

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Другов Михаил Дмитриевич

**Оценка динамики рельефа Анапской пересыпи по разновременным
трехмерным данным дистанционного зондирования**

25.00.33 — Картография

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель – *Тутубалина Ольга Валерьевна, кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова*

Официальные оппоненты – *Погорелов Анатолий Валерьевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой геоинформатики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»*

Пьянков Сергей Васильевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Корзинин Дмитрий Викторович, кандидат географических наук, научный сотрудник ФГБУН «Институт океанологии РАН им. П. П. Шишова»

Защита диссертации состоится «9» декабря 2021 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/51267966/

Автореферат разослан «26» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук

Е. Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Пограничное положение морских берегов делает их очень чувствительными к внешним воздействиям и обуславливает их высокую динамичность. Резкие изменения в береговой зоне в результате экстремальных штормов сменяются медленным и поступательным переносом материала под действием прибоя и ветра. Для выявления таких изменений требуются данные с высоким пространственным и временным разрешением. Традиционно основными методами получения информации о рельефе береговой зоны являлись топографические съёмки в наземной части и батиметрические — в подводной. Измерения проводятся либо по сети профилей, либо вдоль линий, ограничивающих различные элементы рельефа берега и называемых структурными. Однако охват изучаемой местности при высокой частоте точек съёмки получается сравнительно небольшим. Решить эту проблему помогает использование данных дистанционного зондирования (ДЗ). Спутниковые снимки в видимом диапазоне применяются для оценки динамики отдельных элементов берегового рельефа, однако информация, получаемая с их помощью, не даёт возможности получать трёхмерные модели рельефа. Для их создания могут использоваться трёхмерные данные ДЗ, имеющие кроме двух плановых координат ещё и третью — высотную.

Одним из источников трёхмерных данных ДЗ является воздушное лазерное сканирование (ВЛС). Другим современным методом получения трёхмерных данных ДЗ является съёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Этот метод позволяет получать трёхмерные модели местности с ещё большей детальностью и оперативностью. Данные ВЛС и съёмок с БПЛА активно применяются для изучения рельефа береговой зоны и его динамики. Однако методы их совместной обработки для решения задачи оценки динамики рельефа, в т. ч. с помощью картографирования, разработаны недостаточно.

Примером динамичной береговой геосистемы является Анапская пересыпь, находящаяся на северо-западе Черноморского побережья Кавказа. Эта аккумулятивная береговая форма длиной примерно 47 км — один из немногих в нашей стране уникальных рекреационно-бальнеологических районов, ценный благодаря песчаным пляжам и дюнам. Однако массовое строительство и рост числа отдыхающих приводит к нарушению и деградации экосистем пересыпи. Также сильное воздействие на геосистему Анапской пересыпи оказывают опасные гидрометеорологические явления, например, мощные циклоны. Вызываемые ими шторма и наводнения приводят к сильному размыву пляжа и дюн.

Таким образом, в настоящий момент отсутствует методика совместной обработки данных ВЛС и съёмок с БПЛА для изучения рельефа береговой зоны. Проведение с использованием подобных данных оценки динамики береговых аккумулятивных форм рельефа барьерного типа, в т. ч. Анапской пересыпи, является актуальной научной задачей в силу их уязвимости перед

высокой антропогенной нагрузкой и воздействием опасных гидрометеорологических явлений.

Цель работы состоит в разработке методики оценки динамики береговых аккумулятивных форм рельефа барьерного типа, основанной на применении трёхмерных данных ДЗ, на примере Анапской пересыпи.

Достижение поставленной цели требует решения научных **задач**:

1. Обобщение мирового опыта обработки и применения данных ВЛС и съёмок с БПЛА для изучения рельефа береговой зоны моря
2. Разработка методики обработки трёхмерных данных ДЗ (ВЛС и съёмок с БПЛА) и создания по ним цифровых моделей рельефа (ЦМР) для оценки динамики береговых аккумулятивных форм рельефа барьерного типа
3. Разработка методики автоматизированного выделения структурных линий береговых аккумулятивных форм рельефа барьерного типа по ЦМР
4. Создание серии карт динамики рельефа исследуемых участков Анапской пересыпи
5. Расчёт объёмов перенесённого материала на исследуемых участках Анапской пересыпи
6. Анализ динамики рельефа на исследуемых участках Анапской пересыпи на основе созданных карт и количественной оценки объёмов перенесённого материала

Научная новизна работы:

1. Предложены пути совместного использования данных ВЛС и данных съёмок с БПЛА для картографирования динамики береговых аккумулятивных форм барьерного типа
2. Разработана оригинальная методика автоматизированного выделения структурных линий рельефа береговых аккумулятивных форм барьерного типа
3. Созданы карты нового содержания — карты смещения гребня фронтального дюнного вала (ФДВ), типов динамики поперечного профиля ФДВ, сальдо перенесённого материала
4. Впервые для Анапской пересыпи выполнена оценка объёма перенесённого материала по отдельным склонам ФДВ и на участке пляжа, расположенного перед ним

Объектом исследования является Анапская пересыпь.

Предмет исследования — методы оценки динамики береговых аккумулятивных форм рельефа по трёхмерным данным дистанционного зондирования.

Защищаемые положения:

1. Совместное использование разновременных данных ВЛС и данных съёмок с БПЛА позволяет проводить количественную оценку динамики береговых аккумулятивных форм рельефа барьерного типа
2. Методика автоматизированного выделения структурных линий на основе трёхмерных данных ДЗ позволяет достоверно картографировать динамику аккумулятивных береговых форм рельефа барьерного типа
3. Для характеристики динамики дюнного рельефа разработаны карты нового содержания, составленные на исследуемые участки Анапской пересыпи: карты смещения гребня ФДВ, типов динамики поперечного профиля ФДВ, сальдо перенесённого материала.

Методология. Исследование базируется на научно-методических принципах тематического и геоморфологического картографирования, разработанных К. А. Салищевым, А. М. Берлянтом, А. И. Спиридоновым; методах обработки данных ДЗ, разработанных Ю. Ф. Книжниковым, В. И. Кравцовой, Х. Хиршмюллером, А. В. Погореловым; методах выделения и анализа положения структурных линий рельефа береговой зоны, разработанных Х. Стокдон, К. Доран, А. Сэлленджером; опыте исследования берегов Чёрного моря в целом В. П. Зенковичем, Г. В. Выхованец и, в частности, Анапской пересыпи Р. Д. Косьяном, В. В. Крыленко, В. И. Кравцовой, Е. С. Бойко. В рамках работы применяются аэрокосмический, геоинформационный, картографический методы, методы математической статистики и теории обработки сигналов.

Фактический материал, личный вклад автора. В основе работы лежат авторские исследования, проводимые с 2015 г. в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, и полевые работы, проведённые автором на Анапской пересыпи в 2016 г. В качестве исходных материалов в работе выступают данные ВЛС и аэрофотосъёмки Анапской пересыпи в 2013 и 2015 гг., полученные группой под руководством Е. С. Бойко, данные съёмки с БПЛА в 2018 и 2019 гг., выполненных под руководством В. В. Крыленко, результаты полевых геодезических работ и дешифрирования аэрофотоснимков.

Апробация и степень достоверности работы, публикации. Достоверность полученных результатов подтверждается полевыми обследованиями, проведёнными автором на Анапской пересыпи, докладами на всероссийских и международных конференциях, публикациями статей в рецензируемых научных изданиях.

Результаты исследования были доложены на XIV открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2016), XXIV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2017), XIII

международной ландшафтной конференции «Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов» (Воронеж, 2018), международной конференции ИнтерКарто/ИнтерГИС-24 «Цифровая Земля и устойчивое развитие территорий» (Петрозаводск, 2018), всероссийской конференции «VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование» (Москва, 2020), XXVII международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2020).

По теме исследования опубликовано 8 работ: 3 статьи в изданиях, включённых в базы Scopus, WoS и RSCI WoS, 2 статьи в сборниках и 3 тезисов докладов.

Практическая значимость и внедрение. Разработанные методы целесообразно применять для мониторинга рельефа Анапской пересыпи во избежание снижения её рекреационно-хозяйственного потенциала и разрушения уникальной геосистемы. Полученные результаты могут быть использованы в качестве рекомендации для местных органов власти при регламентировании строительства и городском планировании на территории Анапской пересыпи.

Отдельные материалы исследования использованы в рамках работ по гранту РФФИ 18-05-00333 «Выявление взаимосвязей гидрогенных и негидрогенных факторов при формировании рельефа береговых аккумулятивных форм неприливных морей».

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы (111 наименований, в т. ч. 50 на русском и 61 на английском языке) и 13 приложений. Текст работы изложен на 134 страницах машинописного текста. Работа содержит 35 рисунков и 9 таблиц. Приложения включают 13 карт.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю к.г.н. О. В. Тутубалиной, д.г.н. В. И. Кравцовой за неоценимую помощь в работе, сотруднику Южного отделения Института океанологии РАН к.г.н. В. В. Крыленко за предоставленные материалы съёмок и консультации, к.г.н. Е. А. Балдиной за конструктивные замечания по тексту работы, к.г.н. А. Л. Энтину и к.г.н. А. М. Карпачевскому за советы по методике обработки данных, всему коллективу кафедры картографии и геоинформатики, сотруднику кафедры геоморфологии и палеогеографии к.г.н. Т. Ю. Репкиной за ценные консультации, аспирантам Д. В. Баранову, Д. В. Мишуриному, А. В. Новиковой за полезные советы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Трёхмерные данные дистанционного зондирования (ДЗ) как метод изучения рельефа береговой зоны моря

Лазерное сканирование — это технология сбора и регистрации пространственных данных с помощью сканирующих лазерных оптических систем, использующих явления отражения световых волн и их рассеяния в прозрачных и полупрозрачных средах. Результатом работы лазерного сканера является модель снимаемого объекта, представляющего собой большой набор (от сотен до нескольких миллионов) точек лазерного отражения с определёнными пространственными координатами, который принято обозначать термином «облако точек». Выделяют три типа лазерного сканирования в зависимости от носителя оборудования: наземное, мобильное и воздушное.

Первые применения данных ВЛС для исследования береговой зоны моря относятся к рубежу XX–XXI вв. [Sallenger, 2000]. Применение этой технологии нашлось в исследовании рельефа береговой зоны на барьерных островах на Атлантическом побережье США [Zhang et al, 2005; Mitasova et al., 2005], оценке переноса материала между дюнами и пляжем на побережье Великобритании [Saye et al., 2005]. Некоторые исследования посвящены методическим аспектам создания ЦМР по данным ВЛС [Woolard, Colby, 2002; Bater, Coops, 2009].

БПЛА, активно эксплуатируемые военными с середины XX в., стали использоваться для целей ДЗ только с начала 2000-х гг. [Hammer et al., 2001]. Исследовательская активность в области применения БПЛА для получения данных о рельефе береговой зоны резко возрастает в начале 2010-х, что можно объяснить появлением в свободной продаже относительно недорогих микро-БПЛА, оснащённых малоформатными камерами. Благодаря внедрению методики «Структура из движения» с помощью таких аппаратов стало возможным получать из снимков облака точек с плотностью, соизмеримой с облаками точек лазерного отражения [Mancini et al., 2013].

Основная часть проанализированных работ посвящена количественной оценке динамики рельефа береговой зоны. Карты, как правило, используются в качестве вспомогательного материала. Однако исследований, использующих методы тематического картографирования для оценки изменений рельефа, судя по публикациям, не проводилось.

Глава 2. Характеристика района исследования

Районом исследования стала Анапская пересыпь — аккумулятивная береговая форма рельефа барьерного типа, простирающаяся от мыса Железный Рог на юге Таманского полуострова до мыса Анапский. Пересыпь отделяет от моря систему лиманов и озёр, которые в прошлом были морскими заливами — Витязевский и Бугазский лиманы, Анапские плавни и оз. Солёное. В строении Анапской пересыпи прослеживается три основных зоны: пляж, дюнный пояс и пояс бугристых песков. Далее в сторону суши следует либо прилиманное понижение и берег лимана, либо отмерший клиф, либо морская терраса.

Конфигурация берега и рельеф шельфа привели к образованию относительно замкнутой литодинамической системы Анапской пересыпи, в которой преобладает расходная часть бюджета наносов, образованная выносом взвешенного материала от берега, эоловым переносом и антропогенными изъятиями песка [Косьян, Крыленко, 2014].

Для оценки и картографирования динамики рельефа были выбраны три ключевых участка. На первом этапе разработанная методика апробировалась на участке А на северо-западе Бугазской пересыпи длиной 2 км (рис. 1). Он покрыт как данными ВЛС 2013 и 2015 гг., так и съёмкой с БПЛА в 2019 г., соответственно картографирование динамики велось за периоды 2013–2015 и 2015–2019 гг. Затем для верификации созданной методики она была применена на участках Б и В, для которых имеются только данные ВЛС за 2013 и 2015 гг.



Рисунок 1. Участки картографирования динамики рельефа Анапской пересыпи

Анапская пересыпь с середины XX в. активно изучается сотрудниками Института океанологии РАН им. П. П. Ширшова. Работы В. П. Зенковича, Н. А. Айбулатова и др. являются основой теории динамики песчаных пляжей неприливных морей. В современных исследованиях пересыпи, проводимых Р. Д. Косьяном, В. В. Крыленко и др., используются данные ДЗ [Крыленко, 2015]. Сотрудниками географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова проводится детальное картографирование Анапской пересыпи по данным спутниковой съёмки и полевых обследований [Кравцова, Чалова, Фалалеева, 2014]. В то же время имеющиеся данные ВЛС и съёмки с БПЛА на Анапскую пересыпь применяются в ряде работ для изучения динамики рельефа [Кравцова и др., 2017], но её количественной оценки и крупномасштабного картографирования динамики дюнного рельефа пока проведено не было.

Глава 3. Характеристика материалов исследования. Обработка данных съёмок с БПЛА. Создание ЦМР и разностных ЦМР

В работе использовались разновременные данные ВЛС и аэрофотосъёмки, полученные в рамках комплексного исследования Анапской пересыпи 21.11.2013 г. и 09.10.2015 г. Протяженность полосы съёмок, выполненной под руководством Е. С. Бойко, составила около 48 км, ширина от 500 до 1500 м. В 2013 году общее количество точек лазерного отражения (ТЛО) составило более 640 млн., средняя плотность более 20 точек на квадратный метр. Цифровых аэрофотографий с разрешением 10 см было получено 465. В 2015 г. было получено около 500 млн. ТЛО, 814 аэрофотоснимков с аналогичными плотностью и разрешением. Воздушное лазерное сканирование позволило получить облака ТЛО с точностью погрешностью до 10–15 см в плане и по высоте. Обработка результатов ВЛС выполнялась под руководством Е. С. Бойко и подробно изложена в работе [Boyko et al, 2015].

Помимо данных ВЛС в работе использовались результаты съёмок участков Анапской пересыпи с БПЛА DJI Phantom 4 Pro в 2018 и 2019 гг. в рамках выполнения инициативных исследовательских проектов под руководством В. В. Крыленко. В 2018 г. съёмка полосы берега длиной 2 км и шириной 200 м в районе оз. Солёное выполнялась 25 мая. Всего был получен 791 снимок. Перед началом съёмки для пространственной привязки были размещены 10 наземных опознаков. В 2019 г. съёмка с БПЛА осуществлялась 21 апреля. Был снят участок на северо-западе Анапской пересыпи длиной 5 км и шириной 250 м, включающий себя участок съёмки 2018 г. Всего было получено 2122 снимка. Было размещено 37 наземных опознаков, часть из которых совпадали с использовавшимися для съёмки 2018 г.

Поскольку съёмка с БПЛА является методом ДЗ, начавшим своё активное развитие в последние десятилетие, то теоретические основы обработки таких данных по методике «Структура из движения» для решения географических задач пока в русскоязычной литературе рассмотрены недостаточно, хотя за рубежом такие работы встречаются [Carrivick, Smith, Quinsey, 2016]. Поэтому в диссертационной работе этот вопрос отображён весьма подробно.

Обработка данных съёмок с БПЛА проводилась автором и состояла из следующих этапов: создание «разреженных» облаков точек, уточнение их пространственной привязки по координатам опознаков, создание «плотных» облаков точек, построение предварительной ЦМР и ортофотоплана. Описанные процедуры осуществлялись в ПО Agisoft Metashape.

Для требуемой постобработки точек перед созданием ЦМР, заключающейся в классификации точек земли, предложена методика последовательного применения двух алгоритмов: основанного на оценке морфологии облака точек и на анализе цвета точек. Также установлено, что облака точек, полученные из данных съёмок с БПЛА, значительно сдвинуты

относительно облаков, построенных по данным ВЛС. Для их согласования использован анализ распределения расстояний между ближайшими точками облаков, полученных за разные сроки.

Определено несколько особенностей обработки данных ВЛС и съёмов с БПЛА и возможностей их использования для изучения берегов. Выявление точек земной поверхности лучше происходит по данным ВЛС, как на участках, занятых растительностью, так и вблизи строений. Однако гораздо более высокая плотность облаков точек, получаемых по данным съёмов с БПЛА, позволяет выделять наноформы рельефа, плохо различимые по данным ВЛС: как природные (небольшие холмики-косы высотой до 10–15 см), так и антропогенные (автомобильные колеи). Также по данным съёмов с БПЛА возможно выделение крупных, размером первые десятки сантиметров, фрагментов морского мусора, выброшенных на пляж.

Для получения по трёхмерным данным ДЗ достаточной, но не избыточной, по точности ЦМР рекомендуется осуществлять подбор оптимального размера пиксела и метода интерполяции. Для создания ЦМР на основе облаков точек с высокой плотностью наиболее подходящим является метод естественного соседа, а для подбора оптимального пространственного разрешения рекомендуется использовать методику, основанную на расчёте плотности точек в облаке [Hengl, 2006].

Оптимальным размером ячейки для ЦМР, создаваемых по согласованным облакам точек, был признан 0,25 м. Их создание осуществлялось в ПО SAGA, в котором затем путём попиксельного вычитания ЦМР за разные сроки были построены разностные ЦМР на все участки исследования.

Глава 4. Анализ и картографирование динамики рельефа Анапской пересыпи

Методика автоматизированного выделения структурных линий рельефа Анапской пересыпи по ЦМР

Автоматизированное выделение структурных линий рельефа по ЦМР является важной проблемой, неоднократно рассмотренной в научных исследованиях. В данной работе в качестве основы использовалась методика, предложенная в серии работ Х. Стокдон и соавторов [Stockdon et al., 2009], [Stockdon et al., 2012]. Согласно ей создаётся система поперечных профилей рельефа, проведённых по суше перпендикулярно береговой линии через заданные промежутки. Затем анализируется форма каждого из профилей с целью нахождения точек перегиба, из которых путём фильтрации с помощью экспертно заданных параметров отбираются точки, расположенные на вершине гребня дюны (точки гребня) и на подошве её мористого склона (точки подошвы). В качестве параметров выступает расстояние от уреза, минимально возможная высота гребня относительно среднего уровня моря, минимально возможный перепад высоты между подошвой склона и гребнем дюны.

Вычисленные точки вручную проверяются пользователем, который редактирует их положение, если оно оказывается неверным.

Рассмотренная методика была значительно переработана, исходя из особенностей объекта исследований и имеющихся данных, после чего стала частью оригинальной методики, разработанной в данном исследовании. Так, помимо подошвы наветренного (расположенного со стороны моря) склона созданная методика позволяет выделять подошву подветренного (расположенного со стороны лимана) склона, оценивая динамику всего ФДВ. ФДВ был выбран для анализа как наиболее динамичная форма эолового рельефа Анапской пересыпи. Апробация методики, состоящей из трёх этапов, осуществлялась на участке А по данным ВЛС за 2013 и 2015 гг.

Первый этап — создание линий поперечных профилей — реализован с помощью инструментов геообработки в ПО QGIS.

Второй этап — вычисление положения точек гребня и подошв склонов на профилях — автоматизированный с помощью алгоритма, написанного на языке программирования Python и доступного в публичном репозитории GitHub (<https://github.com/midrug/anapa-dunes-public>).

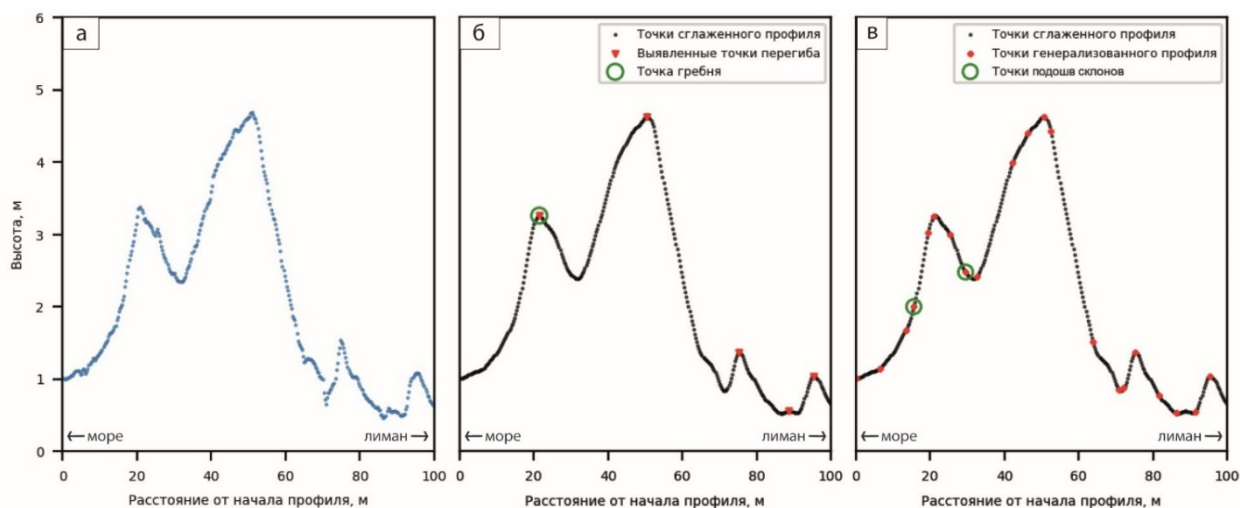


Рисунок 2. Исходный поперечный профиль пересыпи (а); сглаженный профиль с выявленными точками перегиба кривой и выбранной из них точкой гребня (б); сглаженный профиль с точками генерализованного профиля и выбранными из них точками подошв склонов (в)

Сперва вычислялось положение точек гребня. Для этого на каждом профиле, сглаженного методом скользящего окна Ханна с шириной 20 м, необходимо было найти все локальные максимумы и отобрать из них точки гребня. Точка признавалась локальным максимумом, если приращение высоты от предыдущей было больше 0, а до следующей – меньше 0. Для отбора точек гребня были определены следующие условия: высота гребня над урезом должна быть больше 2 м; из всех локальных максимумов гребнем будет самая близкая к урезу точка. Для решения проблемы ошибочного выделения точек гребня на небольших повышениях на подветренном склоне вала была применена иерархическая кластеризация выявленных локальных максимумов.

В каждом кластере выбиралась точка с максимальной высотой. Та точка из получившегося массива, которая была ближе всех к урезу, признавалась точкой гребня (рис. 2б).

Определение точки подошвы наветренного склона происходило следующим образом. Поскольку в данной точке происходит переход от слабонаклонной поверхности пляжа к крутому склону ФДВ, то математически это выражается в резком увеличении углового коэффициента отрезка кривой, начинающегося от данной точки. Однако на исходных профилях отрезки между соседними точками очень малы, что приводит к тому, что максимальный угловой коэффициент фиксируется на мелких неровностях на самом склоне. Для устранения подобных ошибок потребовалось генерализовать линии профилей с помощью алгоритма Дугласа-Пекера. Из всех точек генерализованного профиля выделяются точки, находящиеся между точкой гребня и урезом, а из полученного массива выбираются три, в которых угловой коэффициент отрезка кривой максимален. Среди них точка подошвы наветренного склона выбирается исходя из эмпирически подобранных условий (рис. 2в): высота над урезом меньше высоты выявленной точки гребня и больше 1 м; перепад высот между точкой гребня и точкой нижней границы склона больше 0,4 м.

Точки подошвы подветренного склона выделяются из точек генерализованного профиля, находящихся за гребнем, с теми же условиями за исключением добавления ещё одного – точка должна находиться от точки гребня на расстоянии меньше 20 м.

Третий этап — верификация результатов работы алгоритма и редактирование выявленных точек структурных линий, которые затем объединяются в линии гребня и границ склонов на карте.

Таблица 1. Результаты редактирования автоматически выделенных точек гребня и подошв склонов на участке А

Год съёмки	2013			2015			2019		
Тип точек	Точки гребня	Точки подошвы наветренного склона	Точки подошвы подветренного склона	Точки гребня	Точки подошвы наветренного склона	Точки подошвы подветренного склона	Точки гребня	Точки подошвы наветренного склона	Точки подошвы подветренного склона
После работы алгоритма	288	288	285	308	308	294	323	323	312
Передвинутых	2	14	27	1	5	40	6	10	72
Удалённых	27	27	27	47	47	45	5	13	13
Доля точек, потребовавших редактирования, %	10,1	14,2	18,9	15,6	16,9	28,9	3,4	7,1	27,2

Из табл. 1 видно, что лучше всего выделялись точки гребня, немного хуже — точки нижней границы наветренного склона, и хуже всех — точки нижней границы подветренного склона. В результате применения созданной методики на соседнем морфологически схожем участке Б значения доли точек, потребовавших редактирования, были близки к значениям в табл. 1. Однако на участке В значения сильно отличались: доля точек подошв склонов, потребовавших редактирования, значительно превышает значения на участке А. Это объясняется более плавной границей между пляжем и пологим наветренным склоном вала, которая труднее выделяется созданным алгоритмом.

Создание и анализ карт смещения гребня ФДВ на участках Анапской пересыпи

Поскольку по разработанной методике точки гребней ФДВ выделялись наиболее надёжно и требовали меньше всего дополнительного редактирования, для оценки динамики рельефа было решено анализировать только смещение гребней.

Т. к. точки гребней за все сроки выделялись на одних и тех же профилях, то величину изменения их положения можно интерпретировать как скорость смещения гребня ФДВ в выбранной точке за данный срок вдоль линии профиля. В результате для каждого профиля путём вычисления расстояния между точками, полученных по ЦМР за соответствующий год, рассчитывается среднегодовое смещение гребня в метрах за выбранный интервал. Фрагмент карты для участка А представлен на рис. 3.

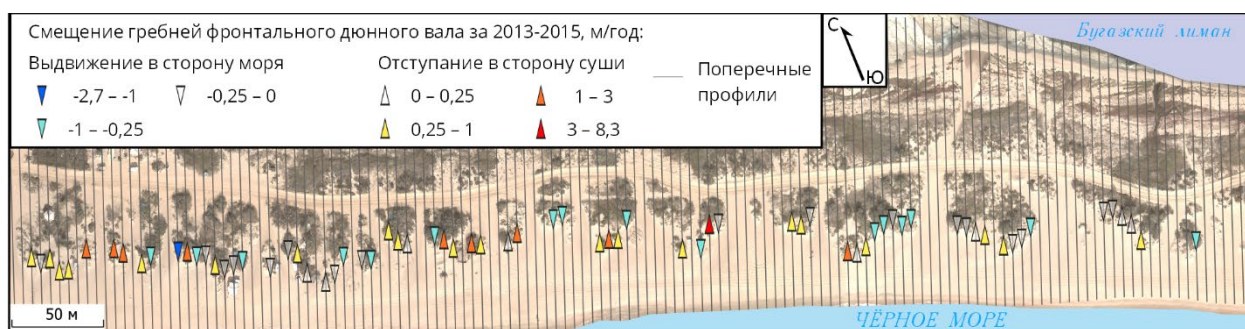


Рисунок 3. Фрагмент карты смещения гребня ФДВ на участке А за 2013–2015 гг.

Для участка В оценка динамики смещения гребней и анализ типов динамики поперечного профиля не проводились из-за особенностей размеров и формы дунного вала. Наветренный склон вала осложнён грядами, и значительные изменения рельефа зачастую связаны с их перестроением, которое может и не сопровождаться смещением гребня всего вала.

Карты созданы в проекции UTM, зона 37, в системе координат WGS-84; масштаб — 1:4000. В качестве способа изображения использованы геометрические значки на месте более позднего положения гребня, цветом которых отображается скорость смещения гребня, а ориентировкой — направление смещения гребня.

Анализ карт смещения гребней на участке Анапской пересыпи показывает, что на участке А преобладает отступление гребней ФДВ, причём за 2015–2019 гг. это отступление гораздо сильнее и обширнее. В целом отступление гребня наиболее характерно для передних, т. е. самых близких к урезу, частей фрагментов вала, в то время как выдвигание происходит чуть чаще по краям этих фрагментов, вдоль поперечных проездов, разрезающих вал. Эта же тенденция сохраняется и на участке Б, однако там участков с выдвиганием гребня меньше, что связано с тем, что вал меньше разбит на фрагменты поперечными проездами.

Создание и анализ карт типов динамики поперечного профиля ФДВ на участках Анапской пересыпи

Анализ изменения формы поперечных профилей через Анапскую пересыпь на исследуемых участках показывает, что они могут быть сведены к семи типам динамики поперечного профиля ФДВ: 1 — полное уничтожение вала; 2 — денудация на наветренном склоне; 3 — денудация на наветренном склоне с одновременной аккумуляцией на подветренном; 4 — аккумуляция на наветренном склоне; 5 — аккумуляция на подветренном склоне; 6 — аккумуляция на обоих склонах; 7 — оба склона вала стабильны.

Для автоматического определения типа изменения формы, к которому относится каждый профиль, была разработана методика классификации, где в качестве основного критерия использовались сумма положительного ($\Sigma_{dz>0}$) и сумма отрицательного ($\Sigma_{dz<0}$) изменения высоты на каждом из склонов. Границы склонов на профилях определялись точками гребня и подошв за более поздний срок.

Описанные величины рассчитывались как площадь фигуры, образуемой линиями двух профилей за разные годы. Сумма положительного изменения высоты вычислялась как площадь фигуры, для которой верхней стороной выступала линия профиля за более поздний срок, а нижней — линия профиля за более ранний. Для суммы отрицательного изменения всё происходило наоборот: верхняя сторона — линия профиля за более ранний срок, нижняя — за более поздний. Расчёт площадей фигур проводился с помощью алгоритма, реализованного на языке программирования Python 3.7 и доступного в публичном репозитории GitHub (<https://github.com/midrug/anapa-dunes-public>).

Для изображения на карте типов динамики поперечного профиля ФДВ использовались линии профилей, цветом которых показана принадлежность к тому или иному типу динамики (рис. 4). Для упрощения анализа сделаны уменьшенные до 1:10000 варианты карты, в которых линии вручную объединены в полигоны (рис. 5).

Анализ карты типов динамики поперечного профиля ФДВ на участок А за 2013–2015 гг. показывает, что профили с аккумуляцией на наветренном склоне характерны для участков, находящихся дальше от берега моря. Профили, относящиеся к типу динамики с аккумуляцией на обоих склонах, практически

все находятся в западной половине участка, где ширина фрагментов вала в среднем значительно меньше. В восточной половине участка преобладают профили с денудацией на наветренном склоне: они распределены равномерно по всем фрагментам вала и характерны для их передних частей, выдвинутых ближе к морю.

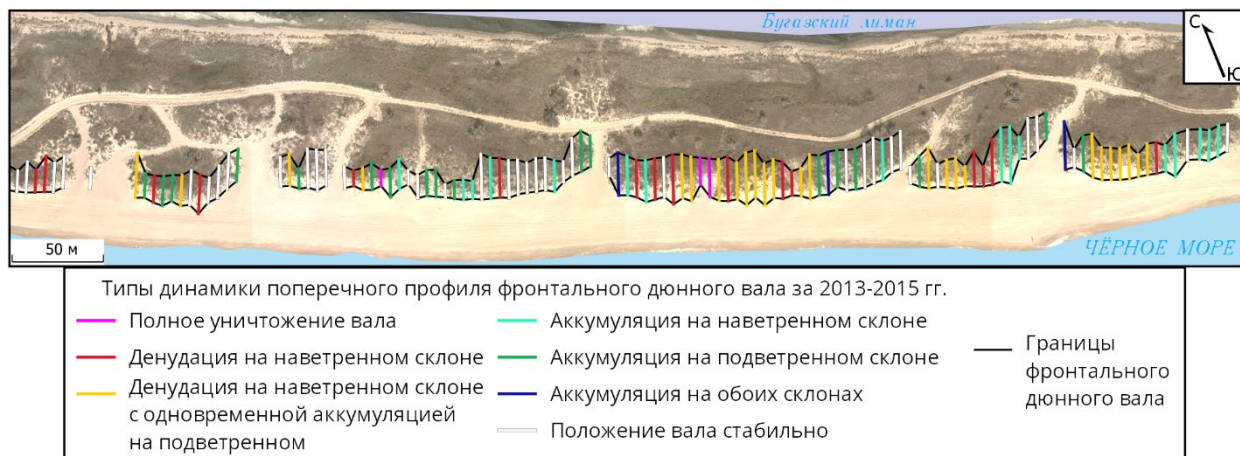
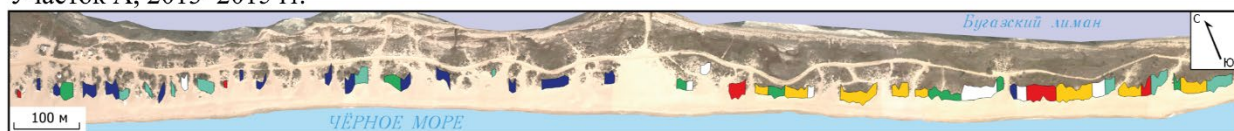


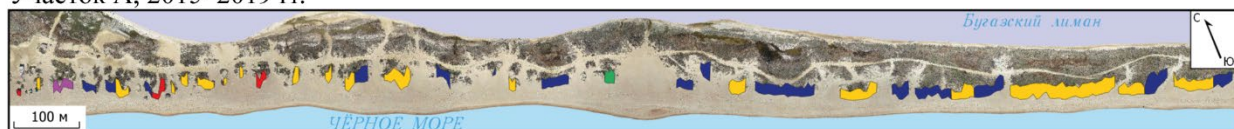
Рис. 4. Фрагмент карты типов динамики поперечного профиля ФДВ на участке А за 2013–2015 гг.

В 2015–2019 гг. общая картина сильно меняется: почти полностью отсутствует аккумуляция только на одном из склонов ФДВ, которая заменяется аккумуляцией на обоих склонах. На участках с денудацией преобладают профили с денудацией на наветренном склоне с одновременной аккумуляцией на подветренном.

Участок А, 2013–2015 гг.



Участок А, 2015–2019 гг.



Участок Б, 2013–2015 гг.

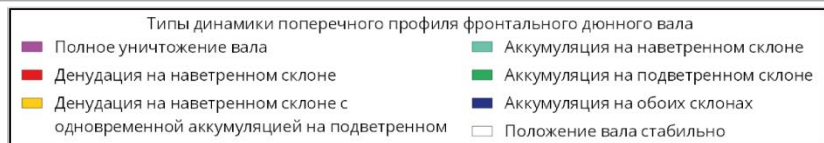
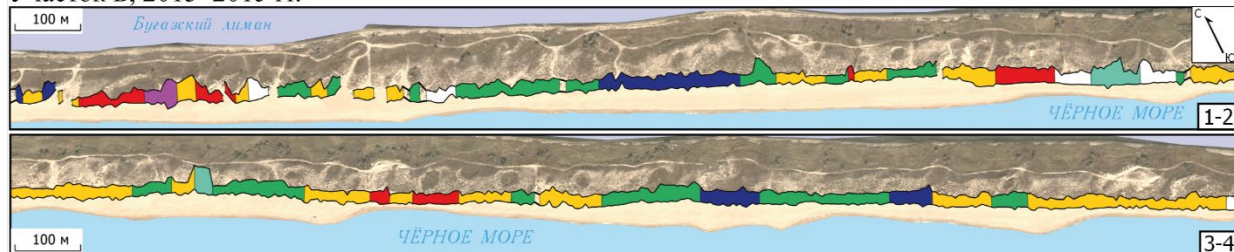


Рис. 5. Типы динамики поперечного профиля ФДВ на участках А и Б

На участке Б перемежаются участки аккумуляции и денудации на всём протяжении. Профили со стабильным положением вала в целом соотносятся с участками незначительного смещения гребня вала, а профили с уничтожением вала или денудацией только на наветренном склоне — с участками значительного отступления гребня.

Расчёт объёмов перенесённого материала на участках Анапской пересыпи

Поскольку наиболее активный перенос материала на исследуемых участках Анапской пересыпи происходит между пляжем и ФДВ, то, зная границы этих зон, можно на основе разностной ЦМР провести количественную оценку объёмов переносимого материала в наиболее динамичной части участков.

Выделенные линии гребня и подошв ФДВ позволяют оконтурить границы и самого вала, и его склонов. Эти линии не имеют плавных очертаний, поскольку создавались автоматически путём соединения выделенных точек. Подошва наветренного склона ФДВ является верхней границей зоны пляжа, а его нижняя граница — урез моря — легко определяется по ортофотоплану. Таким образом, на всём участке были выделены фрагменты, каждый из которых включает три полигона: пляж, наветренный и подветренный склон вала. Боковые границы полигонов проводились вдоль линий профилей. Для расчёта объёмов перенесённого материала за выбранный интервал применялись полигоны за более поздний срок.

Для каждого полигона по разностной ЦМР вычислялись объём аккумуляции и объём денудации по формулам:

$$V_{\text{аккумуляции}} = (D_{\text{пиксело}+} - (N_{\text{пиксело}+} * \Delta x)) * d^2$$

$$V_{\text{денудации}} = (D_{\text{пиксело}-} - (N_{\text{пиксело}-} * (-\Delta x))) * d^2$$

где $D_{\text{пиксело}+}$ — сумма значений положительных разностей высот (м), а $D_{\text{пиксело}-}$ — сумма значений отрицательных разностей высот (м) для пикселей, попавших в полигон; $N_{\text{пиксело}}$ — количество этих пикселей, Δx — погрешность определения высот по исходным данным, равная 0,15 м, d — размер ячейки ЦМР (м).

Далее для каждого полигона рассчитывалась разность между объёмом аккумуляции и денудации — «балансовая разность» или «сальдо» [Шуйский, 1986]. Полученные значения для каждого полигона были просуммированы для всех полигонов одного класса на исследуемом участке. Также были рассчитаны значения объёмов денудации и аккумуляции на единицу площади и сальдо на единицу площади, вычисленные как отношение абсолютного значения к сумме площадей аккумуляции и денудации.

Для участка А объём аккумуляции и денудации материала, перенесённого за 2013–2015 гг. в зоне пляжа, на порядок превышает объёмы для склонов ФДВ. По абсолютным значениям в зоне пляже преобладает

денудация, хотя удельное сальдо близко к 0. На наветренном склоне ФДВ сальдо также отрицательно, но удельное сальдо практически равно 0. Подветренный склон отличают высокие положительные значения сальдо, как абсолютные, так и удельные, что говорит о том, что на этом склоне вала происходит аккумуляция со значительным увеличением высоты. Низкое суммарное значение сальдо для всего участка А ($-8,67 \text{ м}^3$) косвенно указывает на то, что на участке за 2013–2015 гг. объём материала в системе пляж-ФДВ оставался постоянным.

За период 2015–2019 гг. на участке А суммарный объём перенесённого материала в зоне пляжа также оказывается значительно большим аналогичных показателей для склонов ФДВ. Главным отличием от 2013–2015 гг. является более значительное превышение объёма денудации над объёмом аккумуляции в зоне пляжа. На обоих склонах ФДВ объёмы аккумуляции за 2015–2019 гг. выросли значительно больше, чем в 2 раза по сравнению с 2013–2015, в то время как объёмы денудации выросли только в 1,5–2 раза. Это позволяет сделать вывод, что если объём денудации на склонах вала остался примерно таким же (с учётом того, что второй анализируемый период дольше первого на 3,5 года), то рост аккумуляции скорее всего связан со значительно большим объёмом выноса песка из зоны пляжа. Суммарное значение сальдо для всего участка А за 2015–2019 гг. составило $-4647,88 \text{ м}^3$. Вероятно, такая значительная денудация может быть вызвана выносом песка с пляжа в море в результате воздействия волн или ветров, дующих с берега. Съёмки 2015 г. и 2019 г. выполнялись 9 октября и 21 апреля соответственно, поэтому подобные отличия в перемещении материала могут также объясняться влиянием сезонной, а не межгодовой динамики.

Для соседнего участка Б были рассчитаны объёмы перенесённого материала только за 2013–2015 гг. Значения объёма аккумуляции и денудации на единицу площади на пляже на участке Б близки к значениям на участке А. Однако удельный объём денудации по модулю всё-таки немного превышает удельный объём аккумуляции, что говорит о преобладании выноса материала с пляжа. На наветренном склоне фронтального дюнного вала на участке Б в отличие от участка А преобладает денудация, почти в 3 раза превышающая по удельному объёму аккумуляцию. Для подветренного склона вала на участке Б удельное сальдо очень близко к значению на участке А, что говорит о таком же преобладании аккумуляции. Суммарное значение сальдо для всего участка Б за 2013–2015 гг. ($-6123,23 \text{ м}^3$) сильно превышает значение на участке А за тот же период.

Для участка В также были рассчитаны объёмы перенесённого материала только за 2013–2015 гг. На пляже абсолютное и удельное сальдо перенесённого материала являются отрицательными. Соизмеримое преобладание денудации наблюдается и на наветренном склоне ФДВ, что отличает участок В от участков А и Б. Это объясняется морфологией вала на этом участке: наветренный склон, как и сам вал, является более широким, чем

на северо-западе пересыпи, что делает его площадь близкой к площади пляжа. На подветренном склоне наблюдается сильная аккумуляция, свидетельствующая о более мощном переносе песка с пляжа и наветренного склона вала за его подветренный склон на участке В. Суммарное значение сальдо на участке В (9083,16 м³) велико по сравнению с участками А и Б. Однако небольшое значение удельного сальдо даёт понять, что хотя на всём участке В и накапливается материал, но с учётом площадей, на которых происходит перенос, аккумуляция не преобладает безоговорочно над денудацией.

Создание и анализ карт сальдо перенесённого материала

На картах сальдо перенесённого материала отображены выделенные фрагменты, состоящие из трёх полигонов: пляж, наветренный склон и подветренный склон дюнного вала. Для каждого полигона внутри фрагмента способом картограммы показано рассчитанное сальдо перенесённого материала на единицу площади, а для всего фрагмента способом картодиаграммы — абсолютное значение сальдо, подписанное рядом. Дополнительно на карте отмечено пунктиром положение гребня фронтального дюнного вала и его границ, т. е. подошв склонов.

Анализ построенной карты на **участок А** за 2013–2015 гг. (рис. 6) показывает, что рассчитанное для всего участка почти нулевое сальдо перенесённого материала между пляжем и ФДВ не является характерным для отдельных фрагментов. Определяющую роль в значении сальдо внутри фрагмента имеет сальдо на полигоне пляжа. Эта же зависимость заметна и на карте за 2015–2019 гг. В отличие от 2013–2015 гг. в восточной половине участка на всех фрагментах аккумуляция наблюдается не только на подветренном склоне ФДВ, но и наветренном, а на некоторых фрагментах удельные сальдо на обоих склонах оказываются соизмеримы по значениям. В целом, значительно увеличившаяся по сравнению с периодом 2013–2015 гг. аккумуляция на подветренном склоне ФДВ распределяется равномерно по всем фрагментам.

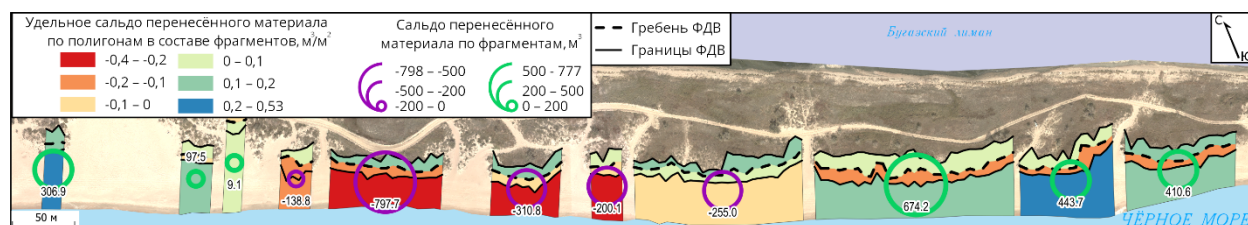


Рис. 6. Фрагмент карты сальдо перенесённого материала на участке А за 2013–2015 гг.

На карте сальдо перенесённого материала на **участок Б** за 2013–2015 гг. заметна большая протяжённость фрагментов, самый восточный из которых имеют длину почти 2,5 км. На карте видна та же зависимость знака абсолютного значения сальдо на фрагменте от удельного значения на полигоне пляжа, что и на участке А. Почти на всех фрагментах на пляже и на

наветренном склоне ФДВ преобладает денудация, а на подветренном склоне вала — слабая аккумуляция. Можно предположить, что в близких к естественным условиям (как на участке Б) в данном районе Анапской пересыпи должна наблюдаться общая денудация наветренного склона ФДВ и аккумуляция на подветренном склоне. Однако при наличии сильного антропогенного воздействия (как на участке А) данная зависимость нарушается вследствие разбиения вала на мелкие фрагменты, на наветренных склонах которых (особенно в краевых частях фрагментов) начинает происходить сильная аккумуляция материала.

На карте сальдо перенесённого материала **на участок В** за 2013–2015 гг. заметна значительно бóльшая ширина фрагментов, чем на участках А и Б. На пляже везде наблюдается вынос материала, а на подветренном склоне вала — мощная аккумуляция. Наветренный склон показывает разнонаправленную динамику, но на бóльшей части наблюдается денудация. Абсолютные значения сальдо на фрагментах в отличие от участков А и Б не совпадают по знаку со значениями удельного сальдо на полигоне пляжа. Основной вклад в абсолютные значения сальдо на фрагментах вносит аккумуляция на подветренном склоне вала, за счёт чего почти для всех фрагментов абсолютное значение сальдо положительно.

Согласно работе И. О. Леонтьева и Т. М. Акивис [2020] в створе участка В частично располагается зона конвергенции вдольберегового потока, в которой наблюдаются размыв и отступление берега. По их мнению, причинами отступления берега могут быть и эоловые процессы, и антропогенное воздействие, но главной называется повышение относительного уровня моря. Проведённый в диссертационной работе расчёт объёмов перенесённого материала подтверждает, что на данном участке наблюдается денудация на пляже и наветренном склоне ФДВ, т. е. размыв и отступление берега, которые по объёму перемещённого материала уступают накоплению на подветренном склоне. Следовательно, эоловый перенос материала с пляжа за вал может играть в этом процессе не менее важную роль, чем подъём уровня моря.

Заключение

Основные выводы выполненного исследования:

1. Трёхмерные данные ДЗ широко применяются для изучения рельефа береговой зоны, в т. ч. для оценки его динамики, поскольку они позволяют оперативно получать данные о рельефе с высоким пространственным разрешением. Наиболее активно используемыми методами получения подобных данных являются ВЛС и съёмка с БПЛА. Однако методы их совместной обработки для решения задачи оценки динамики рельефа, в т. ч. с помощью картографирования, разработаны недостаточно.

2. Представленная методика совместной обработки данных ВЛС и съёмок с БПЛА позволяет создавать ЦМР и разностные ЦМР с высоким пространственным разрешением. Для этого требуется проводить оценку

точности взаимного положения облаков точек, выполнять их уравнивание, автоматизировано классифицировать точки земли. Также целесообразно осуществлять подбор оптимального размера пиксела и метода интерполяции создаваемых ЦМР.

3. Разработанная методика автоматизированного выделения структурных линий рельефа по ЦМР может эффективно применяться для оценки динамики рельефа не только Анапской пересыпи, но и других аккумулятивных береговых форм рельефа барьерного типа. Однако для этого, может потребоваться её частичная модификация, исходя из морфологии конкретных участков исследования.

4. Составленные тематические карты позволили проанализировать изменения рельефа на трёх участках Анапской пересыпи, оценить их пространственное распределение и интенсивность на отдельных фрагментах.

5. Были рассчитаны объёмы аккумуляции и денудации на трёх участках Анапской пересыпи, а также сальдо перенесённого материала для зоны пляжа и склонов ФДВ.

6. Выполненный анализ созданных карт и количественной оценки перенесённого материала показал, что на большей части участка А и всём участке Б происходит отступление ФДВ. На всём участке В наблюдается денудация пляжа и частично наветренного склона дюнного вала, с мощной аккумуляцией на подветренном склоне. Сделанные выводы согласуются с результатами других исследователей Анапской пересыпи, использующих иные методы оценки динамики рельефа.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

В изданиях, включенных в базы Scopus, WoS и RSCI WoS:

1. Кравцова В. И., Крыленко В. В., Другов М. Д., Бойко Е. С. Исследование динамики рельефа северо-западной части Анапской пересыпи по материалам воздушного лазерного сканирования // Геоинформатика. — 2017. — № 4. — С. 48–62 (*5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,465*).

2. Кравцова В. И., Другов М. Д. Типы динамики дюнного рельефа Анапской пересыпи: исследование по материалам воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография. — 2019. — Т. 80, № 2. — С. 32–45 (*5-летний импакт-фактор РИНЦ: 0,306*).

3. Другов М. Д., Тутубалина О. В., Крыленко В. В.. Оценка изменений рельефа береговой зоны по данным воздушного лазерного сканирования и съёмок с беспилотных летательных аппаратов (на примере Анапской пересыпи) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — Т. 18, № 2. — С. 115–127 (*5-летний импакт-фактор РИНЦ: 1,018*).

Иные публикации:

4. **Другов М. Д.**, Кравцова В. И., Тутубалина О. В. Оценка изменений рельефа береговой зоны по разновременным данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки (на примере Анапской пересыпи) // XIV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. — Москва: ИКИ РАН. 2016. — С. 343.

5. Кравцова В. И., **Другов М. Д.** Изменения дюнного рельефа Анапской пересыпи по материалам повторного воздушного лазерного сканирования // ИнтерКарто-ИнтерГИС-24. Материалы Международной конференции Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. — Т. 2. — КарНЦ РАН Петрозаводск, 2018. — С. 55–70.

6. Кравцова В. И., Тутубалина О. В., **Другов М. Д.** Исследование динамики эолового рельефа Анапской пересыпи по данным воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов. Материалы XIII Международной ландшафтной конференции, посвященной столетию со дня рождения Ф.Н. Милькова, г. Воронеж 14–17 мая 2018 г. / Под ред. А. В. Хорошева. — Т. 1. — ИСТОКИ Воронеж, 2018. — С. 206–208.

7. **Другов М. Д.** Картографирование динамики рельефа береговой зоны по разновременным трёхмерным данным дистанционного зондирования (на примере Анапской пересыпи) // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. МГУ имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, Москва, 28 сентября–1 октября 2020 г. / Под ред. Е. Н. Бадюкова, В. Р. Беляев, Ю. Р. Беляев и др. — Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова Москва, 2020. — С. 482–485.

8. **Другов М. Д.** Применение данных съёмки с беспилотных летательных аппаратов для изучения динамики рельефа Анапской пересыпи // Материалы Международного молодежного научного Форума Ломоносов-2020 / тезисы. — Москва, 2020.