

## Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве

В. В. Фомин <sup>✉</sup>, Ю. Н. Горячкин

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

<sup>✉</sup> v.fomin@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022; одобрена после рецензирования 21.02.2022;  
принята к публикации 15.03.2022.

### *Аннотация*

*Цель.* Оценки параметров волн в прибрежных акваториях имеют большое практическое значение для проектирования и эксплуатации объектов береговой инфраструктуры. В работе на примере района Сакской пересыпи (Западный Крым) излагается опыт исследования волновых и морфодинамических процессов в береговой зоне применительно к задачам проектирования и строительства защитных гидротехнических сооружений.

*Методы и результаты.* Для математического моделирования волновых и морфодинамических процессов в исследуемом районе использовались: спектральная модель ветрового волнения SWAN, гидродинамическая модель SWASH, комплексная морфодинамическая модель XBeach, интегральная модель эволюции береговой зоны GenCade. Волновой режим анализировался с использованием 41-летних временных рядов (1979–2019 гг.) волновых параметров, полученных на основе ретроспективных расчетов ветрового волнения по модели SWAN и данных атмосферного реанализа ERA. Получены оперативные и экстремальные характеристики ветрового волнения. Проведено моделирование пространственной структуры волновых полей для разных типов ветровых воздействий. Показано, что наиболее интенсивное волнение возникает при юго-западном ветре. Даны оценки высоты и длины наката волн на берег. Проведены расчеты деформаций профиля береговой зоны для штормов разной длительности. Получены значения суммарного за год вдольберегового потока наносов на участке проектирования за период 1979–2019 гг. Установлено, что в 70% случаев поток наносов направлен в сторону евпаторийского побережья.

*Выводы.* Исследования показали, что пренебрежение научно обоснованными рекомендациями при проектировании объектов прибрежной инфраструктуры может привести к нарушению существующей природной системы формирования береговой зоны и к существенным негативным последствиям для берега на участке протяженностью до 10 км. Эти последствия могут быть выражены в сокращении ширины пляжной зоны, понижении высотных отметок, в замене на некоторых участках песка на галечно-гравийные фракции, что ухудшает рекреационные свойства пляжей. С учетом планового расположения основания ограждающей стены на отдельных участках возможен подмыв и повреждение стены набережной. Эти выводы подтвердились на практике уже в ходе строительства объекта. По результатам проведенной работы были даны рекомендации по исключению из проекта сооружений, возведение которых может привести к существенным негативным изменениям в морфодинамике береговой зоны.

**Ключевые слова:** береговая зона, антропогенное воздействие, волновой режим, морфодинамика, Крым, Сакское озеро, пересыпь, математическое моделирование, SWAN, SWASH, XBeach, GenCade

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН № 0555-2021-0005.

© Фомин В. В., Горячкин Ю. Н., 2022

Для цитирования: Фомин В. В., Горячкин Ю. Н. Учет локальных волновых и морфодинамических процессов в прибрежном гидротехническом строительстве // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 3. С. 291–311. doi: 10.22449/0233-7584-2022-3-291-311

## Accounting for the Local Wave and Morphodynamic Processes in Coastal Hydraulic Engineering

V. V. Fomin , Yu. N. Goryachkin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 v.fomin@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** Estimates of wave parameters in the coastal waters are of great practical importance for designing and operating coastal infrastructure facilities. On the example of the Saki bay-bar region (Western Crimea), the experience of studying the wave and morphodynamic processes in the coastal zone is presented being applied to the tasks of designing and building protective hydraulic structures.

**Methods and Results.** Mathematical modeling of the wave and morphodynamic processes in the area under study was done using the following: spectral model of the wind waves *SWAN*, hydrodynamic model *SWASH*, complex morphodynamic model *XBeach* and integral model of the coastal zone evolution *GenCade*. The wave regime was analyzed using the 41-year time series (1979–2019) of wave parameters resulted from the retrospective calculations of wind waves based on the *SWAN* model and the *ERA* atmospheric reanalysis data. The operational and extreme characteristics of wind waves were obtained. Spatial structure of the wave fields for different types of the wind effects was modeled. The most intense waves are shown to occur during the southwest wind. The height and length of wave run-up on the coast and the coastal zone profile deformations for the storms of different durations were estimated. The values of the total annual along-coastal sediment flow in the design area were obtained for 1979–2019. In 70% of the cases, the sediment flow was established to be directed towards the Evpatoriya coast.

**Conclusions.** The studies have shown that neglecting scientifically based recommendations when designing coastal infrastructure facilities can lead both to disruption of the existing system of the coastal zone natural formation, and to significant negative consequences for the coastline of almost 10 km length. These consequences can be manifested in a reduction of the beach zone width, a decrease in elevation marks and replacement of sand with the pebble-gravel fractions in some areas that worsen recreational features of the beaches. Having been analyzed and taken into account, the planned location of the base of the enclosing wall shows that in some parts, the embankment wall can be possibly washed away and damaged. These conclusions were confirmed in practice already during the facility construction. Based on the results of the performed study, the constructions contributing significantly to the changes in the coastal zone morphodynamics were recommended for exclusion from the project.

**Keywords:** coastal zone, anthropogenic impact, wave regime, morphodynamics, Crimea, Sakscoe Lake, bay-bar, mathematical modeling, *SWAN*, *SWASH*, *XBeach*, *GenCade*

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state assignment of Marine Hydrophysical Institute, RAS No. 0555-2021-0005.

**For citation:** Fomin, V.V. and Goryachkin, Yu.N., 2022. Accounting for the Local Wave and Morphodynamic Processes in Coastal Hydraulic Engineering. *Physical Oceanography*, 29(3), pp. 271-290. doi:10.22449/1573-160X-2022-3-271-290

### Введение

Южный (ЮБК) и западный берег Крымского п-ова являются двумя основными курортными районами, каждый из которых принимает примерно 40% всего потока отдыхающих. Если возможности расширения рекреационных зон на ЮБК практически исчерпаны, то Западный Крым потенциально

может их существенно наращивать, что выразилось в создании в настоящее время ряда проектов дальнейшего развития этого региона. Один из таких проектов под названием «Строительство пешеходной набережной вдоль улицы Морская, Республика Крым, г. Саки», к сожалению, предусматривает серьезное вмешательство в природные процессы береговой зоны пересыпи оз. Сакское, ранее уже подвергавшейся негативному антропогенному воздействию.

Вполне очевидно, что при реализации такого рода проектов необходимо учитывать особенности природных условий конкретного района побережья и ранее полученный опыт его хозяйственного освоения. Это, к сожалению, не было сделано проектировщиками, несмотря на неоднократные предупреждения со стороны научных организаций Крыма. Вследствие проявившегося явного отрицательного воздействия на береговую зону строительство было приостановлено, а проект отправлен на доработку.

Целью настоящей работы является анализ антропогенного воздействия на береговую зону в районе пересыпи оз. Сакское, получение характеристик волнового режима и морфодинамики на основе натурных данных и современных методов математического моделирования.

#### **Ретроспективный анализ реакции береговой зоны участка проектирования на антропогенные воздействия**

Основные и старейшие курорты Западного Крыма – города Евпатория и Саки, расположенные на берегах Каламитского залива, который дугой длиной ~ 60 км протянулся от м. Евпаторийский до м. Лукулл (рис. 1). Берега залива образуют абразионно-аккумулятивную пару. Южная половина представлена абразионным берегом с обрывистым клифом (высотой до 15 м), сложенным красно-бурыми глинами, с включением горизонтов галечных конгломератов. Разрушение клифов в настоящее время наряду с донной абразией является основным источником наносов береговой зоны [1]. Средняя скорость отступания клифа 0,5–1 м/год [2]. Наносы южной части питают северную половину залива, побережье которого представляет собой часть единого аккумулятивного образования от м. Карантинный до оз. Кызыл-Яр. Ранее значительную долю питания пляжей составляло поступление аллювия из рек, однако с их зарегулированием в 70-х гг. прошлого века оно стало играть незначительную роль в балансе наносов.

Пересыпь оз. Сакское, сложенная песчано-галечниковым материалом, представляет собой замыкающую аккумулятивную береговую форму. Такие формы образуются в результате поперечного перемещения и выбрасывания наносов со дна в процессе вдольбереговых миграций наносов в местах торможения потока наносов или при комбинированном действии указанных процессов и являются относительно стабильным элементом береговой зоны. Вместе с тем в течение последних 90 лет пересыпь претерпела ряд антропогенных воздействий, в результате чего береговая линия значительно отступила, а пляжи испытали деградацию.



**Р и с. 1.** Карта-схема северной части Каламитского залива. На врезке – расположение бун № 1 и 2 (обозначено римскими цифрами I и II); желтыми цифрами обозначены: детский центр «Арт-Квест» – 1; санаторий «Юрмино» – 2; база отдыха «Уют» – 3; санаторий «Полтава» – 4; пансионат «Парус» – 5

**F i g. 1.** Schematic map of the Kalamitsky Bay northern part. The inset shows the location of buns No. 1 and 2 (indicated by Roman numerals I and II); yellow numbers denote: children center “Art-Quest” – 1; sanatorium “Yurmino” – 2; recreation center “Uyut” – 3; sanatorium “Poltava” – 4; boarding house “Sail” – 5

Еще в середине XX в. здесь были пляжи полного профиля с дюнным ландшафтом, высота пересыпи над уровнем моря составляла 1,5–5 м [3]. Непосредственной причиной сокращения пляжей стала добыча на них песка, которая началась в 30-е гг. в период строительства ДнепроГЭСa (песок отличался очень высоким качеством). Тогда она локализовалась в основном у с. Прибрежное. Максимума добыча достигла в 50-е гг., когда шла интенсивная разработка Прибреженского месторождения песчано-гравийной смеси, включавшего пересыпи озер Сасык и Сакское. Песок использовался для строительства не только в Крыму, он вывозился железнодорожным транспортом и морем в Одессу и другие порты. Перемычки, отделявшие карьеры от моря, стали узкими и выгнулись в сторону карьера, при этом наблюдалось сокращение ширины пляжей. Максимальное отступление береговой линии составило ~ 120 м. В феврале – марте 1953 г. муниципальная комиссия пришла к заключению, что ни на Сасыкской, ни на Сакской пересыпи не могут быть допущены дальнейшие разработки песка и гравия. Тем не менее добыча продолжалась еще несколько лет.

В то время на пересыпи оз. Сакское практически не было никаких строений, которым бы угрожало отступление берега, однако в связи с реаль-

ной опасностью прорыва пересыпи морем, изменения солености рапы в лечебном озере и утраты лечебных свойств грязей Сакского курорта карьеры на суше были закрыты.

Вместе с тем добыча песка путем его рефулирования со дна моря была продолжена, при этом ситуация ухудшалась, вдольбереговой поток наносов практически полностью перехватывался, в результате чего берег стал интенсивно отступать. В это же время было отмечено уменьшение пляжей в г. Евпатория, и в начале 60-х гг. добыча песка была полностью прекращена. Общий объем добытого песка<sup>1</sup> оценивался величиной ~ 15 млн. м<sup>3</sup>. Подведенная сюда железнодорожная ветка для вывоза песка, впоследствии модернизированная, сохранилась местами до сих пор. На месте разработок песка вместо находившихся здесь песчаных дюн образовались соленые озера и заболоченные участки (засухи), частично впоследствии засыпанные и застроенные.

После закрытия карьеров до начала 80-х гг. прошлого века берег постепенно стабилизировался. Однако затем он стал стремительно размываться и за 1983–2006 гг. на Сакской пересыпи отступил на 18–33 м. Непосредственной причиной этого стало строительство в 1982 г. в районе пгт Новофедоровка защитного сооружения водозабора объекта НИТКА. Он представляет собой с южной стороны выдвинутый в море поперечный берегу сплошной железобетонный мол Г-образной формы, с северной стороны – прямолинейный мол. Сооружение перехватило идущий с юга вдольбереговой поток наносов. В результате южнее сооружения наносы стали аккумулироваться и береговая линия с течением времени выдвинулась на всю его длину – 80 м. Севернее водозабора началось интенсивное отступление берега, наблюдалось классическое явление низового размыва, вследствие которого пострадала значительная часть побережья.

Так, в районе детского центра «Арт-Квест» (показан цифрой 1 на врезке рис. 1) берег скачкообразно отступил в течение 1984–1985 гг. на 10 м. В 1989 г. в качестве защиты была построена вертикальная стенка, но к 1999 г. она разрушилась, в конечном итоге берег здесь отступил на 29 м.

В районе от детского центра «Арт-Квест» до пансионата «Парус» (показан цифрой 5 на врезке рис. 1) за период 1983–2006 гг. средняя величина отступления берега составила 18 м. Пострадали и другие районы этого побережья. На территории санатория «Юрмино» и базы отдыха «Уют» (цифры 2 и 3 на врезке рис. 1) к 2011 г. береговая линия отступила на 24–33 м по сравнению с 1983 г. В результате к концу 80-х гг. прошлого века практически весь участок нынешнего проектирования и строительства был признан аварийным. В попытке предотвратить разрушение различных построек, оказавшихся в прибойной зоне, на территории отдельных здравниц применялись набросные поперечные сооружения, удерживающие пляж, защитные наброски из различных материалов, стенки с волногасящими камерами из щелевых плит и стенки из полимерных материалов. На зимний

---

<sup>1</sup> Шуйский Ю. Д., Плотникова К. И., Выхованец Г. В. Динамика береговой зоны в районах месторождений твердых полезных ископаемых // Основные проблемы геологии, разведки и добычи полезных ископаемых шельфовой зоны Мирового океана : Материалы респ. конф. Киев : Наукова думка, 1982. С. 119–127.

период в качестве барьеров для волн возводились песчаные валы в сочетании с траншеями. Хотя эти меры не решали проблему в целом, все же в штормовой сезон они позволяли в некоторой степени защитить примыкающие к пляжу территории. Однако локальная защита берега приводила к размыву других участков.

В качестве примера опишем последствия строительства в 2008 г. на территории санатория «Полтава» (показан цифрой 4 на врезке рис. 1) комплекса берегозащитных сооружений, состоящего из вертикальной стенки и двух гравитационных бун, ограничивающих основной пляж. В результате сооружения бун средняя ширина пляжа стала увеличиваться и достаточно быстро стабилизировалась на отметках 30–35 м. Искусственное пополнение объемов пляжного материала не производилось. Заполнение межбунного пространства пляжа и некоторое увеличение его ширины южнее произошло в результате перехвата части вдольберегового потока наносов, направленного с юга на север, что привело к интенсивному низовому размыву.

В первые месяцы после завершения строительства на территории, примыкающей к санаторию «Полтава» с севера, ширина пляжа сократилась до 8–10 м, что вызвало разрушение ветровыми волнами берегового уступа в его тыловой части. К концу 2011 г. берег здесь отступил на 25 м от исходного положения. Зона интенсивного размыва берегового откоса наиболее отчетливо прослеживалась на расстоянии ~ 250 м к северу от северной буны. На этом участке произошло полное разрушение полосы кустарниковых насаждений и прогулочной набережной. Одновременно происходили подмыв и разрушение ограничительной каменной стенки пляжа. К югу от бун наблюдалось увеличение и стабилизация ширины пляжа на длине ~ 800 м. Таким образом, наглядно проявилось, что наряду с сезонной и межгодовой изменчивостью направлений вдольберегового потока наносов его преобладающее направление – с юга на север.

В начале 2000-х гг. существовало несколько планов восстановления пляжей пересыпи, которые не были осуществлены. Так, по одному из проектов планировалась отсыпка свободного искусственного пляжа длиной 2800 м.

### **Критический анализ существующих проектных решений**

Целью проекта, разработанного в 2016 г. ООО «Берегозащита» (г. Краснодар), являлось строительство набережной длиной 5600 м, а также расширение пляжной зоны на центральном участке проектирования (протяженность ~ 2400 м), где ширина пляжа составляла 10–30 м и волновому воздействию подвергались стена набережной и береговые строения. Здесь мы не будем останавливаться на представляющей сомнительной идее строительства набережной, а отметим только те решения, которые касаются непосредственно береговой зоны. Проектировщиками были выполнены изыскания, полнота и качество которых представляются спорными. Основным выводом, на котором базировался выбор конструктивной схемы устройства берегозащитных сооружений, заключался в том, что потоки наносов на участке проектирования в среднем за год сбалансированы и результирующий поток близок к нулю. Проектом было определено строительство по границам центрального участка двух бетонных поперечных сооружений (буны № 1 и 2, рис. 1) длиной

~ 120 м каждое. На центральном участке предусматривалась отсыпка пляжа шириной 35 м с заменой существовавших песчано-галечных фракций (0,25–10,0 мм [4]) гравийно-валунными (70–80 мм), что резко ухудшало рекреационные свойства пляжа. Со стороны моря этот участок планировалось защитить от волнового воздействия десятью прерывистыми бетонными волноломами, параллельными берегу. Севернее и южнее уже существующих построек здравниц на месте дюн природного пляжа была запроектирована оградительная стена набережной. Предполагалось, что на этих участках не будет происходить изменений ширины и высотных отметок пляжа. В связи с этим не предусматривалось отсыпок пляжного материала и проведения иных берегоукрепительных мероприятий на северном и южном участках.

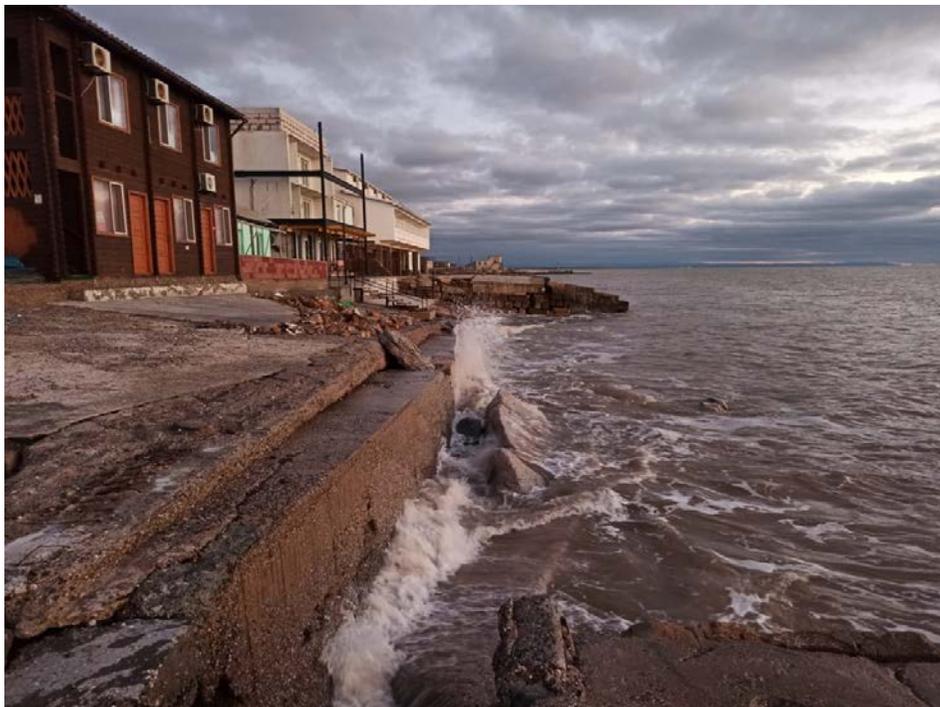
Несмотря на критику проектных решений, прозвучавшую в ходе общественных слушаний со стороны Морского гидрофизического института (МГИ) РАН, к началу 2020 г. были выполнены следующие строительные-монтажные работы: построены стена набережной на южном и северном участках, корневые части бун длиной 63 м (№ 1) и 42 м (№ 2), выполнена отсыпка пляжа на участке между южной и северной бунами в объеме, достоверная информация о котором отсутствует.

Вскоре после начала строительства выявились отрицательные последствия проектных решений. В целях исследования влияния построенных участков на литодинамику нами были выполнены натурные наблюдения подводного и надводного рельефа, сравнение профилей на контрольных створах и предварительная оценка изменения фракционного состава наносов. На основе полученных результатов установлено, что частично построенные буны существенно влияют на трансформацию береговой полосы как выше линии уреза, так и на глубинах до 4,0–4,5 м.

Необходимо отметить, что до строительства буны № 2 (2019 г.) на участках расположения объектов рекреации (детский центр «Арт-Квест», санаторий «Юрмино», база отдыха «Уют») были построены сооружения в активной зоне пляжа, при этом уменьшившейся ширины пляжа было недостаточно для полного гашения волновой энергии. В период 2020–2021 гг. отмечена практически полная потеря пляжа на этих участках (рис. 2). При этом галечно-гравийный материал начал накапливаться с южной стороны буны № 2, а песок отмываться волнением и перемещаться в сторону открытого моря.

Вследствие изменения гранулометрического состава (уменьшение содержания песчаной фракции) на участке южнее буны № 2 произошло понижение высотных отметок и уменьшение ширины пляжа. Частично построенная буна, а также наличие дополнительных препятствий в виде остатков технологической бермы и брошенного на объекте понтона блокировали поток наносов, имеющий здесь генеральное вдольбереговое направление с юга на север. Также отмечались размыв северного угла у буны № 1 и выдвигание галечного пляжа с южной стороны.

В связи с обоснованной тревогой владельцев прибрежных сооружений за сохранность пляжей, а также в связи с реальной угрозой подмыва основания построенной оградительной стены Морским гидрофизическим институтом РАН была инициирована работа по анализу проекта в части, касающейся строительства в береговой зоне.



**Р и с. 2.** Вид берега в районе санатория «Юрмино» (январь 2022 г.)

**Fig. 2.** View of the coast in the region of the sanatorium “Yurmino” (January, 2022)

### **Используемые математические модели**

При проектировании гидротехнических сооружений в береговой зоне, как правило, используются расчетные методики из нормативных документов. В своем большинстве эти методики разработаны на основе простых аналитических решений, в них используются серьезные упрощения рассматриваемых процессов. В конкретных инженерно-гидрометеорологических изысканиях применение указанных методик не всегда возможно, что часто приводит к необходимости привлечения численных моделей с целью получения более точных оценок необходимых для проектирования параметров.

Многолетний опыт МГИ в исследовании динамики береговых процессов дал возможность выделить набор численных моделей, позволяющих решать широкий круг задач, необходимых при проектировании берегозащитных сооружений. Как показывает практика, разумная комбинация нормативных методик и численных моделей может давать более надежные и объективные оценки параметров, необходимых для проектирования гидротехнических сооружений.

Рассматриваемый ниже набор моделей неоднократно применялся МГИ в рамках научно-технического сопровождения проектов гидротехнического строительства в береговой зоне Крыма. Главными критериями выбора моделей являются: открытость и свободное распространение исходных кодов; всесторонняя апробация моделей и их общепризнанность международным

научным сообществом; наличие хорошо разработанной документации для пользователей.

В качестве основного инструмента для моделирования волнения в береговой зоне используется численная спектральная модель *SWAN* [5], которая учитывает: генерацию волн приземным ветром; обрушение волн на глубокой воде; нелинейное взаимодействие волновых гармоник на глубокой и мелкой воде; рефракцию на неоднородностях рельефа дна; обрушение волн на глубокой воде; донное трение и обрушение волн на критических глубинах.

Основной технологической проблемой при моделировании волнения в прибрежных районах является правильное задание характеристик волн, приходящих из открытого моря. Для этого обычно используются неструктурированные сетки со сгущением в прибрежной зоне или прямоугольные вложенные сетки.

В настоящей работе был реализован 4-шаговый метод вложенных прямоугольных сеток: на первом шаге моделируются поля волнения во всем Черноморском бассейне; на втором шаге волнение рассчитывается в области, включающей Каламитский залив; на третьем шаге рассчитываются поля волнения в северной части Каламитского залива; на четвертом шаге моделируются поля волнения на подходах к исследуемому району. На втором, третьем и четвертом шагах параметры ветровых волн на жидких границах расчетных областей определяются интерполяцией модельных данных, полученных на предыдущем шаге. Такой подход дает возможность получить поля ветровых волн с различной детализацией и на различном удалении от исследуемого района.

Для расчета волновых течений и волнового нагона применялась численная гидродинамическая модель *SWASH* [6], которая позволяет проводить моделирование в широком диапазоне пространственно-временных масштабов с учетом рефракции, дифракции и отражения волн. В модели учитываются турбулентное перемешивание, донное трение, обрушение волн, процессы затопления – осушения береговой зоны. В качестве граничных условий на морской границе могут быть использованы данные волновой модели *SWAN*.

Решение морфодинамических задач в масштабах длительности отдельных штормов или штормовых циклов проводилось на основе комплексной численной модели *XBeach* [7], которая позволяет одновременно проводить расчеты характеристик волнения и течений, транспорта наносов и изменений рельефа береговой зоны.

Оценки изменений береговой линии на масштабах нескольких лет выполнялись на основе интегральной модели эволюции береговой линии *GenCade* [8], основное назначение которой – определение межгодовых тенденций изменения береговой линии при разных типах берегозащитных сооружений.

С помощью указанных выше математических моделей удастся решать достаточно широкий круг практических задач, возникающих при реализации проектов хозяйственной деятельности в береговой зоне.

Ниже представлены некоторые из результатов математического моделирования волновых и морфодинамических процессов, полученных МГИ в рамках научно-исследовательской работы по выработке рекомендаций для

выбора типов и схем размещения берегозащитных сооружений на участке строительства набережной в районе пересыпи оз. Сакское.

### Региональный ветроволновой климат

Первым шагом при решении задач проектирования берегозащитных сооружений является получение статистических характеристик волнения в исследуемом районе. Для этого обычно применяются многолетние ряды срочных наблюдений волнения на ближайших морских гидрометеостанциях (МГ), репрезентативных по отношению к исследуемому району. Для района пересыпи оз. Сакское применение данных наблюдений волнения на МГ «Евпатория» (которые использовались ООО «Берегозащита») не вполне корректно, поскольку МГ расположена в полузакрытой бухте и не характеризует волновой режим исследуемого района.

Выходом из этого положения является использование данных ретроспективных расчетов волнения за многолетний период. В МГИ имеется массив данных ретроспективных расчетов параметров ветровых волн в Черном море за период 1979–2019 гг. (далее – массив *SWAN-ERA*) с дискретностью по времени 1 ч. Массив получен с помощью модели *SWAN* на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в прибрежной зоне [9]. Атмосферным форсингом модели служили данные глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts>). Из массива *SWAN-ERA* был выбран ближайший к пересыпи оз. Сакское узел расчетной сетки с глубиной  $\sim 9$  м и сформированы многолетние ряды волновых параметров, включающих высоту значительных волн  $h_s$ , средний период волн  $\bar{\tau}$ , среднее направление волнения  $\theta$ , пиковый период волн  $\tau_p$ .

На основе этих рядов были рассчитаны оперативные и экстремальные характеристики волнения<sup>2</sup>: оперативные характеристики определяют фоновые условия эксплуатации объектов прибрежной инфраструктуры, экстремальные – режим предельных нагрузок на эти объекты.

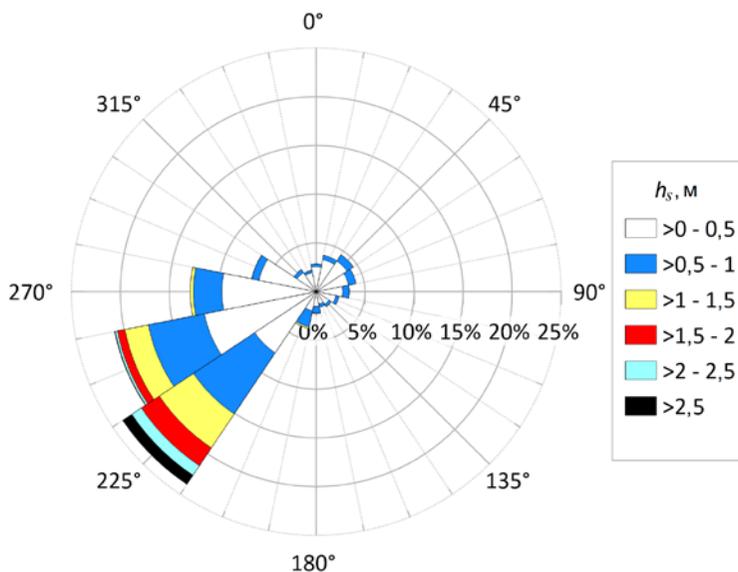
Анализ результатов расчетов оперативных характеристик показал, что с увеличением высоты волн ее повторяемость монотонно уменьшается. Около 70% всех значений  $h_s$  не превышает 0,5 м. Волны высотой  $h_s \geq 1$  м возникают в 7% случаев, а повторяемость волн высотой  $h_s \geq 2,5$  м составляет менее 1%. Наибольшая повторяемость средних периодов волн соответствует интервалу 2–3 с, в который попадает 52% всех случаев.

Со стороны моря наибольшую повторяемость (6%) имеет юго-западный ветер. При этом наиболее вероятным направлением подхода волн к берегу является юго-западное и запад-юго-западное (рис. 3).

Максимумы повторяемости направления волн соответствуют максимумам повторяемости направления ветра и обусловлены распределением глубин и рефракцией, под влиянием которой с приближением к берегу волновые фронты ориентированы параллельно изобатам. Распределение периодов волн по направлениям и градациям показывает, что волны с периодами  $\bar{\tau} \geq 7$  с под-

<sup>2</sup> Крылов Ю. М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л. : Гидрометеоиздат, 1966. 255 с.

ходят к исследуемому району с юго-запада и юго-юго-запада, что качественно повторяет розу волнения.



**Р и с. 3.** Роза волнения по данным SWAN-ERA (глубина 9 м)  
**Fig. 3.** Wave rose according to the SWAN-ERA data (9 m depth)

На основе имеющихся волновых рядов также оценивались продолжительность штормовых ситуаций и интенсивность штормов. В качестве критерия выделения штормов использовалось условие [10]

$$h_s \geq \overline{h_s} + 2\sigma, \quad (1)$$

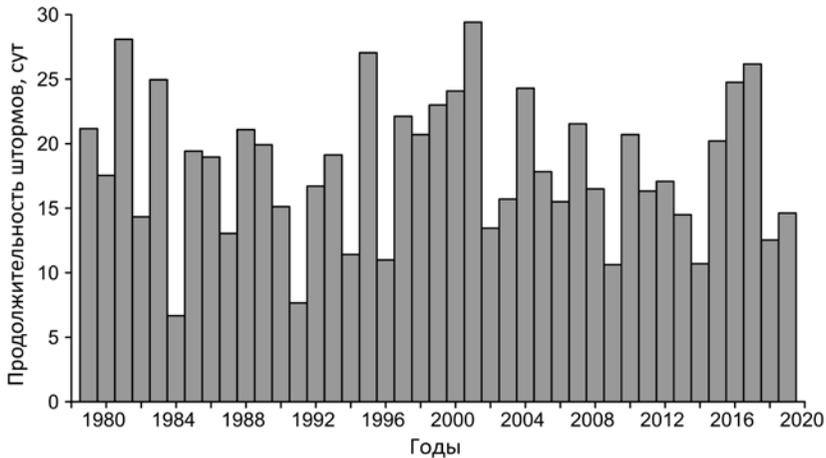
где  $\overline{h_s} = 0,54$  м – среднегодовое значение  $h_s$  для данного ряда;  $\sigma = 0,50$  м – среднеквадратическое отклонение  $h_s$  волн от  $\overline{h_s}$ . Таким образом, пороговое значение высоты волн  $h_p = 1,54$  м.

На рис. 4 приведено распределение по годам суммарной длительности штормовых ситуаций. Как видно, она изменяется в пределах 6,7–29,4 сут, а их среднее значение составляет 18,2 сут. Наиболее продолжительные штормовые ситуации возникают в декабре – январе, минимальная продолжительность штормов отмечается в июле – августе (рис. 5).

Достаточно информативной характеристикой волнения является индекс мощности шторма *SPI* (*storm power index*), рассчитываемый по формуле из работы [10]:

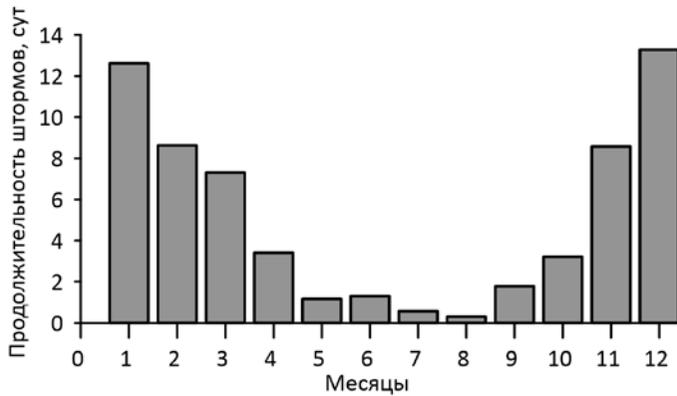
$$SPI = h_d^2 \cdot T_d, \quad (2)$$

где  $h_d$  – среднее за период шторма значение  $h_s$  (м);  $T_d$  – продолжительность шторма (ч). При расчете  $T_d$  и  $h_d$  используются значения  $h_s$ , удовлетворяющие критерию (1).



**Р и с. 4.** Распределение по годам суммарной продолжительности штормов по данным *SWAN-ERA* (глубина 9 м)

**Fig. 4.** Yearly distribution of the storm total durations according to the *SWAN-ERA* data (9 m depth)

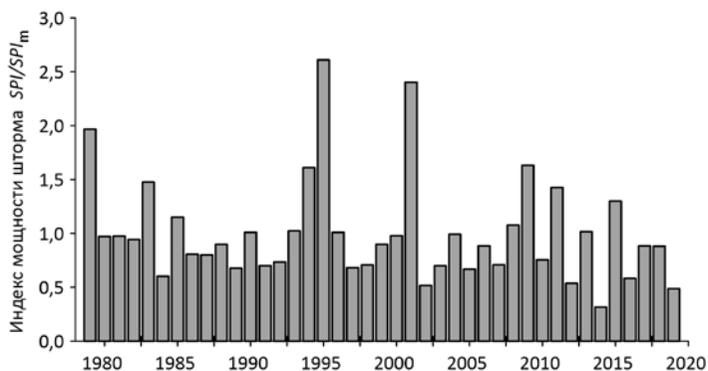


**Р и с. 5.** Распределение по месяцам средней продолжительности штормов по данным *SWAN-ERA* (глубина 9 м)

**Fig. 5.** Monthly distribution of storm mean durations according to the *SWAN-ERA* data (9 m depth)

На рис. 6 показано распределение суммарных по годам значений *SPI*, нормированных на среднемноголетнее значение  $SPI_m = 0,869 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$ . На гистограмме выделяются три года (1979, 1995 и 2001) со штормовой активностью, в 2 раза большей средней. В последние 10 лет прослеживаются заметные колебания индекса штормовой активности.

Для оценки экстремальных значений средних высот волн  $\bar{h} = 0,63 \cdot h_s$  и средних периодов волн  $\bar{\tau}$ , возможных один раз в  $n$  лет, использовалось экстремальное распределение Гумбеля [9, 11], полученное на основе последовательности годовых максимумов  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$  рядов *SWAN-ERA*. Затем с помощью функций распределения элементов волн для моря конечной высоты<sup>2</sup>, куда входят максимумы  $\bar{h}$  и  $\bar{\tau}$ , определялись высоты и периоды волн различной обеспеченности в системе штормов, возможных один раз в  $n$  лет.



**Р и с. 6.** Распределение по годам суммарного индекса мощности шторма  $SPI$ , нормированного на его среднееголетнее значение  $SPI_m$  (глубина 9 м)

**F i g. 6.** Yearly distribution of the storm power total index  $SPI$  normalized to its average long-term value  $SPI_m$  (9 m depth)

Результаты расчетов экстремальных характеристик волнения приведены в табл. 1. Отсюда следует, что для шторма 4%-ной режимной обеспеченности (возможного один раз в 25 лет) расчетное значение высоты волн однопроцентной обеспеченности составляет 5,3 м. Эта величина, наряду со значениями  $\bar{\lambda}$  и  $\bar{\tau}$ , необходима при проектировании берегозащитных сооружений, к которым относятся сооружения типа бун и волноломов.

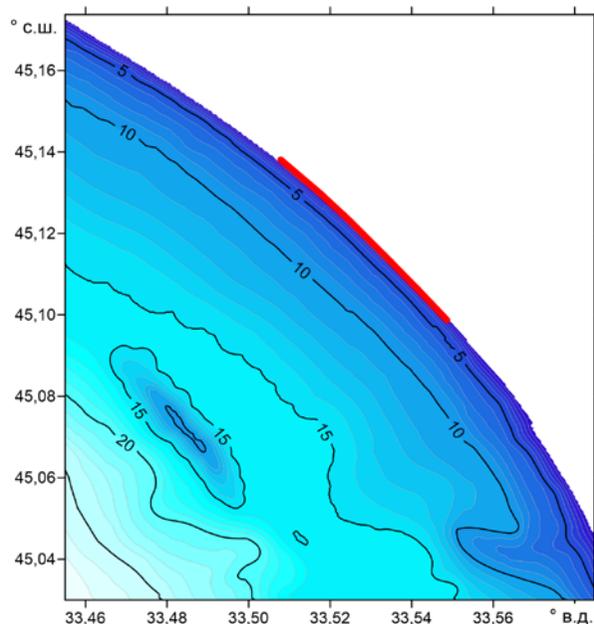
Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Высота значительных волн  $h_s$ , средняя высота волн  $\bar{h}$ , средний период волн  $\bar{\tau}$ , средняя длина волн  $\bar{\lambda}$ , высота волн 13%-, 3%- и 1%-ной обеспеченности в системе штормов, возможных один раз в год, 5, 10, 25, 50 и 100 лет (по данным SWAN-ERA, глубина 9 м)**  
**Wave significant height  $h_s$ , wave average height  $\bar{h}$ , wave average period  $\bar{\tau}$ , wave average length  $\bar{\lambda}$ , wave height of the 13% -, 3% - and 1% probability in the system of storms which are possible once per 1, 5, 10, 25, 50 and 100 years (based on the SWAN-ERA data, 9 m depth)**

$T$ , годы / $T$ , years	Волновые характеристики / Wave characteristics						
	$h_s$ , м / $h_s$ , m	$\bar{h}$ , м / $\bar{h}$ , m	$\bar{\tau}$ , с / $\bar{\tau}$ , s	$\bar{\lambda}$ , м / $\bar{\lambda}$ , m	$h_{13\%}$ , м / $h_{13\%}$ , m	$h_{3\%}$ , м / $h_{3\%}$ , m	$h_{1\%}$ , м / $h_{1\%}$ , m
1	3,4	2,0	9,2	83	3,1	3,8	4,3
5	3,7	2,3	10,2	94	3,5	4,3	4,7
10	3,7	2,5	10,8	100	3,7	4,5	5,0
25	4,0	2,6	11,5	107	3,9	4,8	5,3
50	4,0	2,8	12,0	112	4,1	5,0	5,5
100	4,2	2,9	12,5	118	4,2	5,1	5,7

## Результаты математического моделирования и их обсуждение

Перейдем к рассмотрению основных особенностей пространственной структуры волновых полей. Поля ветровых волн в исследуемом районе определяются скоростью, направлением и временем действия ветра, особенностями рельефа дна, конфигурацией береговой линии, а также значениями эффективных разгонов. Район проектирования характеризуется относительно прямолинейной береговой линией и параллельными ей изобатами (рис. 7). Таким образом, волновые поля во вдольбереговом направлении будут относительно однородными.



**Р и с. 7.** Модельный рельеф дна в районе пересыпи оз. Сакское. Красная линия – район проектирования

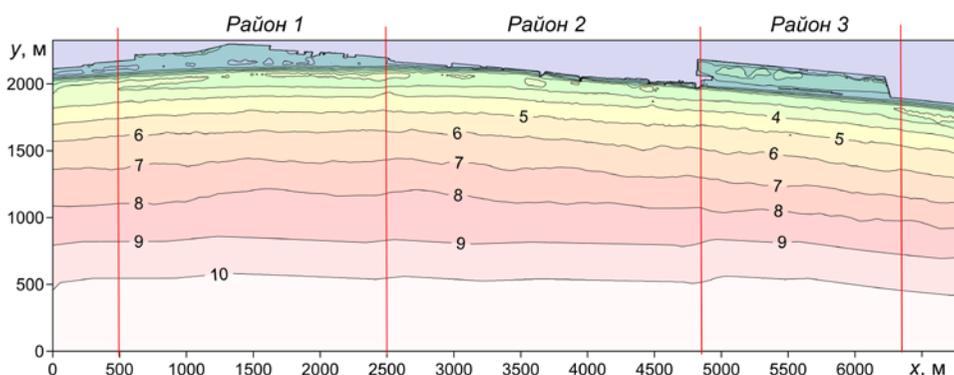
**F i g. 7.** Model bottom topography in the region of the Sakscoe Lake bay-bar. Red line shows the design area

Для моделирования полей волнения использовались модель *SWAN* и 4-шаговый метод вложенных сеток, описанный выше. Расчеты выполнялись на период времени 16 ч для однородного по пространству ветра 4%-ной режимной обеспеченности<sup>3</sup>. Для всех четырех расчетных областей угловое разрешение модели *SWAN* составляло 10°. По частотной координате, изменяющейся в диапазоне 0,04–2 Гц, использовалась неравномерная сетка с 31 узлом. В четвертой расчетной области шаг сетки составлял ~ 40 м. Интегрирование по времени проводилось по неявной разностной схеме с шагом 30 мин.

<sup>3</sup> Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Отв. исп. Л. И. Лопатухин и др. СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2006. 450 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/91f/4293747775.pdf> (дата обращения: 12.05.2022).

Как показывают результаты моделирования, наиболее интенсивное волнение возникает при юго-западном ветре, что обусловлено максимальными разгонами. Вследствие мелководности исследуемого района существенное влияние на волны оказывает рефракция. При подходе к берегу волновые фронты ориентированы параллельно изобатам и среднее направление волн становится перпендикулярным изобатам. На изобате 10 м значения средних длин волн  $\bar{\lambda}$  находятся в пределах 70–105 м, в непосредственной близости от берега они уменьшаются до 45–55 м.

Важным фактором, определяющим потери волновой энергии за счет донного трения, является амплитуда орбитальной скорости волнового движения у дна  $V_b$  [5]. Как показали расчеты, вблизи берега (на глубинах 10 м и меньше) характерные значения  $V_b$  составляют 1,1–1,4 м/с. О потерях волновой энергии за счет обрушения волн позволяет судить пространственное распределение зон обрушения. В модели *SWAN* количественным критерием обрушения является доля разрушающихся волн  $Q_b$  [5]. Как показал анализ полей  $Q_b$ , во всех рассмотренных случаях внешняя граница зоны обрушения волн соответствует изобате  $\sim 4$  м.



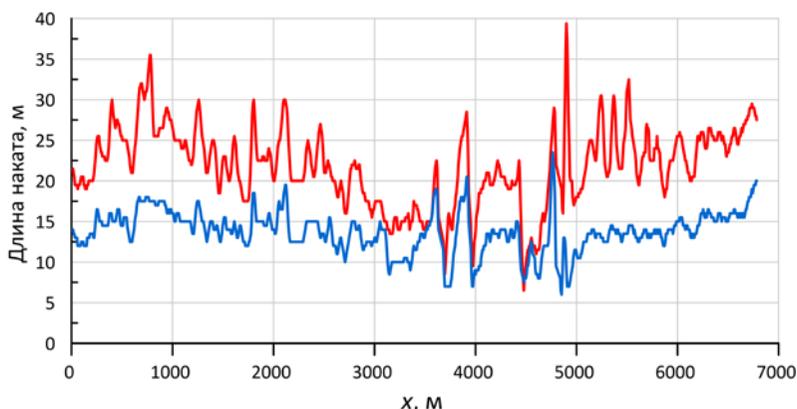
**Р и с. 8.** Рельеф дна и суши (м) береговой зоны для моделирования наката волн на берег и деформаций профиля пляжа

**F i g. 8.** Bottom and land relief (m) of the coastal zone for modeling the wave run-up on the coast and the beach profile deformations

Для оценки характеристик наката волн на берег исследуемого района использовалась модель *SWASH*. Рельеф дна расчетной области показан на рис. 8. Ось  $x$  ориентирована вдоль генерального направления береговой линии, ось  $y$  – в направлении, перпендикулярном генеральному направлению береговой линии. Использовалась сетка с шагом 6,8 м по  $x$  и 2,5 м по  $y$ . Шаг интегрирования по времени составлял 0,02 с. На мористой границе ( $y = 0$ ) расчетной области характеристики волнения определялись на основе спектра *JONSWAP* [6] при  $h_s$  и  $\tau_p$ , соответствующих шторму 4%-ной режимной обеспеченности. На жидких боковых границах задавалось условие излучения. Время интегрирования составляло 360 с. В процессе моделирования для каж-

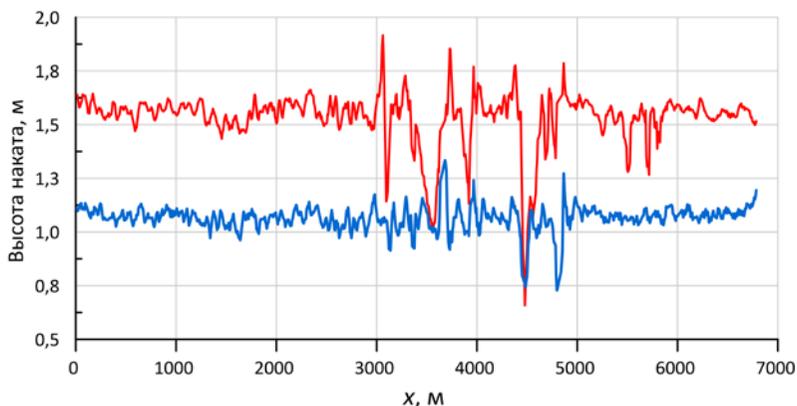
дого  $x$  определялись максимально возможные значения длины и высоты наката.

Были выполнены расчеты максимальных длин и высот наката волн на берег с условием гидростатики (вариант ГМ) и без этого условия (вариант НМ). Результаты моделирования показаны на рис. 9 и 10. Красные кривые соответствуют негидростатическому варианту *SWASH*, голубые кривые – гидростатическому. Как видно, длина и высота наката значительно меняются вдоль береговой линии, что обусловлено непостоянством уклонов дна и уклонов надводной части пляжа на разных участках района проектирования, а также наличием волноотбойной стенки и других берегозащитных сооружений.



**Р и с. 9.** Максимальная длина наката вдоль побережья исследуемого района для шторма 4%-ной режимной обеспеченности. Красная кривая – негидростатическая модель, голубая кривая – гидростатическая модель

**F i g. 9.** Run-up maximum length along the coast of the area under study for a storm of the 4% regime probability. Red curve is a non-hydrostatic model, blue curve is a hydrostatic one



**Р и с. 10.** Максимальная высота наката вдоль побережья исследуемого района для шторма 4%-ной режимной обеспеченности. Красная кривая – негидростатическая модель, голубая кривая – гидростатическая модель

**F i g. 10.** Run-up maximum height along the coast of the area under study for a storm of the 4% regime probability. Red curve is a non-hydrostatic model, blue curve is a hydrostatic one

Сопоставление вариантов ГМ и НМ показало (табл. 2), что по сравнению с гидростатической негидростатическая модель дает в среднем бóльшую длину (на 37%) и бóльшую высоту (на 27%) наката.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Статистические характеристики максимального наката волн вдоль побережья  
в системе шторма 4%-ной режимной обеспеченности  
(ГМ – гидростатическая модель, НМ – негидростатическая модель)  
Statistical characteristics of the maximum wave run-up along the coast in the system  
of a storm of the 4% regime probability  
(HM – hydrostatic model, NM – non-hydrostatic model)**

Значение / value	Статистические характеристики / Statistical characteristics			
	Максимальная длина наката, м / Maximum wave run-up length, m		Максимальная высота наката, м / Maximum wave run-up height, m	
	ГМ / НМ	НМ / NM	ГМ / НМ	НМ / NM
Максимум / Maximum	25,0	41,5	1,8	2,0
Минимум / Minimum	2,5	2,5	0,2	0,5
Среднее / Average	13,8	21,9	1,1	1,5
Медиана / Median	15,0	22,5	1,1	1,6
СКО / Standard deviation	2,9	5,1	0,1	0,2

Далее проводилось моделирование деформаций профиля береговой зоны для штормов разной длительности. Поскольку рельеф дна в исследуемом районе достаточно однороден во вдольбереговом направлении, использовались осредненные для трех районов поперечные профили береговой зоны (границы и номера районов показаны на рис. 8).

Штормовое волнение на мористой границе расчетной области задавалось с помощью спектра *JONSWAP*. Расчетная сетка имела шаг 2,3 м, длительность шторма составляла 12 ч.

В процессе моделирования рассчитывались ширина зоны размыва берега ( $L_C$ ) и протяженность зоны деформаций дна от уреза воды в сторону моря ( $L_S$ ). Началом отсчета при определении параметров  $L_C$  и  $L_S$  служило положение уреза воды в начальный момент времени. Внешняя граница зоны деформаций дна определялась по координате первой мористой точки, в которой деформации дна по абсолютной величине превышали 0,1 м. Расчеты проводились для двух фракций донных осадков [12]: фракция 1 – песок средней крупности ( $D_{50} = 0,375$  мм), фракция 2 – мелкий гравий и крупный песок ( $D_{50} = 0,8$  мм).

Результаты расчетов  $L_C$  и  $L_S$  для разной длительности шторма приведены в табл. 3 и 4. Видно, что наибольшие изменения указанных параметров происходят в интервале времени – 6 ч. Для фракции 2 ширина зоны размыва берега на 2,5–3,5 м меньше, чем для фракции 1. Наименьший размыв берега происходит в южной части (район 3). При длительности шторма 12 ч получены следующие оценки средних значений параметров деформации:  $L_C = 19,1 \pm \pm 2,2$  м,  $L_S = 56,0 \pm 8,9$  м.

Т а б л и ц а 3

Table 3

**Ширина зоны размыва берега  $L_C$  (м) при разной длительности шторма**  
**Width of the coast erosion zone  $L_C$  (m) at different storm durations**

Район / Region	Фракция / Fraction	Длительность шторма / Storm duration			
		3 ч / 3 hr	6 ч / 6 hr	9 ч / 9 hr	12 ч / 12 hr
1	1	4,0	14,4	18,1	20,3
	2	3,4	12,3	16,1	18,3
2	1	4,0	15,0	17,7	22,5
	2	3,4	12,8	15,3	17,0
3	1	4,2	13,6	17,5	19,8
	2	3,0	11,2	14,3	16,7

Т а б л и ц а 4

Table 4

**Протяженность зоны деформаций дна  $L_S$  (м) от уреза воды при разной длительности шторма**  
**Length of the bottom deformations zone  $L_S$  (m) from the water edge at different storm durations**

Район / Region	Фракция / Fraction	Длительность шторма / Storm duration			
		3 ч / 3 hr	6 ч / 6 hr	9 ч / 9 hr	12 ч / 12 hr
1	1	18,6	39,2	46,1	53,0
	2	16,2	32,3	39,2	43,8
2	1	22,0	49,6	56,5	63,4
	2	19,7	40,4	47,3	54,2
3	1	18,9	49,8	62,6	69,5
	2	16,6	39,6	51,1	58,0

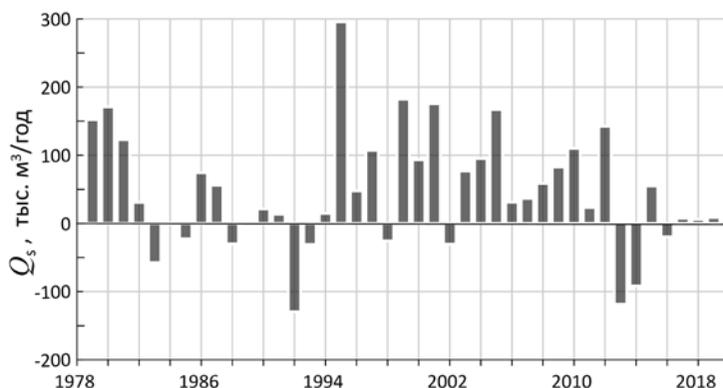
Также была проанализирована упомянутая выше состоятельность предположения о сходимости потоков наносов и балансе, близком к нулю, который был заложен в основу проектных решений. Для этих целей на основе данных ретроспективных расчетов волнения и формулы *CERC* [13] получены значения суммарного за год вдольберегового потока наносов  $Q_S$  на участке проектирования за период 1979–2019 гг.

В формуле *CERC* использовался композитный массив параметров штормового волнения, полученный по данным *SWAN-ERA* за период 1979–2019 гг. В массив включались только штормовые волны ( $h_s > 1,54$  м), направленные в сторону берега. То есть среднее направление волн  $\theta$  удовлетворяло условию  $|\theta_N - \theta| < 90^\circ$ , где  $\theta_N = 232^\circ$  – угол, соответствующий направлению внешней нормали к генеральному направлению береговой линии исследуемого района  $\theta_C = 142^\circ$ . Как показал анализ, в 80% случаев штормовые волны подходят к берегу с юго-запада ( $225^\circ$ ), а в остальные 20% – с запада-юго-запада. Наибольшее количество сильных штормов соответствует юго-западному направлению.

Как показано выше, в исследуемом районе обрушение волн начинается с глубины  $H_C = 4$  м. Поэтому в формуле *CERC* высота волн в зоне обрушения  $h_{SC}$  оценивалась выражением  $h_{SC} = \min(\gamma H_C, h_s)$ , где  $\gamma = 0,73$  – индекс обрушения.

Результаты расчета суммарных вдольбереговых потоков приведены на рис. 11. Среднегодовая величина  $Q_s$  равна 61 тыс. м<sup>3</sup>/год, при этом в 71% случаев поток наносов направлен против часовой стрелки в сторону Евпатории. Статистические характеристики  $Q_s$  следующие: максимум 391 тыс. м<sup>3</sup>/год, минимум 174 тыс. м<sup>3</sup>/год, медиана 39 тыс. м<sup>3</sup>/год, среднеквадратическое отклонение  $Q_s$  115 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Значения потоков, наиболее близкие к среднему, отмечались в 1987, 1996, 2007, 2008, 2015 гг. В последние несколько лет (2015–2019 гг.) расчетные значения  $Q_s$  малы, т. е. в этот период положительные и отрицательные суммарные потоки наносов внутри года компенсируют друг друга.



**Р и с. 11.** Распределение суммарного вдольберегового потока наносов  $Q_s$  по годам. При  $Q_s > 0$  он направлен с юго-востока на северо-запад, при  $Q_s < 0$  – с северо-запада на юго-восток

**F i g. 11.** Distribution of the total along-coastal sediment flow  $Q_s$  by the years. At  $Q_s > 0$ , it is directed from the southeast to the northwest, at  $Q_s < 0$  – from the northwest to the southeast

Следует отметить, что в связи с отсутствием данных прямых наблюдений потоков в исследуемом районе полученные выше оценки  $Q_s$  дают лишь качественную (балансовую) картину межгодовой изменчивости вдольберегового потока наносов.

На основе интегральной модели *GenCade* были получены оценки изменений береговой линии для 5 вариантов берегозащитных сооружений, включая вариант, заложенный в проект. Шаг сетки по вдольбереговой координате составлял 20 м, шаг интегрирования по времени равнялся 15 мин. Использовались два значения среднего диаметра частиц  $D_{50}$  (0,4 и 2,0 мм). На входе в модель задавался массив волновых параметров *SWAN-ERA* (высота, направление и период штормового волнения с шагом 1 ч). Моделирование проводилось на интервал времени в один год.

Расчеты выполнялись для трех лет с разными значениями суммарного вдольберегового потока наносов  $Q_s$ : для 2015 г. (поток близок к среднему многолетнему значению), для 1995 г. (явно выраженный поток в северо-западном направлении) и для 1992 г. (явно выраженный поток в юго-восточном направлении).

Установлено, что с точки зрения минимизации изменений береговой линии наиболее предпочтительным является вариант с 10 короткими бунами, при этом годовые изменения положения уреза не превышают  $\pm 20$  м. Для варианта, заложенного в проект, результаты моделирования выявили существенные изменения положения линии уреза в пределах центрального участка, в зоне расположения прерывистых волноломов, с возможным существенным сокращением ширины пляжа на участках, не прикрытых волноломами.

Эти выводы хорошо подтверждают фактические изменения в положении береговой полосы. Строительство поперечного сооружения (длина которого по нормали к берегу примерно такая же, как и проектируемых бун) привело к сокращению ширины пляжей на участке общей протяженностью  $\sim 10$  км. При этом на некоторых участках отступление берега доходило до 40 м.

### **Заключение**

На основании выполненных исследований можно сделать вывод, что проектное решение, в случае его реализации в полном объеме, в значительной мере может нарушить существующую природную систему формирования береговой зоны, что приведет к существенным негативным последствиям для берега на участке протяженностью до 10 км. Эти последствия могут быть выражены в сокращении ширины пляжной зоны, понижении высотных отметок пляжа, в замене на некоторых участках песчаного пляжа на галечно-гравийный. С учетом планового расположения строящейся набережной и отметки заложения основания ограждающей стены на отдельных участках возможен подмыв и повреждение стены набережной. По нашим оценкам, реализация проекта в существующем виде неминуемо приведет к необходимости проведения работ по устройству берегозащитных сооружений дополнительно еще на участке протяженностью более 10 км. Здесь уместно отметить, что указанные выводы были подтверждены на практике: даже частично построенные берегозащитные сооружения в зимний штормовой период 2021–2022 гг. оказали прогнозируемое нами негативное воздействие на береговую зону, что потребовало принятия срочных противоаварийных мер.

По результатам проведенной работы нами были даны рекомендации, суть которых заключается в исключении из состава проекта сооружений (буны длиной 125 м, прерывистые подводные волноломы), существование которых

внесет значительные изменения во вдольбереговой поток наносов и в дальнейшем приведет к деградации берега на смежных участках. На основе рекомендаций был разработан новый проект.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шуйский Ю. Д.* Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72.
2. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с.
3. *Дзенс-Литовский А. И.* Пересыпи и лиманы Азово-Черноморского побережья и степного Крыма // Природа. 1938. № 6. С. 22–35.
4. *Гуров К. И.* Результаты мониторинга динамики береговой зоны и гранулометрического состава наносов пляжей в центральной части Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 36–46. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-36-46
5. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
6. *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>
7. XBeach Technical Reference: Kingsday Release. Model description and reference guide to functionalities / D. J. A. Roelvink [et al.]. Delft : Deltares, 2015. P. 1–141. doi:10.13140/RG.2.1.4025.6244
8. GenCade version 1 model theory and user's guide / A. E. Frey [et al.]. Vicksburg, MS : U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2012. P. 12–25. (Technical reports ; ERDC/CHL TR). URL: <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/4328> (date of access: 15.01.2021).
9. 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>
10. *Amarouche K., Akpinar A.* Increasing Trend on Storm Wave Intensity in the Western Mediterranean // Climate. 2021. Vol. 9, iss. 1. 11. <https://doi.org/10.3390/cli9010011>
11. Estimation of extreme wind wave heights / L. J. Lopatoukhin [et al.]. Geneva, Switzerland : WMO & IOC, 2000. (JCOMM Technical Report 9). 73 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-1495>
12. *Гуров К. И., Удовик В. Ф., Фомин В. В.* Моделирование штормовых изменений рельефа береговой зоны и гранулометрического состава наносов в районе пересыпи оз. Богайлы (Западный Крым) // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 2. С. 185–196. doi:10.22449/0233-7584-2019-2-185-196
13. *Леонтьев И. О., Акивис Т. М.* О воздействии системы бун на песчаный берег // Океанология. 2020. Т. 60, № 3. С. 474–484. doi:10.31857/S0030157420030041

*Об авторах:*

**Фомин Владимир Владимирович**, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, [v.fomin@mhi-ras.ru](mailto:v.fomin@mhi-ras.ru)

**Горячкин Юрий Николаевич**, главный научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, [yngor@mhi-ras.ru](mailto:yngor@mhi-ras.ru)