

Трансформация западной ветви Бакальской косы (Северо-Западный Крым) в результате шторма 26–27 ноября 2023 года

В. В. Крыленко^{1*}, Ю. Н. Горячкин², М. В. Крыленко¹,
Б. В. Дивинский¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

* e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Аннотация

Аккумулятивные морские береговые формы Черного моря подвержены ряду природных угроз, в числе которых подъем уровня моря и усиление волнового воздействия. Мониторинг динамики аккумулятивных форм для своевременного выявления неблагоприятных тенденций их развития является необходимой составляющей для управления береговой зоной и разработки мер по защите берегов. Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации западной ветви крупнейшей аккумулятивной формы северо-западного побережья Крыма – Бакальской косы – в результате шторма 26–27 ноября 2023 г. Используются картографические, литературные и архивные источники, данные дистанционного зондирования, материалы многолетних мониторинговых наблюдений, результаты математического моделирования. По волновым параметрам и общей мощности шторм 26–27 ноября 2023 г. является чрезвычайно сильным, но не уникальным, а по мощности и другим параметрам волнения сравним со штормом 11 ноября 2007 г. Установлено, что в ходе шторма произошло смещение аккумулятивного тела на восток. Величина смещения существенно различается на протяженности косы и превышает величину отступления коренного берега. Положение зон с разными величинами смещения берегового вала или образованием промоин не совпадает с положением таких зон в прошлые штормы. Различия в характере и масштабе трансформации аккумулятивного тела определяются локальными во времени и пространстве условиями, прежде всего рельефом подводного склона и пляжа на момент формирования шторма. Мониторинг динамики аккумулятивного тела после шторма зафиксировал процессы самовосстановления, подтверждающие, что литодинамическая система не была выведена из состояния динамического равновесия.

Ключевые слова: Черное море, полуостров Крым, Бакальская коса, экстремальный шторм, рельеф, береговая линия

Благодарности: работа выполнена в рамках тем государственных заданий ИО РАН FMWE-2024-0027 и ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0016.

© Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

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

Для цитирования: Трансформация западной ветви Бакальской косы (Северо-Западный Крым) в результате шторма 26–27 ноября 2023 года / В. В. Крыленко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 51–71. EDN NJYEOA.

Transformation of the Western Branch of the Bakalskaya Spit (Northwestern Crimea) as a Result of the Storm on 26–27 November 2023

V. V. Krylenko¹*, Yu. N. Goryachkin², M. V. Krylenko¹, B. V. Divinsky¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia*

² *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

* *e-mail: krylenko.slava@gmail.com*

Abstract

Accumulative marine coastal forms of the Black Sea are exposed to a number of natural threats, including sea level rise and increased wave action. Monitoring of accumulative forms dynamics in order to timely identify adverse trends in their development is a necessary component for coastal zone management and the development of coastal protection measures. The aim of the work is to determine the qualitative and quantitative characteristics of the transformation of the western branch of the largest accumulative form in the northwestern coast of Crimea – the Bakalskaya Spit – as a result of the storm on 26–27 November 2023. We used cartographic, literary and archival sources as well as remote sensing data, materials of long-term monitoring observations and results of mathematical modeling. In terms of wave parameters and overall power, the 26–27 November 2023 storm was extremely strong but not unique, and in terms of power and other wave parameters it is comparable to the 11 November 2007 storm. It was found that during the extreme storm, the accumulative body shifted to the east. The magnitude of the displacement varies significantly along the length of the spit and exceeds the magnitude of the main shore retreat. The position of zones with different magnitudes of the coastal bar displacement or formation of washouts does not coincide with that in previous storms. Differences in the character and scale of the accumulation body transformation are determined by local in terms of time and space conditions, primarily by the relief of the underwater slope and beach at the time of storm formation. Monitoring of the accumulative body dynamics following the storm recorded self-restoring processes confirming that the lithodynamic system had not been not brought out of the dynamic equilibrium.

Keywords: Black Sea, Crimean peninsula, Bakalskaya Spit, extreme storm, relief, coastline

Acknowledgments: The work was carried out under state assignment of IO RAS no. FMWE-2024-0027 and that of MHI RAS no. FNNN-2024-0016.

For citation: Krylenko, V.V., Goryachkin, Yu.N., Krylenko, M.V. and Divinsky, B.V., 2025. Transformation of the Western Branch of the Bakalskaya Spit (Northwestern Crimea) as a Result of the Storm on 26–27 November 2023. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 51–71.

Введение

Бакальская коса расположена в Каркинитском заливе Черного моря на северо-западном побережье Крымского п-ова. Принципиальным отличием Бакальской косы от других крупных аккумулятивных форм Черного моря является ее расположение в глубине Каркинитского залива, где действие одних природных факторов ослаблено, а других – усилено. Она является уникальным природным объектом, определяя гидродинамический режим Каркинитского залива и одновременно подвергаясь влиянию опасных природных явлений. Трансформация аккумулятивного тела, с одной стороны, является следствием тех или иных природных воздействий (например, штормов или нагонов), а с другой – причиной изменений литодинамических, гидродинамических или гидрохимических процессов в акватории залива. Важно, что литодинамическая система Бакальской косы мало изменена антропогенным воздействием, что дает возможность изучать естественную трансформацию крупных морских береговых аккумулятивных форм в условиях повышения уровня моря и усиления штормовой активности [1, 2].

Специалистами Морского гидрофизического института (МГИ) РАН и Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН) проводится мониторинг Бакальской косы. Научный материал, полученный в ходе экспедиций, а также методами дистанционного зондирования и математического моделирования нашел свое отражение в ряде публикаций [3–7]. В Черном море отмечена тенденция к увеличению частоты и интенсивности штормового волнения [8–11]. Штормы, особенно экстремальной силы, приводят к трансформации береговых аккумулятивных форм [12, 13], в некоторых случаях – к их деградации [14]. При этом воздействие экстремальных штормов на аккумулятивные формы чаще всего рассматривается теоретически [15–17].

В ноябре 2023 г. Черное море оказалось под действием серии глубоких средиземноморских циклонов. Над большей частью акватории наблюдались ветры, скорость которых достигала 40 м/с [18].

26–27 ноября 2023 г. сформировалось штормовое волнение, параметры которого достигли уровня наблюдавшихся ранее в регионе штормов или превысили его, что позволяет отнести этот шторм к категории экстремальных природных явлений [19]. Поскольку научных наблюдений за трансформацией морских береговых аккумулятивных форм Черного моря во время экстремальных штормов мало, представляется актуальным рассмотреть воздействие шторма на Бакальскую косу. В работе [20] рассмотрено воздействие данного шторма на другую аккумулятивную форму – пересыпь озера Богайлы. Показано, что в результате штормового воздействия была полностью преобразована существовавшая несколько десятилетий структура рельефа и растительного покрова в пределах пересыпи. Пересыпь оз. Богайлы подверглась значительно большей, по сравнению с предшествующим 40-летним периодом, трансформации.

Необходимо отметить, что Бакальская коса и прилегающая акватория имеют статус ландшафтно-рекреационного парка регионального значения. Тем не менее по заказу местных административных органов уже разработаны эскизные проекты создания здесь крупной рекреационной зоны. К сожалению, эти проекты полностью игнорируют протекающие на побережье природные

процессы, в том числе опасные. Представляется, что сопоставление новых данных с результатами предшествующих исследований позволит оценить произошедшие во время одного шторма изменения в сравнении с предшествующей многолетней динамикой.

Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации западной ветви Бакальской косы под действием экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г.

Материалы и методы исследования

Для анализа динамики береговых форм рельефа использовали спутниковые снимки разных лет из открытых источников (*Google Earth*, Яндекс, *Bing* и т. п.). Для оперативной оценки вызванных штормом 26–27 ноября 2023 г. изменений были использованы данные съемки с космических аппаратов *Sentinel-2* Европейского космического агентства¹⁾. Чтобы добиться точной пространственной привязки, была проведена геометрическая коррекция спутниковых данных [20]. По снимкам выполнена оцифровка линии урезов моря и озера (лагуны), берегового вала (бара), бровки клифа. В качестве пространственной привязки получаемых результатов использована система виртуальных опорных профилей (ОП), проводимых через точки, расположенные на расстоянии 200 м друг от друга. В результате проведенной работы получена информация о динамике уреза и других морфологических элементов в разные временные периоды.

Для детального изучения рельефа и его динамики потребовалось создание цифровых моделей рельефа (ЦМР). Были использованы материалы аэрофотосъемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [21, 22]. С применением технологии фотограмметрической обработки, реализованной в ПО *Agisoft Metashape*, были построены ортофотопланы с разрешением 0.1 м и ЦМР с шагом сетки 0.15×0.15 м.

Кроме материалов дистанционного зондирования были использованы данные гранулометрического анализа проб пляжевых и донных отложений, морфометрические характеристики, геоботанические описания, полученные в ходе экспедиционных работ, а также архивные материалы.

Расчеты климатических характеристик ветрового волнения на Черном море выполнены с помощью современной спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*²⁾. Полное описание модели, а также вопросы ее верификации и настройки изложены в работе [23]. По результатам расчетов сформирован массив пространственных полей параметров поверхностного волнения с дискретностью в 1 ч для всей акватории моря за период с января 1979 г. по декабрь 2023 г.

¹⁾ URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 12.12.2023).

²⁾ MIKE 21/3 Coupled Model FM : Step-by-step training guide: Coastal application. Hørsholm, Denmark : DHI, 2007. 190 p.

Общая характеристика Бакальской косы

Бакальская коса (рис. 1) морфологически представляет собой свободную двойную аккумулятивную форму длиной до 8 км [24]. Обе ветви корневой частью примыкают к активным клифам, выработанным в толще плиоценовых и четвертичных глин. В точке примыкания западной ветви коренной берег резко меняет свое направление с северо-восточного на восточное. Западная ветвь косы от места примыкания к коренному берегу вытянута почти прямолинейно. На протяжении первых 4 км западная ветвь образует узкую (60–100 м) пересыпь, отделяющую от моря лагуну (оз. Бакальское).

Подводный склон вблизи Бакальской косы отличается асимметричностью, отражающей процесс развития косы. Подводный склон к западу от косы представляет собой понижающуюся к западу мелководную равнину, с восточной стороны вблизи берега наблюдается резкий свал глубин до 7 м, далее же следует плоское дно залива. Береговой вал и наносы до глубины 2–6 м состоят из ракушечного песка с большой примесью оолитов, гравия и гальки. Перед фронтом пересыпи оз. Бакальского на глубинах до 2 м на дне моря выходит пласт серого озерного ила.

Географическое положение определяет специфику гидродинамического режима прилегающей к Бакальской косе акватории. В развитии аккумулятивной формы чередуются периоды с преобладающим влиянием либо волн,

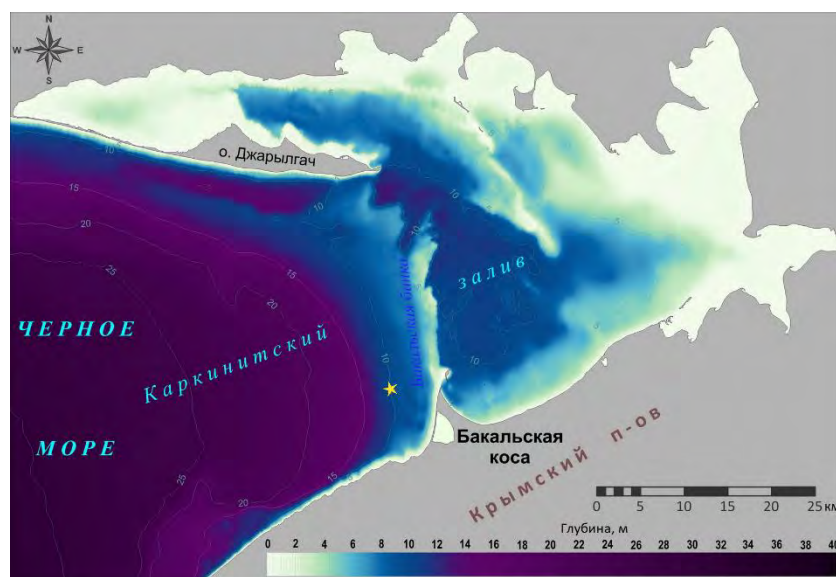


Рис. 1. Карта-схема Каркинитского залива Черного моря (подводный рельеф представлен на основе материалов *SonarChart™*) (URL: <https://webapp.navionics.com>). Звездочкой обозначена точка, для которой производились расчеты основных параметров волнения

Fig. 1. Schematic map of the Karkinitzky Gulf in the Black Sea (data on underwater topography are given using *SonarChart™* materials) (Available at: <https://webapp.navionics.com>). The star denotes the point for which the main wave parameters were calculated

либо течений. Повторяемость и скорости течений, направленных со стороны открытого моря в Каркинитский залив и обратно, сравнимы, при этом волновые режимы для западной и восточной сторон косы различаются [25–28]. Преобладающими являются ветры северных и западных румбов, однако длина разгона для этих ветров неодинакова. Западные ветры генерируют крупную длинную волну открытого моря, северные ветры – низкую короткую волну. Волнение западного и юго-западного направлений по мощности и продолжительности действия значительно превосходит волнение восточного и северо-восточного направлений: средние значения мощности к западу от косы составляют около 1 кВт/м, к востоку – 0.5 кВт/м [25]. Эпизодически может развиваться штормовое волнение, в несколько раз превосходящее по мощности средние штормы. Для западной ветви косы наиболее сильные штормы наблюдались: в 1981 и 1992 гг. – северо-северо-западного направления; в 2007 г. – западо-северо-западного; в 1981, 2000, 2017 гг. – западо-юго-западного; в 1981, 2008 гг. – юго-юго-западного. Шторм 2007 г. обладал наибольшей мощностью – 60 кВт/м. Подобные экстремальные события во многом определяют литодинамический облик косы. Характерными трендовыми составляющими климатической изменчивости ветрового волнения с 1979 г. в районе Бакальской косы являются:

- уменьшение повторяемости штормов западо-юго-западных направлений;
- существенное уменьшение средней высоты волн при штормах северо-северо-западного и юго-юго-западного направлений;
- увеличение высоты волн при волнении западо-северо-западного и северо-северо-восточного румбов [25].

Волновым режимом обусловлено кардинальное различие строения и динамики рельефа западной и восточной ветвей косы. В многолетнем режиме проявляется доминирующая роль волнения, направленного на восток. Аккумулятивное тело Бакальской косы (включая подводную часть – Бакальскую банку) в ходе своего развития смещалось на восток, что отразилось в поперечном профиле косы (рис. 1): западный склон пологий, восточный – крутой [29]. Для надводной части косы этот процесс проявляется в размыве западной ветви косы и аккумуляции на восточном берегу. Основу бюджета наносов составляют продукты абразии берегов и поступающая непосредственно с подводного склона ракуша. Несмотря на то что основной объем наносов поступает в литодинамическую систему с запада, западная ветвь смещается на восток (берег отступает) в виде берегового вала (бара) высотой 1.2–1.6 м и шириной 20–50 м. При волнении со значительной вдольбереговой составляющей здесь наблюдается движение наносов в сторону дистали; при волнении, поперечном берегу, происходит размыв предшествующих отложений с выносом материала во внутреннюю часть косы. Восточная ветвь выдвигается в акваторию моря (наблюдается аккумуляция) по мере формирования новых генераций береговых валов высотой 0.5–1.2 м и шириной 5–10 м.

Таким образом, современное развитие Бакальской косы определяется изменениями количества, направления и интенсивности штормов, колебаниями объема поступающих наносов, антропогенным изъятием наносов [1, 7, 24].

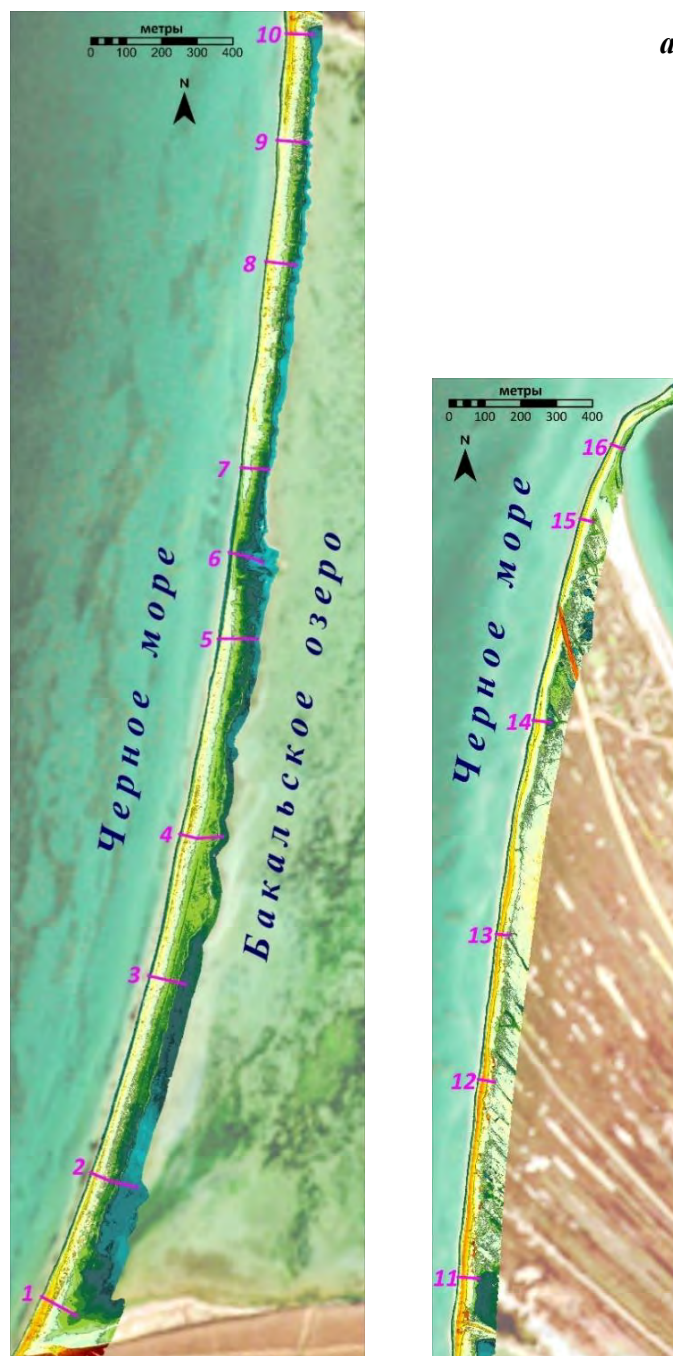
Строение западной ветви

Основой рельефа надводной части западной ветви Бакальской косы является песчано-ракушечный пляж полного профиля (рис. 2). В пределах западной ветви можно выделить основные зоны, в том или ином виде прослеживавшиеся почти на всей протяженности косы:

1. Зона активного пляжа. Отличается наиболее изменчивым рельефом, подвергается действию волн на протяжении большей части своего развития. Ширина редко превышает 10 м (рис. 2, 3), характерен уклон в сторону моря. В пределах пляжа обычно формируется штормовой вал (реже – несколько), иногда наблюдается формирование фестонов. При усилении вдольбереговых течений, сопровождающемся выносом материала, образуется уступ размыва (рис. 3, *с*). В прикорневой части косы вдоль уреза периодически образуются плотные маты из остатков водорослей (рис. 3, *а*). По мере отступления берега вблизи уреза обнажаются отложения внутренней части косы – валов (ракуша, песок, галька, зачастую литифицированные) либо межваловых понижений (илы с примесью ракуши, с каркасом из растительных остатков). Последние более устойчивы к размыву и способствуют образованию мысов (рис. 3, *с*). Наибольшая изменчивость планового положения береговой линии, образование и разрушение штормовых валов и террас наблюдаются вблизи дистали (рис. 3, *е*), где колебания объемов перемещающихся в различных направлениях наносов наиболее значительны.

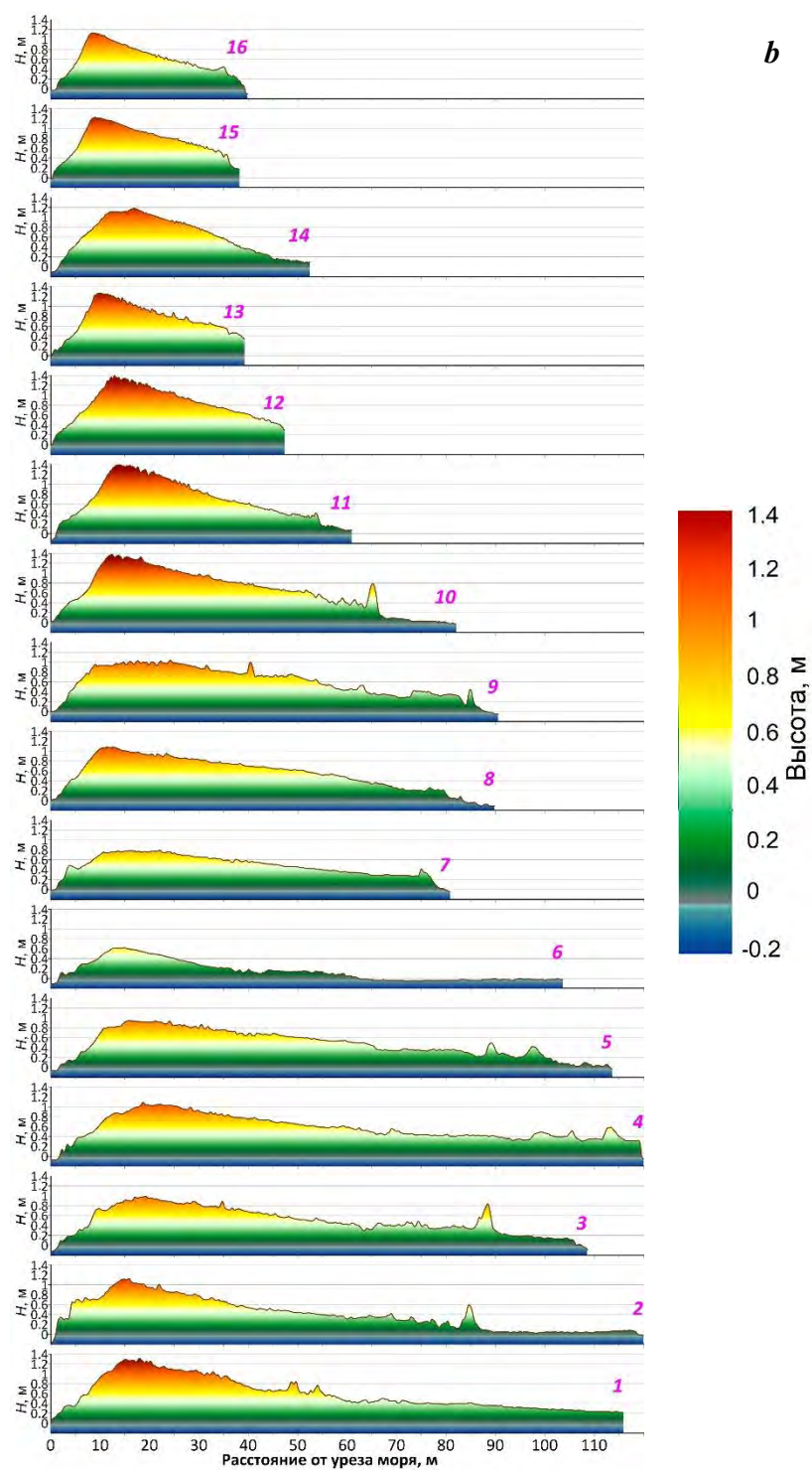
2. Пригребневая зона. Наиболее возвышенная часть берегового вала (от 0.6 м на пересыпи оз. Бакальского до 1.4 м на прикорневой и северной частях) расположена в 10–15 м от уреза моря (рис. 2). Основные черты рельефа данной зоны формируются при наиболее сильных штормах, когда перехлест волнами гребня берегового вала отмечается по всей его длине и сопровождается переносом материала на тыльную сторону. Во время штормов средней силы волновой заплеск пересекает гребень только через понижения в нем, где концентрируется стекающая во внутреннюю часть косы морская вода и формируются ложбины стока. В межштормовой период под действием атмосферных осадков ложбины стока трансформируются в эрозионные врезы. В пределах пригребневой зоны имеется более или менее развитый растительный покров, разрушаемый во время сильных штормов. На наиболее возвышенных участках центральной части западной ветви местами образовались эоловые формы с сопутствующей растительностью.

3. Тыловая (прилагунная для пересыпи оз. Бакальского) зона. Переходная зона, в которой завершается миграция материала, перенесенного волнами с морского склона или поверхностным стоком с пригребневой зоны. Рельеф представлен наклонной в направлении от моря поверхностью, рассеченной ложбинами стока. Переход в поверхность внутренней части косы имеет выраженный перегиб, переход в дно лагуны более плавный и выделяется лишь по составу отложений. Для участков разгрузки потоков заплеска характерны языковидные выступы (рис. 3, *ф*), частота и конфигурация которых существенно различаются вдоль протяженности косы. В пределах зоны обычно имеется развитый растительный покров.



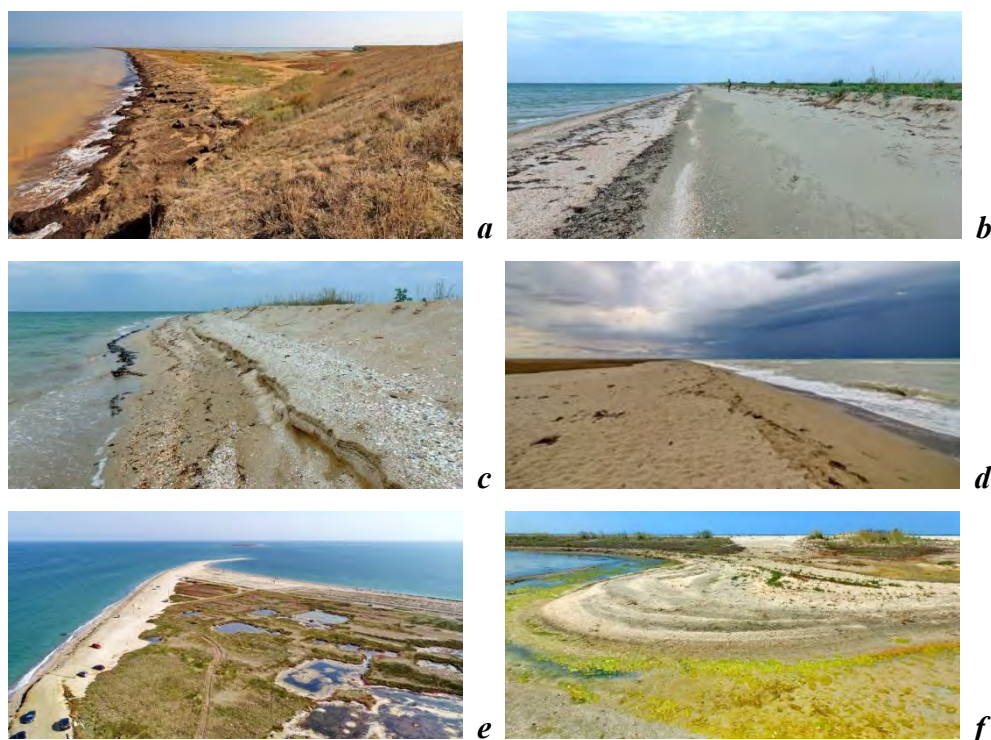
Р и с . 2 . Рельеф западной ветви Бакальской косы (а), поперечные профили (b): *слева* – пересыпь оз. Бакальского; *справа* – основная часть косы. Цифрами обозначены номера профилей

F i g . 2 . The relief of the Bakalskaya Spit western branch (a), transverse profiles (b): *left* – barrier beach of Bakalskoe Lake, *right* – main part of the spit. The numerals indicate the numbers of the profiles



Продолжение рис. 2.

Continued Fig. 2.



Р и с . 3 . Западная ветвь Бакальской косы: *a* – прикорневая часть; *b* – пляж на пересыпи оз. Бакальского; *c* – мыс, образовавшийся на морском урезе в результате обнажения остатков растительности внутренней части косы; *d* – пляж в центральной части косы; *e* – дистальная часть косы; *f* – конус выноса на берегу оз. Бакальского

F i g . 3 . The western branch of the Bakalskaya Spit: *a* – the root part; *b* – the barrier beach of Bakalskoe Lake; *c* – a cape formed at the sea water's edge as a result of the exposure of vegetation remnants of the inner part of the spit; *d* – the beach in the central part of the spit; *e* – the distal part of the spit; *f* – the overflow cone on the shore of Bakalskoe Lake

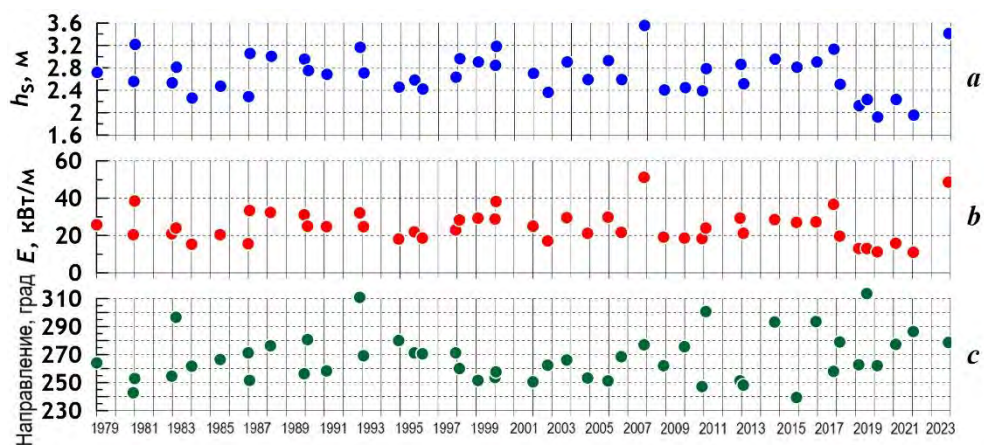
4. Берег оз. Бакальского вдоль пересыпи. Данный участок развивается под влиянием моря. Перехлест волн через гребень пересыпи сопровождается переносом материала с ее морского склона и размывом бортов ложбин стока, в результате чего на берегу озера образуются многочисленные конусы выноса (рис. 3, *f*), которые создают своеобразную конфигурацию в виде фестонов. На развитие берегов оз. Бакальского значительное влияние оказывают колебания уровня в озере, вызванные сезонными изменениями количества атмосферных осадков или поступлением морской воды при сильных штормах. Полное высыхание озера не наблюдалось. Берег озера, за исключением активных конусов, покрыт околководной галофитной травянистой растительностью, в засушливые годы осваивающей часть полосы осушки. Во время сезонного развития водорослей, сопровождающегося падением уровня воды в озере, на мелководьях и полосе осушки из отмерших растительных остатков образуется сплошной чехол толщиной 15–30 см. Этот чехол дополнительно снижает волновое воздействие на берега озера. В периоды высокого стояния воды вдоль уреза озера под действием волн формируется вал из остатков растительности

и мусора. Вдоль пересыпи во время сильных штормов на море этот вал обычно разрушается потоками заплеска и начинает формироваться новый. На большей части береговой линии озера активного вдольберегового перераспределения материала не наблюдается, что объясняется слабой интенсивностью волнения соответствующего направления или отсутствием наносов.

Характеристика шторма 26–27 ноября 2023 г.

Для анализа характера штормового воздействия на берег были рассчитаны основные параметры волнения (значительные высоты волн, периоды пика спектра, средние направления распространения). Расчетная точка располагалась в 5200 м от берега на изобате 10 м (рис. 1). Кроме того, была рассчитана мощность волнения, являющаяся показательной характеристикой, поскольку зависит от двух интегральных параметров волнения, а именно от высоты и энергетического периода волн. Если немного упростить, можно сказать, что энергетический период – это период монохроматической волны с мощностью, эквивалентной мощности данного нерегулярного волнения. Мощность волнения выражается в киловаттах на метр волнового фронта.

На рис. 4 приведены максимальные высоты волн и мощность отдельных штормов к западу от Бакальской косы за последние 45 лет. Анализировались штормы, при прохождении которых развивалось волнение со значительными высотами, превышающими уровень в 2.5 м. Если в определенном году данное пороговое значение не достигалось, то для этого года выбирали характеристики просто наибольшего шторма. Как видно на рис. 4, за последние 45 лет шторм 26–27 ноября 2023 г. по своей энергии и высоте волн сравним со штормом 11 ноября 2007 г.



Р и с . 4. Параметры наибольших штормов для акватории западнее Бакальской косы: *a* – максимальные значительные высоты волн; *b* – максимальные мощности волнения; *c* – генеральные направления штормов

F i g . 4. Parameters of the largest storms west of the Bakalskaya Spit: *a* – maximum significant wave heights; *b* – maximum wave power; *c* – general directions of storms

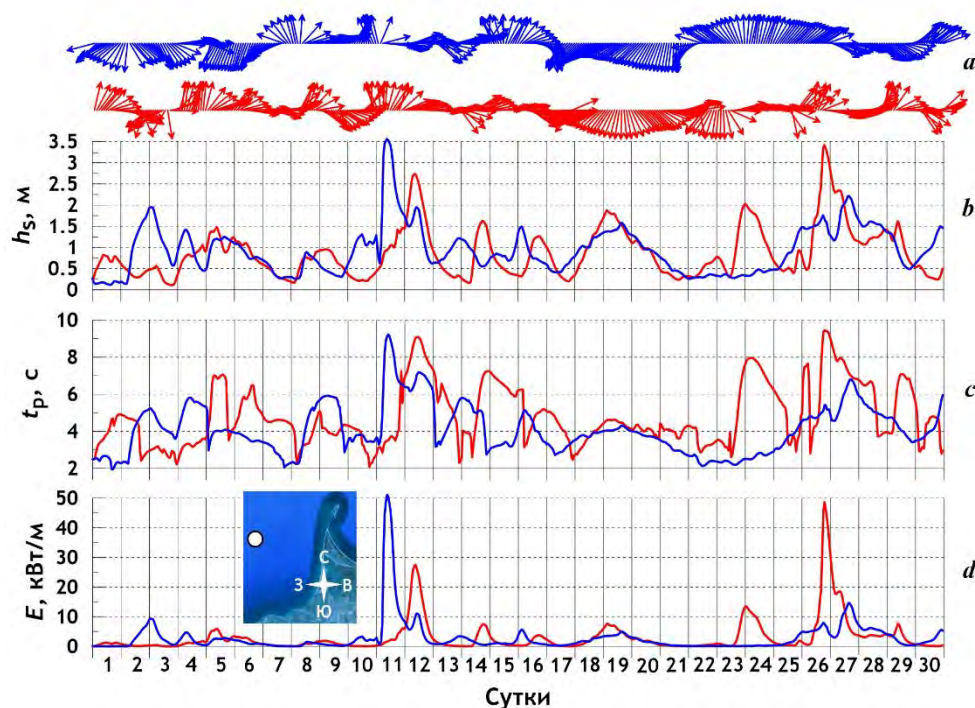


Рис. 5. Основные параметры ветрового волнения для акватории западнее Бакальской косы в ноябре 2007 (синий цвет) и 2023 г. (красный цвет): *a* – направления распространения; *b* – значительные высоты волн; *c* – периоды пика спектра и средние периоды волн; *d* – мощности волнения

Fig. 5. The main parameters of wind waves for the water area west of the Bakalskaya Spit in November 2007 (blue) and 2023 (red): *a* – propagation directions; *b* – significant wave heights; *c* – peak and mean wave periods; *d* – wave power

На рис. 5 представлены ряды значительных высот волн, периодов, мощности, а также направлений волнения для акватории западнее Бакальской косы за ноябрь 2023 г. Кроме того, на рисунке для сравнения представлены графики тех же параметров для ноября 2007 г. Видно, что как в ноябре 2007 г., так и в ноябре 2023 г. западная ветвь Бакальской косы находилась под воздействием развитого волнения, в частности 12 ноября 2023 г. наблюдался шторм мощностью свыше 25 кВт/м. В момент наибольшего развития шторма 26 ноября 2023 г. на изобате 10 м параметры волнения составили: значительная высота волн – 3.4 м, период – 7 с, длина – 75 м. Высота волнового нагона во время шторма составляла 0.15–0.55 м. Заметим, что ноябрьский шторм 2007 г. по мощности немного превосходит аналогичный шторм 2023 г. Скорее всего, эти два случая характеризуют степень возможного максимального развития ветрового волнения для рассматриваемой акватории.

Трансформация западной ветви в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г.

Как показано в работах [18, 30], по волновым параметрам, а также общей мощности шторм 26–27 ноября 2023 г. является для Западного Крыма экстремальным в масштабе нескольких десятилетий. Несколько иная картина наблюдается в районе Бакальской косы, расположенной в Каркинитском заливе. По масштабу и характеру изменений конфигурации берега, рельефа берегового вала (бара) западной ветви Бакальской косы можно сделать вывод, что рассматриваемый шторм является чрезвычайно сильным, но не уникальным. По мощности и другим параметрам волнения (рис. 5) данный шторм сравним со штормом 11 ноября 2007 г.

Во время штормов 2007 и 2023 гг. воздействие волн с перехлестом гребня пляжа наблюдалось на всей протяженности берегового вала западной ветви косы. Поверхность вала выровнена, а существовавшая на ней растительность либо разрушена, либо погребена под слоем песка. Ширина берегового вала существенно увеличилась, хорошо заметны языки песчаных потоков, надвигавшихся на внутреннюю часть косы (рис. 6). В пересыпи оз. Бакальского образовывались многочисленные промоины с выраженными следами перемещения наносов с морского берега на берег озера (рис. 6).

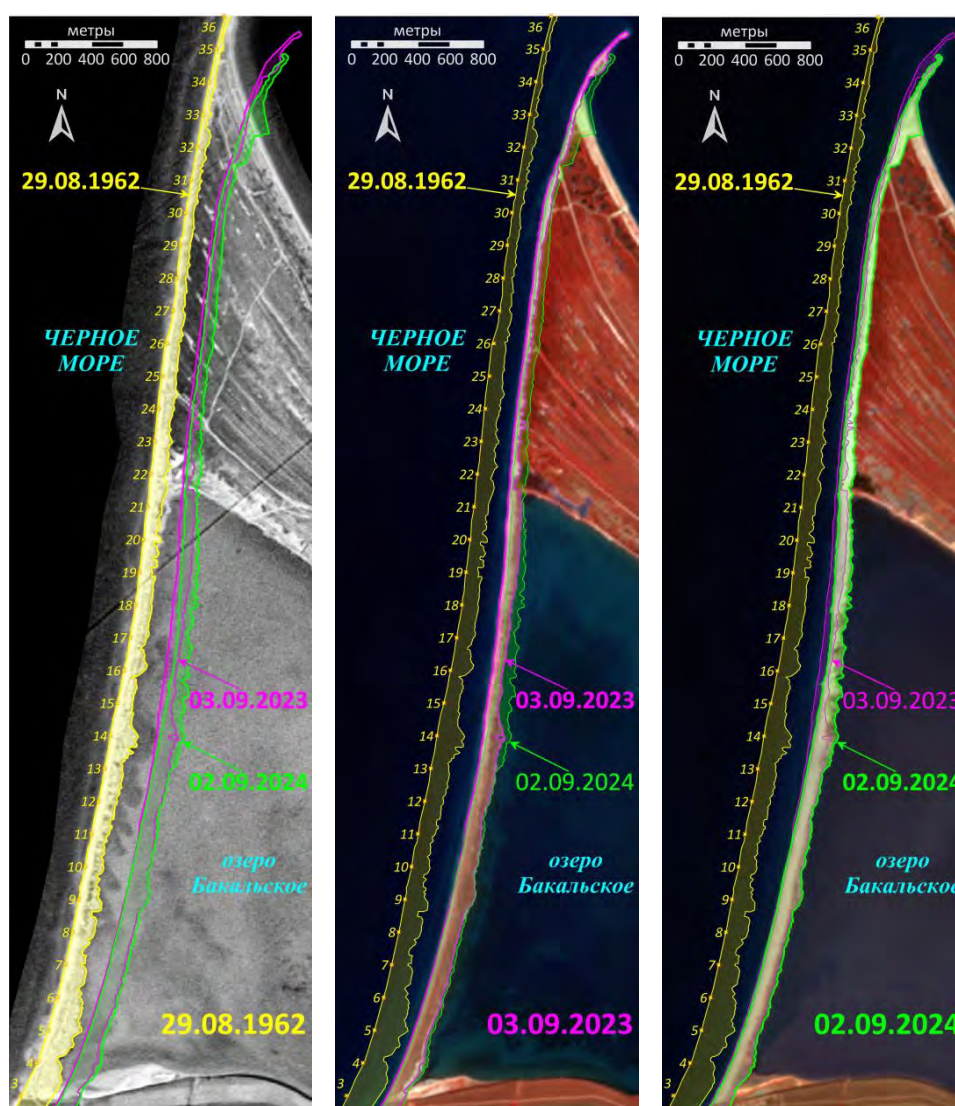
На рис. 7 и 8, а приведены значения отступления морского уреза западной ветви с 03.09.2023 (перед штормом) по 02.09.2024 (после шторма и восстановления целостности пересыпи). Видно, что вдоль всей косы величина отступления существенно варьирует. На участке коренного берега к югу от косы отступление либо отсутствует (ОП 1), либо не превышает 5 м (ОП 2 – ОП 3). На прикорневой части косы отступление уреза сравнительно невелико (10–12 м), а на участке ОП 8–ОП 11 не превышает 5 м. На северной части пересыпи оз. Бакальского (ОП 12–ОП 22) значения отступления существенно вырастают – в среднем 28 м, достигая 45 м у ОП 16. На участке, где западная ветвь представляет собой бар, надвигающийся на внутреннюю часть косы (ОП 23 – ОП 33), отступление несколько меньше – в среднем 16.2 м. В пределах дистальной оконечности (ОП 34 – ОП 36) западный берег отступил примерно на 60 м.



Р и с . 6. Трансформация западной ветви Бакальской косы в ходе шторма: *слева* – промоина в пересыпи оз. Бакальского; *справа* – перемещение песка с морского берега на внутреннюю часть косы

F i g . 6. Transformation of the western branch of the Bakalskaya Spit during the storm: *left* – a washout in the barrier beach of Bakalskoe Lake; *right* – movement of sand from the seashore to the inner part of the spit

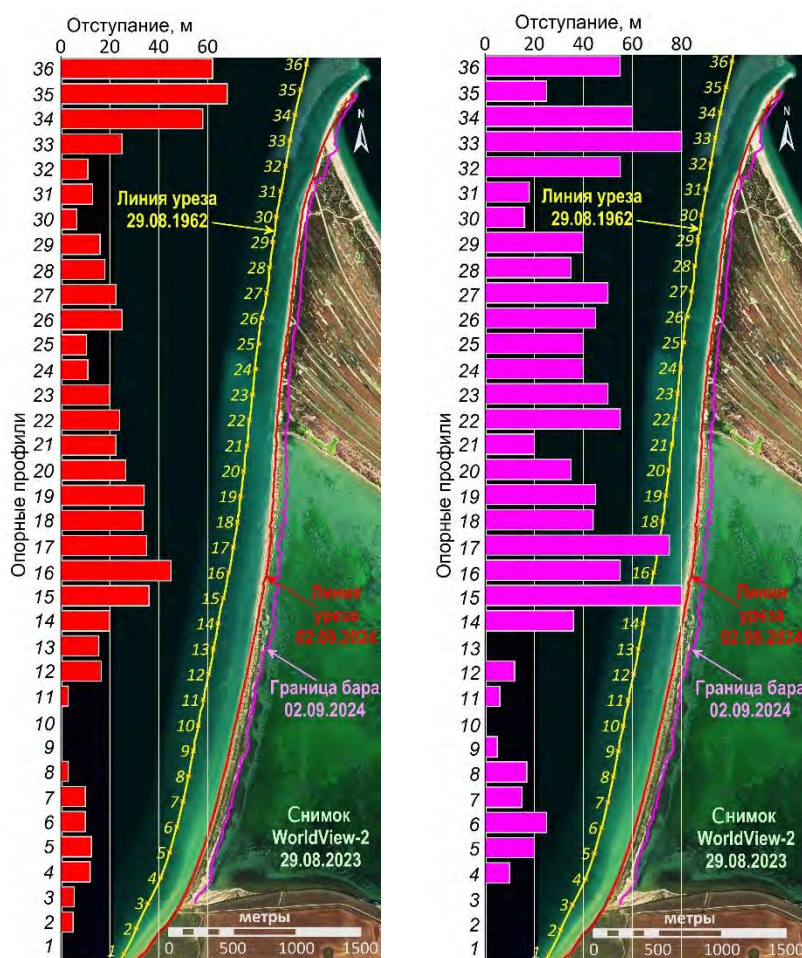
На рис. 7 и 8, *b* приведены значения смещения морского уреза западной ветви с 03.09.2023 (перед штормом) по 02.09.2024 (после шторма и восстановления целостности пересыпи). Видно, что вдоль всей косы величина смещения существенно варьирует. Невелико (в среднем 10 м) отступление уреза на прикорневой части косы (ОП 3 – ОП 13), при этом на профилях 10 и 13 оно либо отсутствует, либо не превышает 5 м. На северной части пересыпи оз. Бакальского (ОП 12 – ОП 22) значения смещения существенно вырастают – в среднем 49.5 м, достигая 80 м у ОП 15. На участке, где западная ветвь представляет собой бар,



Р и с . 7 . Схема трансформации западной ветви Бакальской косы с 1962 г. и в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г.

Fig. 7. The transformation scheme of the western branch of the Bakalskaya Spit since 1962 and during the storm on 26–27 November 2023

надвигающийся на внутреннюю часть косы, смещение остается высоким на отрезке ОП 23 – ОП 29 (в среднем 43 м), а на отрезке ОП 30 – ОП 31 резко снижается до 16–18 м. Возможно, снижение на этом участке обусловлено наличием выходящей под острым углом к урезу высокой насыпи автомобильной дороги из измельченного ракушечного известняка. К северу от дороги смещение бара резко растет, достигая 80 м на ОП 33. Отмечено сильное (до 60 м) смещение к востоку дистальной оконечности (ОП 34 – ОП 36). Во время шторма протяженность дистали сократилась на 380 м, впоследствии произошло ее восстановление на 220 м.



Р и с. 8. Отступление морского уреза (слева) и тыльной части берегового вала (справа) западной ветви Бакальской косы в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г. Цифрами обозначены номера опорных профилей, расстояние между профилями 200 м

Fig. 8. Retreat of the sea water's edge (left) and the rear part of the beach bar (right) of the western branch of the Bakalskaya Spit during the storm on 26–27 November 2023. The numbers indicate the numbers of the support profiles, the distance between the profiles is 200 m

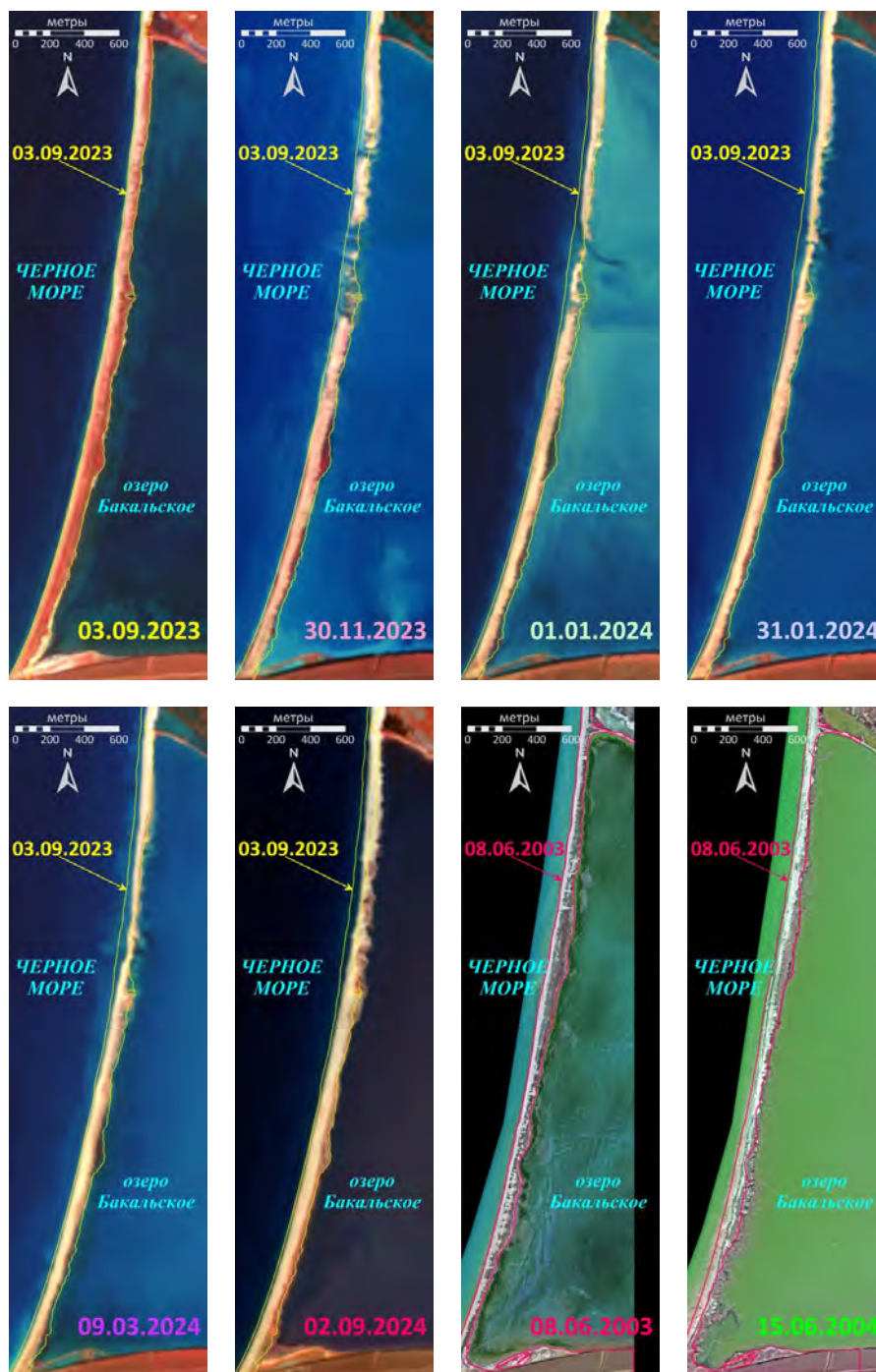
Следует отметить, что на всей протяженности западной ветви нет никаких признаков вдольберегового движения наносов во время шторма, все изменения вызваны поперечными берегу движениями воды. Вероятно, это обусловлено большой длиной волн. Фронт подходящих с открытого моря волн при контакте с дном разворачивался параллельно урезу на значительном удалении от берега и подходил к нему практически по нормали.

Трансформация западной ветви после шторма 26–27 ноября 2023 г.

В ходе шторма наибольшие изменения претерпела пересыпь оз. Бакальского. В ее северной части образовались две группы сплошных промоин протяженностью вдоль пересыпи 550 и 150 м (снимок от 30.11.2023 на рис. 9). Во время шторма поток и воды, и наносов был направлен в сторону озера. Избыток воды в озере привел к затоплению понижений внутренней части косы. После окончания шторма и снижения уровня моря через промоины начался обратный отток воды, сопровождавшийся выносом песка на берег моря. После выравнивания уровней поперечное движение воды прекратилось, создались условия для восстановления целостности пересыпи. За прошедший после шторма месяц северная группа промоин закрылась полностью (снимок от 01.01.2024 на рис. 9), а в южной остались наиболее крупные, при этом они существенно обмелели. Еще через месяц в пределах пересыпи наблюдалась лишь одна промоина (снимок от 01.31.2024 на рис. 9), в течение последующих двух месяцев также закрывшаяся (снимок от 09.03.2024 на рис. 9).

Восстановление пересыпи сопровождалось изменением положения линии как морского, так и лагунного уреза. При этом большая часть изменений конфигурации линии берега лагуны была связана с колебаниями уровня воды в озере. На морском берегу изменения конфигурации были связаны с перераспределением наносов как в продольном, так и в поперечном направлении. В отличие от пересыпи оз. Богайлы [20], где в послештормовой период наблюдалось выдвигание морского уреза в сторону моря, на западной ветви Бакальской косы после окончания шторма отступление берега продолжилось. Промоины закрывались за счет наносов с прилегающих участков берега. В результате наибольшие значения отступления берега за прошедшее после шторма время отмечены на северной части пересыпи оз. Бакальского, где во время шторма образовались промоины.

Следует отметить, что зоны образования промоин и отступления берега во время штормов не являются стационарными. На рис. 9 (снимки от 08.06.2003 и 15.06.2004) видно, что после серии штормов октября 2003 г. мощностью 25 и 34.2 кВт/м, образование промоин и отступление берега произошло на южной части пересыпи оз. Бакальского. Наиболее вероятной причиной такой неравномерности являются флуктуации в объемах и расположении запасов наносов на подводном склоне, прилегающем к Бакальской косе с запада. На присутствие запасов наносов указывают подводные валы вдоль западной ветви косы (см. рис. 2). Неравномерный характер прохождения штормов и мозаичность распределения скоплений наносов являются причиной существенных колебаний объема материала, поступающего в приурезовую зону. Анализ космических снимков показывает, что вдоль западной ветви косы периодически формируются «плюмы» из наносов, постепенно смещающиеся вдоль берега



Р и с . 9. Трансформация пересыпи оз. Бакальского после шторма 26–27 ноября 2023 г. Для сравнения приведены иллюстрации трансформации пересыпи в 2003–2004 гг.

Fig. 9. Transformation of the barrier beach of Lake Bakalskoe after the storm on 26–27 November 2023. For comparison, illustrations of the transformation of the barrier beach in 2003–2004 are given

от основания косы к дистали, что вызывает существенное изменение рельефа подводного склона, конфигурации береговой линии, ширины и профиля пляжа. Именно эта особенность способствует изменению положения формирующихся при штормах промоин.

Еще одним последствием шторма было уничтожение растительности в пределах всего берегового вала. К осени 2024 г. растительность в пределах берегового вала еще не восстановилась, что хорошо видно при сравнении снимков от 03.09.2023 и 02.09.2024 (рис. 9).

Заключение

По волновым параметрам и общей мощности шторм 26–27 ноября 2023 г. для Западного Крыма является экстремальным в масштабе нескольких десятилетий. Однако в районе расположенной в Каркинитском заливе Бакальской косы рассматриваемый шторм является чрезвычайно сильным, но не уникальным, а по мощности и другим параметрам волнения сравним со штормом 11 ноября 2007 г. По масштабу и характеру изменений конфигурации берега, рельефа берегового вала (бара) западной ветви Бакальской косы можно сделать аналогичный вывод. Скорее всего, эти два шторма определяют пределы возможного максимального развития ветрового волнения для рассматриваемой акватории, а различия в характере и масштабе трансформации аккумулятивного тела определяются локальными во времени и пространстве условиями, прежде всего рельефом подводного склона и пляжа на момент формирования шторма.

Основой рельефа надводной части западной ветви Бакальской косы является пляж полного профиля, в пределах которого выделяются основные зоны, прослеживающиеся почти по всей длине косы. Во время шторма 26–27 ноября 2023 г. воздействие волн с перехлестом гребня пляжа наблюдалось на всей протяженности берегового вала западной ветви косы. Все зоны были подвергнуты значительной трансформации. Ширина берегового вала существенно увеличилась вследствие его смещения на внутреннюю часть косы на расстояние, превысившее величину отступления морского уреза. Поверхность вала была выровнена, а растительность на ней либо уничтожена, либо погребена под слоем песка. На пересыпи оз. Бакальского образовывались многочисленные промоины, по которым наносы перемещались с морского берега на берег озера.

В целом последствия шторма 26–27 ноября 2023 гг. для западной ветви Бакальской косы являются масштабными, но не критичными. Как видно по динамике пересыпи в последующее после шторма время, прослеживаются процессы самовосстановления, подтверждающие, что литодинамическая система не была выведена из состояния динамического равновесия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д. Бакальская коса – уникальный природный объект Крымского полуострова (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 5–14. EDN MJALWP. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-5-14>
2. Зенкович В. П. Бакальская коса // Сборник трудов Института океанологии АН СССР. 1955. № 4. С. 86–101.

3. Современное состояние и эволюция Бакальской косы / В. А. Иванов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 8–15. EDN VUYYSR.
4. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Исследование гранулометрического состава пляжевых и донных отложений Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 40–49. EDN VPUHVD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-40-49>
5. Горячкин Ю. Н., Харитонова Л. В. Динамика береговой линии в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 22–30. EDN YSAXTV. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-22-30>
6. Руднев В. И. Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 15–21. EDN YSAXTN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-15-21>
7. Косьян А. Р. Роль прибрежных моллюсков в формировании карбонатных осадков Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 81–91. EDN YSAXVZ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-81-91>
8. Белокопытов В. Н., Фомин В. В., Ингеров А. В. О комплексных исследованиях опасных природных явлений в Азово-Черноморском бассейне // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 3. С. 32–48. EDN UTZIKM. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-3-32-48>
9. Дивинский Б. В., Кубряков А. А., Косьян Р. Д. Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 367–382. EDN QVBMH. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-367-382>
10. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979–2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 24–33. EDN VUYRTL.
11. Гиппиус Ф. Н., Архипкин В. С. Многолетняя изменчивость штормового волнения на Черном море по результатам моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 1. С. 38–47. EDN YHPLRF.
12. Горячкин Ю. Н., Иванов В. А. Новый остров в Черном море? // Доповіді НАН України. 2013. № 8. С. 100–104.
13. Руднев В. И., Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Изменения топографии прибрежной зоны Бакальской косы с 2018 по 2019 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 22–35. EDN ROPFJN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-1-22-35>
14. Косьян Р. Д., Крыленко В. В. Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. Москва : Научный мир, 2014. 256 с.
15. Леонтьев И. О. Оценка опасности штормовых размывов песчаного берега // Океанология. 2021. Т. 61, № 2. С. 286–294. EDN SBIYMT. <https://doi.org/10.31857/S0030157421020118>
16. Леонтьев И. О., Рябчук Д. В., Сергеев А. Ю. Моделирование штормовых деформаций песчаного берега (на примере восточной части Финского залива) // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 147–158. EDN TGWBPL. <https://doi.org/10.7868/S0030157414060069>

17. Modelling morphological changes of beach and dune induced by storm on the Southern Baltic coast using XBeach (case study: Dziwnow Spit) / N. Bugajny [et al.] // Journal of Coastal Research. 2013. Vol. 65, sp. iss. 1. P. 672–677. <https://doi.org/10.2112/SI65-114.1>
18. Экстремальный черноморский шторм в ноябре 2023 года / В. А. Дулов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 2. С. 325–347. EDN ESLTYQ.
19. Климатические угрозы на северо-западе Черноморского побережья Кавказа: современные тренды / А. Ю. Богданович [и др.] // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 4. С. 44–70. EDN UDUAVQ. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-4-44-70>
20. Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма / В. В. Крыленко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 59–78. EDN HQBWYY.
21. Крыленко В. В., Руднев В. И. Методика аэрофотосъемки Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 59–64. EDN YSAXVB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-59-64>
22. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Особенности выполнения высокоточной съемки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6, № 2. С. 10–19. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
23. Divinsky B., Kosyan R. Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // Continental Shelf Research. 2017. Vol. 136. P. 1–19. <https://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
24. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
25. Дивинский Б. В. Гидродинамические условия вод в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 31–39. EDN YSAXUD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-31-39>
26. Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н. Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69. EDN YKTSVR.
27. Фомин В. В., Алексеев Д. В., Харитонов Л. В. Моделирование морфодинамики Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 374–380. EDN VBFSGN.
28. Фомин В. В., Лазоренко Д. И. Особенности гидродинамических процессов в районе Бакальской косы по данным численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 3. С. 31–47. EDN OIZZAE. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-3-31-47>
29. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Исследование подводного рельефа Бакальской банки по данным космических снимков SENTINEL-2 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 30–39. EDN VYVTKL. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-30-39>
30. Divinsky B. V., Saprykina Ya. V. Extreme wind waves on the northeastern shelf of the Black Sea // Doklady Earth Sciences. 2024. Vol. 517, iss. 1. P. 1224–1233. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601676>

Поступила 18.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.10.2024 г.;
принята к публикации 17.12.2024 г.; опубликована 31.03.2025 г.

Об авторах:

Крыленко Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4096-8377, ORCID ID: 0000-0001-8898-8479, ResearcherID: N-1754-2017, krylenko.slava@gmail.com**

Горячкин Юрий Николаевич, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **SPIN-код: 6419-5267, ORCID ID: 0000-0002-2807-201X, ResearcherID: I-3062-2015, yngor@mhi-ras.ru**

Крыленко Марина Владимировна, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 4376-3410, ORCID ID 0000-0003-4407-0548, ResearcherID: R-2210-2016, krylenko@mail.ru**

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 2027-8359, ORCID ID: 0000-0002-2452-1922, ResearcherID: C-7262-2014, divin@ocean.ru**

Заявленный вклад авторов:

Крыленко Вячеслав Владимирович – постановка проблемы, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи и графических материалов

Горячкин Юрий Николаевич – постановка проблемы, обработка и анализ литературных источников, натурные исследования, подготовка текста статьи

Крыленко Марина Владимировна – обработка и анализ результатов натурных исследований, подготовка текста статьи и списка литературы

Дивинский Борис Васильевич – математическое моделирование гидродинамических процессов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.