

ДАНЧЕНКОВ Александр Романович

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОРСКОГО БЕРЕГА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОРФОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА В
УСЛОВИЯХ ОСОБО ОХРАНЯЕМОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ (НА
ПРИМЕРЕ КУРШСКОЙ КОСЫ)**

25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Работа выполнена на кафедре географии океана Института природопользования, территориального развития и градостроительства ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Научный руководитель:	Рябчук Дарья Владимировна , кандидат геолого-минералогических наук, зав. отделом региональной геоэкологии и морской геологии ФГБУ «ВСЕГЕИ»
Официальные оппоненты:	Шилин Михаил Борисович , доктор географических наук, профессор, Российский государственный гидрометеорологический университет, кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности, профессор
	Репкина Татьяна Юрьевна , кандидат географических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра геоморфологии и палеогеографии, старший научный сотрудник
Ведущая организация:	ФГБУН Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится «21» декабря 2020 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.084.09 при ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14, ауд. «Скворечник», e-mail: tikuznetsova@kantiana.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград, ул. Университетская, д. 2). Электронные версии диссертации и автореферата размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»: <https://www.kantiana.ru/postgraduate/dis-list/danchenkov/>

Автореферат разослан «__» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Т.Ю. Кузнецова

Введение

Географическое положение береговых систем в зоне контакта суши и моря обуславливает их высокий динамизм, с которым тесно связаны изменения природных комплексов, особенности условий хозяйственного использования и проживания человека. В береговой зоне антропогенное воздействие протекает на фоне взаимодействия природных процессов, что приводит к ряду негативных явлений. Глобальная проблема разрушения берегов характерна для более чем 20% берегов Европы [European Commission, 2008]. Разрушение берегов совместно с расширением антропогенизированных ландшафтов существенно сокращают пространство для существования естественных экосистем [Feagin et al., 2004; Nordstrom, 2004].

Прибрежные дюны занимают около 34% свободных ото льда берегов мира, где выступают первой линией защиты против подтопления внутренних территорий морем [Coch and Wolff, 1991; Baeyens et al., 2008]. Динамическое равновесие системы прибрежных дюн, в ходе которого происходит естественное восстановление профиля дюны, является необходимым условием для поддержания безопасного уровня защиты от воздействия волн и штормовых нагонов [Temmerman et al., 2013]. Под воздействием природных процессов (изменений в климате, а также увеличения частоты экстремальных явлений и связанных с ними процессов абразии) и неблагоприятных антропогенных процессов происходят постоянные изменения в береговой зоне, часто нарушающие процессы развития прибрежных дюн [McLachlan et al., 2018; Chen et al., 2019]. В последнее столетие наблюдаются тенденции ухудшения состояния прибрежных дюнных систем в Европе, защитная роль которых хорошо известна [Arens et al., 2001; European Commission, 2008; Ruz et al., 2009; Carter, 2013; Garcia-Lozano et al., 2018]. Несмотря на экологическое и социальноэкономическое значение прибрежных дюнных систем в южной и восточной частях Балтийского моря, из-за их эксплуатации и климатических изменений они сильно деградировали за последнее столетие [Labuz et al., 2015; 2018].

Существование дюнного вала на морском берегу создает условия для защиты от опасных природных явлений, снижая уровень риска воздействия на внутренние территории. Для особо охраняемых природных территорий Куршской косы дюнный вал создан с целью защиты как от ветропесчаного потока, так и от подтопления морскими водами при штормовых нагонах. Дюнный вал Куршской косы изучается с момента его строительства и по настоящее время [Gerhardt, 1900; Wichdorf, 1919; Mager, 1938; Гуделис и др., 1963; 1977; Кирлис и др., 1981; Волкова, 1994; Болдырев и др., 2008; Шаплыгина, 2010], однако рациональная стратегия управления, направленная на поддержание его устойчивого состояния и минимизацию негативного

воздействия антропогенных факторов, не была в полной мере разработана к данному моменту.

Развитие дюнного вала на морском берегу – барьера против неблагоприятных гидрометеорологических явлений – неотъемлемо связано с состоянием морских пляжей. В определении прибрежных дюн как «форм рельефа, сформированных у песчаных пляжей при ветровом переносе песчаных наносов и закрепленных растительностью» [Hesp, 2002] песчаный пляж является отправной точкой их развития, источником подпитывающего материала и буфером, защищающим от волнового воздействия. Состояние дюн и их долгосрочная способность защищать поселения и экосистемы напрямую связаны и с состоянием прилегающих пляжей. Рекреационные функции и эффективность экономического использования морского берега также зависят от состояния всей береговой системы и характера протекающих неблагоприятных процессов [Alexandrakis et al., 2015]. Снижение качества и стабильности пляжей и прибрежных дюн усиливает необходимость разработки эффективных мер для поддержания устойчивого состояния и минимизации негативного антропогенного воздействия.

К настоящему времени морфодинамическая основа комплексной геоэкологической оценки морского берега и разработки рациональных стратегий управления дюнным валом ограничена уровнем знаний о динамике дюн в прибрежной зоне моря. Несмотря на то, что основные факторы развития прибрежных дюн известны, существует ряд естественных и антропогенных процессов, взаимодействий и эффектов, которые зависят от рассматриваемых масштабов пространства и времени [Walker et al., 2017]. Возможность оценки развития дюнного вала на морском берегу важна для устойчивого развития внутренних приморских территорий, особенно в контексте климатических изменений (увеличения числа штормов) и антропогенной нагрузки [Elko et al., 2016].

Понимание пространственно-временных закономерностей развития прибрежных дюн ограничено существующими методами их полевого исследования. Традиционно процессы изучались в рамках краткосрочных исследований, а длительные наблюдения проводились по отдельным профилям, что не позволяло выполнить сравнение и обобщение таких результатов [Ruggiero et al., 2016], а также применить их для морфодинамически обоснованной геоэкологической оценки аккумулятивного морского берега. Развитие технологий получения пространственных данных позволило производить исследование аккумулятивных морских берегов с высоким пространственным разрешением и выявлять особенности их развития под воздействием природных и антропогенных факторов, расширяя научное понимание протекающих процессов [de Vries et al., 2017; Smith et al., 2017; Donker et al., 2018; O'Dea et al., 2019; Phillips et al., 2019; Brodie et al., 2019; Danchenkov et al., 2019]. Новые

технологии, методы и данные позволяют описать взаимосвязи в системе аккумулятивного берега и разработать эффективные стратегии управления дюнным валом Куршской косы, имеющим важное экологическое и социально-экономическое значение.

Цель работы: геоэкологическая оценка морского берега с использованием морфодинамического подхода для организации рационального управления дюнным валом на примере Куршской косы.

Задачи работы:

1) проанализировать современные подходы к изучению прибрежных дюн и охарактеризовать факторы их развития на основе опубликованных данных;

2) определить наиболее значимые лимитирующие факторы развития дюнного вала Куршской косы на основе комплексного анализа и интерпретации геоморфологических и гидрометеорологических данных, полученных в ходе исследования;

3) построить модель развития и предложить подход к геоэкологической оценке дюнного вала;

4) выполнить зонирование дюнного вала Куршской косы по потенциалу возникновения эколого-геоморфологических опасностей на основе проведенной геоэкологической оценки;

5) предложить рекомендации по управлению дюнным валом с учетом морфодинамических особенностей.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертации положены материалы мониторинговых наблюдений за развитием дюнного вала и котловины выдувания, полученные при непосредственном участии автора в период обучения в БФУ им. И. Канта, а также во время работы в лаборатории геоэкологии Атлантического отделения ИО РАН в 2012–2018 гг.

Камеральная обработка и анализ материалов полевых измерений наземного лазерного сканирования (сканер Topcon GLS-1500) включали построение высокоточных цифровых моделей рельефа, их морфодинамический и морфометрический анализ с использованием пакета программ геоинформационной системы ArcGIS. Для морфологического зонирования было выполнено построение цифровых ортофотопланов на основе материалов аэрофотосъемки с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 с геодезической привязкой (спутниковый приемник Topcon GR-5). Анализ гидрометеорологических данных был выполнен на основе измерений стационарных метеорологических станций, уровнемеров и материалов моделирования ветрового волнения, выполненного автором.

Научная новизна. Для Куршской косы выполнен комплексный анализ условий развития дюнного вала, позволивший впервые определить наиболее существенные лимитирующие факторы его развития [Danchenkov and Belov, 2019; Данченков, 2020]. На основе мониторинговых наблюдений наземного

лазерного сканирования впервые была произведена оценка мощности эолового ветропесчаного потока в сезонном масштабе с использованием анализа цифровых моделей рельефа [Danchenkov et al., 2019]. Методика геоэкологической оценки аккумулятивного морского берега дополнена моделью развития и подходом к оценке дюнного вала. Предложены рекомендации для рационального управления дюнным валом Куршской косы с учетом морфодинамических особенностей.

Практическая значимость работы. Использование результатов работы возможно в практике берегозащитной деятельности и управления прибрежными территориями. Предложенные в исследовании рекомендации по управлению дюнным валом могут быть применены при планировании берегозащитных мероприятий и мероприятий по защите территорий от неблагоприятных процессов. Результаты работы были использованы при разработке проектной документации и методических рекомендаций по строительству и реконструкции берегоукрепления авантюны национального парка «Куршская коса».

Личный вклад автора. Изложенные в работе результаты и выводы были получены автором самостоятельно. Материал был собран и проанализирован автором в ходе полевых экспедиций с использованием наземного лазерного сканирования, беспилотных летательных аппаратов, спутниковых геодезических средств и отбором проб в 2012–2018 гг. Автором проводилась обработка и интерпретация полевых материалов, построение и анализ моделей рельефа, лабораторный анализ, гидродинамическое, морфодинамическое и гидрологическое моделирование, анализ гидрометеорологических данных. Разработка методического подхода, его апробация, геоэкологическая оценка и предложенные рекомендации также выполнены лично автором.

Апробация работы. Результаты исследования представлены на XXI, XXII, XXIII Международных научных конференциях (Школах) по морской геологии (Москва, 2015; 2017, 2019); Международной научной конференции EMECS'11 – SeaCoasts XXVI (Санкт-Петербург, 2016); Международной научной конференции 8th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone (Калининград, 2017); 4-й Международной научной школе «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2018); VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» MARESEDU-2019 (Москва, 2019). Результаты работы использовались при разработке документации строительства и реконструкции берегоукрепления авантюны для национального парка «Куршская коса».

Благодарности. Автор благодарит БФУ им. Канта и АО ИО РАН за предоставленное научное оборудование. Также автор выражает благодарность научному руководителю Д.В. Рябчук за ценные и конструктивные советы и помощь на всех этапах исследования; Н.С. Белову за совместную многолетнюю работу и поддержку научных идей; В.А. Гриценко и Е.В. Краснову за ценные

консультации и проявленный интерес к работе; Н.М. Озеровой за помощь и поддержку.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 3 – в изданиях, включенных в WOS / Scopus, 2 – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 165 страниц, включая 14 таблиц, 76 рисунков и 8 приложений. Список литературы содержит 337 наименований, из которых 245 – зарубежные источники.

Во введении охарактеризована актуальность работы, определены цель и задачи, дана оценка научной новизны, теоретической и практической значимости исследования. В главе 1 приводится литературный обзор по геоэкологии морских берегов, процессам развития пляжей и прибрежных дюн, геоэкологическая и геоморфологическая характеристики изучаемого района. В главе 2 описываются использованные в работе материалы и методы: сбор и обработка гидрометеоданных, наземное лазерное сканирование, используемый материал. В главе 3 представлено исследование системы «пляж – дюнный вал» Куршской косы на основе анализа естественных и антропогенных факторов. Определены основные факторы природно-антропогенного развития дюнного вала Куршской косы и морфодинамические связи. В главе 4 приведена модель развития дюнного вала и авторский подход к геоэкологической оценке потенциала возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов на морском берегу. На основе выполненной геоэкологической оценки предложена схема организации рационального управления дюнным валом Куршской косы.

Защищаемые положения:

1) основными лимитирующими факторами естественного развития дюнного вала Куршской косы являются атмосферные осадки и ширина незатопленной части пляжа, снижающие количество благоприятных дней на 36-88% в год. Антропогенные факторы (рекреационное воздействие и берегоукрепление) изменяют шероховатость прибрежного рельефа;

2) полуэмпирическая модель развития дюнного вала как основа разработки и реализации стратегии рационального управления, направленной на поддержание устойчивого состояния и минимизацию негативного воздействия антропогенных факторов;

3) геоэкологическая оценка аккумулятивного морского берега на основе морфодинамического подхода и зонирование дюнного вала по показателю потенциала возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов с разработкой рекомендаций рационального управления дюнным валом Куршской косы с учетом локальных морфодинамических особенностей.

Общие сведения о факторах развития прибрежных дюн и районе исследования

Прибрежные дюны распространены во всем мире, связаны с песчаными пляжами и представлены различными формами и размерами в зависимости от количества поступающих наносов и ветрового режима [Зенкович, 1962; 1967; Вейсов, 1976; Шуйский, 1976; Айбулатов, 1990; Берд, 1990; Nordstrom et al., 1990; Carter et al., 1992; Pye, 1993; Hesp, 2000]. Эоловый перенос и обеспечивающие его эффективные ветры (ветры скоростью выше пороговой, морских и вдольбереговых направлений), способные переносить песок с пляжа, являются фундаментальным фактором развития прибрежных дюн [Pye, 1983; Carter, 1988; Шуйский и Выхованец, 1989; Выхованец, 1998; 2001]. В число корректирующих и лимитирующих факторов развития прибрежных дюн включают: колебания уровня моря, волнение, влажность песков, степень покрытия растительностью, доступность наносов на морском пляже, а также антропогенные факторы (берегозащитные мероприятия, рекреационное воздействие и пр.) [Davidson-Arnott and Law, 1990; Pye, 1993; Kocurek and Lancaster, 1999; McLean and Shen, 2006; Pye and Tsoar, 2008; Davidson-Arnott, 2010; Delgado-Fernandez, 2011]. Нестабильность прибрежных дюн регулярно приводит к их размыву в ходе воздействия штормовых нагонов и волнения [Olivier and Garland, 2003; Suanez et al., 2012], когда пески могут выноситься к барам, а затем, в ходе послештормового восстановления, возвращаться на пляжи, вовлекаться в эоловый перенос и переформировывать дюны [Davidson-Arnott and Law, 1990; Aagaard et al., 2004; Masselink et al., 2006].

Обобщение условий и лимитирующих факторов поступления и переноса песков показало, что развитие и восстановление прибрежных дюн зависит от пространственно-временной связи эоловых и прибрежных гидродинамических процессов [Houser, 2009]. Аккумуляция песчаного материала на прибрежных дюнах зависит от синхронизации транспортирующего потенциала с доступностью наносов на пляже, куда они были доставлены прибрежными гидродинамическими процессами [Christiansen and Davidson-Arnott, 2004], что определяет их роль в развитии прибрежных эоловых форм.

Диссертационное исследование было выполнено на морском берегу Куршской косы – крупнейшей аккумулятивной формы юго-восточной части Балтийского моря, в российской части которой сформирована особо охраняемая природная территория федерального значения – национальный парк «Куршская коса». Куршская коса включена в список всемирного наследия ЮНЕСКО как уникальный природно-антропогенный ландшафт. Коса, общей протяженностью около 100 км, отделяет пресноводный Куршский залив от Балтийского моря, которые соединены Клайпедским проливом.

Особенностью строения Куршской косы является наличие на ней природно-антропогенного сооружения – дюнного вала, построенного в XIX в.

как часть комплекса мероприятий по стабилизации песков Куршской косы [Wichdorf, 1919; Dobrotin et al., 2013]. Строительство целостного вала велось на основе ряда фрагментарно расположенных дюн, расчлененных дефляционными котловинами. Исторически известно [Wichdorff, 1919], что состояние дюнного вала напрямую влияет на миграцию эоловых песков, которые могут покрывать существенные площади прилегающих территорий. На территории Куршской косы результатом миграции песков ранее становилась деградация лесных угодий, потеря ряда поселков и земельных ресурсов. Строительство дюнного вала позволило создать барьер для эоловых песков, снизив их миграцию, а проведенное лесовосстановление – восстановить лесные угодья и экосистемы. Вследствие стабилизации геоморфологических условий и развития поселений произошел рост экономической активности.

Дюнный вал связан с морским пляжем: эоловый перенос песков пляжа поставляет материал, формируя эоловые подушки и подпитывая наносами тело дюны. Однако темпы штормовой абразии в отдельные годы существенно снижают запасы песков на дюнном валу, приводя к его постепенной деградации и увеличению риска размыва [Danchenkov et al., 2019]. Антропогенное воздействие на дюнный вал вызвано активным рекреационным использованием национального парка и береговосстановительными мероприятиями. Состояние дюнного вала может определять состояние и устойчивое развитие широкой полосы прилегающих территорий. В последние годы ряд исследований показывает тенденцию деградации дюнного вала Куршской косы [Болдырев и др., 2008; Бобыкина и др., 2011; Бобыкина и Стонт, 2014; Badyukova and Solovieva, 2015; Sergeev, 2015; Бурнашов и Карманов, 2016; Česnulevičius et al., 2016; Jarmalavičius et al., 2017; Volkova et al., 2017; Sergeev et al., 2018; Danchenkov and Belov, 2019]. Таким образом, актуальна организация морфодинамически обоснованных комплексных мероприятий по управлению и восстановлению дюнного вала.

Обоснование защищаемых положений

1. Основными лимитирующими факторами естественного развития дюнного вала Куршской косы являются атмосферные осадки и ширина незатопленной части пляжа, снижающие количество благоприятных дней на 36-88% в год. Антропогенные факторы (рекреационное воздействие и берегоукрепление) изменяют шероховатость прибрежного рельефа.

Обзор работ по исследованию процессов развития прибрежных дюн позволил установить общий ряд факторов, стимулирующих и лимитирующих эоловый перенос и аккумуляцию. Для определения естественных лимитирующих факторов развития дюнного вала Куршской косы был выполнен анализ гидрометеорологических и гидродинамических условий с учетом

местных природных особенностей и режима [Hojan 2009, 2014; Danchenkov et al., 2019], что позволило дифференцировать и установить основные лимитирующие факторы естественного развития дюнного вала Куршской косы.

1. *Атмосферные осадки* (рис. 1, а). Атмосферные осадки вызывают намокание поверхности песчаных отложений. Сцепление частиц во влажных отложениях усиливается капиллярными и адгезионными (молекулярными) взаимодействиями. Атмосферные осадки в районе Куршской косы ограничивают число благоприятных для эолового переноса событий в среднем на 22–80%, а в отдельные месяцы – до 92%, являясь основным лимитирующим фактором.

2. *Ширина незатопленной части пляжа* (рис. 1, б), связывающая морфологические, метеорологические и гидродинамические факторы. Определяет как доступность полосы насыщения, так и потенциал размыва дюнного вала в ходе штормовых событий.

Фактор ширины незатопленной части пляжа включает в себя морфологические условия – уклон и ширину надводной части пляжа, определяемые предшествующими гидродинамическими явлениями; гидродинамические – высоту и длину значительных волн, высоту потока заплеска, уровень моря; метеорологические – направление и силу ветра. Ограничения, вызываемые шириной незатопленной части пляжа, связаны с критической длиной полосы насыщения F_c (минимально необходимой длины полосы насыщения (F_d), определяемой как расстояние от уреза до подножия дюнного вала для конкретного направления ветра) [Delgado-Fernandez, 2010; Montreuil, 2012]. При определенных направлениях ветра и глубоком проникновении волнения сокращение незатопленной ширины пляжа может привести к невозможности формирования сальтационного режима ветропесчаного потока, а также существенно увеличивает влажность песков пляжа. На Куршской косе фактор ширины незатопленной части пляжа ограничивает число благоприятных для эолового переноса событий в среднем на 2–48%, а в отдельные месяцы – до 90%, что позволяет отнести его ко второму по значимости лимитирующему фактору.

В совокупности (рис. 1, в) вышеуказанные лимитирующие факторы могут ограничивать число благоприятных для эолового переноса ситуаций на 36–88%, их годовой ход достаточно равномерный. В осенне-зимний период с присущей ему штормовой и циклонической активностью лимитирующие факторы проявляются наиболее существенно.

Антропогенное влияние на процессы развития дюнного вала выражено рекреационным воздействием (формирование зон угнетения растительности, развитие котловин выдувания на участках массового прохода на пляж), а также мероприятиями по укреплению дюнного вала (пескоулавливающие конструкции, противодефляционная защита и пр.). Коэффициенты шероховатости характеризуют естественные и антропогенные объекты по их

влиянию на приземные ветровые потоки на морском берегу Куршской косы. Ориентировочные коэффициенты шероховатости были получены посредством морфометрического анализа цифровых моделей наземного лазерного сканирования на участках с антропогенным воздействием и при его отсутствии (табл. 1).

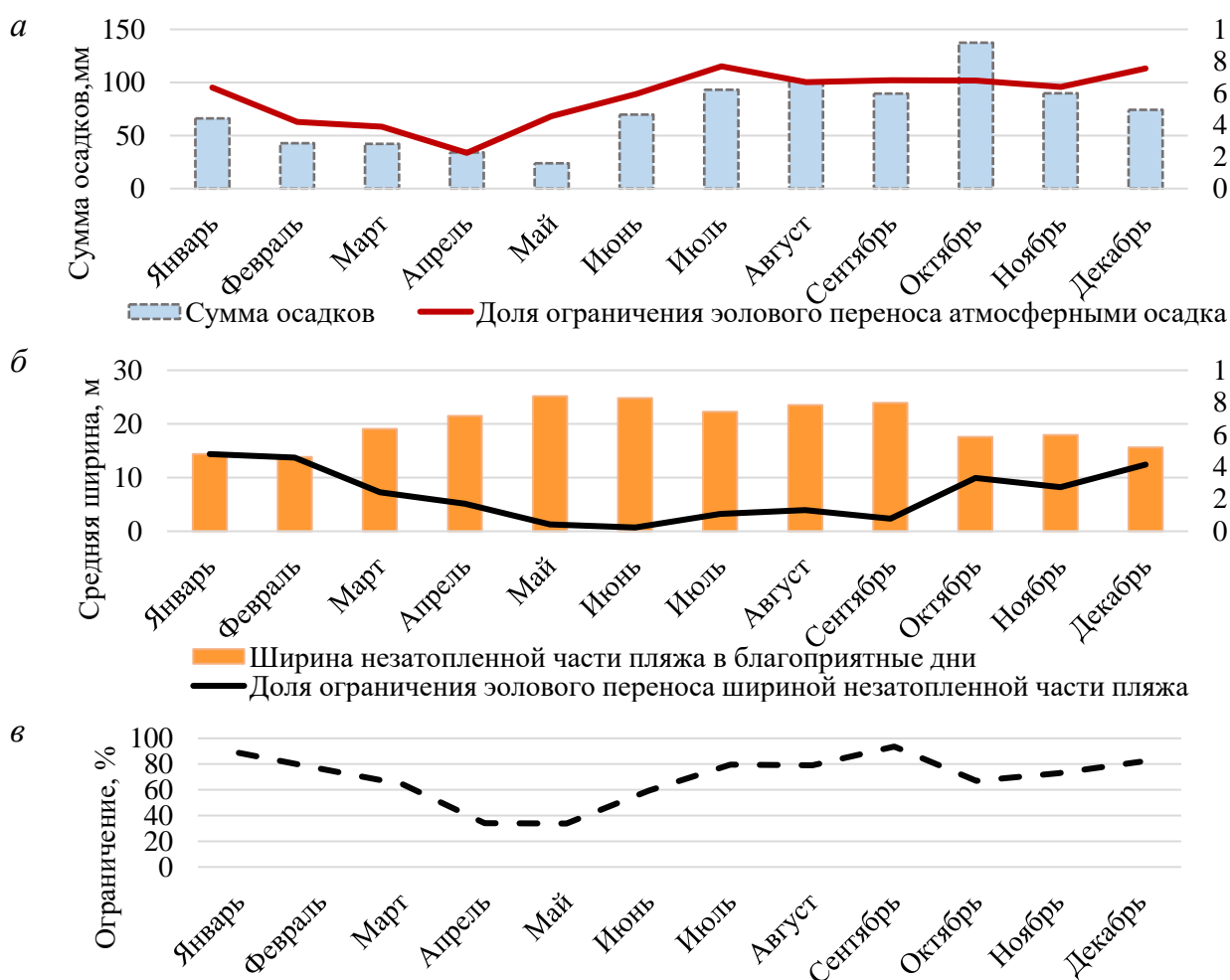


Рис. 1. Ограничение эолового переноса на берегу Куршской косы, вызванное атмосферными осадками (а); шириной незатопленной части пляжа (б); совместным влиянием этих факторов (в)

Таблица 1

Характерная шероховатость объектов морского берега Куршской косы

Объект	Коэффициент шероховатости z_0
Морской пляж	0,001–0,1
Эоловая подушка и основание пляжа	0,015–0,15
Ложе активной котловины выдувания	0,04–0,05
Наветренный склон дюнного вала (без растительности)	0,05–0,07
Наветренный склон дюнного вала (с растительностью)	0,05–0,30
Растительность в основании пляжа	0,07–0,30
Пескоулавливающие конструкции	0,22–0,38
Навалы елового лапника или ветвей	0,25–0,30 и более

2. Полуэмпирическая модель развития дюнного вала как основа разработки и реализации стратегии рационального управления, направленной на поддержание устойчивого состояния и минимизацию негативного воздействия антропогенных факторов.

На основе массива данных наблюдений за состоянием дюнного вала Куршской косы, результатов численного моделирования ветрового волнения и динамики пляжей и опубликованных функциональных зависимостей была построена упрощенная модель развития дюнного вала. В модель включены условия аккумуляции, дефляции, а также штормовой абразии. В модели использован ряд параметров, позволяющих учитывать природные факторы (силу и направление ветра, гранулометрический состав, влажность, доступную ширину пляжа, характеристики волнения), а также коэффициенты шероховатости, характеризующие степень влияния на ветровые потоки природных и антропогенных факторов.

Общее уравнение модели развития дюнного вала для применения в геоэкологической оценке и разработке стратегий рационального управления имеет вид (1), определяя вклад всех компонентов:

$$Q = Q_{ac} - Q_{er} - Q_{def} \oplus Q_b, \quad (1)$$

где Q_n – объем аккумулярованного песка на дюнном валу с учетом антропогенных факторов; Q_{er} – объем абразии дюнного вала; Q_{def} – объем потерь на дюнном валу вследствие ветровой дефляции с учетом антропогенных факторов; Q_b – оценка годовой динамики котловины выдувания при ее наличии на рассматриваемом сегменте, с учетом антропогенного воздействия, по уравнению упрощенной оценки годовой динамики котловины выдувания. При значениях $Q < 0$ развитие дюнного вала можно характеризовать как деградацию на рассматриваемом участке вследствие совокупного воздействия природных и антропогенных факторов; при $Q > 0$ развитие дюнного вала протекает в аккумулятивной форме вследствие проводимых восстановительных и защитных мероприятий (при их наличии) или естественных аккреционных процессов.

Базовые зависимости, используемые в компонентах модели (константы и переменные). Скорость сдвига U_* определяется исходя из логарифмического закона Кармана (2):

$$U_* = 0,4 U(z) / \ln(z/z_0), \quad (2)$$

где U – скорость ветра на высоте измерения z ; z_0 – коэффициент шероховатости.

При антропогенном воздействии на дюнный вал изменяется аэродинамический коэффициент шероховатости z_0 поверхности, влияя на скорость сдвига U_* . Изменение шероховатости при антропогенном воздействии может быть связано с установкой пескоудерживающих конструкций, заборчиков, навалов лапника, изменений в характеристиках растительного покрова и пр. Учет изменений шероховатости может выполняться на основе

натурных наблюдений с использованием индекса шероховатости TRI по [Riley et al., 1999] либо ориентировочных значений (например, табл. 1). Пороговая скорость сдвига U_{*tm} определяется по выражению (3) с учетом влажности песков [Bagnold, 1941; Dong et al., 2002; Duarte-Campos et al., 2018]:

$$U_{*tm} = 0,1 \sqrt{g D_{50} \frac{\rho_s}{\rho_a} (1 + C * M)}, \quad (3)$$

где ρ_a – плотность воздуха; ρ_s – плотность песков; M – влажность песков; C – коэффициент, зависящий от медианного диаметра D_{50} [Dong et al., 2002].

Аккумулятивный компонент модели. Объем аккумуляции Q_{ac} определяется как (4) [Bagnold, 1941; Kamawura, 1951; Duarte-Campos et al., 2018]:

$$Q_{ac} = \begin{cases} 3 \cos(\alpha) C_k \frac{\rho_a}{g} (U_{*b} - U_{*tmb})(U_{*b} + U_{*tmb})^2, & R < 0,1; UBW > F_c \\ 0, & R > 0,1; UBW < F_c \end{cases}, \quad (4)$$

где U_{*b} – скорость сдвига, характерная для пляжей; U_{*tmb} – пороговая скорость сдвига для пляжа; R – сумма осадков за время шага расчета; UBW – ширина незатопленного пляжа; F_c – критическая длина полосы насыщения.

Дефляционный компонент модели. Объем дефляции Q_{def} на дюнном валу может быть определен посредством (5):

$$Q_{def} = \begin{cases} 3 C_{def} C_k \frac{\rho_a}{g} (U_{*d} - U_{*tmd})(U_{*d} + U_{*tmd})^2, & R < 0,1 \\ 0, & R > 0,1 \end{cases}, \quad (5)$$

где U_{*d} – скорость сдвига на дюнном валу; U_{*tmd} – пороговая скорость сдвига для дюнного вала; R – сумма осадков за время шага расчета; C_{def} – косинусный эффект дефляции; C_k – константа Камавюры (2.78).

Абразионный компонент модели. Упрощенное соотношение для определения абразии прибрежных дюн Van Rijn [2009] было принято для полуэмпирической модели, поскольку численные модели (например, [Roelvink, 2009]) при достаточно высокой точности [Cohn et al., 2019] требуют значительных вычислительных мощностей [Bart, 2017], а модели, основанные на геометрических методах [Kriebel, 1982; Hallermeier and Rhodes, 1989], критикуются за их неточность [Cooper and Pilkey, 2004]. Объем абразии дюнного вала Q_{er} за счет воздействия волн и штормового нагона может быть определен по соотношению (6):

$$Q_{er} = \begin{cases} 0,6 A_{ref} \left(\frac{D_{50,ref}}{D_{50}}\right)^{1,3} \left(\frac{S}{S_{ref}}\right)^{1,3} \left(\frac{H_s}{H_{s,ref}}\right)^{0,5} \left(\frac{T_p}{T_{p,ref}}\right)^{0,5} \left(\frac{\tan\beta}{\tan\beta_{ref}}\right)^{0,3} \left(\frac{1+\theta}{100}\right)^{0,5}, & UBW < 0 \\ 0, & UBW > 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где A_{ref} – опорный объем размыва ($100 \text{ м}^3/\text{м}$); S – высота нагона; H_s – высота значительных волн; T_p – пиковый период волн; $\tan\beta$ – тангенс уклона; D_{50} – медианный диаметр; θ – угол подхода волн к нормали берега в градусах; переменные с индексом $_{ref}$ выражают принятые опорные значения.

Для оценки тенденций в динамике котловины выдувания был выполнен анализ натурных наблюдений и получено уравнение годовых изменений объема котловины в зависимости от изменения ее площади. Антропогенное воздействие на котловину выдувания характеризуется ее активным использованием для

выхода отдыхающих на морской пляж. В результате регрессионного анализа получено уравнение для упрощенной оценки годовой динамики котловины выдувания Q_b с учетом антропогенного воздействия и морфометрических изменений (7):

$$Q_b = 3,1 * Ar \quad (R^2=0,881), \quad (7)$$

где Ar – годовое изменение площади котловины выдувания.

Калибровка и верификация полученной модели развития дюнного вала выполнялась на массиве 40 съемок наземного лазерного сканирования на морфологически и морфодинамически различных участках (рис. 2).

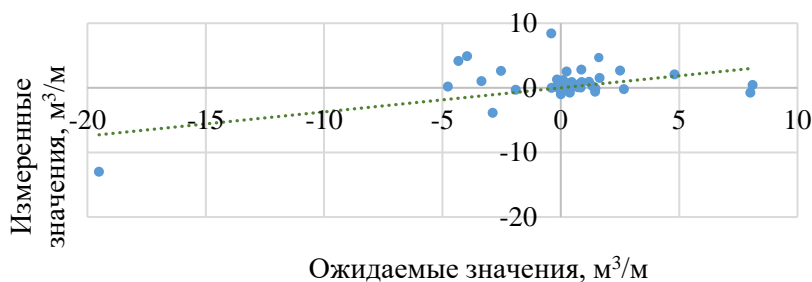


Рис. 2. Связь измеренных значений изменения объема дюнного вала и ожидаемых значений по модельным расчетам

Величина среднеквадратического отклонения для результатов расчета по балансовой модели и результатов мониторинга наземного лазерного сканирования на полигонах составила 2–3, средняя относительная погрешность 15–20%, что свидетельствует об улучшении ранее полученных результатов [Delgado-Fernandez, 2011; Montreuil, 2012; Duarte-Campos et al., 2018]. Использование предложенной модели развития дюнного вала позволяет характеризовать развитие исследуемых участков и обосновывать рациональные стратегии управления с целью минимизации негативного воздействия природных и антропогенных факторов.

3. Геоэкологическая оценка аккумулятивного морского берега на основе морфодинамического подхода и зонирование дюнного вала по показателю потенциала возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов с разработкой рекомендаций рационального управления дюнным валом Куршской косы с учетом локальных морфодинамических особенностей.

Ценность дюнного вала для Куршской косы обусловлена его защитной ролью от штормовых воздействий и эолового ветропесчаного потока для внутренних особо охраняемых территорий и поселений. Отсутствие единого подхода к геоэкологической оценке изменений и состояния природно-антропогенных систем обуславливает необходимость разработки частных подходов, которые учитывали бы свойства и функциональные связи конкретных

систем. Разработка подхода к геоэкологической оценке аккумулятивных морских берегов является важным этапом на пути к рациональному природопользованию на этих территориях и защите внутренних территорий от неблагоприятных процессов. На основе анализа стимулирующих и лимитирующих факторов развития дюнного вала, природных и антропогенных процессов автором предложен частный подход к геоэкологической оценке морского берега при наличии дюнного вала (рис. 3).



Рис. 3. Схема геоэкологической оценки морского берега при наличии дюнного вала

При управлении прибрежной зоной высока значимость наблюдений за морфологическим состоянием берега в различных масштабах [например, Amore et al., 1994; Galofre and Montoya, 1996; Cevik and Yuksel, 1997; Araujo, 2014], поскольку береговая система, как и любая природная система, обладает

сложными связями. Характер изменений, происходящих в береговой зоне, еще более усложняется в результате антропогенного воздействия. Предложенный диагностический подход к геоэкологической оценке проблемных зон на дюнном валу на первых этапах позволяет определять участки с потенциалом возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов, а на последних – планировать стратегии рационального управления, направленного на поддержание устойчивого состояния с учетом локальных морфодинамических особенностей.

Развитие дюнного вала – барьера против последствий негативных гидрометеорологических явлений – неотъемлемо связано с состоянием и устойчивостью пляжей. В определении прибрежных дюн как «форм рельефа, сформированных у песчаных пляжей при ветровом переносе песчаных наносов и закрепленные растительностью» [Несп, 2002] песчаный пляж является отправной точкой их развития, источником подпитывающего материала и буфером от волнового воздействия. Таким образом, состояние прибрежных дюн и их долгосрочная способность защищать внутренние территории напрямую связаны с состоянием прилегающих пляжей. Предложенный диагностический подход основан на получении положения береговой линии со спутниковых изображений видимого спектра с последующей корректировкой ширины пляжа с учетом гидродинамических условий.

Предложенное сочетание параметров корректировки ширины пляжа – регионально адаптированной модели высоты волнового наката [Raprotny et al., 2014], а также уровня моря – позволяет уточнить ширину пляжа в момент получения спутникового изображения (рис. 4, а). С использованием данных ширины пляжа со спутниковых изображений в качестве опорных совместно с результатами моделирования гидродинамических условий на примере Куршской косы был выполнен анализ динамики ширины пляжа между спутниковыми измерениями (рис. 4, б), поскольку регулярное получение спутниковых данных на практике затруднено наличием облачности и периодом обращения спутников [Li and Roy, 2017; Sudmanns et al., 2019].

На основе полученных временных рядов ширины незатопленной части пляжа для берега Куршской косы был выполнен анализ проблемных участков с использованием принципа «горячих точек» [Kraus and Galgano, 2001] (рис. 5). Межгодовые процентиля повторяемости превышения критической отметки незатопленной части пляжа использовались как объективный критерий выделения проблемных зон [Cabezas-Rabadan, 2019].

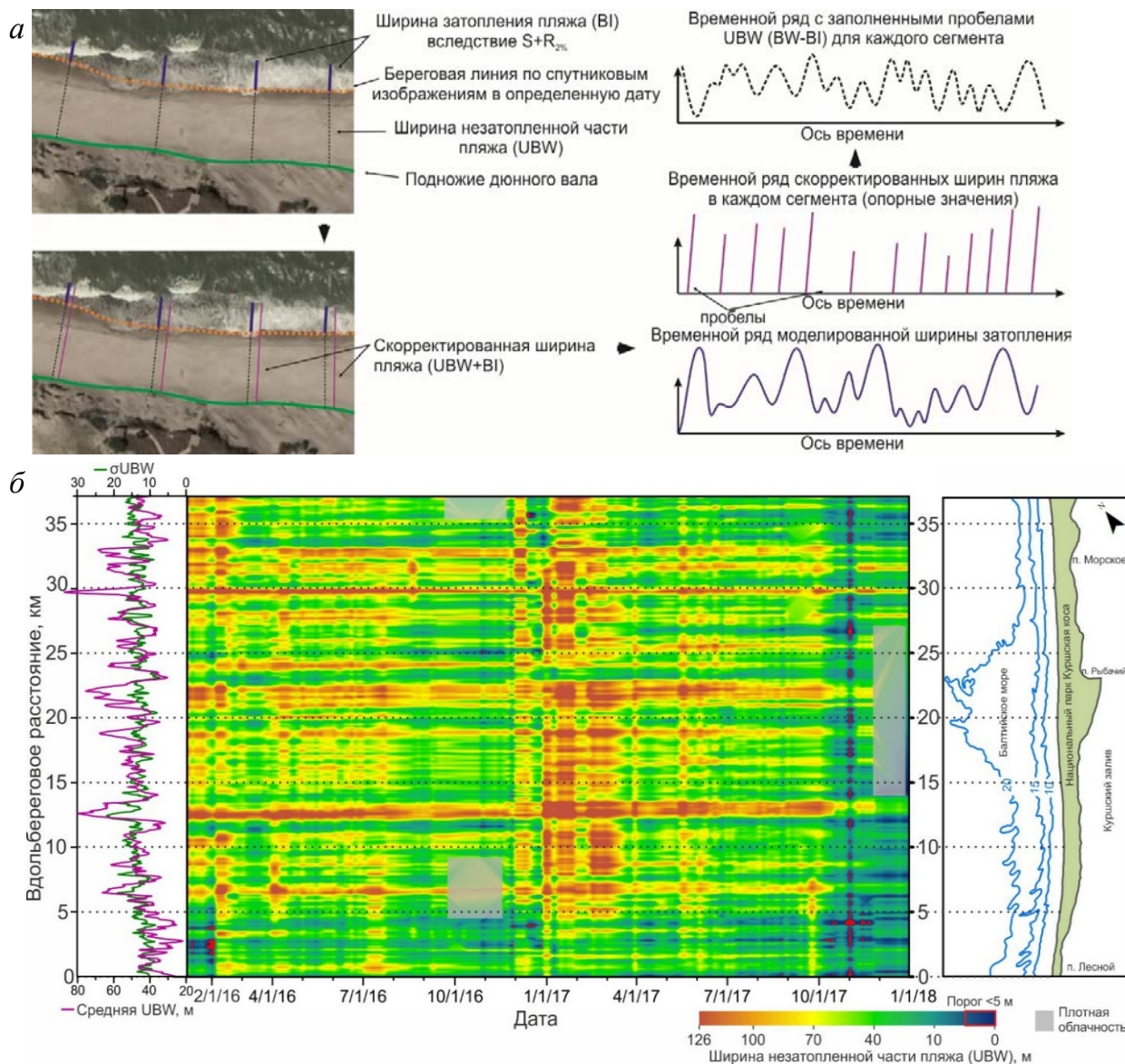


Рис. 4. Корректировка незатопленной ширины пляжа к гидродинамическим условиям (а); пространственно-временная схема незатопленной ширины пляжей Куршской косы (б)

В результате были выделены участки с существенным превышением повторяемости критической ширины незатопленной части пляжа, поскольку абразия дюнного вала наблюдается при локальных превышениях суммарным уровнем моря (высота нагона и волнового наката) подошвы вала. С использованием предложенной модели подтверждена интенсивность деградации дюнного вала на 13,5-м километре Куршской косы, а также выявлен новый участок на 15-м километре косы, где возможен размыв тела дюнного вала и связанные с проникновением морских вод вглубь косы неблагоприятные процессы (рис. 5).

Темпы деградации с учетом потенциальной эоловой аккумуляции, дефляции и абразии, а также существующего антропогенного воздействия для участка №1 были оценены в $5,6 \text{ м}^3/\text{м}/\text{год}$. Такие темпы могут привести к размыву дюнного вала (объем $\sim 487 \text{ м}^3/\text{м}$) на этом участке в течение 87 лет. В работе Сергеева [2015], по независимой оценке, приводится срок такого размыва к 2100

году (85 лет). Второй участок (№2) расположен на 15-м километре косы, на котором наблюдалась высокая повторяемость (до 5%) превышения критической отметки ширины пляжа. Темпы деградации на данном участке оцениваются выше ($9,2 \text{ м}^3/\text{м}/\text{год}$) за счет большей высоты дюнного вала (11–13 м). Размыв $920 \text{ м}^3/\text{м}$ дюнного вала может быть достигнут в течение 100 лет при сохранении тенденций.

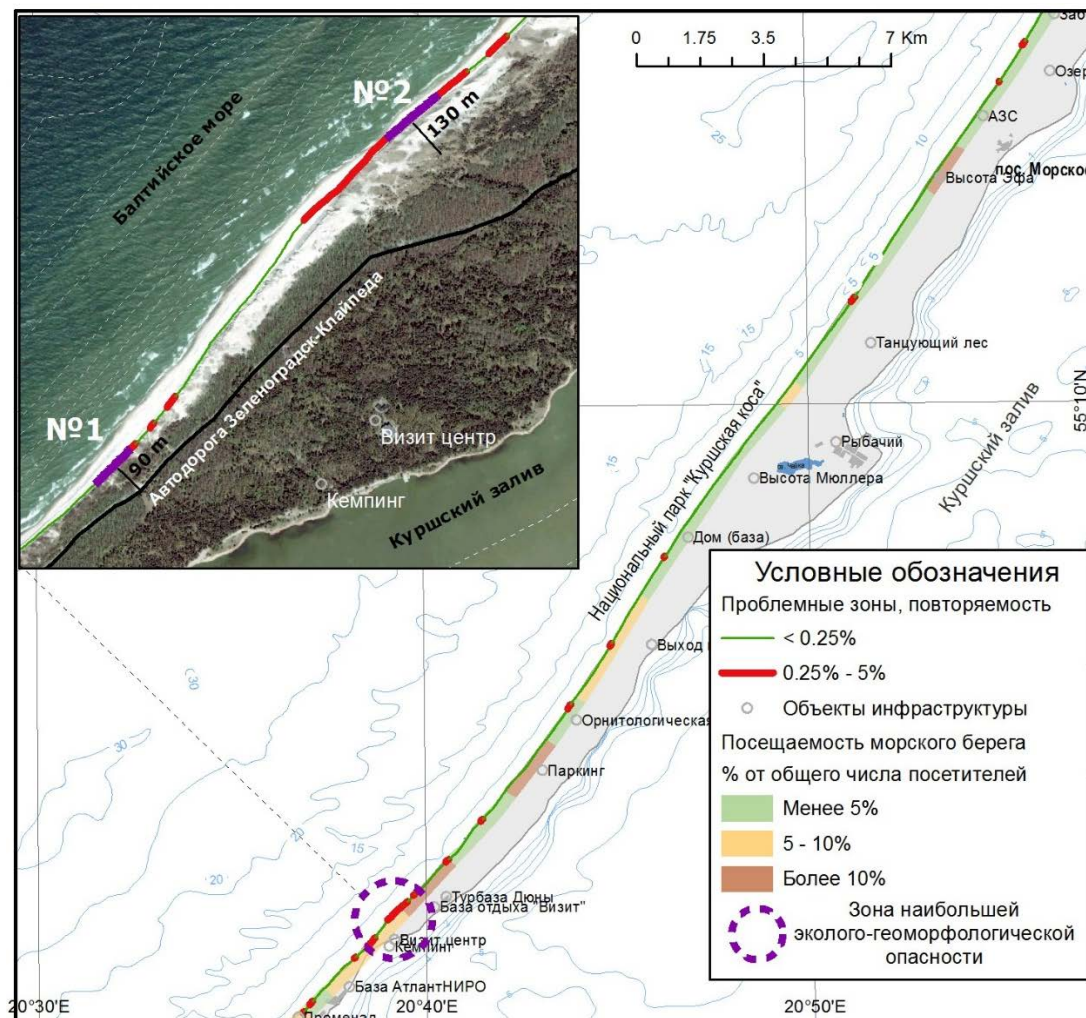


Рис. 5. Зоны потенциального возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов на берегу Куршской косы

Для оценки потенциальной опасности для экосистем и инфраструктуры национального парка от вероятного прорыва тела дюнного вала был выполнен гидрологический анализ зон подтопления по методике *hec-ras* [Gallien et al., 2018] в условиях штормов различной повторяемости (ежегодной и 1 раз в 25 лет), а также при прогнозируем росте регионального уровня моря (рис. 6). Выполненный гидрологический анализ показал наличие потенциальной опасности для внутренних территорий при нарушении целостности вала. Предполагаемая область затопления может составить в среднем 370000 м^2 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 [Didier et al., 2019] и естественный

гравитационный дренаж [Gallen et al., 2011; 2014] играли существенную роль в формировании зон затопления. В рассмотренных штормовых сценариях слабое различие в площади зон затопления связано с потенциальным стоком морских вод в пресноводный Куршский залив (в объеме 1180–5500 м³).

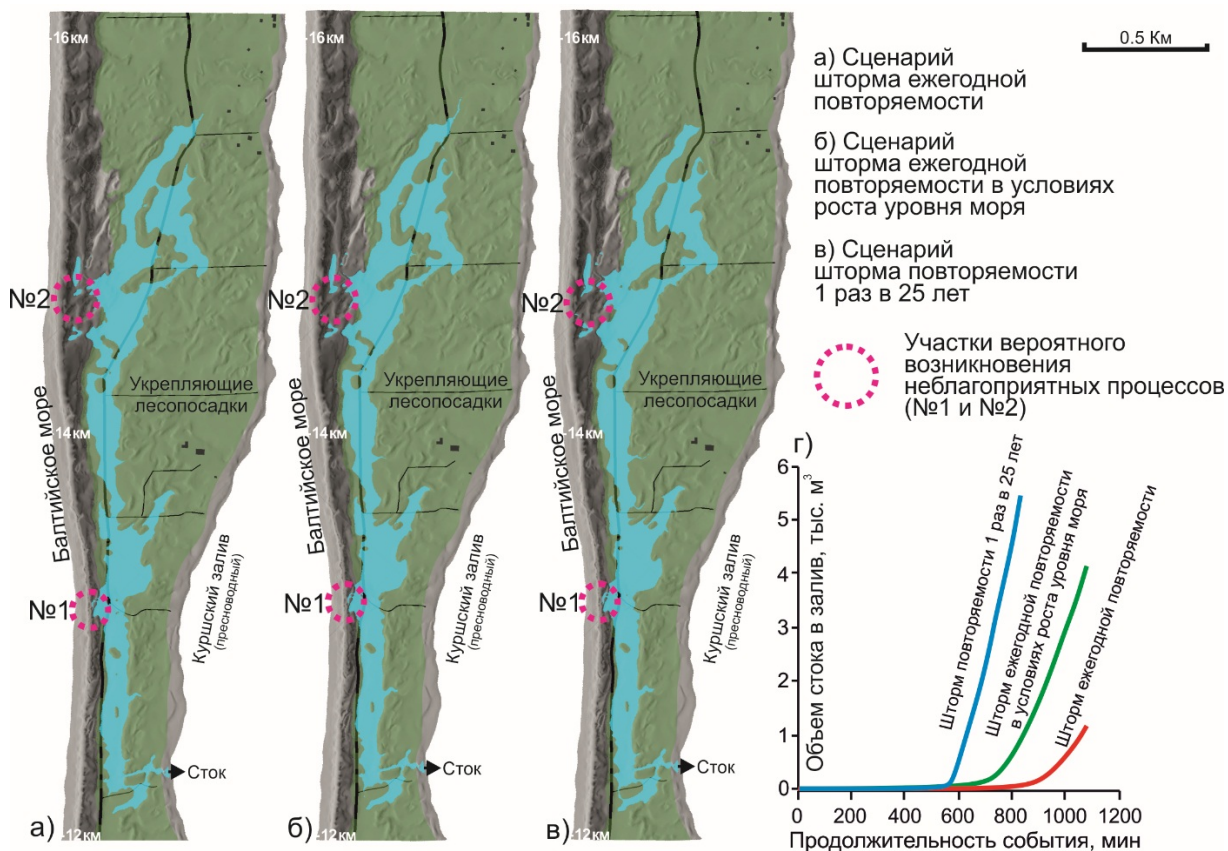


Рис. 6. Пространственные границы подтопления территории Куршской косы при различных сценариях штормового воздействия

Результаты геоэкологической оценки позволили предложить схему организации рационального управления, направленную на поддержание устойчивого состояния дюнного вала национального парка «Куршская коса» с использованием морфодинамического подхода. На основе проведенной с использованием модели оценки факторов выбраны проградационная стратегия и стратегия динамической консервации как наиболее рациональные в условиях особо охраняемой природной территории с учетом морфодинамических условий и антропогенного воздействия для сохранения устойчивости дюнного вала и его защитной роли (рис. 7, антропогенные факторы приведены по состоянию на 2019 г.).

Проградационная стратегия может быть использована на участках, где ежегодная повторяемость критического затопления пляжа не превышает 1–1,1% и в системе есть потенциал восстановления, а особенностью управленческой стратегии является использование естественных морфолитодинамических процессов. При проградационной стратегии рекомендуется использовать полупроницаемые пескоулавливающие конструкции для наращивания в основании вала новой авандюны, а на открытых участках выполнить

противодефляционную защиту. Защитная мера стратегии – организация условий, затрудняющих перемещение отдыхающих вне оборудованных переходов (ограждения вдоль гребня, а также обсадка колючими кустарниками) с подробным информированием посетителей об ограничениях, связанных с проведением восстановительных работ.



Рис. 7. Схема рекомендуемых стратегий локального управления пляжем и дюнным валом для национального парка «Куршская коса»

Стратегия динамической консервации рекомендована для ряда сегментов с повторяемостью критического затопления пляжа более 1–1,1% (2,4 км берега), где необходимо применять ряд восстановительных и поддерживающих мероприятий при утере дюнным валом допустимого уровня защиты внутренних территорий. Рекомендуется установка многорядных ячеистых пескоулавливающих конструкций в основании вала (а также вдоль бровки) для генерации эоловых форм, которые станут первичной линией волновой абразии, укрытие абразированных наветренных склонов (геосетками или тростниковыми матами) с обсадкой травами по достижении склоном угла естественного откоса. На период реализации динамической консервации следует полностью исключить рекреационное воздействие. На отдельных участках (например, участки №1 и №2) рекомендуется выполнить локальную подпитку пляжа для формирования аккомодационного пространства (стабильное увеличение ширины на 10 м может позволить достигнуть положительного баланса наносов).

Проведенное исследование показало возможность сочетания гидродинамического и гидрологического моделирования, спутниковых наблюдений, моделирования развития дюнного вала в единую геоэкологическую оценочную схему, которая позволяет анализировать и предупреждать опасности для аккумулятивного морского берега. Полученные результаты могут улучшить существующую систему или стать основой планируемой системы управления прибрежной зоной, в особенности в условиях особо охраняемой природной территории.

Заключение

В ходе диссертационного исследования были получены следующие выводы.

1. По результатам выполненного комплексного анализа физико-географических условий были определены наиболее значимые сезонные факторы развития дюнного вала Куршской косы. Развитие дюнного вала происходит при комплексном сочетании метеорологических, геоморфологических и гидродинамических факторов. В условиях аккумулятивного берега юго-восточной части Балтийского моря основными стимулирующими факторами являются эффективные ветра (скоростью выше критической для отрыва песков от поверхности, открытых румбов) в совокупности с шириной незатопленной части пляжа, достаточной для насыщения материалом ветропесчаного потока. Характерная для Куршской косы критическая скорость ветра в зависимости от влажности, температуры воздуха и атмосферных осадков в среднем составляет 5,3–5,9 м/с для всех направлений. При ветрах открытых румбов как для ветров с углами подхода менее 40° к нормали берега, так и для ветров с углами подхода 40° – 75° к нормали берега характерна критическая скорость 6–7 м/с.

2. Наиболее существенный лимитирующий фактор развития дюнного вала Куршской косы – атмосферные осадки, сокращающие число благоприятных к эоловому переносу дней на 22–80% ввиду намокания песка. Совокупность морфологических и гидродинамических факторов, обобщенных в лимитирующем факторе ширины незатопленной части пляжа, влияет как на развитие ветропесчаного потока, так и на потенциал абразии дюнного вала. Анализ антропогенного воздействия показал его влияние на аэродинамический коэффициент шероховатости прибрежного рельефа. Изменение шероховатости вследствие антропогенного воздействия имеет разнонаправленный характер, снижаясь при угнетении растительного покрова и в котловинах выдувания до 0,04–0,07 м и увеличиваясь при проведении берегоукрепительных мероприятий до 0,3–0,38 м и более.

3. На основе многолетних полевых мониторинговых наблюдений за состоянием дюнного вала и котловины выдувания, результатов численного моделирования и имеющихся функциональных зависимостей была построена полуэмпирическая модель развития дюнного вала. Были введены условия ветровой аккумуляции и дефляции, волнового размыва, приведены характерные для антропогенного воздействия коэффициенты аэродинамической шероховатости. Для упрощенной оценки динамики котловины выдувания было получено уравнение зависимости динамики объема от динамики ее площади. Полуэмпирическая модель естественного развития дюнного вала выступает основой геоэкологической оценки, а также разработки и осуществления

стратегии рационального управления, направленной на поддержание его устойчивого состояния и минимизацию негативного воздействия антропогенных факторов. Верификация модели проводилась на массиве данных наблюдений наземного лазерного сканирования 2014–2018 гг. на морфологически и морфодинамически различных участках дюнного вала и показала улучшение качества моделирования развития дюнного вала в сезонном масштабе в сравнении с представленными ранее упрощенными моделями.

4. Был разработан частный подход к геоэкологической оценке морского берега при наличии дюнного вала, позволяющий определять участки с потенциалом возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов (используя концепцию «горячих точек» и процедуры нормирования), а также планировать стратегии рационального управления, направленные на поддержание устойчивого состояния дюнного вала с учетом локальных морфодинамических особенностей. Показана возможность сочетания гидродинамического и гидрологического моделирования, спутниковых наблюдений, модели развития дюнного вала и сведений об антропогенной нагрузке в единую оценочную систему, которая позволяет анализировать и предупреждать опасности для аккумулятивного морского берега.

5. На основе предложенного подхода выполнена геоэкологическая оценка и зонирование дюнного вала участка Куршской косы по потенциалу возникновения эколого-геоморфологических опасностей. Участки высокого (0,25–5% в год) потенциала возникновения неблагоприятных эколого-геоморфологических процессов характерны на 13–15-м км косы, где были подтверждены интенсивность деградации дюнного вала, потенциал подтопления 370 тыс. м² территории косы, включая автодорогу и укрепляющие лесопосадки, и стока 1–5 тыс. м³ морских вод в Куршский залив в условиях штормов (не только повторяемостью 1 раз в 25 лет, но и статистически ежегодных).

6. Статус особо охраняемой природной территории Куршской косы и пространственная дифференциация зон потенциальных эколого-геоморфологических опасностей обуславливают специфику применения мер защиты и восстановления дюнного вала. По результатам выполненной геоэкологической оценки предложена схема рекомендуемых стратегий локального управления пляжем и дюнным валом, включающая реализацию стратегии динамической консервации и проградационной стратегии в зависимости от характера проявления морфодинамических процессов и антропогенного воздействия. Предлагается комплексно использовать потенциал естественных морфодинамических процессов с применением рациональных и обоснованных берегозащитных мероприятий, учитывающих локальные особенности состояния и развития пляжей и дюнного вала.

Публикации по теме исследования в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Данченков А.Р. Моделирование ветрового волнения и ширины затопления пляжа для исследований прибрежных дюн национального парка «Куршская коса» // Успехи современного естествознания. 2020. № 3. С. 65–71.
2. Danchenkov A., Belov N., Stont Z. Using the terrestrial laser scanning technique for aeolian sediment transport assessment in the coastal zone in seasonal scale // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2019. Vol. 223. P. 105–114.
3. 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. ES4003.
4. Volkova I. I., Shaplygina T. V., Belov N. S., Danchenkov A. R. Eolian coastal-marine natural systems in the Kaliningrad Region // Terrestrial and Inland Water Environment of the Kaliningrad Region. Cham: Springer, 2017. P. 147–177.
5. Белов Н.С., Волкова И.И., Шаплыгина Т.В., Данченков А.Р. Специфика применения технологии наземного лазерного сканирования при мониторинге береговой зоны // Маркшейдерский вестник. 2014. № 5. С. 49–51.

Публикации в других изданиях

1. Белов Н.С., Данченков А.Р., Пичугина А.В., Гриценко В.А. Дифференциально-геометрические характеристики песчаных пляжевых поверхностей юго-восточной Балтики // Геология морей и океанов. Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 2019. С. 44–48.
2. Данченков А. Р., Белов Н. С., Гриценко В. А. Полуэмпирическая модель взаимодействия песчаной поверхности с ветром на основе данных лазерного сканирования // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. 2018. С. 132–134.
3. Белов Н.С., Данченков А.Р. Использование беспилотных летательных аппаратов при географических исследованиях // Аллея науки. 2017. Т. 2, № 16. С. 43–48.
4. Белов Н.С. Данченков А.Р. Возможности совместного использования БПЛА и наземного лазерного сканирования для мониторинга береговой зоны. // Геология морей и океанов. Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 2017. С. 84–88.
5. Danchenkov A. Modern technology in dune complexes monitoring on the Vistula spit // Proceedings of International Conference «Managing risks to coastal regions and communities in a changing world» (EMEC'S'11 – SeaCoasts XXVI), 2016. 3. 186–192. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b43173e38ee.
6. Данченков А. Р., Белов Н. С. Использование оператора кэнни при обработке результатов наземного лазерного сканирования // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. №. 4-2. С. 142–147.
7. Данченков А. Р., Белов Н. С. Использование данных дистанционного зондирования при исследовании динамики форм рельефа прибрежной зоны на примере Балтийской косы Калининградской области // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. №. 9-3. С. 6–10.
8. Данченков А.Р., Белов Н.С. Волнометрическая оценка штормового воздействия на дюнно-грядовые комплексы Куршской косы Балтийского моря // Геология морей и океанов. Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 2015. С. 64–68.
9. Белов Н.С., Волкова И.И., Шаплыгина Т.В., Данченков А.Р. Применение технологии наземного лазерного сканирования при мониторинге береговой зоны // Изыскательский вестник. 2014. №1 (18). С. 24–27.

Данченков Александр Романович

**Геоэкологическая оценка морского берега с использованием
морфодинамического подхода в условиях особо охраняемой природной
территории (на примере Куршской косы)**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Подписано в печать «__» октября 2020 г.

Формат 60x90 1/11 Усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в типографии

Издательства Балтийского федерального университета имени И. Канта

236022, г. Калининград, ул. Гайдара, 6