были волноопасными (участок побережья от м. Тарханкут до м. Ай-Тодор). О причинах повреждений на отдельных участках берега можно сказать следующее.

На участке 1 основные последствия шторма связаны с разрушениями инфраструктуры на пляжах, чего можно избежать, используя перемещаемые конструкции, которые в зимний сезон располагаются в местах временного хранения, что широко практикуется на мировых курортах. Затопление прибрежных территорий произошло вследствие уничтожения дюн и изменения естественного профиля пляжа, что противоречит общемировой практике защиты и искусственного восстановления дюн.

На участке 2 разрушение плиточного покрытия набережных стало неизбежным следствием использования такого материала, что доказывается многолетней практикой и является нарушением нормативных требований. Некоторые сооружения были, по всей видимости, повреждены вследствие использования при проектировании заниженных волновых характеристик, полученных при проведении изысканий.

Зафиксированные на участке 3 повреждения были связаны с нарушениями при проектировании и строительстве сооружений, находящихся в зоне волнового воздействия при сильных

штормах. Различного рода расширения набережной (г. Ялта, пгт Отрадное и пансионат «Донбасс») не были спроектированы и построены с учетом возможного вертикального воздействия на участки расширения, консолидно-выступающие над пляжем. По нашему мнению, если для берегозащитных сооружений расчетной является волна 5% обеспеченности, то для такого рода конструкций необходимо учитывать воздействие от максимально возможных волн при расчетном шторме, поскольку разрушить такую конструкцию могут одна-две волны за шторм.

На участке 4 дорога Алушта — Су-дак в с. Морское была повреждена в связи с отсутствием берегоукрепительных сооружений со стороны моря. Подпорная стена была недостаточно заглублена, отсутствовала защита основания стены, что не соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к стенам берегозащитных сооружений. Это привело к просадкам стены и размыву засыпки со стороны берега с последующим повреждением дорожного полотна. Следует отметить, что ранее в работе [14] высказывалось предположение о возможности разрушения дороги на этом участке. Использование плит для защиты откоса, по всей видимости, не было обосновано волновыми расчетами в соответствии с нормативными требованиями. Это привело к взвешиванию плит и повреждению конструкции с последующим размывом основания дороги. Примечательно, что типовое откосно-ступенчатое укрепление на смежном участке, сооруженное более 30 лет назад, устояло.

Подтопление территории и повреждение объектов благоустройства пляжей «Рипарио» и «Золотой», расположенных в пгт Приморский и Феодосии, объясняется исключительно антропогенным воздействием на природную среду. При выполнении работ по благоустройству пляжей были срезаны природные дюны, которые являлись естественными берегозащитными сооружениями, что привело к размыву пляжа и проникновению штормовых волн вглубь территории вплоть до дороги Феодосия — Керчь.

Список источников

1. Дулов А. В. и др. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347. EDN ESLTYQ.
2. Крыленко В. В. и др. Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 59–78. EDN HQBWYY.
3. Военно-морской энциклопедический словарь. Под ред. В. И. Куроедова. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Военное издательство, 2003. 960 с.
4. Евстигнеев В. П. и др. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона. Севастополь: ИПТС, 2017. 320 с. doi:10.33075/978–5–6040795–0–8.
5. Зац В. И. Особенности режима волнения в районе Ялты // Сб. работ Гидрометеорологической обсерватории Черного и Азовского морей. М.: Гидрометеоиздат. 1962. Вып. 1. С. 77–103.
6. Репетин Л. Н., Белокопытов В. Н., Липченко А. И. Ветры и волнение в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2003. Вып. 9. С. 13–28. EDN ZREIKZ.
7. Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н. Штормовой ветро-волновой режим у Черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. Вып. 19. С. 56–69. EDN YKTSVR.
8. Бухановский А. В. и др. Шторм на Черном море 11 ноября 2007 г. и статистики экстремальных штормов моря // Известия Русского географического общества. 2009. Т. 141, вып. 2. С. 71–80. EDN OIJXSR.
9. Ильин Ю. П. и др. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том II: Черное море. Севастополь, 2012. 421 с.
10. Куклин А. К. и др. Экстремальные значения высот и периодов морских волн в районе Южного берега Крыма // Системы контроля окружающей среды. 2013. Вып. 19. С. 156–161. EDN VUCRXB.
11. Ивашинцев Н. Исследование шторма, бывшего на Черном море 2/14 ноября 1854 года // Морской сборник. 1855. Т. XVII, № 7. С. 1–25.
12. Иванов В. А. Очерк климата Таврической губернии. Симферополь, 1888. 36 с.
13. Буря на Севастопольском рейде 23–24 ноября 1861 года // Морской сборник. 1862. Т. LVIII, № 8. С. 70–71.
14. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь: Колорит, 2019. 256 с.
15. Zijlema M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57, iss. 3. Pp. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>.
16. Dietrich J. C., et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58, iss. 1. Pp. 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>.
17. Фомин В. В., Полозок А. А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 27. С. 139–145.
18. Fomin V. V. Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, issue 5. 052005. DOI 10.1088/1742–6596/899/5/052005
19. Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Washington, USA: US Army Corps of Engineers, 1992, 141 p. (Dredging Research Program Technical Report DRP-92–6).
20. Papadopoulos A., et al. The weather forecasting system for Poseidon — an overview // Journal of Atmospheric & Ocean Science. 2002. Vol. 8, issues 2–3. Pp. 219–237. <https://doi.org/10.1080/1023673029000003543>.

References

1. Dulov V. A., et al. Extreme Black Sea Storm in November, 2023 // Physical Oceanography. 2024. № 31(2). Pp. 295–316.
2. Krylenko V. V., et al. Transformation of Lake Bogailly Barrier Beach (Western Crimea) under the Influence of Extreme Storms // Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea. 2024. № (3). Pp. 59–78.
3. Kuroedov V. I., ed. Naval Encyclopaedic Dictionary. Edition 2nd, revised and supplemented. M.: Military Publishing House, 2003. 960 p.
4. Evstigneev V. P., et al. Wind Wave Conditions in the Coastal Zone of the Azov-Black Sea Region. Sevastopol: IPTS, 2017. 320 p. doi:10.33075/978–5–6040795–0–8.
5. Zats V. I. Features of the wave regime in the area of Yalta // Collection of works of the Hydrometeorological Observatory of the Black and Azov Seas. 1962; Vol. 1. Pp. 77–103.
6. Repetin L. N., Belokopytov V. N., Lipchenko M. M. Winds and wave perturbations in the southwest Crimean coast // Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources. 2003. № 9. Pp. 13–28.
7. Goryachkin Yu. N., Repetin L. N. Storm wind and wave regime near the Black Sea coast of Crimea // Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources. 2009. № 19. Pp. 56–69.

8. Boukhanovsky A. V., Lopatoukhin L. I., Chernysheva E. S., Kolesov A. M. A Storm on the Black Sea on November 11, 2007 and the Statistics of Extreme Sea Storms // *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2009. № 141, issue 2. Pp. 71–80.
9. Ilyin Yu. P., et al. Hydrometeorological Conditions of the Seas of Ukraine. Vol. 2. Black Sea. Sevastopol, 2012. 421 p.
10. Kuklin A. K., et al. Extreme values of heights and the periods of sea waves in area of Southern coast of Crimea // *Monitoring Systems of Environment*. 2013. № 19. Pp. 156–161.
11. Ivashintsev N. A study of the storm occurred on the Black Sea the 2/14 November 1854 // *Marine Collected Articles*. 1855. Vol. XVII, № 7. Pp. 1–25.
12. Ivanov V. A. Description of the climate of Tavricheskaya province. Simferopol, 1888. 36 p.
13. Storm at the Sevastopol roadstead on 23–24 November 1861 // *Marine Collection*. 1862. Vol. LVIII, № 8. Pp. 70–71.
14. Goryachkin Yu. N., Dolotov V. V. Sea Coasts of Crimea. Sevastopol: COLORIT Ltd., 2019. 256 p. (In Russ.).
15. Zijlema M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // *Coastal Engineering*. 2010. Vol. 57, is. 3. Pp. 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.011>.
16. Dietrich J. C., et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations // *Coastal Engineering*. 2011. Vol. 58, iss. 1. Pp. 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>.
17. Fomin V. V., Polozok, A. A. Technology for Modelling Storm Surges and Wind Waves in the Sea of Azov on Unstructured Grids // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2013. Iss. 27. Pp. 139–145.
18. Fomin V. V. Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 899, issue 5. 052005. DOI 10.1088/1742–6596/899/5/052005.
19. Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Washington, USA: US Army Corps of Engineers, 1992, 141 p. (Dredging Research Program Technical Report DRP-92–6).
20. Papadopoulos A., et al. The weather forecasting system for Poseidon — an overview // *Journal of Atmospheric & Ocean Science*. 2002. Vol. 8, issues 2–3. Pp. 219–237. <https://doi.org/10.1080/1023673029000003543>.

Информация об авторах

Горячкин Юрий Николаевич — д.г. н., главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН. Author ID: 848301, SPIN-код: 6419–5267. Scopus Author ID: 6507545681. WoS Researcher ID: I-3062–2015. ORCID: 0000–0002–2807–201X

Марков Алексей Анатольевич — ведущий инженер, Морской гидрофизический институт РАН

Фомин Владимир Владимирович — д. ф.—м. н., зав. отделом вычислительных технологий и математического моделирования, Морской гидрофизический институт РАН. ORCID ID: 0000–0002–9070–4460. Researcher ID: H-8185–2015, SPIN-код: 6992–2688

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.12.2024; одобрена после рецензирования ...2025; принята к публикации ... 2025.

Information about the authors

Yuri N. Goryachkin — Dr. Sci. (Geogr.), Chief Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS. Author ID: 848301, SPINкод: 6419–5267. Scopus Author ID: 6507545681. WoS Researcher ID: I-3062–2015. ORCID: 0000–0002–2807–201X

Aleksey A. Markov — Lead Engineer, Marine Hydrophysical Institute of RAS

Vladimir V. Fomin — DSc (Phys.—Math.), Chief Researcher, Marine Hydrophysical Institute of RAS. ORCID ID: 0000–0002–9070–4460. ResearcherID: H-8185–2015

Article info

The article was submitted 16.12.2024; approved after reviewing ... 2025, accepted for publication ... 2025.