

Оценка изменений рельефа береговой зоны по данным воздушного лазерного сканирования и съёмок с беспилотных летательных аппаратов (на примере Анапской пересыпи)

М. Д. Другов¹, О. В. Тутубалина¹, В. В. Крыленко²

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

E-mail: midrug@gmail.com

² *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: krylenko.slava@gmail.com

Выполнена оценка изменений рельефа участка Анапской пересыпи по данным воздушного лазерного сканирования (2013, 2015) и съёмок с беспилотного летательного аппарата (2019). Приведена автоматизированная методика выделения гребня и нижних границ склонов фронтального дюнного вала (ФДВ) на основе рассчитанных по облакам точек цифровых моделей рельефа и системы поперечных профилей. Анализ построенных карт показывает, что для участков, где ФДВ разбит на фрагменты, характерно выравнивание его фронта и аккумуляция материала вдоль проездов, пересекающих вал. Результаты количественной оценки свидетельствуют, что сальдо перенесённого материала для системы «пляж – ФДВ» на исследуемом участке в 2013–2015 гг. составило 94,35 м³, в 2015–2019 гг. оно было равно –5113,78 м³. В зоне пляжа в течение обоих периодов преобладал вынос материала, а на подветренном склоне ФДВ – аккумуляция, значительно преобладавшая по объёму над денудацией. На наветренном склоне ФДВ в 2013–2015 гг. преобладала денудация, а в 2015–2019 гг. – аккумуляция, однако сальдо в обоих случаях гораздо меньше, чем на пляже и подветренном склоне.

Ключевые слова: динамика рельефа, береговая зона, лазерное сканирование, беспилотный летательный аппарат, цифровая модель рельефа

Одобрена к печати: 26.01.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-115-127

Введение

Береговая зона моря является очень динамичным объектом, обладающим высокой чувствительностью к антропогенному воздействию. Для её мониторинга полезны цифровые модели рельефа (ЦМР), для создания которых могут применяться трёхмерные данные дистанционного зондирования (ДЗ), имеющие кроме двух плановых координат ещё и третью — высотную.

Источником трёхмерных данных ДЗ могут служить стереопары снимков, получаемых как с воздушных носителей, так и со спутников. Среди всех видов ДЗ аэрофототопографические методы до 1990-х гг. традиционно являлись основными для получения точных моделей рельефа, в том числе и в береговой зоне (Di et al., 2003). Появление технологии воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и его применение совместно с аэрофотосъёмкой (АФС) позволило совершить значительный скачок в точности получаемых данных. Ещё одним методом получения трёхмерных данных ДЗ, активно развивающимся в последнее десятилетие, становится съёмка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Этот метод позволяет получать трёхмерные модели местности с ещё большей точностью и оперативностью, а затраты на покупку и эксплуатацию БПЛА значительно ниже, чем стоимость одной съёмки с пилотируемого аппарата, и сравнимы с ценой нескольких космических снимков сверхвысокого разрешения.

Данные ВЛС (Mitasova et al., 2005, 2009; Sallenger, 2000; Saye et al., 2005) и съёмок с БПЛА (Long et al., 2016; Mancini et al., 2013; Sturdivant et al., 2017; Taddia et al., 2017) активно применяются для исследования рельефа береговой зоны и его динамики. Однако вопрос их совместной

обработки и использования для изучения рельефа береговой зоны изучен недостаточно. Цель нашего исследования — оценка изменений берегового рельефа на основе разновременных данных ВЛС и съёмкам с БПЛА на примере Анапской пересыпи.

Район исследования

Анапская пересыпь — аккумулятивная береговая форма рельефа, простирающаяся от м. Железный Рог до м. Анапский (рис. 1). Литодинамическая система пересыпи состоит из абразионного участка (коренной берег Таманского п-ова), участков аккумулятивных террас (Веселовская и Анапская террасы, Благовещенский останец) и пересыпей, отделяющих от моря систему одноимённых озёр и лиманов (оз. Солёное, Бугазский и Витязевский лиманы). В поперечном строении Анапской пересыпи прослеживается три основных зоны: пляж, дюнный пояс и пояс бугристых песков. Далее следует либо отмерший клиф, либо прилиманное понижение.



Рис. 1. Анапская пересыпь и положение исследуемого участка

Анапская пересыпь активно изучается сотрудниками Южного отделения Института океанологии РАН (Косьян, Крыленко, 2014), в том числе динамика её морского берега (Крыленко, 2015). Также участие в исследовании Анапской пересыпи принимает группа специалистов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова во главе с В.И. Кравцовой. На основе данных спутниковой съёмки и полевых обследований проводится крупномасштабное ландшафтно-морфологическое картографирование всей пересыпи (Кравцова, Чалова, 2017). По материалам ВЛС, используемых и в нашей работе, изучается динамика рельефа отдельных частей Анапской пересыпи (Кравцова и др., 2017), а также выделение типов динамики рельефа для всей пересыпи (Кравцова, Другов, 2019). Однако коли-

чественной оценки и крупномасштабного картографирования динамики рельефа пока проведено не было. В настоящей статье представлен подход к решению данной проблемы, основанный на совместном использовании разновременных данных ВЛС и съёмкам с БПЛА.

На текущем этапе оценка изменений рельефа осуществлялась на северо-западном участке Бугазской пересыпи протяжённостью 2 км. Этот участок покрыт как данными ВЛС 2013 и 2015 гг., так и съёмкам с БПЛА в 2019 г. В его западной половине из-за активного антропогенного воздействия дюнный пояс представлен в виде мелких фрагментов частично разрушенного фронтального дюнного вала (ФДВ). В восточной половине участка ФДВ сохранился гораздо лучше, хотя и разделён поперечными проездами на фрагменты длиной до нескольких десятков метров.

Исходные данные и их обработка

В нашей работе использовались разновременные данные ВЛС и АФС, полученные в рамках комплексного исследования Анапской пересыпи 21.11.2013 и 09.10.2015. Протяжённость полосы съёмкам составила около 48 км, ширина — от 0,5 до 1,5 км. Наземное геодезическое обеспечение осуществлялось с помощью двух базовых ГНСС-станций (ГНСС — спутниковая система навигации). В 2013 г. было получено около 640 млн точек со средней плотностью более 20 точек на квадратный метр и 465 цифровых аэрофотоснимков с разрешением 0,1 м. В 2015 г. — около 500 млн точек и 814 аэрофотоснимков с аналогичными плотностью и разрешением. Съёмка и обработка материалов (включавшая приведение к нормальным высотам и классификацию точек земной поверхности) выполнялись под руководством Е.С. Бойко и подробно описаны в статье (Войко et al., 2015). Погрешность лазерного дальномера, связанная с высотой съёмки и характеристиками оборудования, составила 8–10 см, погрешность вычисления по системе позиционирования траектории полёта самолёта-носителя — 2–5 см. Погрешность определения координат точек определяется по формуле предельной систематической погрешности результата прямого измерения (Весничева и др., 2003):

$$\Theta = \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где Θ_i — систематическая погрешность, обусловленная различными причинами. В таком случае погрешность определения координат точек составляет 0,11 м.

Помимо данных ВЛС в работе использовались результаты съёмкам участков Анапской пересыпи с БПЛА DJI Phantom 4 Pro. 25.05.2018 была выполнена съёмка полосы берега длиной 2 км и шириной 200 м в районе оз. Солёное. Перед началом съёмки для пространственной привязки были размещены 10 наземных опознаков, координаты которых определялись ГНСС-приёмником в режиме быстрой статики. 21.04.2019 был снят участок на северо-западе Анапской пересыпи длиной 5 км и шириной 250 м, включающий участок съёмки 2018 г. Использовались 37 наземных опознаков, часть из которых совпадала с применявшимися для съёмки 2018 г.

Для получения из снимков с БПЛА облаков точек применялась методика «Структура из движения» (Structure from motion), реализованная в программном обеспечении (ПО) Agisoft Metashape. Сначала проводился отбор снимков по следующим параметрам: примерно одинаковая высота съёмки, минимальное поперечное (40 %) и продольное (60 %) перекрытие, отклонение оси камеры от вертикальной оси не более нескольких градусов. Затем создавались «разреженные» облака точек и уточнялась их пространственная привязка по координатам опознаков. После чего выполнялся расчёт «плотных» облаков точек, на основе которых строились предварительная цифровая модель местности и ортофотоплан.

Для создания ЦМР полученные облака точек требовали дополнительной постобработки, заключавшейся в двухэтапной классификации точек земной поверхности. На первом шаге использовался фильтр, основанный на морфологии облака точек и реализованный в виде инструмента Classify ground points в Agisoft Metashape. Для исследуемой территории были

подобраны следующие параметры инструмента: максимальный угол — 15° ; максимальное расстояние — 0,1 м; размер ячейки — 25 м (Agisoft..., 2019).

Этот алгоритм хорошо справляется с удалением из исходного облака точек участков древесной и кустарниковой растительности, а также различных технических объектов. Для фильтрации участков с густой травянистой растительностью на втором шаге применялся алгоритм, основанный на анализе цвета точек, полученного со снимков (Anders et al., 2019). Поскольку цвета точек представлены с помощью модели RGB, в качестве соответствующих растительности определялись точки со значением зелёной компоненты $G > 130$. Фильтрация осуществлялась только для точек, расположенных выше 0,75 м над урезом, что примерно соответствует верхней границе зоны пляжа, в которой растительность отсутствует. Описанный алгоритм был реализован в ПО CloudCompare, где затем проводилось ручное редактирование артефактов, оставшихся после обоих этапов классификации.

В результате сравнения полученных облаков точек, построенных по данным съёмки с БПЛА 2018–2019 гг. и по данным ВЛС 2013–2015 гг., был выявлен их значительный сдвиг относительно друг друга по трём осям, который, вероятно, был вызван разной геодезической основой съёмки. Для определения сдвига плановых координат использовались реперные точки на неподвижных объектах, определяемых на ортофотопланах. Для согласования по высоте был использован анализ моды расстояний между ближайшими точками облаков, полученных за разные сроки.

Перед созданием ЦМР было подобрано её оптимальное разрешение на основе методики, предложенной в работе Т. Хенгла (Hengl, 2006). Согласно ей максимальный размер ячейки равен среднему расстоянию между ближайшими парами точек, а минимальный определяется условием, что более 95 % ближайших пар точек не попадают в один пиксель. Для расчёта было использовано наименее плотное облако точек 2013 г., и в результате оптимальный размер ячейки ЦМР был определён как 0,25 м. Создание ЦМР методом естественной окрестности было выполнено в ПО SAGA. Там же путём попиксельного вычитания были построены разностные ЦМР за 2013–2015 и 2018–2019 гг.

Методика автоматизированного выделения гребня и нижних границ склонов ФДВ

Визуальный анализ построенных разностных ЦМР показал, что на исследуемом участке наибольшие изменения высоты характерны для зоны пляжа и склонов ФДВ. Для оценки изменений каждого элемента рельефа этих зон требовалось выделить их границы. Урез моря выделялся по ортофотопланам, но для определения границ наветренного и подветренного склонов ФДВ применялись ЦМР.

При выделении гребня и нижних границ склонов ФДВ за основу была взята методика, предложенная в работе Х. Стокдон (H. Stockdon) с соавторами (Stockdon et al., 2009). Адаптированный нами вариант состоит из трёх этапов: 1) создание на основе ЦМР линий поперечных профилей; 2) вычисление положения точек гребня и нижней границы склонов на каждом профиле; 3) редактирование полученных точек.

На первом этапе с помощью инструментов ПО QGIS автоматически создаются линии профилей, проведённых через каждые 5 м и перпендикулярных береговой линии. Далее профили разбиваются на точки с шагом 0,25 м так, чтобы каждая из них попадала в одну ячейку ЦМР.

На втором этапе определялись точки гребня и нижней границы склонов вала с помощью алгоритма, реализованного на языке программирования Python и доступного в репозитории GitHub (<https://github.com/midrug/anapa-dunes-public>). Сперва вычислялось положение точек гребня. Для этого на каждом профиле, сглаженном 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 нуля, а до следующей — меньше. 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 качестве параметра кластеризации использовалось максимальное расстояние между точками внутри кластера, в нашем случае равное 5 м. В каждом кластере выбиралась точка с максимальной высотой. Из получившегося массива точка, которая оказывалась ближе всех к урезу, признавалась точкой гребня (рис. 2б).

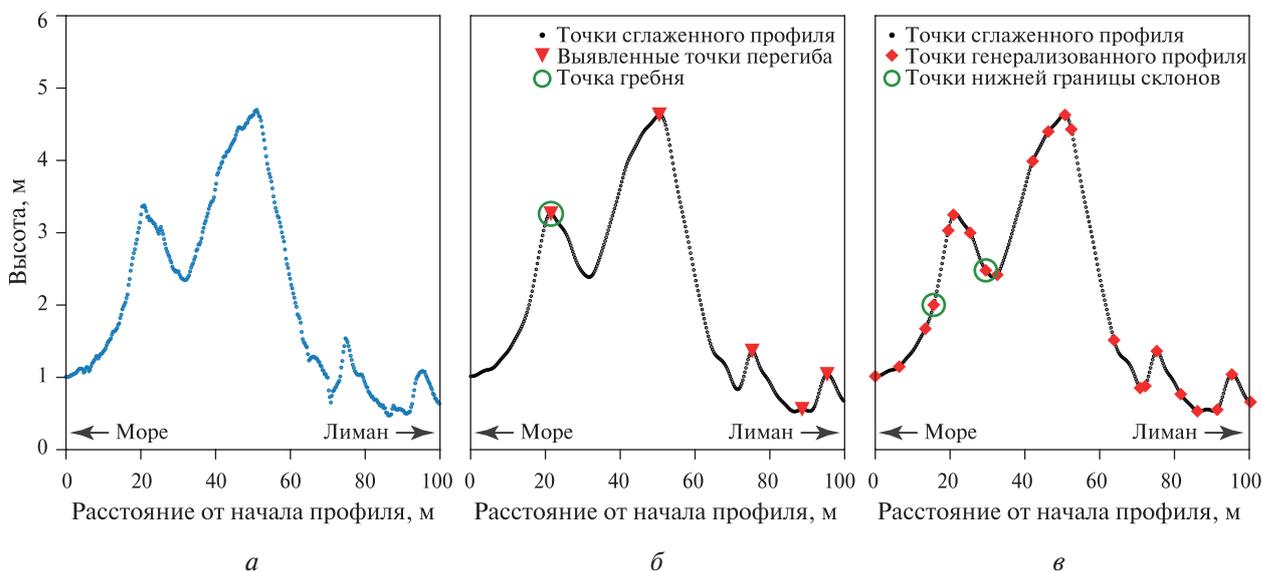


Рис. 2. Исходный поперечный профиль пересыпи (а); сглаженный профиль с выявленными точками перегиба кривой и выбранной из них точкой гребня (б); сглаженный профиль с точками генерализованного профиля и выбранными из них точками нижней границы склонов ФДВ (в)

Определение точки нижней границы наветренного склона выполнялось 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, это 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 нижней границы 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 нижней границы 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. На финальном этапе оператором проводится редактирование автоматически выявленных точек гребней и нижней границы склонов в QGIS, которые затем объединяются в линии гребня и границ склонов на карте.

Для исследуемого участка было построено 399 профилей для ЦМР 2013 и 2015 гг. и 381 профиль для ЦМР 2019 г. Из табл. 1 видно, что независимо от даты съёмки лучше всего автоматически выделялись точки гребня, немного хуже — точки нижней границы наветренного склона и хуже всех определялось положение точек нижней границы подветренного склона.

Таблица 1. Результаты редактирования автоматически выделенных точек гребня (1), нижней границы наветренного (2) и подветренного (3) склонов ФДВ

Год съёмки	2013			2015			2019		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Тип точек									
Всего точек после работы алгоритма, шт.	288	288	285	308	308	294	323	323	312
Передвинутых точек, шт.	2	14	27	1	5	40	6	10	72
Удалённых точек, шт.	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

Анализ и картографирование динамики рельефа участка Анапской пересыпи

Картографирование смещения гребня ФДВ

Поскольку по нашей методике точки гребней ФДВ выделялись наиболее надёжно и требовали меньше всего дополнительного редактирования, для оценки динамики рельефа было решено анализировать только смещение гребней. Так как точки гребней за все три срока 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 вычислением расстояния между точками, полученными по ЦМР за соответствующий год, рассчитывается среднегодовое смещение гребня в метрах за выбранный интервал. На основе этого построены карты среднегодового смещения гребней ФДВ за 2013–2015 и 2015–2019 гг. (рис. 3 и 4, см. с. 121).

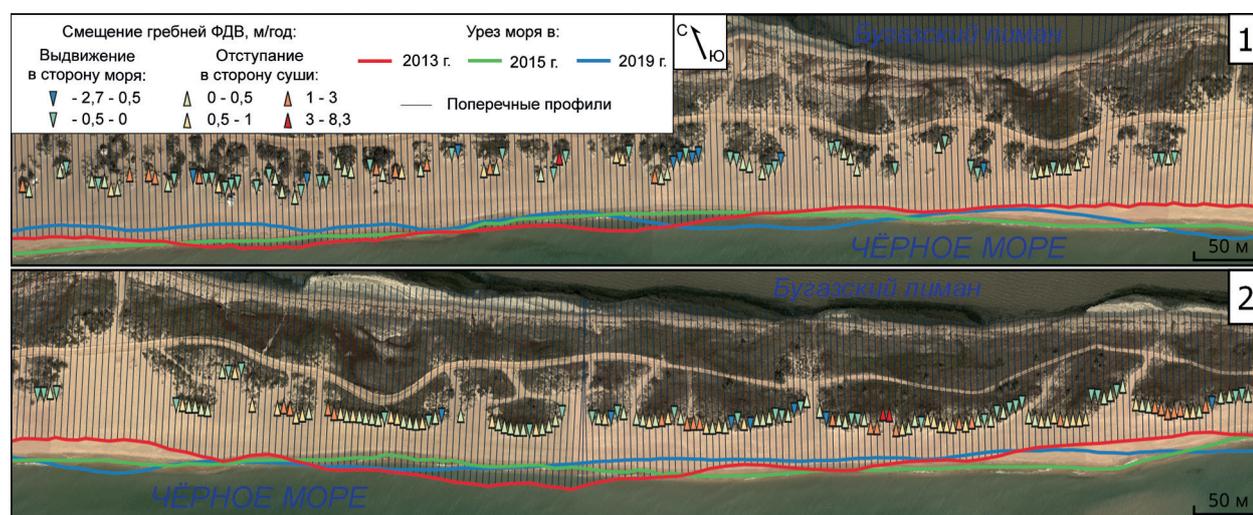


Рис. 3. Среднегодовое смещение гребней ФДВ за 2013–2015 гг. (здесь и далее 1 — западная половина исследуемого участка, 2 — восточная)

Все карты созданы в проекции UTM (Universal Transverse Mercator), зона 37, в системе координат WGS-84, масштаб — 1:2000 (на рисунках представлены варианты, уменьшенные до 1:6000). В качестве способа изображения использованы геометрические значки на месте более позднего положения гребня, цветом которых отображается скорость смещения гребня, а ориентировкой — направление смещения гребня: к морю или от него.

Созданные карты среднегодового смещения гребней показывают, что на исследуемом участке преобладает отступление гребней ФДВ, причём за 2015–2019 гг. это отступление сильнее и обширнее. Отдельные точки выдвигания гребня вала в 2013–2015 гг. в западной поло-

вине участка почти полностью сменяются отступанием в 2015–2019 гг. В целом отступление гребня наиболее характерно для передних, ближайших к урезу, частей фрагментов вала, в то время как выдвигание чаще происходит по краям этих фрагментов, вдоль поперечных профилей, разрезающих вал.

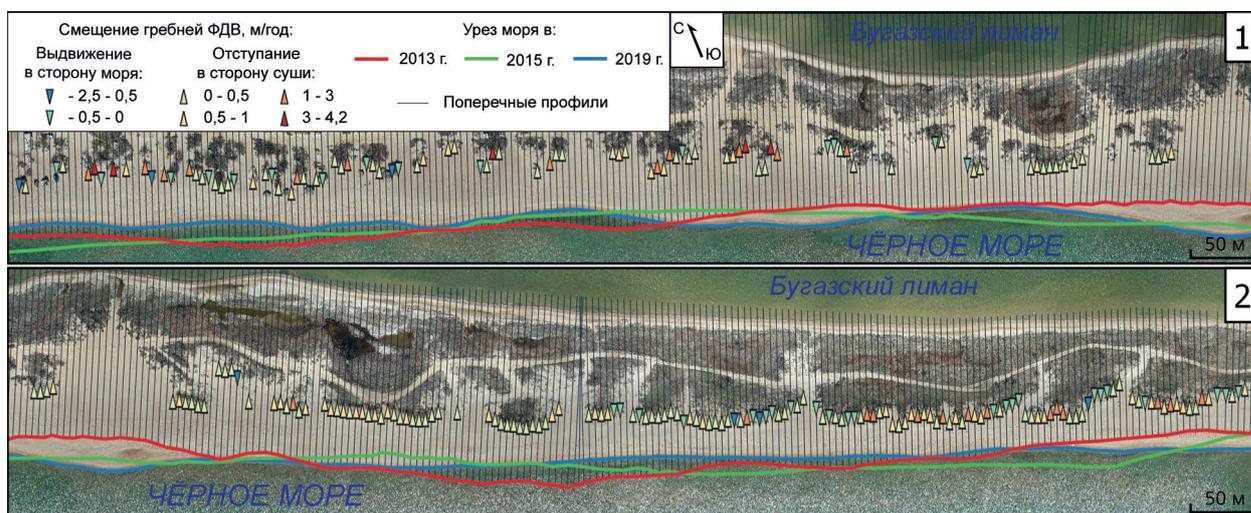


Рис. 4. Среднегодовое смещение гребней ФДВ за 2015–2019 гг.

Расчёт объёмов перенесённого материала

Поскольку наиболее активный перенос материала на исследуемом участке 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 данного участка.

Выделенные гребень и нижние границы склонов позволяют оконтурить склоны вала, а нижняя граница зоны пляжа — урез моря — легко определяется по ортофотоплану. Таким образом, на всём участке были выделены фрагменты, включающие как часть ФДВ, так и часть пляжа перед ней. Каждый из этих фрагментов содержит три полигона: пляж, наветренный и подветренный склоны вала. Боковые границы этих полигонов проводились вдоль линий профилей. Всего было создано 32 полигона, суммарная протяжённость которых вдоль уреза моря составила 1150 м, т. е. примерно 60 % от общей длины исследуемого участка. Для расчёта объёмов перенесённого материала за выбранный интервал использовались полигоны за более поздний срок. Для каждого полигона по разностной ЦМР вычислялись объём аккумуляции и объём денудации по формулам:

$$V_{\text{аккумуляции}} = D_{\text{пикселей}+} - N_{\text{пикселей}} \cdot \Delta x \cdot d^2,$$

$$V_{\text{денудации}} = D_{\text{пикселей}-} - N_{\text{пикселей}} \cdot (-\Delta x) \cdot d^2,$$

где $D_{\text{пикселей}+}$ — сумма положительных разностей высот (м); $D_{\text{пикселей}-}$ — сумма отрицательных разностей высот (м) для пикселей, попавших в полигон; $N_{\text{пикселей}}$ — количество этих пикселей; Δx — погрешность определения высот по исходным данным, равная 0,11 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 удельные значения объёмов денудации и аккумуляции на единицу площади и сальдо на единицу площади, вычисленные как отношение абсолютного значения к сумме площадей аккумуляции и денудации (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчёта объёмов перенесённого материала за 2013–2015 гг. для всех полигонов одного класса на исследуемом участке

Класс полигонов	Тип процесса	Площадь, м ²	Объём, м ³	Удельный объём, м ³ /м ²	Сальдо, м ³	Удельное сальдо, м ³ /м ²
Пляж	Аккумуляция	14 053,44	4378,08	0,311	–744,80	–0,024
	Денудация	16 336,00	–5122,88	–0,313		
Наветренный склон ФДВ	Аккумуляция	2 700,63	391,06	0,145	–53,43	–0,010
	Денудация	2 478,63	–444,49	–0,179		
Подветренный склон ФДВ	Аккумуляция	5 680,50	930,65	0,164	892,59	0,141
	Денудация	633,19	–38,06	–0,060		

Объём аккумуляции и денудации материала, перенесённого за 2013–2015 гг. в зоне пляжа, на порядок превышает объёмы для склонов ФДВ. В расчёте на площадь разница значительно меньше, хотя всё равно составляет почти два раза. Это говорит о том, что площади, затронутые изменениями, достаточно велики, однако изменения высот не очень значительны, т. е. вынос материала происходит достаточно равномерно со всей площади. Исходя из абсолютного значения сальдо в зоне пляжа, можно заключить, что преобладает денудация, хотя удельное сальдо близко к нулю.

На наветренном склоне ФДВ сальдо также отрицательно, но удельное сальдо практически равно нулю. Можно было бы сделать вывод, что на этом склоне происходит одновременная и равномерная аккумуляция и денудация, однако анализ созданных карт покажет, что это не так. Подветренный склон отличают высокие положительные значения сальдо, как абсолютные, так и удельные. Это указывает, что на данном склоне вала происходит аккумуляция со значительным увеличением высоты.

Просуммировав значения сальдо для всех классов полигонов из *табл. 2*, получим достаточно низкое значение — 94,35 м³ (всего 0,83 % от суммы объёмов аккумуляции и денудации по модулю). Это косвенно указывает, что на исследуемом участке за 2013–2015 гг. общий объём материала в системе «пляж – ФДВ» оставался постоянным. Однако однозначно утверждать это нельзя, так как, хотя перенос перпендикулярно берегу на данном участке и преобладает, боковой перенос с территории между выделенными фрагментами также может присутствовать, пусть и в гораздо меньших объёмах. Для более однозначного объяснения требуется проанализировать суммарное сальдо по всем трём классам полигонов для каждого фрагмента в отдельности, для чего были построены карты сальдо перенесённого материала, анализ которых приведён ниже.

За период 2015–2019 гг. суммарный объём перенесённого материала в зоне пляжа также оказывается значительно большим аналогичных показателей для склонов ФДВ (*табл. 3*). Главное отличие от 2013–2015 гг. состоит в значительно большем превышении объёма денудации над объёмом аккумуляции в зоне пляжа. При этом объём аккумуляции в зоне пляжа даже меньше, чем объёмы аккумуляции на склонах вала, как в абсолютных значениях, так и в расчёте на площадь.

На обоих склонах ФДВ объёмы аккумуляции за 2015–2019 гг. по сравнению с 2013–2015 гг. выросли более чем в два раза, а объёмы денудации — только в 1,5–2 раза. Следовательно, если объём денудации на склонах вала остался примерно таким же (с учётом, что второй анализируемый период дольше первого на 20 мес), то рост аккумуляции, скорее всего, связан со значительно большим объёмом выноса песка из зоны пляжа.

Сумма сальдо для всех классов полигонов из *табл. 3* составляет 5113,78 м³, т. е. 33 % от суммы объёмов аккумуляции и денудации на всех полигонах по модулю. Таким образом, даже повышенной по сравнению с 2013–2015 гг. аккумуляцией на ФДВ столь значительная по объёму денудация в зоне пляжа не компенсируется. Вероятно, частично это объясняется неучтённой аккумуляцией за пределами ФДВ — в дюнном поясе и прилиманном понижении. Но её объём всё равно не может быть выше объёма на вале, так как именно на его подветрен-

ном склоне происходит отложение основного объёма переносимого материала на данном участке пересыпи (Крыленко, 2011). Причиной такой разнонаправленной динамики может быть усилившийся вынос песка с пляжа в море. Другое объяснение заключается в разносезонности съёмов 2015 и 2019 гг., из-за которой на разностной ЦМР может отображаться сезонная динамика перемещения материала, а не межгодовая.

Таблица 3. Результаты расчёта объёмов перенесённого материала за 2015–2019 гг. для всех полигонов одного класса на исследуемом участке

Класс полигонов	Тип процесса	Площадь, м ²	Объём, м ³	Удельный объём, м ³ /м ²	Сальдо, м ³	Удельное сальдо, м ³ /м ²
Пляж	Аккумуляция	2 524,63	720,45	0,285	-8863,50	-0,333
	Денудация	24 093,10	-9583,90	-0,398		
Наветренный склон ФДВ	Аккумуляция	3 783,63	1167,97	0,309	541,73	0,091
	Денудация	2 189,75	-626,24	-0,286		
Подветренный склон ФДВ	Аккумуляция	8 305,38	3287,14	0,396	3207,94	0,363
	Денудация	541,50	-79,20	-0,146		

Карты сальдо перенесённого материала

На картах сальдо перенесённого материала отображены выделенные фрагменты, состоящие из трёх полигонов: пляж, наветренный склон и подветренный склон фронтального дюнного вала. Для каждого полигона способом картограммы показано рассчитанное сальдо перенесённого материала на единицу площади, а для всего фрагмента способом картодиаграммы — абсолютное значение сальдо, значение которого подписано рядом.

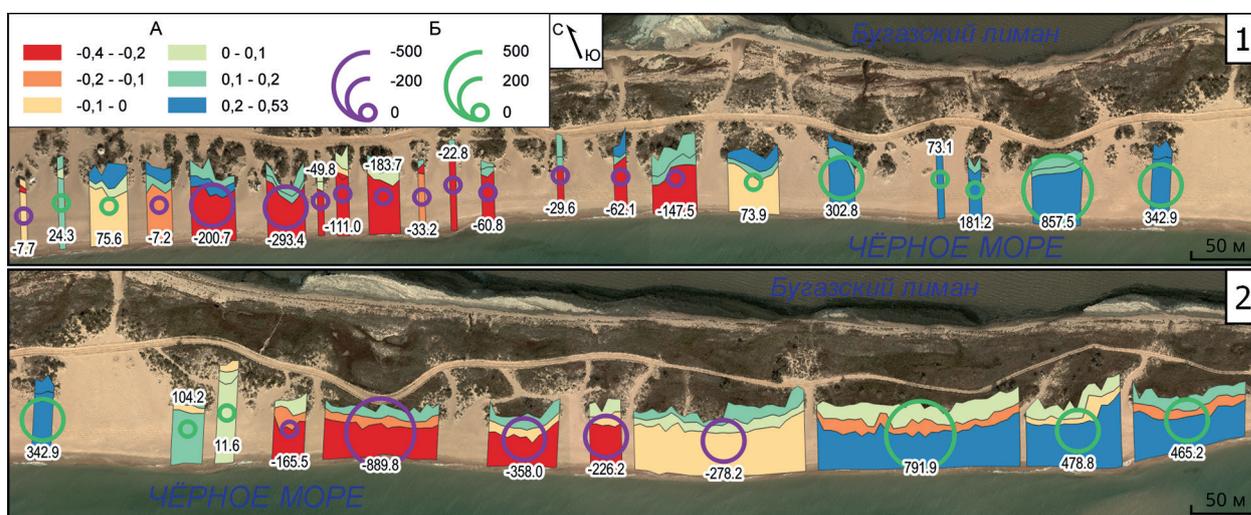


Рис. 5. Сальдо перенесённого материала за 2013–2015 гг. А — удельное сальдо по полигонам в составе фрагментов, м³/м²; Б — сальдо по фрагментам, м³

Построенная за 2013–2015 гг. карта (рис. 5) показывает, что рассчитанное для всего участка близкое к нулю сальдо перенесённого между пляжем и ФДВ материала не характерно для отдельных фрагментов. Определяющую роль в значении сальдо внутри фрагмента имеет сальдо на полигоне пляжа: практически везде знак удельного значения сальдо для полигона пляжа совпадает со знаком сальдо всего фрагмента. Также в пространственном распределении удельного сальдо для полигонов пляжа хорошо заметна фестончатая структура — смена

участков преобладания аккумуляции и денудации. Вероятно, именно тем, что на картографируемый участок попало две примерно равных по площади пары этих фестонов (и соответственно, зон аккумуляции и денудации, связанных с выдвиганием или отступанием береговой линии), и объясняется близкое к нулю сальдо между пляжем и ФДВ на всём участке.

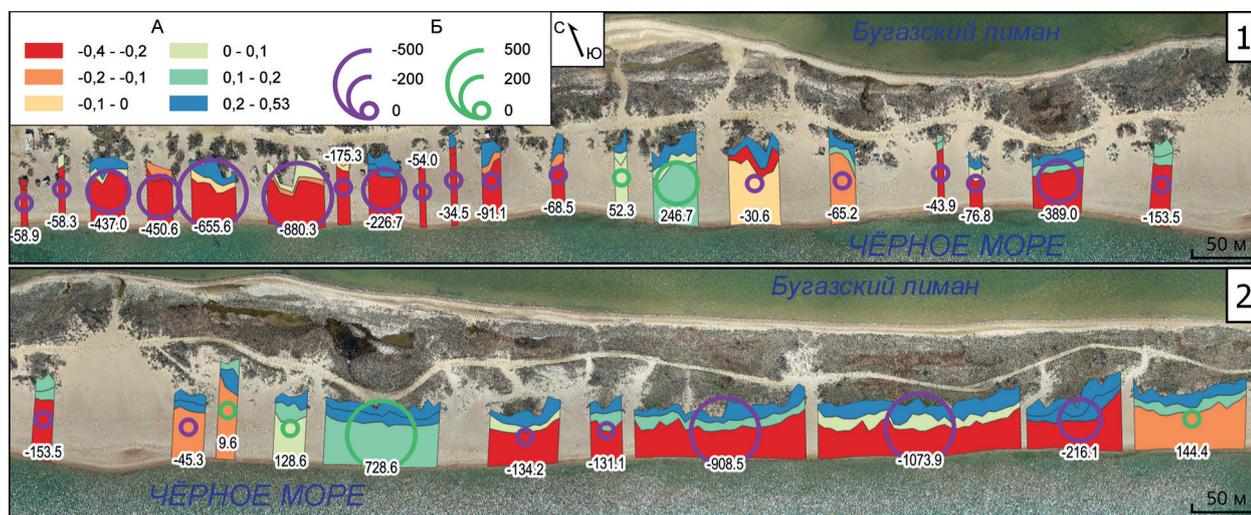


Рис. 6. Сальдо перенесённого материала за 2015–2019 гг. А — удельное сальдо по полигонам в составе фрагментов, $\text{м}^3/\text{м}^2$; Б — сальдо по фрагментам, м^3

На карте 2015–2019 гг. (рис. 6) также заметна зависимость значения сальдо внутри всего фрагмента от удельного значения сальдо на полигоне пляжа. В отличие от 2013–2015 гг. в восточной половине участка на всех фрагментах аккумуляция наблюдается не только на подветренном склоне ФДВ, но и на 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.

Заключение

Разновременные данные ВЛС и съёмки с БПЛА могут применяться для исследования динамики рельефа береговой зоны, однако для этого необходимо выполнять оценку взаимного положения облаков точек, их согласование в плане и по высоте, автоматизировано классифицировать точки земной поверхности.

Разработанная методика автоматизированного выделения линий гребня и нижних границ склонов ФДВ по ЦМР может эффективно применяться для оценки динамики рельефа не только Анапской пересыпи, но и других аккумулятивных береговых форм рельефа барьерного типа.

Составленные карты смещения гребня ФДВ и сальдо перенесённого материала характеризуют пространственную дифференциацию изменений рельефа береговой зоны, а также позволяют определить их количественные параметры, получить которые в полевых условиях на такой площади и с таким высоким разрешением крайне сложно.

Рассчитаны объёмы аккумуляции и денудации, а также сальдо перенесённого материала для зоны пляжа и склонов ФДВ на всём исследуемом участке. Сальдо перенесённого материала для системы «пляж – ФДВ» в 2013–2015 гг. составило $94,35 \text{ м}^3$, а в 2015–2019 гг. было равно $-5113,78 \text{ м}^3$. В зоне пляжа на исследуемом участке в течение обоих периодов преобладает вынос материала. Для наветренного склона в 2013–2015 гг. преобладает денудация, а в 2015–2019 гг. — аккумуляция, однако сальдо перенесённого материала в обоих случаях го-

раздо меньше сальдо на пляже и подветренном склоне. Для подветренного склона ФДВ в течение обоих периодов характерна аккумуляция, значительно преобладающая по объёму над денудацией.

Съёмка Анапской пересыпи с БПЛА в 2018 и 2019 гг. проведена в рамках выполнения проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00333 и 19-45-230004. Обработка данных ВЛС и АФС выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00060).

Литература

1. *Весничева Г. А., Худяков В. Ф., Яковлева З. К., Яцевич Г. Б.* Обработка результатов измерений: Методические указания. СПб.: ГУАП, 2003. 46 с.
2. *Косьян Р. Д., Крыленко В. В.* Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование. М.: Науч. мир, 2014. 256 с.
3. *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.
4. *Кравцова В. И., Чалова Е. Р.* Картографирование ландшафтно-морфологической структуры северо-западной части Анапской пересыпи по цифровым аэрофотоснимкам высокого разрешения // *Геодезия и картография*. 2017. Т. 78. № 9. С. 20–27.
5. *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.
6. *Крыленко В. В.* Природные и антропогенные факторы, определяющие эволюцию Анапской пересыпи: дис. ... канд. геогр. наук. Геленджик, 2011. 129 с.
7. *Крыленко В. В.* Динамика морского берега Анапской пересыпи // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 5. С. 821–828.
8. *Шуйский Ю. Д.* Проблемы исследования баланса наносов в береговой зоне морей. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 240 с.
9. Agisoft Metashape User Manual. Professional Edition. Version 1.5. 2019. 145 p. URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf.
10. *Anders N., Valente J., Masselink R., Keesstra S.* Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds // *Drones*. 2019. V. 3. No. 3. Art. No. 61. 14 p.
11. *Boyko E., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // *Proc. 3rd Intern. Conf. Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*. 2015. Art. No. 95351Q. 9 p.
12. *Di K., Ma R., Wang J., Li R.* Coastal mapping and change detection using high-resolution IKONOS satellite imagery // *Proc. 2003 Annual National Conf. Digital Government Research. Digital Government Society of North America*, 2003. P. 1–4.
13. *Hengl T.* Finding the right pixel size // *Computers and Geosciences*. 2006. V. 32. No. 9. P. 1283–1298.
14. *Long N., Millescamp B., Guillot B., Pouget F., Bertin X.* Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 5. Art. No. rs8050387. 18 p.
15. *Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G.* Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. No. 12. P. 6880–6898.
16. *Mitasova H., Overton M., Harmon R. S.* Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina // *Geomorphology*. 2005. V. 72. No. 1. P. 204–221.
17. *Mitasova H., Overton M., Recalde J. J., Bernstein D. J., Freeman C. W.* Raster-based analysis of coastal terrain dynamics from multitemporal lidar data // *J. Coastal Research*. 2009. V. 25. Iss. 2. P. 507–514.
18. *Sallenger Jr. A. H.* Storm impact scale for barrier islands // *J. Coastal Research*. 2000. V. 16. No. 3. P. 890–895.
19. *Saye S. E., Van der Wal D., Pye K., Blott S. J.* Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data // *Geomorphology*. 2005. V. 72. No. 1. P. 128–155.
20. *Stockdon H. F., Doran K. S., Sallenger Jr. A. H.* Extraction of lidar-based dune-crest elevations for use in examining the vulnerability of beaches to inundation during hurricanes // *J. Coastal Research*. 2009. No. 53. P. 59–65.

21. Sturdivant E. J., Lentz E. E., Thieler E. R., Farris A. S., Weber K. M., Remsen D. P., Miner S., Henderson R. E. UAS-SfM for coastal research: Geomorphic feature extraction and land cover classification from high-resolution elevation and optical imagery // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 10: 1020.
22. Taddia Y., Corbau C., Zambello E., Russo V., Simeoni U., Russo P., Pellegrinelli A. UAVs to assess the evolution of embryo dunes // *The Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017. V. 42. P. 363–369.

Assessment of terrain changes in the coastal zone using airborne laser scanning and unmanned aerial vehicle survey data (case study of the Anapa bay-bar)

M. D. Drugov¹, O. V. Tutubalina¹, V. V. Krylenko²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: midrug@gmail.com

² *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: krylenko.slava@gmail.com

We have assessed terrain changes for a section of the Anapa Bay using airborne laser scanning data (2013, 2015) and surveys from an unmanned aerial vehicle (2019). We present an automated method to identify the frontal dune (FD) crest and lower boundaries of the FD slopes using point clouds of digital elevation models and a system of transverse profiles. Analysis of the compiled maps shows that the areas where the FD is divided into fragments are characterized by the leveling of its front and the accumulation of material along the passages crossing the dune. Results of our quantitative assessment indicate that the balance of the transferred material for the “beach-FD” system in the study area in 2013–2015 amounted to 94.35 m³, and in 2015–2019 to –5113.78 m³. In the beach area, the removal of sand prevailed over both periods, while on the leeward slope of the FD accumulation prevailed significantly in volume over denudation. On the windward slope of the FD denudation prevailed in 2013–2015, and accumulation prevailed in 2015–2019. However, the balance in both cases is much less than on the beach and leeward slope.

Keywords: terrain changes, coastal zone, laser scanning, unmanned aerial vehicle, digital elevation model

Accepted: 26.01.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-115-127

References

1. Vesnicheva G. A., Khudyakov V. F., Yakovleva Z. K., Yatsevich G. B., *Processing of measurement results: Methodology guidelines*, Saint Petersburg: GUAP, 2003, 46 p. (in Russian).
2. Kos'yan R. D., Krylenko V. V., *The current state of the accumulative coasts of Krasnodar region and their management*, Moscow: Nauchnyi mir, 2014, 256 p. (in Russian).
3. Kravtsova V. I., Drugov M. D., Types of dune terrain dynamics of Anapa bay bar: research based on airborne lidar data, *Geodeziya i kartografiya*, 2019, Vol. 80, No. 2, pp. 33–46 (in Russian).
4. Kravtsova V. I., Chalova E. R., Mapping of landscape-morphological structure of the Northern-Western part of Anapa bay bar by digital high-resolution aerial images, *Geodeziya i kartografiya*, 2017, Vol. 78, No. 11, pp. 29–39 (in Russian).
5. Kravtsova V. I., Krylenko V. V., Boyko E. S., Drugov M. D., Morphological dynamics study of northwestern part of Anapa bay bar based on airborne lidar data, *Geoinformatika*, 2017, No. 4, pp. 48–62 (in Russian).
6. Krylenko V. V., *Prirodnye i antropogennye faktory, opredelyayushchie evolyutsiyu Anapskoi peresypi: Diss. kand. geog. nauk* (Natural and anthropogenic factors, defining the evolution of Anapa bay bar: Cand. geog. sci. thesis), Gelendzhik, 2011, 129 p. (in Russian).

7. Krylenko V.V., New Data about Sea-Shore Dynamics of the Anapa Bay-Bar, *Okeanologiya*, 2015, Vol. 55, No. 5, pp. 821–828 (in Russian).
8. Shuyskiy Yu. D., *Problemy issledovaniya balansa nanosov v beregovoii zone morei* (Problems of drifts balance investigation in coastal zone), Leningrad: Gidrometizdat, 1986, 240 p. (in Russian).
9. *Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition, Version 1.5*, 2019, 145 p., available at: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf.
10. Anders N., Valente J., Masselink R., Keesstra S., Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds, *Drones*, 2019, Vol. 3, No. 3, Art. No. 61, 14 p.
11. Boyko E., Krylenko V., Krylenko M., LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts, *Proc. 3rd Intern. Conf. Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*, 2015, Art. No. 95351Q, 9 p.
12. Di K., Ma R., Wang J., Li R., Coastal mapping and change detection using high-resolution IKONOS satellite imagery, *Proc. 2003 Annual National Conf. Digital Government Research*, Digital Government Society of North America, 2003, pp. 1–4.
13. Hengl T., Finding the right pixel size, *Computers and Geosciences*, 2006, Vol. 32, No. 9, pp. 1283–1298.
14. Long N., Millescamp B., Guillot B., Pouget F., Bertin X., Monitoring the topography of a dynamic tidal inlet using UAV imagery, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 5, Art. No. rs8050387, 18 p.
15. Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G., Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments, *Remote sensing*, 2013, Vol. 5, No. 12, pp. 6880–6898.
16. Mitsova H., Overton M., Harmon R.S., Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina, *Geomorphology*, 2005, Vol. 72, No. 1, pp. 204–221.
17. Mitsova H., Overton M., Recalde J.J., Bernstein D.J., Freeman C.W., Raster-based analysis of coastal terrain dynamics from multitemporal lidar data, *J. Coastal Research*, 2009, Vol. 25, Issue 2, pp. 507–514.
18. Sallenger Jr. A.H., Storm impact scale for barrier islands, *J. Coastal Research*, 2000, Vol. 16, No. 3, pp. 890–895.
19. Saye S.E., Van der Wal D., Pye K., Blott S.J., Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data, *Geomorphology*, 2005, Vol. 72, No. 1, pp. 128–155.
20. Stockdon H.F., Doran K.S., Sallenger Jr. A.H., Extraction of lidar-based dune-crest elevations for use in examining the vulnerability of beaches to inundation during hurricanes, *J. Coastal Research*, 2009, No. 3, pp. 59–65.
21. Sturdivant E.J., Lentz E.E., Thieler E.R., Farris A.S., Weber K.M., Remsen D.P., Miner S., Henderson R.E., UAS-SfM for coastal research: Geomorphic feature extraction and land cover classification from high-resolution elevation and optical imagery, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 10: 1020.
22. Taddia Y., Corbau C., Zambello E., Russo V., Simeoni U., Russo P., Pellegrinelli A., UAVs to assess the evolution of embryo dunes, *The Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, Vol. 42, pp. 363–369.