

УДК 502.53

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ НА АККУМУЛЯТИВНОМ МОРСКОМ БЕРЕГУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА НА ПРИМЕРЕ КУРШСКОЙ КОСЫ

^{1,2}Данченков А.Р., ²Белов Н.С.¹*Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, e-mail: aldanchenkov@mail.ru;*²*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград*

Представлены результаты оценки потенциала возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов на аккумулятивном берегу бесприливного моря, связанных с абразией прибрежных дюн. Прибрежные дюны являются важнейшей частью защиты прибрежных территорий от штормовых нагонов и морского волнения. Песчаные пляжи выполняют защитную функцию для авантюны, определяя своим морфологическим строением потенциал их абразии при штормовых воздействиях. Оценка эколого-геоморфологических опасностей проведена с использованием оригинального комбинированного подхода, использующего краткосрочные спутниковые наблюдения оптического диапазона, а также результатов гидродинамического моделирования. Подход основан на анализе скорректированной к высоте волнения и уровню моря ширины пляжа, полученной со спутниковых изображений оптического диапазона. Выполнено сравнение результатов работы предложенного комбинированного подхода с результатами полевых измерений с использованием наземного лазерного сканирования, которое показало высокую степень сходимости. Для морского берега национального парка «Куршская коса» выполнен анализ горячих точек на авандюне с использованием пространственно-временной модели ширины пляжей. В качестве критерия выделения горячих точек была использована частота превышения критической для абразии авандюны ширины пляжей. В результате на авандюне Куршской косы был выявлен ряд проблемных участков высокого потенциала абразии авандюны, где может быть спрогнозировано развитие неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов, связанных с интрузией морских вод. Для участков с наибольшим потенциалом эколого-геоморфологических опасностей выполнено гидрологическое моделирование подтопления территорий Куршской косы в условиях различных штормов, в том числе с учетом прогнозного роста уровня Балтийского моря.

Ключевые слова: прибрежные дюны, песчаные пляжи, спутниковые снимки, абразия, подтопление

ASSESSMENT OF ECO-GEOMORPHOLOGICAL HAZARDS ON THE ACCUMULATIVE COAST USING THE COMBINED APPROACH ON THE EXAMPLE OF THE CURONIAN SPIT

^{1,2}Danchenkov A.R., ²Belov N.S.¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: aldanchenkov@mail.ru;*²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

The paper presents the results of an assessment of the potential for the occurrence of unfavorable eco-geomorphological processes on the accumulative shore of a tideless sea, associated with the erosion of coastal dunes. Coastal dunes are an essential part of the protection of coastal areas from storm surges and waves. Sandy beaches perform a protective function for dunes, determining by their morphological structure their erosion potential under storm impacts. The ecological-geomorphological hazards were assessed using an original combined approach using short-term optical range satellite observations as well as hydrodynamic modeling results. The approach is based on the analysis of the beach width corrected to wave height and sea level obtained from satellite images of the optical range. The results of the proposed combined approach were compared with the results of field measurements using terrestrial laser scanning, which showed a high level of similarity. For the seashore of the Curonian Spit National Park, the analysis of hot spots on the foredune was carried out using the spatio-temporal model of the beach width. The frequency of exceeding the beach width critical for erosion of the foredune was used as the criterion of hot spots selection. As a result, on the Curonian Spit a number of problem areas of high erosion potential of the foredune, where the development of unfavorable eco-geomorphological processes, connected with intrusion of sea waters, may be predicted, have been identified. Hydrological modeling of flooding of the Curonian Spit territories under different storm conditions was performed for the areas with the highest potential of eco-geomorphological hazards, including the forecasted rise in the level of the Baltic Sea.

Keywords: coastal dunes, sandy beaches, satellite images, erosion, flooding

Известно, что на аккумулятивных песчаных берегах прибрежные дюны являются важнейшей частью защиты прибрежных территорий от штормовых нагонов и морского волнения. Прибрежные дюны распространены во всем мире, характеризуются широким разнообразием форм и размеров, зависящих от количества поступающего ма-

териала, преобладающего ветрового режима, степени покрытия растительностью [1]. Потенциал эрозии авандюны, в том числе, связан с шириной пляжа и его морфологией [2]. Связанные с пляжами в единой морфодинамической системе авандюны чувствительны к изменениям в бюджетах наносах и динамике пляжей, которые могут

приводить к увеличению интенсивности процессов эрозии и снижению берегозащитного потенциала [3]. Это делает пляжи важнейшими естественными средами, способными выполнять защитную и морфодинамическую функции для авантюнов [4].

Исследование состояния пляжей с целью оценки потенциала абразии прибрежных дюн для разработки адекватной системы управления прибрежной зоной может быть выполнено на основе данных дистанционного зондирования, которые позволяют получить продолжительный в пространстве и времени массив данных. Такие данные позволяют исследовать ретроспективу изменений, в том числе на достаточно удаленных территориях [5]. В ряде работ использовались спутниковые изображения в оптическом спектре для получения информации о положении береговой линии с различных источников – Landsat [6], Sentinel [7], а также сочетание данных с различных источников, позволяющее увеличить временное разрешение [6].

Известно [8], что на практике понятие береговой линии намного сложнее, поскольку ее положение постоянно изменяется, что связано с рядом факторов, некоторыми из которых являются штормовые нагоны, волновой накат, а также приливы. Лишь несколько работ было посвящено корректировке положения береговых линий, полученных со спутниковых изображений на высоту прилива (например, [9]), еще меньше учитывало волновой накат и штормовые нагоны в даты измерений [10]. В данной работе представлены результаты применения комбинированного подхода (учета волнового наката и уровня моря) для корректировки временного ряда ширины пляжа и оценки связанного с превышением критической ширины незатопленной части пляжа потенциала размыва дюнного вала, а также ассоциированных эколого-геоморфологических опасностей.

Цель исследования состояла в оценке потенциала размыва дюнного вала с применением комбинированного подхода на примере Куршской косы.

Материалы и методы исследования

1. Гидрометеорологические данные

Для получения сведений о высоте ветрового волнения на исследуемом участке акватории моря выполнено моделирование ветровых волн с использованием спектральной модели третьего поколения SWAN версии 41.20A. В качестве исходных данных

используются сила и направление ветра, полученные с метеостанции платформы Д-6, расположенной в 20 км от берега. Сведения об уровне Балтийского моря были получены с поста порта Пионерский, а частота измерений уровня моря составила 1 раз в 6 ч. Высота волнового наката на пляж была рассчитана по адаптированной для юго-восточной части Балтийского моря модели [11] (уравнение 1).

$$R = 1.29H_s \left(\tan \beta / \sqrt{\frac{H_s}{L}} \right)^{0.72}, \quad (1)$$

где H_s – высота значительных волн, м; L – длина волны, м; β – уклон пляжа.

Расчет ширины затопления пляжа (BI) выполнялся на основе полученной (уравнение 1) высоты наката волн (уравнение 2):

$$BI = (R + S) * \text{ctg}(\beta), \quad (2)$$

где R – высота волнового наката; S – высота уровня моря, м; β – уклон пляжа.

Уклоны пляжа были приняты по данным мониторинговых наблюдений методом наземного лазерного сканирования за динамикой авантюнов Куршской косы, который проводился с 2014 г. [12].

2. Береговые линии по результатам дешифровки данных дистанционного зондирования

За период с 04.01.2016 по 27.12.2017 гг. (2 полных года) было обработано 76 спутниковых снимков Landsat 8/OLI и Sentinel 2a, с использованием которых было получено положение береговой линии. Пространственное разрешение составляет 15 м на пиксель для Landsat 8 и 10 м на пиксель для Sentinel. Для векторизации береговых линий на спутниковых снимках использовалась настольная ГИС ESRI ArcGIS 10.0. На спутниковых снимках визуально определялась и обозначалась позиция береговой линии (1 точка береговой линии на 12–19 м расстояния). В качестве базовой линии для расчета ширины пляжа по материалам геодезических измерений и детальных спутниковых изображений была подготовлена линия основания авантюны (эоловой подушки, подножия уступа размыва авантюны). Граница авантюны (базовая линия) была разделена на 10-метровые участки, всего 3720 участков. От базовой линии до каждой из береговых линий было определено минимальное расстояние, которое соответствует ширине надводной части пляжа в момент получения спутникового изображения (всего было более 280 000 измерений).

3. *Корректировка ширины пляжа в соответствии с гидрометеорологическими факторами*

Известно, что высота нагона, высота прилива и высота волнового наката являются основными факторами, влияющими на наблюдаемое положение береговой линии [8]. Согласно уравнению 2, основные гидродинамические факторы (высота волнового наката ($R_{2\%}$), высота нагона (S)) могут быть выражены в едином показателе ширины затопления пляжа (BI), который может быть получен для каждого сегмента береговой линии в каждую дату спутниковых наблюдений. Таким образом, наблюдаемая с использованием спутниковых снимков ширина незатопленной части пляжа может быть скорректирована на ширину затопления, которая была характерна для каждого сегмента берега в определенные моменты времени, что позволяет полу-

чить ширину незатопленной части пляжа, которая могла бы быть в рассматриваемый момент времени при отсутствии затопления, связанного с гидрометеорологической активностью. Общий принцип такой идеи приведен на рис. 1.

Результаты исследования и их обсуждение

1. *Пространственно-временная модель ширины пляжей*

С использованием данных ширины пляжа со спутниковых изображений совместно с результатами моделирования ширины затопления пляжей был получен массив данных по ширине незатопленной части пляжа. Массив данных был организован в единую пространственно-временную модель, позволяющую оценивать вариативность ширины пляжа, связанную с морфолитодинамическими процессами (рис. 2).

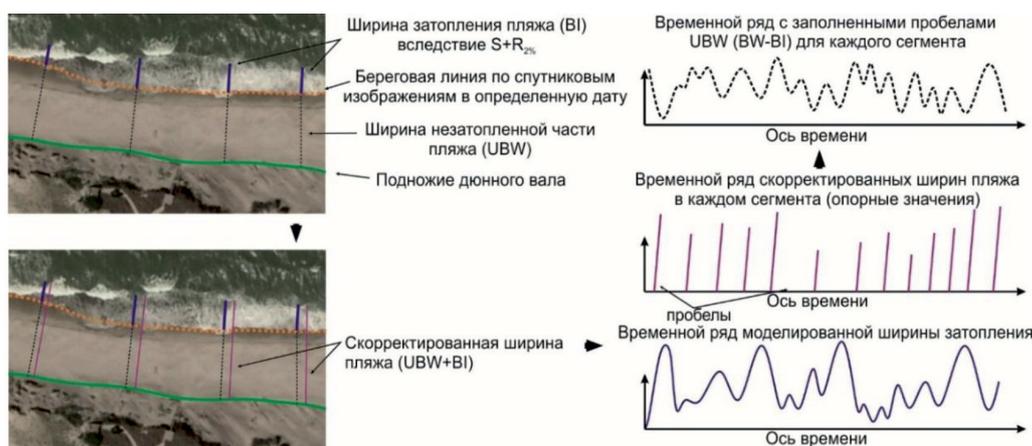


Рис. 1. Принцип корректировки ширины пляжа к ширине затопления (волновой накат и уровень моря)

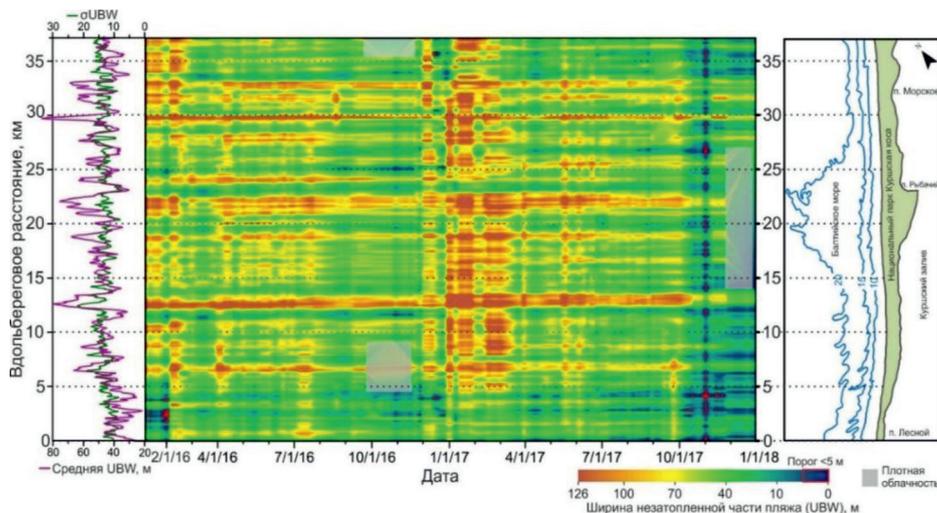


Рис. 2. Пространственно-временная схема ширины пляжей Курильской косы

По признаку ширины пляжей прослеживаются три характерные группы.

1. Стабильно широкие участки. Характеризуются относительной постоянностью ширины пляжей. Визуально представлены горизонтальными полосами, вытянутыми вдоль оси времени (например, на отметке 12,5 км, ряд участков на промежутке 15–24 км, вблизи 30-го км).

2. Вариабельные участки, где наблюдается чередование периодов с широкими и узкими пляжами.

3. Стабильно узкие участки. Характеризуются относительной постоянностью низкой ширины, без существенных изменений во времени. Визуально представлены темно-голубым полосами с темно-синими участками (первые 5 км). Вероятно, приурочены к области дефицита наносов.

Периодическое снижение ширины пляжей вызвано штормовыми событиями (например, январь 2016 г., январь 2017 г., февраль 2017 г.), в ходе которых динамичное снижение ширины пляжей сменяется последующим увеличением при снижении нагона и ветрового волнения.

2. Оценка точности предлагаемого подхода

Использование ряда теоретических и эмпирических предпосылок в данной работе (модели ветрового волнения, модели волнового наката), а также используемый подход по корректировке ширины пляжа по спутниковым наблюдениям и расчету ширины незатопленной части пляжа между спутниковыми измерениями обуславливают необходимость провести оценку точ-

ности. Оценка точности производилась на основе данных морфодинамических наблюдений за авантюной, результаты которых частично обсуждались [12]. В рамках морфодинамических наблюдений производятся регулярные наблюдения с использованием наземного лазерного сканирования, координированные с использованием GNSS в режиме RTK. В даты морфодинамических наблюдений на участках наблюдений (14-й и 42-й км Куршской косы) была измерена ширина незатопленной части пляжа (всего 493 измерения). Измеренная ширина пляжа была сравнена с расчетной в аналогичных сегментах и соответствующих датах (рис. 3).

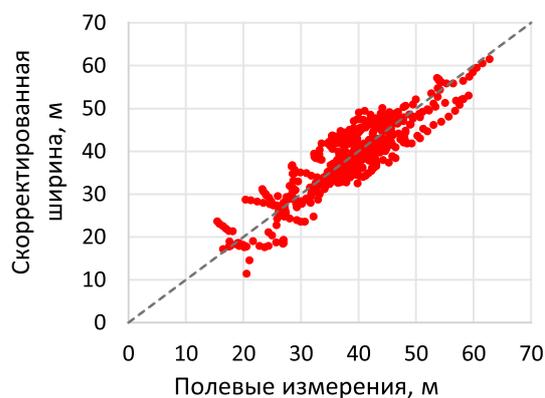
Таблица 1

Статистическая оценка точности определения ширины пляжей

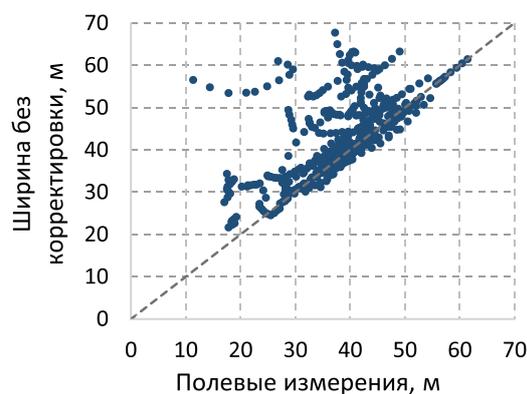
	Полевые измерения/ Скорректированная ширина	Полевые измерения/ Ширина без кор- ректировки
ME	0,12	-4,81
MAE	3,19	6,81
RMSE	3,97	9,41

Примечание: ME – средняя ошибка, MAE – средняя абсолютная ошибка, RMSE – среднеквадратическая ошибка.

По результатам проведенной корректировки ширины пляжа, полученной по спутниковым изображениям, а также проведенного расчета ширины незатопленной части пляжа, с использованием этих данных как исходных прослеживается очевидное увеличение точности получаемых результатов (табл. 1).



а)



б)

Рис. 3. (а) Соотношение между измеренной и скорректированной спутниковой шириной незатопленной части пляжа; (б) Соотношение между измеренной и спутниковой шириной незатопленной части пляжа без корректировки

В сравнении с ранее выполненными оценками точности получения ширины незатопленной части пляжа получены близкие значения по некорректированным значениям. В работе [13] по некорректированным значениям RMSE составляла 10 м, MAE – 7,5 м. После проведенной коррекции на высоту прилива были достигнуты RMSE 9,14 м, MAE 7,06 м против 3,97 м и 3,19 м соответственно, полученных в настоящей работе. В [6] после проведенных корректировок для пляжа была получена RMSE 6,6 м, что может быть связано с использованием более общей модели волнового наката, калиброванной для океанических гидродинамических условий.

3. Оценка горячих точек и ассоциированных эколого-геоморфологических опасностей

Горячие точки на авандюне выделялись по признаку превышения медианы частот наблюдений ширины пляжа менее 5 м. За исследуемый период наблюдения медиана составляла 0,25% (что соответствует 22 ч в год). Были выделены участки с су-

щественным превышением повторяемости критически низкой ширины пляжа, являющиеся участками повышенной эколого-геоморфологической опасности. Это обусловлено тем, что абразия авандюн происходит при локальных превышениях подошвы дюн высотой нагона в совокупности с волновым накатом. Анализ позволил подтвердить существование зоны (№ 1) деградации авандюны на 13,5-м км Куршской косы, а также выявить участок (№ 2) на 15-м км косы. На данных участках возможны размыв авандюны и развитие неблагоприятных процессов, связанных с интрузией морских вод на территорию косы (рис. 4).

Для оценки потенциальной опасности для экосистем и инфраструктуры национального парка от вероятного прорыва тела дюнного вала был выполнен гидрологический анализ зон подтопления по методике hes-ras в условиях штормов различной повторяемости (ежегодной и 1 раз в 25 лет), а также при прогнозируемом росте регионального уровня моря (табл. 2).

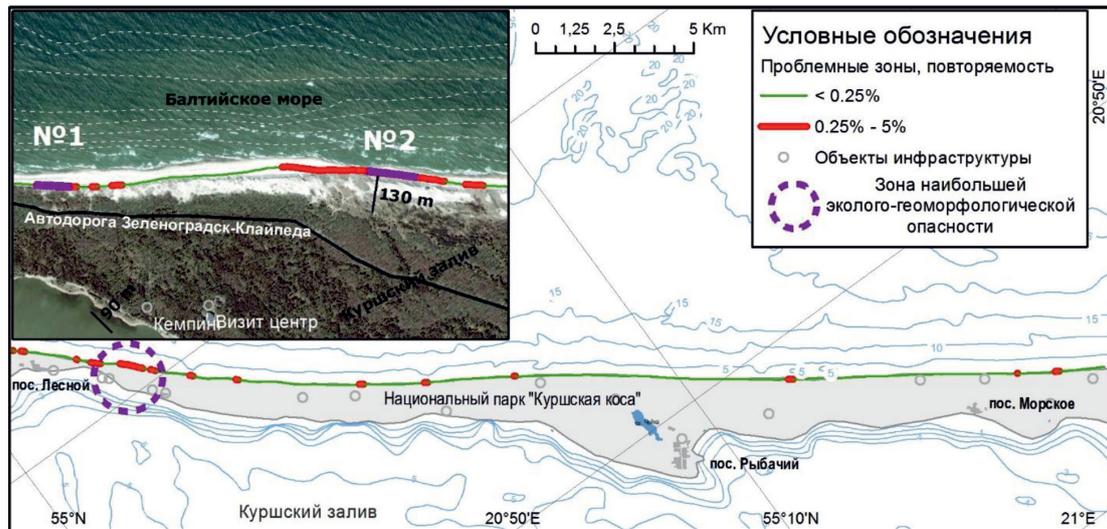


Рис. 4. Участки потенциального возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов на берегу Куршской косы

Таблица 2

Параметры моделируемых штормов

Параметр	Шторм ежегодной повторяемости	Шторм ежегодной повторяемости в условиях роста уровня моря	Шторм повторяемости 1 раз в 25 лет
Высота значительных волн, м	3,7	3,7	4,7
Длина волны, м	113	113	141
Период волны, с	8,5	8,5	8,8
Высота штормового нагона	0,93	1,43	1,29
Продолжительность, ч (м)	18 (1080)	18 (1080)	14 (840)

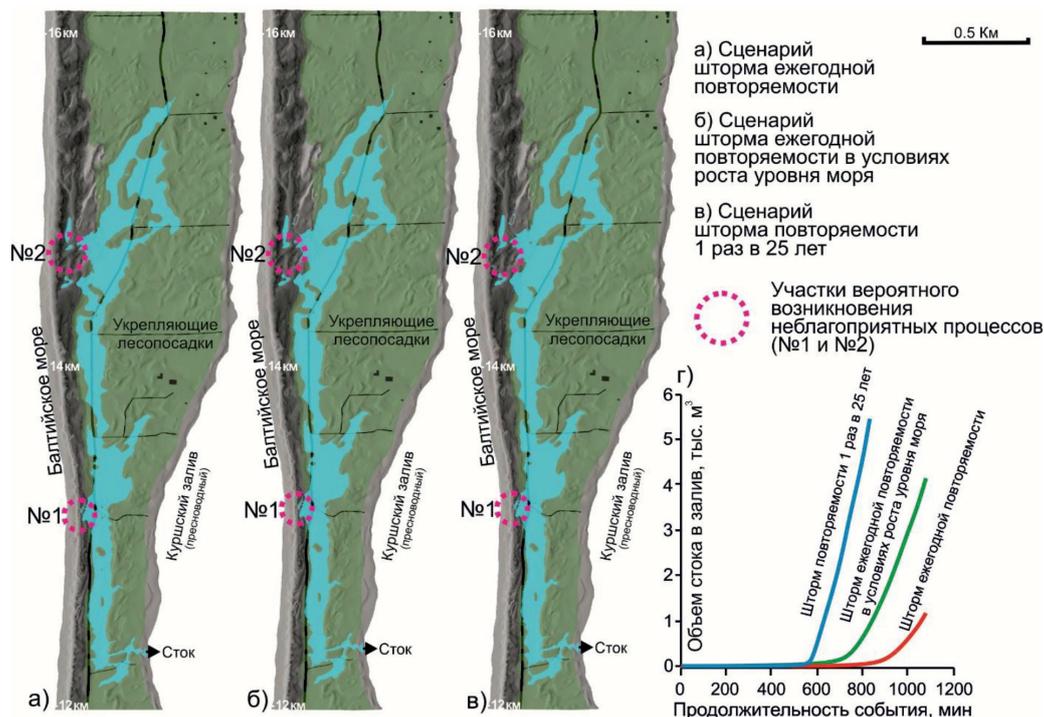


Рис. 5. Зоны подтопления территории Куршской косы в условиях различных штормов

Выполненное моделирование зон подтопления выявило наличие потенциальной опасности для внутренних территорий при нарушении целостности авантюны (рис. 5). Предполагаемая область затопления может составить в среднем 370 тыс. м² с глубиной затопления до 0,5 м, что может привести к нанесению ущерба при существующей социально-экономической и природной значимости данных территорий, занятых автодорогой и укрепляющими лесопосадками. Топографические условия территории [14] и естественный гравитационный дренаж [15] играли ключевую роль в формировании зон затопления. В рассмотренных сценариях сходство в площади зон затопления связано с потенциальным стоком морских вод в пресноводный Куршский залив (в объеме 1,18–5,5 тыс. м³).

Заключение

В работе представлен диагностический подход к выделению горячих точек на авантуне, который позволяет определять участки высокого потенциала возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов. Используемый подход базируется на сведениях о положении береговой линии, полученных со спутниковых снимков. Данные береговые линии являют-

ся основой для определения ширины пляжа с учетом уровня и волнения моря. Предложенный подход показал высокую степень сходимости с данными полевых наблюдений. На основе полученных временных рядов ширины незатопленной части пляжа для сегментов берега национального парка «Куршская коса» был выполнен анализ горячих точек на авантуне. Повторяемость превышения критической ширины пляжа была использована как критерий выделения горячих, поскольку волновой размыв донного вала наблюдается при достижении волнением подошвы вала. Было подтверждено наличие участка развития неблагоприятных процессов на 13,5-м км Куршской косы, а также был выделен новый участок на 15-м км косы, где прогнозируются размыв авантюны и связанные с проникновением морских вод неблагоприятные процессы. Для оценки потенциального риска для особо охраняемых экосистем национального парка от вероятного прорыва тела авантюны было выполнено моделирование зон подтопления в условиях штормов различной повторяемости, а также в условиях прогнозируемого роста уровня моря. Анализ показал существенную опасность нарушения целостности вала в контексте социально-экономической, природной и культурной

значимости внутренних территорий Куршской косы, занятых автодорогой, укрепляющими лесопосадками. Топографические условия местности играли ключевую роль при формировании зон затопления. Низкое различие в площади зон затопления связано с потенциальным стоком морских вод в пресноводный Куршский залив.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Калининградской области (проект № 19-45-393001). Сбор и обработка данных по уровню моря выполнены при поддержке госзадания ИО РАН (тема № 0128-2021-0012).

Список литературы / References

1. Pye K. The dynamics and environmental context of aeolian sedimentary systems. London: Geological society special publication. 1993. 325 p.
2. Davidson-Arnott R.G.D. Conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts. *Journal of Coastal Research*. 2005. Vol. 21. No. 6. P. 1166-1172.
3. Martínez M.L., Psuty N.P. Coastal dunes. Berlin: Springer Verlag. 2004. 384 p.
4. Prodder S., Russell P., Davidson M., Miles J., Scott T. Understanding and predicting the temporal variability of sediment grain size characteristics on high-energy beaches. *Marine Geology*. 2016. Vol. 376. p. 109-117.
5. Saleem A., Awange J.L. Coastline shift analysis in data deficient regions: Exploiting the high spatio-temporal resolution Sentinel-2 products. *Catena*. 2019. Vol. 179. P. 6-19.
6. Pardo-Pascual J.E., Sánchez-García E., Almonacid-Caballer J., Palomar-Vázquez J.M., Priego De Los Santos E., Fernández-Sarría A., Balaguer-Beser Á. Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. No. 2. P. 326.
7. Hagenaaars G., de Vries S., Luijendijk A.P., de Boer W.P., Reniers A.J. On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: A case study of the sand motor mega-scale nourishment. *Coastal Engineering*. 2018. Vol. 133. P. 113-125.
8. Boak E.H., Turner I.L. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of coastal research*. 2005. Vol. 21. No. 4. P. 688-703.
9. Chen W.W., Chang H.K. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2009. Vol. 84. No. 1. P. 54-60.
10. Chang H.K., Chen W.W., Liou J.C. Shifting the waterlines of satellite images to the mean water shorelines considering wave runup, setup, and tidal variation. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2015. Vol. 9. No. 1. P. 096004.
11. Paprotny D., Andrzejewski P., Terefenko P., Furmańczyk K. Application of empirical wave run-up formulas to the Polish Baltic Sea coast. *PloS one*. 2014. Vol. 9. No. 8. P. e105437.
12. Danchenkov A.R., Belov N.S. Morphological changes in the beach-foredune system caused by a series of storms. Terrestrial laser scanning evaluation. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. Vol. 19. No. 4.
13. Liu Q., Trinder J.C., Turner I.L. Automatic super-resolution shoreline change monitoring using Landsat archival data: a case study at Narrabeen-Collaroy Beach, Australia. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2017. Vol. 11. No. 1. P. 016036.
14. Didier D., Bandet M., Bernatchez P., Dumont D. Modelling coastal flood propagation under sea level rise: a case study in Maria, Eastern Canada. *Geosciences*. 2019. Vol. 9. No. 2. P. 76.
15. Gallien T.W., Sanders B.F., Flick R.E. Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. *Coastal Engineering*. 2014. Vol. 91. P. 18-28.