

Трансформация пересыпи озера Богайлы (Западный Крым) под воздействием экстремального шторма

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 Азово-Черноморского бассейна являются ключевым элементом береговых абразионно-аккумулятивных геосистем и ценным хозяйственным ресурсом. Мониторинг динамики аккумулятивных форм региона является необходимой составляющей успешного управления береговой зоной и своевременного принятия мер по защите берегов. Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации пересыпи оз. Богайлы под действием штормов, в частности экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. Используются материалы многолетних мониторинговых наблюдений, спутниковые снимки, результаты математического моделирования гидрологических процессов, литературные и архивные источники. Установлено, что в последние 60 лет наблюдались значительные изменения конфигурации и рельефа изучаемой аккумулятивной формы. Отмечены периоды, когда морфологические и динамические особенности аккумулятивной формы не претерпевали принципиальных изменений, и периоды ее значительной трансформации. В частности, во время шторма 26–27 ноября 2023 г. конфигурация и рельеф пересыпи оз. Богайлы были значительно изменены. Выявлены характерные черты динамики аккумулятивной формы в ходе шторма. Произошло смещение аккумулятивного тела в акваторию озера, величина этого смещения существенно превысила величину отступления прилегающих коренных берегов. Преобразована существовавшая несколько десятилетий продольная и поперечная структура в пределах пересыпи. Сделан вывод, что экстремальные по тем или иным характеристикам штормы играют определяющую роль в изменчивости береговых аккумулятивных форм региона.

Ключевые слова: Черное море, полуостров Крым, береговая геосистема, пересыпь, аккумулятивные формы, экстремальный шторм, береговой рельеф, береговая линия

© Крыленко В. В., Горячкин Ю. Н., Крыленко М. В., Дивинский Б. В., 2024



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

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

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий FMWE-2024-0027 и FNNN-2024-0016.

Для цитирования: 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.

Transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach (Western Crimea) under the Influence of an Extreme Storm

V. V. Krylenko^{1*}, **Yu. N. Goryachkin**², **M. V. Krylenko**¹, **B. V. Divinsky**¹

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 Azov-Black Sea basin are a key element of coastal abrasion-accumulative geosystems and a valuable commercial resource. Monitoring of the accumulative forms dynamics in the region is a necessary component for successful management of the coastal zone and timely adoption of measures for coastal protection. The purpose of the work is to determine the qualitative and quantitative characteristics of the transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach influenced by storms, in particular the extreme storm of November 26–27, 2023. The work uses materials from long-term monitoring observations, satellite images, simulation results of hydrological and lithodynamic processes, literary and archival sources. It was established that in the last 60 years the configuration and topography of the studied accumulative form have changed significantly. Periods were noted when the morphological and dynamic features of the accumulative form did not undergo fundamental changes as well as periods of their significant transformation. In particular, during the storm on November 26–27, 2023, the configuration and topography of the Lake Bogaily Barrier Beach was completely redesigned. The paper reveals characteristic features of the accumulative form dynamics during the storm. The accumulative body was displaced into the water area of the lake. The magnitude of this displacement significantly exceeded that of the retreat of the adjacent bedrock shores. The longitudinal and transverse structure within the barrier beach that existed for several decades has been completely transformed. It is concluded that any extreme storms play a decisive role in the variability of coastal accumulative forms in the region.

Keywords: Black Sea, Crimean Peninsula, coastal geosystem, barrier beach, accumulative form, extreme storm, coastal relief, coastline

Acknowledgments: The work was carried out under state assignments no. FMWE-2024-0027 and FNNN-2024-0016.

For citation: Krylenko, V.V., Goryachkin, Yu.N., Krylenko, M.V., and Divinsky, B.V., 2024. Transformation of the Lake Bogaily Barrier Beach (Western Crimea) under the Influence of an Extreme Storm. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 59–78.

Введение

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН и Морской гидрофизический институт РАН в течение последних десятилетий ведут исследования динамики Азово-Черноморских берегов. Особое внимание уделяется изучению процессов формирования и трансформации береговых аккумулятивных форм – кос и пересыпей [1–3].

Совместные негативные антропогенные и природные, в частности штормовые, воздействия приводят к трансформации береговых аккумулятивных форм, в некоторых случаях – к их деградации [1]. В работе [4] указывается, что трансформации песчаных пляжей, определяющиеся как сезонные, могут происходить за отдельный шторм. В работе [5] была предложена усовершенствованная версия модели штормовых деформаций *CROSS-P* с учетом эффекта перелива через авантону при штормовых нагонах. Результаты моделирования показали, что при переливе через авантону часть наносов перебрасывается на тыловой склон и дюнный пояс постепенно продвигается вглубь суши, одновременно уменьшаясь по высоте. О возникновении переноса материала в тыльную часть пересыпи и возможности ее смещения в сторону лагуны в результате воздействия экстремального шторма также говорится в работе [6]. В [7] было показано, что модель *XBeach* разумно моделирует морфологические изменения, такие как эрозия дюн и пляжей, вызванная штормом. В работе [8] с использованием математической модели *XBeach* для района оз. Богайлы показано, что под воздействием штормового волнения происходит интенсивный размыв пляжа и активное переформирование профиля верхней части подводного берегового склона. Получены количественные оценки скорости отступления уреза воды и величин деформации рельефа дна для разного времени воздействия волн.

Экстремальное штормовое волнение оказывает, как правило, сильнейшее влияние на перераспределение материала в береговой зоне. Известны случаи [9], когда объемы поперечных к береговой линии потоков достигали $200 \text{ м}^3/\text{м}$, приводя к значительным изменениям рельефа аккумулятивной формы. Вместе с тем, как показывают недавние исследования [10, 11], экстремальные штормы могут способствовать перераспределению наносов и в некоторых случаях приводить к стабилизации береговой линии. Представленные в перечисленных работах результаты показывают комплексный и не всегда предсказуемый характер штормового воздействия на аккумулятивные формы.

События экстремальных штормов достаточно редки, а научные наблюдения за трансформацией морских береговых аккумулятивных форм Азово-Черноморского региона в результате прохождения штормов носят единичный характер. В пределах берегов Крымского п-ова такие целенаправленные наблюдения не проводились. При этом в последнее время наблюдается тенденция к увеличению частоты и интенсивности штормового волнения в Азово-Черноморском бассейне [12, 13].

В ноябре 2023 г. акватория Черного моря оказалась под действием серии глубоких средиземноморских циклонов. Над большей частью акватории наблюдались ветры, скорость которых достигала 40 м/с . Сформировалось штормовое волнение, многие параметры которого 26–27 ноября 2023 г. достигли или превысили наблюдавшиеся ранее в регионе, что позволяет отнести его к категории экстремальных природных явлений [14].

Представляется актуальным рассмотреть воздействие экстремального шторма на пересыпь оз. Богайлы в контексте развития данной аккумулятивной формы на протяжении предшествующих 60 лет. Цель работы – определение качественных и количественных характеристик трансформации пересыпи оз. Богайлы под действием экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г.

Материалы и методы исследования

Для изучаемого региона (рис. 1) первыми доступными материалами дистанционного зондирования являются космические снимки 1960–1980-х гг.¹⁾. Для анализа динамики берегов использовали спутниковые снимки разных лет из открытых источников (*Google Earth*, Яндекс, *Bing* и т. п.). Для оперативной оценки вызванных штормом 26–27 ноября 2023 изменений были использованы данные съемки с космических аппаратов *Sentinel-2* Европейского космического агентства^{2), 3)}. Чтобы добиться точной пространственной привязки, была проведена геометрическая коррекция спутниковых данных. При геометрической коррекции снимков применялся полиномиальный метод 9+ *GCP* (*Ground Control Points*). Для повышения точности количество точек было существенно увеличено (чаще всего использовалось более 20 *GCP*), а сами они были распределены равномерно по площади корректируемого снимка [15]. Для каждого снимка после корректировки производилась оценка точности снятия векторной информации по расположенным вблизи изучаемого участка берега контрольным линейным объектам (уличной сети, взлетно-посадочной полосы аэродромов). По разновременным снимкам, представленным на данных ресурсах, выполнена оцифровка линии уреза моря и (при возможности) лагуны, бровки клифа. С учетом крутого морского склона пляжа, максимально возможного подъема уровня моря на пике шторма около 0.4 м, а также низкой интенсивности сгонно-нагонных явлений изменение планового положения линии уреза в результате колебаний уровня моря существенно ниже точности измерений. В результате проведенной работы получена информация о динамике уреза и других морфологических элементов изучаемых природных объектов в разные периоды.

Для детального изучения рельефа и его динамики потребовалось создание цифровых моделей рельефа. При выполнении этой задачи были использованы материалы аэрофотосъемок, выполнявшихся с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Производилась как плановая, так и панорамная съемка (для участков с клифами) [16–18]. С применением технологии фотограмметрической обработки снимков построены высокоточные цифровые модели рельефа (ЦМР) и ортофотопланы. Было использовано программное обеспечение *Agisoft Metashape*, позволяющее создавать высококачественные 3D-модели объектов и ортофотопланы на основе цифровых фотографий.

¹⁾ U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS). URL: <http://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения: 30.08.2042)

²⁾ MultiSpectral Instrument (MSI). URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (дата обращения: 30.08.2024)

³⁾ The operational Copernicus optical high resolution land mission. URL: http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (дата обращения: 30.08.2024)

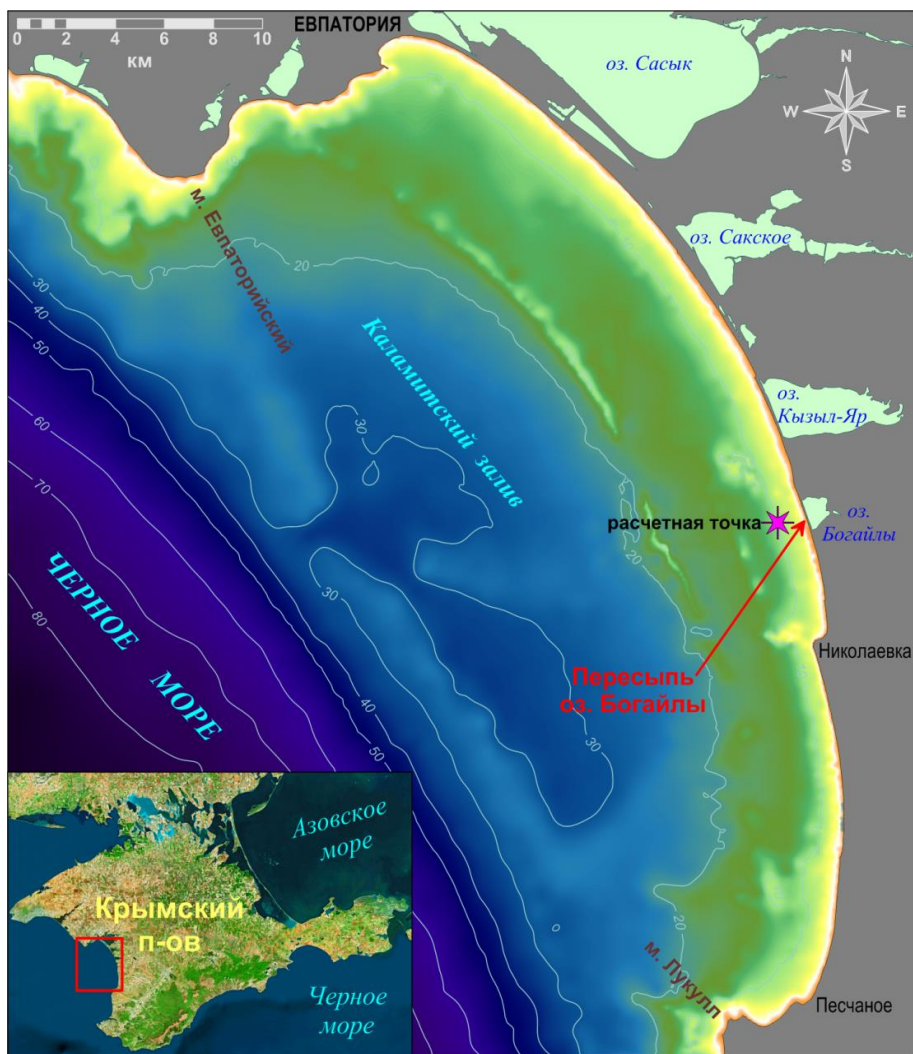


Рис. 1. Карта-схема Каламитского залива Черного моря (данные по подводному рельефу приведены с использованием материалов *SonarChart*TM (URL: <https://webapp.navionics.com>)). Расчетная точка – точка, для которой производились расчеты основных параметров волнения

Fig. 1. Map-chart of the Kalamitsky Gulf in the Black Sea (data on underwater topography are given using *SonarChart*TM materials (<https://webapp.navionics.com>)). The calculation point is the point for which the main wave parameters were calculated

Для классификации облаков точек фотограмметрической обработки использовался модуль *TerraScan Bentley MicroStation*⁴⁾. В результате обработки цифровых снимков, полученных с БПЛА, были построены ортофотопланы с разрешением 0.05 м и ЦМР с шагом сетки 0.15×0.15 м. Данные материалы использовались при анализе структуры рельефа пересыпи.

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

Расчеты климатических характеристик ветрового волнения на Черном море [19] выполнены с помощью современной спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*⁵⁾. Полное описание модели, а также вопросы верификации и настройки модели изложены в работе [19]. По результатам расчетов сформирован массив пространственных полей параметров поверхностного волнения, с дискретностью в 1 ч покрывающих всю акваторию моря за период с января 1979 г. по декабрь 2023 г.

Общая характеристика пересыпи оз. Богайлы

Озеро Богайлы расположено в центральной части Каламитского залива (рис. 1) и является лиманом, образовавшимся в устьевой части сходящихся балок Сухая и Богайлы. Площадь зеркала озера около 0.95 км², глубина озера вблизи пересыпи большую часть года не превышает 20–40 см. Длина пересыпи озера 1.4 км, ширина 40–70 м. Питание аккумулятивной формы наносами осуществляется за счет продуктов разрушения прилегающих с двух сторон абразионных берегов. Они представлены клифами высотой до 8–10 м, сложенными глинами с прослоями песчаников, гравелитов и конгломератов древнеаллювиального происхождения. Строение клифов подробно приведено нами в работе [2]. Миграция материала, как правило, происходит в узкой приурезовой полосе, образование подводных валов не отмечено. На морском подводном склоне пересыпи на глубине 1–1.5 м преобладает смесь песка мелкой и средней зернистости с мелким гравием; глубже 2.5 м преобладают алевриты. В диапазоне глубин от 2 до 4 м в пробах отсутствуют частицы размером более 0.25 мм. Таким образом, зона миграций пляжеобразующих наносов в районе пересыпи оз. Богайлы ограничивается изобатами 2–2.5 м, глубже накапливаются мелкозернистые илистые фракции [20].

Пересыпь является частью Каламитской литодинамической системы I порядка [21], простирающейся между мысами Лукулл и Евпаторийским (рис. 1). Результирующий вдольбереговой поток наносов направлен на север вплоть до Евпаторийской бухты [22]. Однако на отдельных участках направление и интенсивность вдольберегового потока наносов характеризуется значительной сезонной и межгодовой изменчивостью [23].

⁴⁾ Sentinel Online technical website. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 30.08.2024)

⁵⁾ DHI Water&Environment. MIKE21/3 Coupled Model FM, 2007. 190 p.

Клиф, а вместе с ним и линия уреза на участке берега вблизи оз. Богайлы активно отступают. По спутниковым данным, между 1984 и 2016 гг. по абразионному участку к северу от пересыпи отступление клифа составило в среднем 42 м, а пересыпь отступила в сторону суши на 30–35 м. Таким образом, скорость отступления морского берега пересыпи близка к скорости отступления примыкающих к ней клифов. Скорость процесса в многолетнем режиме существенно изменяется в зависимости от частоты и силы штормов.

В многолетнем режиме преобладает волнение западно-юго-западных направлений [24]. Анализ распределения высот и периодов значительных волн за 30 лет показал [25], что наибольшие высоты волн в прилегающей акватории Черного моря в осенне-зимний период могут достигать 5.5–6 м с периодом 6.5–7 с. В апреле – сентябре среднемесячные высоты значительных волн не превышают 4 м и соответствуют минимуму ветровой активности. В районе пересыпи оз. Богайлы характерны два преобладающих направления подхода значительных волн (с северо-востока и юго-запада), что определяет реверсивный характер движения наносов вдоль берега. Математическое моделирование [24] указывает на существование двух потоков наносов, направленных навстречу друг другу с образованием у пересыпи зоны конвергенции в летний период [24]. Вероятно, двухстороннее движение наносов предопределяет высокую изменчивость береговой линии на отдельных участках, но повышает устойчивость аккумулятивного тела в целом из-за поступления наносов с прилегающих абразионных участков при любой волновой ситуации.

До шторма 26–27 ноября 2023 г. основой поперечного профиля пересыпи оз. Богайлы являлся песчано-галечный пляж полного профиля [2]. В пределах пересыпи прослеживались три продольных зоны: зона пляжа, пригребневая зона (зона дюн и растительности) и прилиманная зона. Ширина и другие морфометрические параметры указанных зон время от времени изменялись, но общая структура рельефа сохранялась на протяжении десятилетий. Так, ширина пляжа (до полосы растительности и дюн) составляла 30–40 м. Пляж вблизи уреза сложен преимущественно галькой, выше по склону – среднезернистым песком. Для изменений рельефа в пределах пляжа в обычном режиме было характерно чередование участков повышения и понижения поверхности или увеличения и уменьшения ширины пляжа вследствие миграции линии уреза. Даже небольшие штормы вызывали перестройку поперечного профиля пляжа, чаще всего в приурезовой зоне. Наиболее часто наблюдалось образование и последующее разрушение штормовых валов, террас. При сильных штормах, сопровождавшихся усилением вдольбереговых течений, на отдельных участках пересыпи отмечалось формирование уступов размыва высотой до 1 м.

Возвышенная часть пересыпи геоморфологически первоначально являлась гребнем пляжа полного профиля (1.8–1.9 м над у. м.). По мере развития растительности вдоль нее образовывались аккумулятивные эоловые формы (кучугуры). В последние десятилетия вплоть до шторма 26–27 ноября 2023 г. вдоль гребня пересыпи существовала дюнная гряда высотой до 0.5 м (2–2.5 м над у. м.), покрытая характерной для прибрежных эоловых форм травянистой растительностью. Отдельные участки дюнной гряды были разделены понижениями – промоинами, по которым при сильных штормах отмечался перехлест волнами. В эти периоды отмечалось увеличение ширины и глубины

промоины, частичное разрушение эловых форм по ее бортам, вынос материала на лагунный берег пересыпи и в озеро. Помимо штормового воздействия, прибрежная часть пересыпи подвергалась техногенному воздействию при движении автотранспорта, при этом значительно повреждался рельеф эловых форм и растительность.

В ходе наиболее сильных штормов в пределах промоин отмечался перенос волновым заплеском галечно-песчаного материала с морского берега на берег озера. Такой процесс можно считать одним из элементов в расходной части бюджета наносов для прилегающего к пересыпи оз. Богайлы участка берега. Вблизи промоин на озерном берегу пересыпи образовались конусы выноса, определившие своеобразную конфигурацию береговой линии озера в виде фестонов. Активного перераспределения поступившего материала вдоль уреза озера не наблюдалось, что объясняется недостаточной интенсивностью волнения. Прилиманное понижение, за исключением конусов, было покрыто околородной галофитной травянистой растительностью, в засушливые годы осваивающей прилегающую к пересыпи часть осохшего дна озера. Вдоль уреза озера наблюдалось формирование вала из остатков растительности и мусора. До 1970-х гг. оз. Богайлы было соленым, оно периодически пересыхало. Позднее в озеро начали поступать сбросовые воды из птицефабрики, озеро распреснилось и стало круглогодично полноводным. В южной части ранее существовал трубопровод для сброса пресной воды и канализации, в настоящее время он разрушен. После сокращения объемов сброса в засушливые годы озеро вновь полностью высыхает летом.

Динамика береговой линии и рельефа пересыпи оз. Богайлы

Имеющиеся архивные картографические материалы и спутниковые снимки позволяют выделить несколько характерных периодов в развитии аккумулятивного тела пересыпи оз. Богайлы.

На некоторых картах XIX в. озеро показано как морской залив, в котором по линии современной пересыпи расположен о. Кичик-Бель. В этот период сплошной пересыпи, по-видимому, еще не существовало, озеро соединялось с морем проливом (проливами) переменной ширины.

На космических снимках 19.07.1963 и 19.09.1968 в южной части пересыпи заметна промоина между озером и морем, но ее местоположение меняется. Возможно, ее происхождение имеет антропогенный характер.

Анализ космических снимков позволяет сделать уверенный вывод, что в 1963–1968 гг. (как минимум) структура надводного тела пересыпи была совершенно иной, чем позднее. На снимках 19.07.1963 и 19.09.1968 видно (рис. 2), что береговые линии со стороны моря и озера прямолинейны и почти параллельны, а на пересыпи средней шириной 80 м отсутствуют выраженные поперечные гидрогенные формы, кроме крупной промоины в южной части. Вдоль пересыпи в структуре береговых валов и растительности заметны продольные зоны.

Совершенно иная картина видна на снимке 21.06.1975. Ширина пересыпи от 60 м на севере до 40 м на юге, что связано с высоким стоянием уровня в озере. Морской урез сохранил прямолинейность, линия уреза на озере приобрела извилистость, особенно в южной части. В продольной структуре

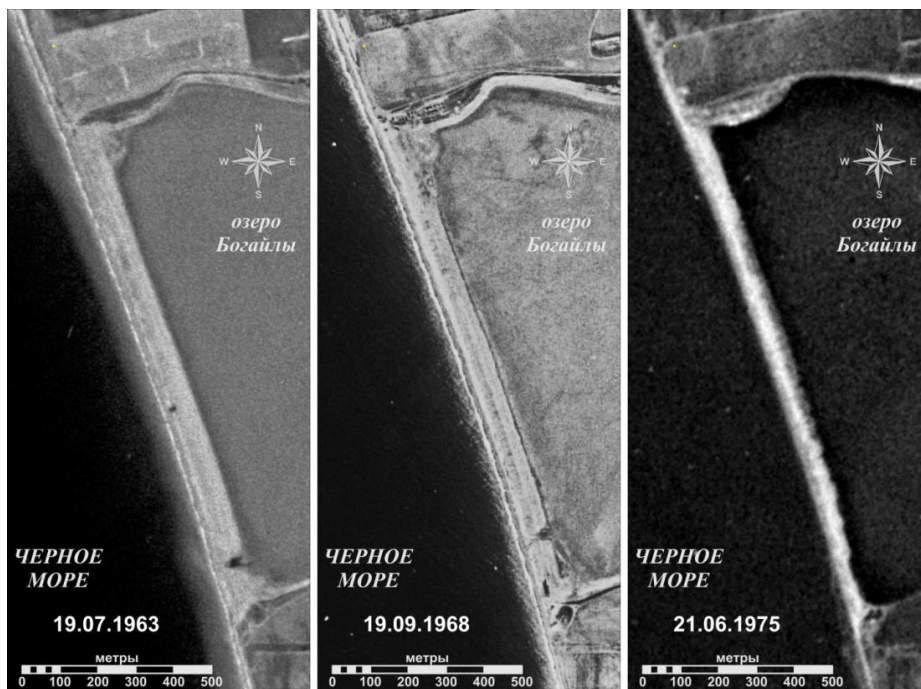
прослеживается извилистый гребень берегового вала без признаков растительности, что указывает на произошедшее воздействие штормового заплеска по всей поверхности пересыпи. Наиболее вероятной причиной таких изменений являются штормы экстремальной силы, отмеченные в течение 1969 г. [26–28].

Снимок 31.07.1984 (рис. 3) показывает, что на пересыпи восстановилась структура в виде полосы пляжа, гряды дюн с развитой на лагунном склоне растительностью и полосы осушки с околководной растительностью вдоль берега озера. Ширина пересыпи варьирует от 40 м в южной части до 60 м в северной, линия морского уреза почти прямолинейна, на линии уреза озера есть несколько плавных изгибов в южной части. Хорошо видны пересекающие полосы дюн и растительности тропы, но нет никаких признаков крупных поперечных промоин, как и признаков формирования конусов выноса на берегу озера. К сожалению, детальных снимков периода 1984–2005 гг. обнаружить не удалось. Таким образом, сложно сказать, какое воздействие оказал на пересыпь оз. Богайлы экстремальный шторм 15.11.1992.

На снимке 2005 г. конфигурация пересыпи (рис. 3) в целом близка к ее конфигурации в 1975 г. – выровненная линия уреза моря и извилистая – озера. На 2/3 северной части пересыпи ширина ее составляет около 50 м, далее идет расширение до 60 м, примерно в 100 м от южной границы пересыпи идет резкое сужение до 30 м. В продольной структуре хорошо заметна полоса пляжа, дюн и прилиманной растительности, ширина этих зон вдоль пересыпи меняется без резких скачков. На снимке 08.05.2005 хорошо заметны и разделяющие полосу растительности поперечные промоины, наиболее крупным из которых на лагунном берегу соответствуют конусы выноса. На снимке 31.10.2009 (рис. 3) общая конфигурация морского и лиманного берегов принципиально не изменилась в сравнении с 08.05.2005, но конусы выноса заметны гораздо лучше и имеются у большинства промоин. Таким образом, можно сделать вывод, что экстремальный шторм ноября 2007 г. не оказал на морфологическую структуру пересыпи оз. Богайлы существенного влияния, его воздействие ограничилось расширением промоин и конусов выноса. Как видно на рис. 4, описанная выше структура в общих чертах сохранялась вплоть до шторма ноября 2023 г.

Следует отметить значительные вариации в среднемноголетней скорости отступления уреза моря. На рис. 5 видно, что в 1963–1984 гг. берег отступил незначительно – от 5 м в центральной части пересыпи до 15 м на участках примыкания к коренному берегу. Значительно сильнее отступил берег в 1984–2005 гг. (рис. 5). Вдоль пересыпи и к северу от нее отступление составляет 25–30 м, вдоль клифа южнее пересыпи – около 20 м. Следует отметить влияние поперечной конструкции (железобетонного эллинга) в месте примыкания северной части пересыпи к клифу. Хорошо видно заполнение входящего угла севернее и низовой размыв южнее конструкции. Влияние этого сооружения прослеживается и позднее, даже после его частичного разрушения. Характерно, что отмечены периоды, когда расположение входящего угла и зоны низового размыва менялось на противоположное.

С учетом особенностей распределения и состава наносов на подводном склоне вдоль пересыпи оз. Богайлы и прилегающих абразионных коренных берегов [20], а также анализа данных дистанционного зондирования можно



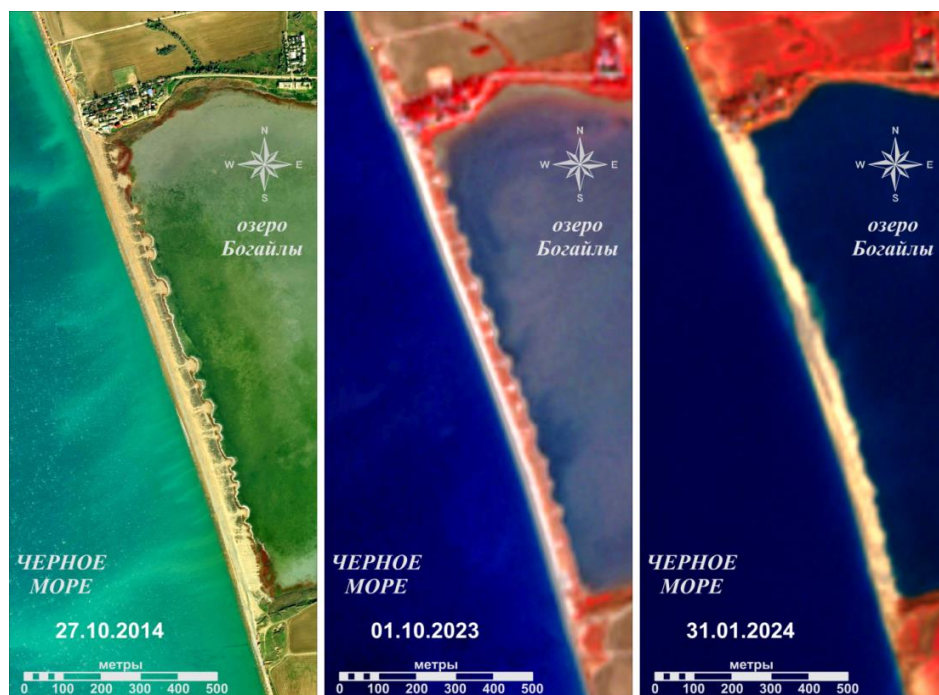
Р и с . 2 . Развитие пересыпи оз. Богайлы в 1963–1975 гг.

F i g . 2 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 1963–1975



Р и с . 3 . Развитие пересыпи оз. Богайлы в 1984–2009 гг.

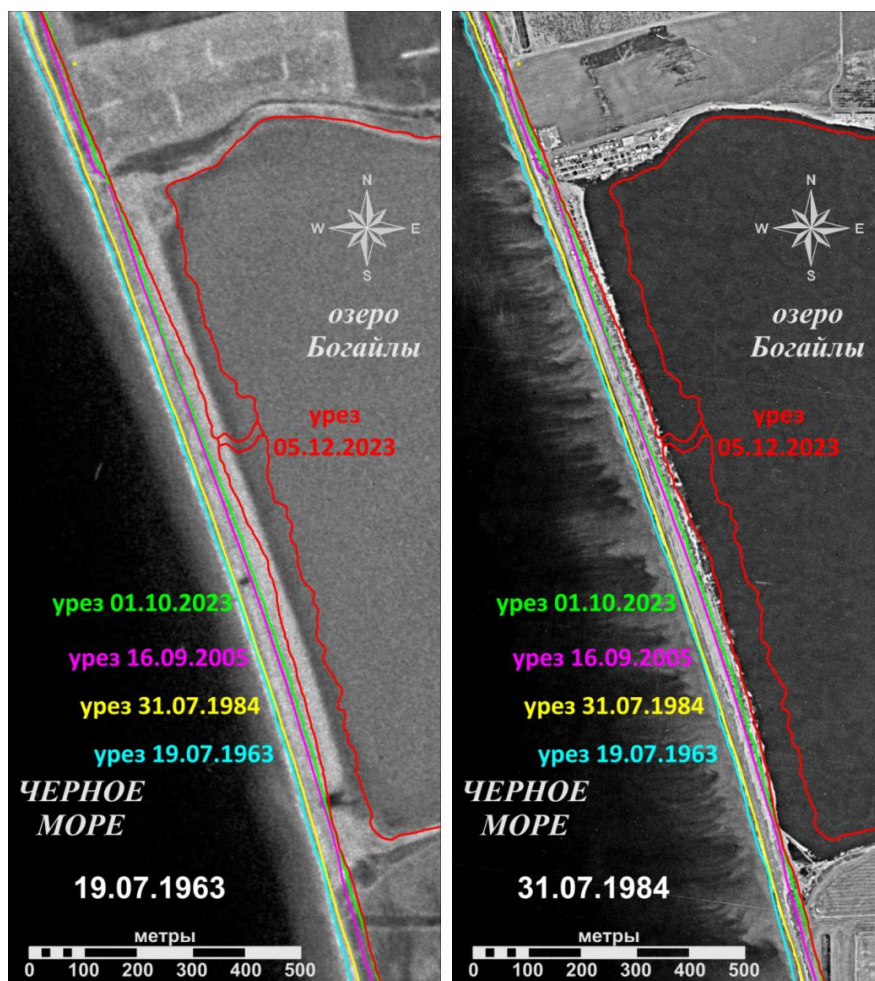
F i g . 3 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 1984–2009



Р и с . 4 . Развитие пересыпи оз. Богайлы в 2014–2024 гг.

F i g . 4 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 2014–2024

сделать вывод, что реальная мощность вдольберегового потока наносов сравнительно невелика. Здесь уместно отметить, что начиная с 1960-х гг. поток наносов в системе уменьшался, что было вызвано зарегулированием рек, блокированием клифов берегозащитными сооружениями, строительством поперечных сооружений и другими факторами. В настоящее время южной границей литодинамической системы, в которую входит пересыпь оз. Богайлы, можно считать безымянный мыс в южной части пгт Николаевка с системой из двух бун, а северной границей – поперечное сооружение водозабора на оз. Кызыл-Яр. Отсутствие в пределах литодинамической системы мощных запасов наносов, мобилизуемых при штормах того или иного направления со значительной вдольбереговой составляющей, способствует отсутствию существенных колебаний в объеме поступающего на пересыпь материала. Этим определяется относительная выравненность морского края пересыпи, единообразие поперечного профиля вдоль всей ее протяженности. Отсутствие изгибов в линии берега и подводного склона способствует равномерному распределению энергии волн и повышает общую устойчивость надводной части аккумулятивной формы. Вероятно, именно этим обстоятельством определяется постоянство положения и конфигурации промоин и связанных с ними конусов выноса на лагунном берегу в течение нескольких десятков лет. В последние десятилетия значительное повреждение волнами растительности вдоль морского склона дюн и на бортах стационарных промоин отмечалось редко.



Р и с . 5. Развитие пересыпи оз. Богайлы с 1963 по 2023 гг.

Fig. 5. Development of the Lake Bogaily Barrier Beach in 1963–2023

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 4500 м от берега на изобате 10 м (см. 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. Несколько упрощая, энергетический период – это период монохроматической волны с мощностью, эквивалентной мощности данного нерегулярного волнения. Мощность волнения выражается в киловаттах на метр волнового фронта.

На рис. 6 приведены максимальные высоты волн и мощности в отдельных штормах за последние 45 лет в районе пересыпи оз. Богайлы. Выбирались штормы, значительные высоты волн в которых превышали 2.5 м. Естественно, выбор порогового уровня всегда дискуссионен. В нашем случае он определяется простой практической задачей из многочисленных штормов выделить наиболее сильные, развивавшиеся в конкретный год. Как видно из рис. 6, шторм 2023 г. за последние 45 лет по своей энергии является самым мощным, причем высоты волн в нем несколько уступали значениям, зафиксированным, например, в 1981, 1988, 1999 и 2003 гг.

На рис. 7 представлены ряды значительных высот волн, периодов, мощностей, а также направлений волнения у пересыпи оз. Богайлы за ноябрь 2023 г. Из него видно, что почти весь месяц пересыпь оз. Богайлы находилась под воздействием развитого волнения. Наблюдалось три шторма с мощностями, превышающими 30 кВт/м, включая экстремальный шторм 26–27 ноября. Как следует из рис. 6, *b*, этот шторм по мощности (109 кВт/м) для пересыпи оз. Богайлы является самым сильным за последние 45 лет. До этого самым сильным был шторм 2000 г. (82 кВт/м). В момент наибольшего развития шторма 26.11.2023 г. на изобате 10 м у пересыпи оз. Богайлы параметры волнения составили: значительная высота волн – 3.4 м, период – 12.8 с, длина – 160 м. Высота волнового нагона во время шторма составляла 0.21–0.54 м.

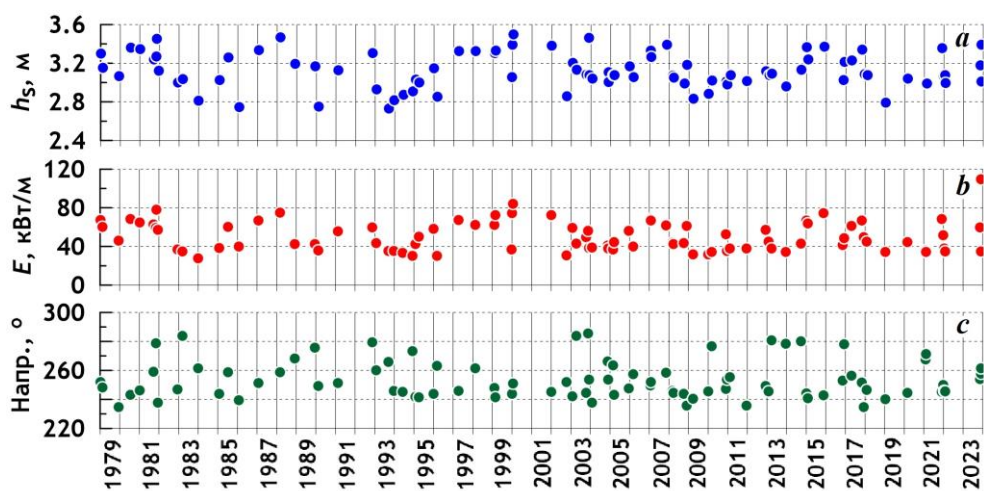
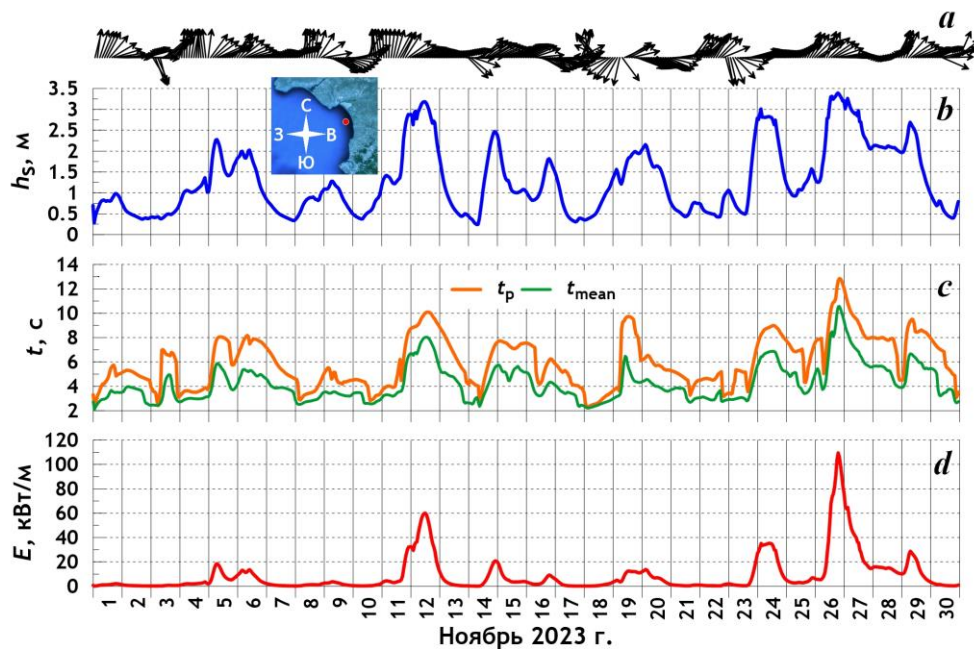


Рис. 6. Параметры наибольших штормов вблизи пересыпи оз. Богайлы: *a* – максимальные значительные высоты волн; *b* – максимальные мощности волнения; *c* – генеральные направления штормов

Fig. 6. Parameters of the largest storms near the Lake Bogaily Barrier Beach: *a* – maximum significant wave heights; *b* – maximum wave power; *c* – general directions of storms



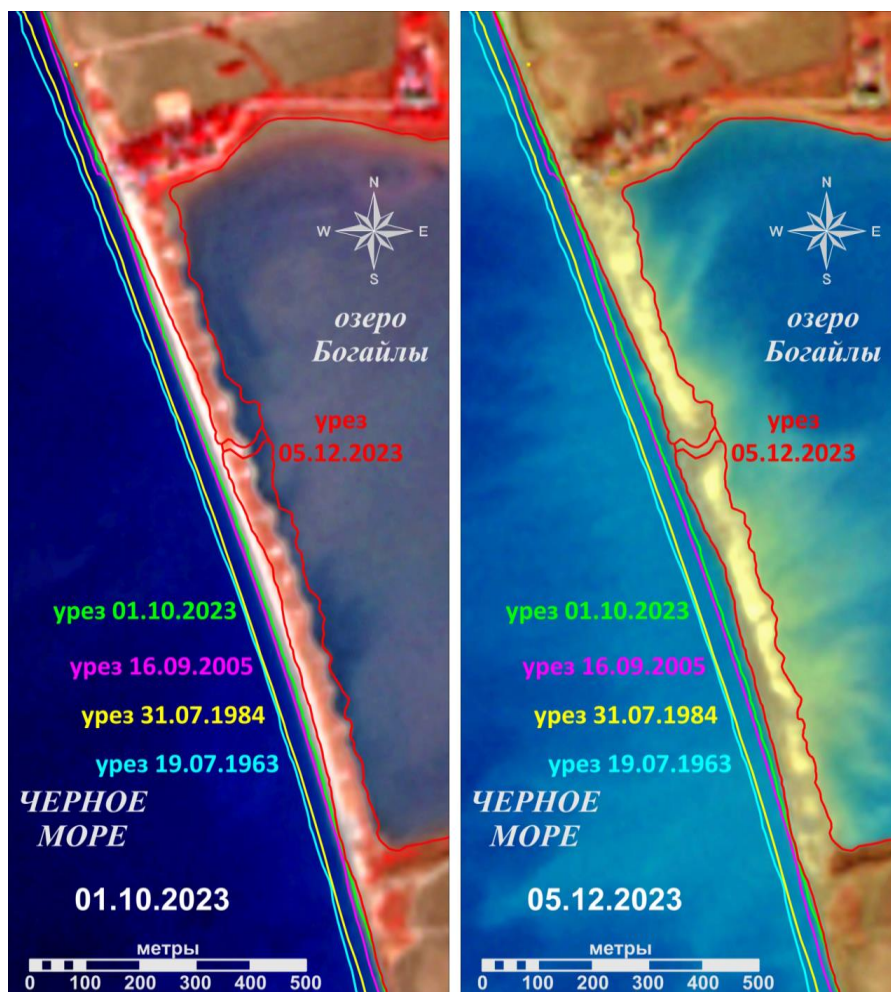
Р и с . 7. Основные параметры ветрового волнения вблизи пересыпи оз. Богайлы: *a* – направления распространения; *b* – значительные высоты волн; *c* – периоды пика спектра и средние периоды волн; *d* – мощности волнения

Fig. 7. The main parameters of wind waves near the Lake Bogaily Barrier Beach: *a* – propagation directions; *b* – significant wave heights; *c* – peak and mean wave periods; *d* – wave power

Перестройка рельефа пересыпи в ходе шторма 26–27.11.2023 г.

Совершенно очевидно, что по масштабу и характеру изменений конфигурации и рельефа пересыпи оз. Богайлы шторм 26–27 ноября 2023 г. является экстремальным в масштабе нескольких десятилетий. Прямое воздействие волн с перехлестом гребня пляжа наблюдалось по всей протяженности пересыпи. В результате переноса материала с морского на лагунный берег пересыпи линия морского уреза сместилась к востоку (рис. 8). Отступление морского берега пересыпи вблизи примыкания к клифам коренного берега составило 5–10 м, что близко к величине отступления клифа вследствие шторма. В центральной части пересыпи величина отступления возрастает до 20 м, а в районе образовавшегося гирла и чуть севернее величина отступления превышает 30 м даже с учетом последующего выравнивания берега. Масштаб отступления можно оценить при сравнении с величиной отступления берега пересыпи за 60 лет (с 1963 по 2023 г.), составляющей 40–45 м (рис. 5, 8).

Следует отметить, что нет никаких признаков вдольберегового движения наносов во время шторма, все изменения вызваны поперечными берегу движениями воды. Вероятно, это является следствием большой длины подходящих



Р и с . 8 . Развитие пересыпи оз. Богайлы с 1963 г. и в ходе шторма в ноябре 2023 г.: *слева* – пересыпь накануне шторма; *справа* – после него

F i g . 8 . Development of the Lake Bogaily Barrier Beach since 1963 and during the storm in November 2023. *Left* – the barrier beach before the storm, *right* – that after the storm

с открытого моря волн, фронт которых при контакте с дном, происходившем на значительном удалении от берега, разворачивался параллельно урезу. Возможно, этим же обстоятельством вызвано значительное повышение уровня моря во время шторма.

Штормовой заплеск охватил даже самые высокие участки пересыпи и разрушил ранее существовавшие формы рельефа. Воздействием штормового заплеска полностью разрушена существовавшая несколько десятилетий характерная продольная структура, включавшая полосы дюн и растительности (рис. 9). По сути произошло преобразование прежней упорядоченной продольной и поперечной структуры, формировавшейся и сохранявшейся



Р и с . 9 . Вид пересыпи оз. Богайлы с южной стороны (2021 г.)

F i g . 9 . View of the Lake Bogaily Barrier Beach from the south side (2021)

десятилетиями, в пляж полного профиля с крутым морским и пологим лагунным склонами. Подобный процесс наблюдался как ранее, так и в ходе шторма 26–27 ноября 2023 г. на ряде аккумулятивных форм Черного моря, в частности на пересыпи оз. Соленого и в южной части Анапской пересыпи. Как уже отмечалось выше, сходное масштабное преобразование рельефа пересыпи оз. Богайлы могло произойти в конце 1960-х – начале 1970-х гг.

В результате экстремального шторма полностью исчезла система поперечных промоин с конусами выноса во внутренней (озерной) части пересыпи. Во время обычных сильных штормов эти промоины играли своеобразную роль предохранительного клапана, пропуская часть волнового заплеска в сторону озера и способствуя гашению энергии волн. Вероятно, наличие подобных стационарных промоин на песчаной пересыпи может служить признаком ее зрелости и продолжительного отсутствия экстремальных штормовых воздействий.

Образование русла сброса избыточной воды из озера произошло в центральной части пересыпи, где сток из озера сконцентрировался в пределах одной из существовавших ранее стационарных промоин. На южной части пересыпи, где высота поперечного профиля и ширина пересыпи до шторма были минимальными и где в прошлом наблюдалось образование гирл, стоку воды препятствовала наброска бетонных конструкций. В центральной части пересыпи на линии уреза моря, ранее бывшей почти прямой, после шторма сформировались несколько вогнутостей. К концу января 2024 г. образовавшееся в ходе шторма гирло было полностью замкнуто, но понижение в теле пересыпи сохранилось. К этому же моменту стала заметна тенденция к выравниванию линии уреза моря. С учетом сохраняющегося высокого уровня стояния воды в озере и зафиксированного нами полного уничтожения растительности

вдоль лагунного берега пересыпи следует ожидать частичного выравнивания линии уреза озера под действием волн, хотя общая конфигурация, скорее всего, сохранится. Как видно по динамике пересыпи в последующее после шторма время, прослеживаются процессы самовосстановления.

Заключение

Проведенный анализ многолетней динамики пересыпи оз. Богайлы подтверждает предположение о ведущей роли сильных штормов в развитии морских береговых аккумулятивных форм. В частности, в ходе и в результате экстремального шторма 26–27 ноября 2023 г. отмечено следующее:

1. Конфигурация и рельеф пересыпи оз. Богайлы были полностью изменены, произошло смещение аккумулятивного тела в акваторию озера, величина этого смещения существенно превысила величину отступления прилегающих коренных берегов.

2. На линии морского уреза, ранее бывшей почти прямой, после шторма сформировались несколько вогнутостей в центральной части пересыпи.

3. Величина отступления пересыпи вблизи примыкания к клифам коренного берега составила 5–10 м, в центральной части пересыпи – до 20 м, в районе образовавшегося гирла и чуть севернее превысила 30 м даже с учетом последующего выравнивания берега.

4. Наблюдалось полное исчезновение ранее существовавшей системы поперечных промоин с конусами выноса во внутренней (озерной) части пересыпи.

5. Воздействием штормового заплеска полностью разрушена существовавшая несколько десятилетий характерная продольная структура, включавшая полосы дюн и растительности.

6. К концу января 2024 г. образовавшееся в ходе шторма гирло было полностью замыто, прослеживается выравнивание линии уреза моря.

Таким образом, 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. Очевидно, что экстремальные штормы играют определяющую роль в развитии как пересыпи оз. Богайлы, так и подобных береговых аккумулятивных форм региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косьян Р. Д., Крыленко В. В., Крыленко М. В.* Геосистема Анапской пересыпи. Москва : Научный мир, 2021. 262 с.
2. Сходство и различия малых пересыпей северо-восточной части Черного моря / В. В. Крыленко [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2021. № 1. С. 63–83. EDN PXHKDX. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2021-1-63-83>
3. *Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д., Крыленко В. В.* Комплексная оценка берегов Западного Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 3. С. 41–55. EDN YLLQHB. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-41-55>

4. *Корзинин Д. В.* Особенности деформаций берегового песчаного профиля за полный штормовой цикл // *Океанологические исследования*. 2021. Т. 49, № 2. С. 45–56. EDN AVNEBK. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49\(2\).3](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(2).3)
5. *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>
6. *Леонтьев И. О., Акивис Т. М.* Моделирование динамики берегов Анапской пересыпи // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 2. С. 315–322. EDN EXZYXJ. <https://doi.org/10.31857/S0030157420020069>
7. 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>
8. *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. EDN NEUQUP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-2-185-196>
9. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England / T. Scott [et al.] // *Marine Geology*. 2016. Vol. 382. P. 224–241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.10.011>
10. Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise / M. D. Harley [et al.] // *Communications Earth and Environment*. 2022. Vol. 3. 112. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00437-2>
11. *Kim T.-K., Lim C., Lee J.-L.* Vulnerability analysis of episodic beach erosion by applying storm wave scenarios to a shoreline response model // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 759067. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.759067>
12. *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>
13. *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 QVVMIN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-367-382>
14. 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>
15. *Krylenko M., Krylenko V., Kosyan R.* Accumulative coast dynamics estimation by satellite camera records // *Proceedings of SPIE, Third international conference on remote sensing and geoinformation of the environment* / Edited by D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid. Paphos, 2015. Vol. 9535. 95351K. <https://doi.org/10.1117/12.2192495>
16. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // *Proceedings of SPIE, Third international conference on remote sensing and geoinformation of the environment* / Edited by D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, G. Papadavid. Paphos, 2015. Vol. 9535. 95351Q. <https://doi.org/10.1117/12.2192577>

17. 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>
18. 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. EDN IAEPTR. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/51/01>
19. 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>
20. Гуров К. И. Результаты мониторинга гранулометрического состава наносов береговой зоны Каламитского залива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 56–63. EDN YLLQHJ. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-56-63>
21. 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. EDN YODYQE.
22. Горячкин Ю. Н., Долотов В. В. Морские берега Крыма. Севастополь : ООО «Колорит», 2019. 256 с. EDN ARVKTY.
23. Удовик В. Ф., Горячкин Ю. Н. Межгодовая изменчивость вдольберегового потока наносов в береговой зоне Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 363–368. EDN VBFSFT.
24. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Пространственная структура потока наносов в береговой зоне Западного побережья Крыма по результатам численного моделирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2017. Вып. 1. С. 48–58. EDN YKSPXJ.
25. 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. С. 24–33. EDN VUYUTL.
26. 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.
27. Ергина Е. И., Жук В. О. Пространственно-временная изменчивость климата зимних сезонов в Крыму // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 4, №. 1. С. 104–121. EDN YLIIAP.
28. Кринко Е. Ф., Семёнов В. С. Последствия шторма 1969 г. в Пицунде и меры по их преодолению // Наука Юга России. 2021. Т. 17, №. 2. С. 90–97. EDN ONSBZD. <https://doi.org/10.7868/S25000640210210>

Поступила 6.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 3.05.2024 г.; принята к публикации 17.06.2024 г.; опубликована 25.09.2024 г.

Об авторах:

Крыленко Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр., 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., 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., 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.