

## Расчет морфометрических характеристик валов косы Долгая по цифровой модели рельефа

*В. В. Кулыгин<sup>1\*</sup>, С. А. Мисиров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

\* e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

**Аннотация.** Рассмотрены возможности автоматизированного выделения и морфометрического анализа одновременных ракушечных валов по цифровой модели рельефа (ЦМР) на основе данных съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на косе Долгая. Обоснована необходимость проведения фильтрации на уровне облака точек и после создания ЦМР перед проведением геоморфологического анализа. Представлена автоматизированная процедура выделения линий гребней береговых валов на основе ЦМР. Выполнена идентификация береговых валов в центральной части косы Долгая и расчет их морфометрических характеристик. Средняя высота валов составила около 0,5 м, ширина – 16 м. Анализ результатов автоматизированного выделения валов по ЦМР и их сравнение с результатами наземных наблюдений показали существенные расхождения в значениях морфометрических характеристик по простиранию валов.

**Ключевые слова:** цифровая модель рельефа, беспилотный летательный аппарат, фильтрация, RANSAC, морфометрические характеристики, береговые валы, коса Долгая

### *Введение*

Земная поверхность структурно представляется совокупностью форм рельефа, образованных в результате влияния геоморфологических, геологических, гидрологических и почвообразующих процессов. В настоящее время для количественной характеристики геоморфологических объектов и их картографирования в исследованиях береговых систем все чаще применяются цифровые модели рельефа (ЦМР), построенные на основе съемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1–5]. Этот способ создания ЦМР позволяет получить в короткие сроки весьма высокое пространственное разрешение при сравнительно низких затратах на проведение съемки [6, 7]. Однако высокое пространственное разрешение и абсолютная точность значений высот не являются самыми важными показателями качества ЦМР для геоморфометрического анализа. Например, даже там, где значения высот измеряются очень точно, результаты анализа могут быть неудовлетворительными (например, из-за слишком зашумленной ЦМР; отсутствия фильтрации слоя растительности). Для качественного геоморфометрического анализа более важно, чтобы ЦМР точно соответствовала реальным фор-

мам поверхности Земли. Поэтому активно разрабатываются алгоритмы фильтрации для подавления шумов, применяемые как на уровне облаков точек (например, [8, 9]), так и на уровне цифровой модели рельефа (например, [10–12] и др.).

Решение задачи классификации геоморфологических объектов основано на использовании морфометрических характеристик рельефа, среди которых выделяют следующие основные группы: локальные, нелокальные, солярные, комбинированные [13]. Для определения форм рельефа наибольшее распространение получили методы на основе локальных морфометрических характеристик, являющихся функциями частных производных высоты [14]. Линейные объекты, такие как урезы воды, гребни, подошвы и межгребневые ложины валов, извлеченные из ЦМР, также используются для характеристики рельефа и количественной оценки динамики земной поверхности с точки зрения скорости миграции этих объектов в плане.

Обычный подход к идентификации таких линейных объектов состоит в том, чтобы свести ЦМР к серии сглаженных профилей, расположенных по нормали к некоторой линии (например, береговой линии) и определить на них точки перегиба на основе перехода от по-

ложительного к отрицательному градиенту уклона [15, 16].

Точки перегиба интерпретируются как положение гребня вала на данном профиле, а линия гребня вала извлекается путем ручного соединения (и возможной корректировки) ряда точек перегиба на соседних профилях. Этот подход используется достаточно часто (например, [17, 18]).

Другой метод поиска гребня и нижней границы наветренного склона берегового вала заключается в использовании алгоритма поиска пути с наименьшей стоимостью (Least Cost Path) между двумя заданными точками [19]. По сравнению с традиционным методом, основанном на локальных экстремумах и кривизне вдоль профилей, этот подход создает непрерывную линию гребня вала с минимальными ручными корректировками.

В работе [20] предложен автоматизированный подход для извлечения морфологии в береговой зоне с выделением линий гребней валов и подошв наветренного и подветренного склонов на основе анализа среднего относительного рельефа в разных пространственных масштабах.

Береговые аккумулятивные формы являются наиболее динамичными участками бере-

говой зоны. В Азовском море большая часть аккумулятивных форм представлена косами, расположенными вдоль всего побережья. Исследование особенностей строения рельефа аккумулятивных форм позволяет уточнять закономерности их развития под влиянием различных факторов.

Так, в [21] на основе данных дистанционного зондирования проанализирована динамика береговой линии, донный и наземный рельеф, выявлены закономерности и условия, определившие трансформацию косы Долгая в ходе ее эволюции. Целью настоящей работы является выделение микроформ рельефа на косе Долгая, в частности разновременных ракушечных валов, на основе данных БПЛА съемки. Предполагается, что информация о расположении и морфометрических характеристиках валов позволит впоследствии уточнить детали процесса развития косы.

### *Материалы и методы исследований*

Объектом исследования является коса Долгая – аккумулятивная береговая форма рельефа, отделяющая Таганрогский залив и открытую часть Азовского моря (рис. 1).

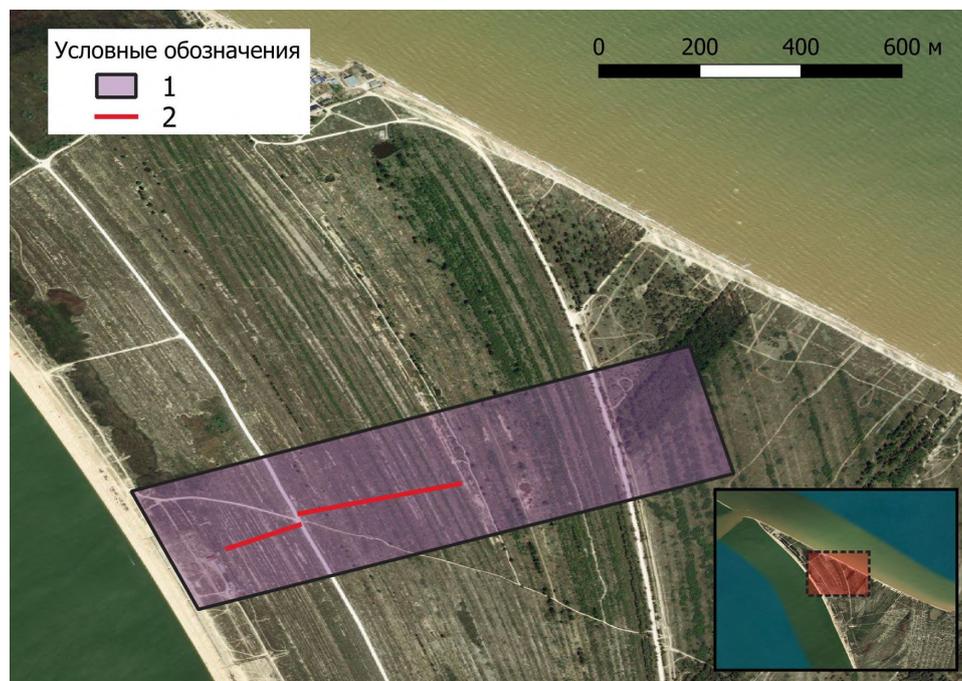


Рис. 1. Территория исследований на косе Долгая:

1 – покрытие материалами аэрофотосъемки, 2 – треки наземных маршрутов. Подложка – композит World Imagery Esri

Она простирается от коренного берега в северо-западном направлении на расстояние около 10 км (без учета дистальной части, почти полностью размытой в 2014 г., и подводной отмели). Поверхность центральной части косы имеет грядово-ложбинный рельеф [21]. Возраст генераций ракушечных гряд уменьшается с 2 300 лет на юго-западе до 1 570 лет к центральной части косы [22]. Формирование валов из песка и ракуши происходит на западной стороне косы, после чего они постепенно смещаются к востоку.

Для исследования микрорельефа косы Долгая использовались результаты съемки участка центральной части косы беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) DJI «Phantom 4 Advanced» (см. рис. 1). Площадь участка съемки составила около 0,53 км<sup>2</sup>. При подготовке маршрута полета было заложено обеспечение 60 % поперечного и 65 % продольного перекрытия снимков. При выполнении полета автоматическая съемка велась через 2 с. Для повышения точности привязки аэрофотосъемки перед ее началом было произведено размещение 19 наземных опознаков. При их размещении учитывалась схема планируемой траектории пролета БПЛА, наличие и состояние растительного покрова. Координаты опознаков определялись геодезическим GNSS-приемником «EFT M4 GNSS».

В результате аэрофотосъемки были получены 502 снимка. Для дальнейшей обработки использовалось программное обеспечение Agisoft MetaShare. На первом этапе производилось построение разреженного облака точек с последующим уточнением его пространственной привязки по координатам опознаков. Далее в Agisoft Metashape строилось плотное облако точек на основе карт глубины по алгоритму «Semi-Global Matching». Плотное облако использовалось для создания ортофотоплана и цифровой модели поверхности путем интерполяции методом естественной окрестности. Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) использовался инструмент из Agisoft Metashape для автоматической классификации точек с целью выделения точек класса «земля».

Для региона исследования были выбраны следующие параметры этого инструмента:

максимальный угол – 5°; максимальное расстояние – 0,1 м; размер ячейки – 25 м. Результат автоматической классификации прошел ручной контроль для выявления ошибок и удаления ложных точек.

Точки класса «земля» использовались для построения ЦМР в результате интерполяции методом естественной окрестности в Agisoft Metashape.

Пространственное разрешение для создания ЦМР определялось по среднему расстоянию между парами точек плотного облака и составило 0,05 м. Однако следует учитывать, что применяемые на практике методы классификаций форм рельефа относятся к определенному масштабу или узкому диапазону масштабов. Они, как правило, рассматривают изменения поверхности земли, происходящие ниже заданного масштаба, как случайный шум, который следует игнорировать или удалять, а изменения в заданном конкретном масштабе или в ограниченном диапазоне масштабов как сигнал, который необходимо распознать и интерпретировать. Поэтому для геоморфологического анализа следует выбрать более грубое разрешение, исходя из предметной области [23]. Ширина валов на исследуемом участке косы Долгая изменяется от 6 до 30 м [24], поэтому пространственное разрешение ЦМР для выделения валов не должно превышать 3 м. В связи с этим для выполнения анализа была подготовлена вторая ЦМР с разрешением 0,5 м.

Качество построенной ЦМР оценивалось путем сравнения с наземными отметками высот, измерения которых проводились вдоль маршрута, перпендикулярного основной ориентации береговых валов, с помощью геодезического GNSS приемника «EFT M4 GNSS» (см. рис. 1). Для этого использовались такие показатели, как средняя абсолютная ошибка и среднеквадратическое отклонение.

Для выделения линий гребней береговых валов и ложин между ними за основу взят подход [15] и дополнен процедурой объединения точек в непрерывную линию гребня вала. Предлагаемая полуавтоматическая процедура состоит из следующих этапов:

- 1) создание набора линий профилей и извлечение в них значений из ЦМР;

2) сглаживание профилей для устранения высокочастотного шума;

3) определение положения точек гребней валов и лощин между ними на каждом профиле;

4) объединение выделенных точек гребней валов с соседних профилей в единую линию гребня берегового вала.

Сначала была определена базовая линия, ориентированная вдоль основного направления валов с северо-запада на юго-восток и расположенная в западной части территории исследования. Далее через каждый 1 м автоматически создавались линии профилей, перпендикулярные базовой линии. Профили разбивались на точки с шагом 0,5 м, в каждую из которых извлекалось значение из соответствующей ячейки ЦМР.

В работе [25] было показано, что для условий косы Долгая уровень шума часто соизмерим с полезным сигналом. Поэтому фильтрация на уровне облака точек не в состоянии полностью устранить все шумы.

В связи с этим для снижения уровня высокочастотного шума в построенных профилях перед последующим дифференцированием применялась низкочастотная фильтрация и сглаживание. Для этого использовался метод анализа сингулярного спектра [26] с длиной окна, равной 5 м.

Для удаления влияния мелких неровностей, оставшихся после фильтрации, линии профилей были дополнительно генерализованы с помощью алгоритма Дугласа – Пекера (рис. 2).

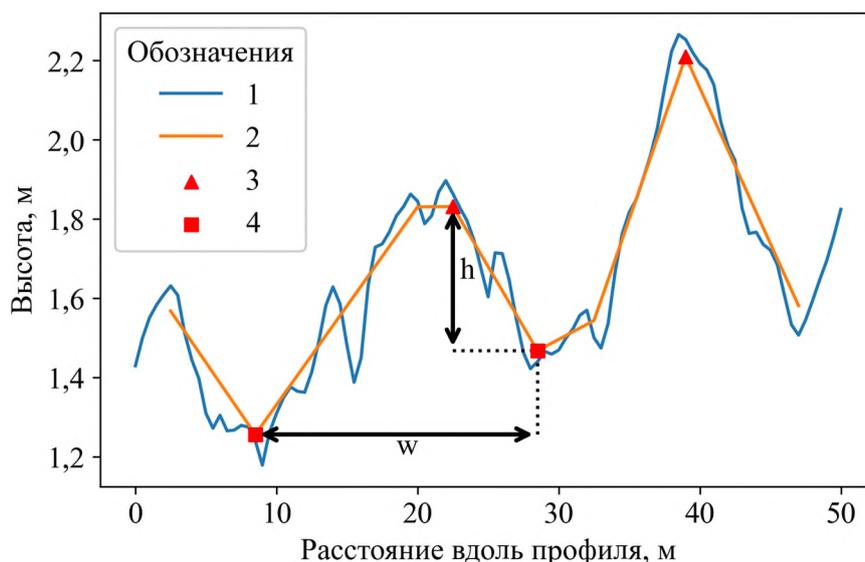


Рис. 2. Участок профиля с исходными значениями высот по ЦМР (1); сглаженный генерализованный профиль (2); точки гребней валов (3) и лощин между ними (4), используемые для расчета ширины ( $w$ ) и высоты ( $h$ ) вала

Алгоритм идентификации гребней валов на профиле заключается в поиске локальных максимумов на сглаженном профиле с последующей фильтрацией по морфологическим характеристикам: высоте ( $h$ ) и ширине ( $w$ ) вала. Вычисление морфологических характеристик выполняется следующим образом. Между соседними максимумами ищется минимум, который принимается за лощину между валами. Ширина вала определяется как расстояние между соседними миниму-

мами, а высота – как разница высотной отметки гребня вала и максимумом между высотными отметками ограничивающих его минимумов (см. рис. 2). Для отбора точек гребней валов были определены следующие критерии: высота гребня должна быть больше 0,2 м; ширина вала должна быть менее 30 м. Первое условие обеспечивает фильтрацию незначительных возвышенностей; второе – исключает сильно антропогенно преобразованные участки.

Для автоматизированного объединения точек гребней валов с соседних профилей в непрерывные линии использовался алгоритм RANSAC (Random sample consensus) [27]. Алгоритм RANSAC запускается в окне 40 м, которое последовательно движется вдоль всех профилей. Внутри окна выполняется несколько итераций, на каждой из которых все точки разделяются на два типа: точки, удовлетворяющие линейной модели (т. е. близко расположенные к некоторой линии), и остальные («выбросы»). В качестве критерия близости использовалась дистанция 3 м. Точки первого типа объединяются в линию и исключаются из дальнейшего рассмотрения. На следующей итерации процедура повторяется для оставшихся точек. Результаты автоматизированного объединения гребней в линии проверяются оператором, и в случае необходимости проводится их ручное редактирование.

Оценка качества выделения береговых валов выполнялась путем сравнения с данными наземных измерений и визуального контроля формы полученных объектов. По наземным точкам, идентифицированным как гребни валов и лощины, проверялась их принадлежность соответствующей морфологической структуре по расстоянию до ближайшей линии гребня или лощины.

Для каждого берегового вала рассчитывались средняя ширина и высота, а также их

среднеквадратичные отклонения по точкам на соседних профилях.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены высотные профили вдоль восточной части пешего маршрута (см. рис. 1) по результатам наземных измерений и обработки данных аэрофотосъемки.

Во время проведения БПЛА съемки растительность на косе была достаточно сильно развита. Высота растительности в центре косы составляла 40–60 см, ближе к восточному и западному берегу косы – 20–40 см. Абсолютные высотные отметки, полученные по данным аэрофотосъемки, позволяют строить высотную модель поверхности. После фильтрации на уровне облака точек удалось избавиться от вклада крупной растительности (см. рис. 3). Наибольшие различия между высотами по цифровой модели поверхности и высотами по ЦМР приходятся на кустарники размером около 1 м.

Таким образом, после построения ЦМР удалось заметно снизить влияние растительного покрова на качество ЦМР, однако погрешности остались существенными. При сравнении с данными наземных отметок средняя абсолютная ошибка по высоте составила 19 см, среднеквадратическое отклонение – 22 см.

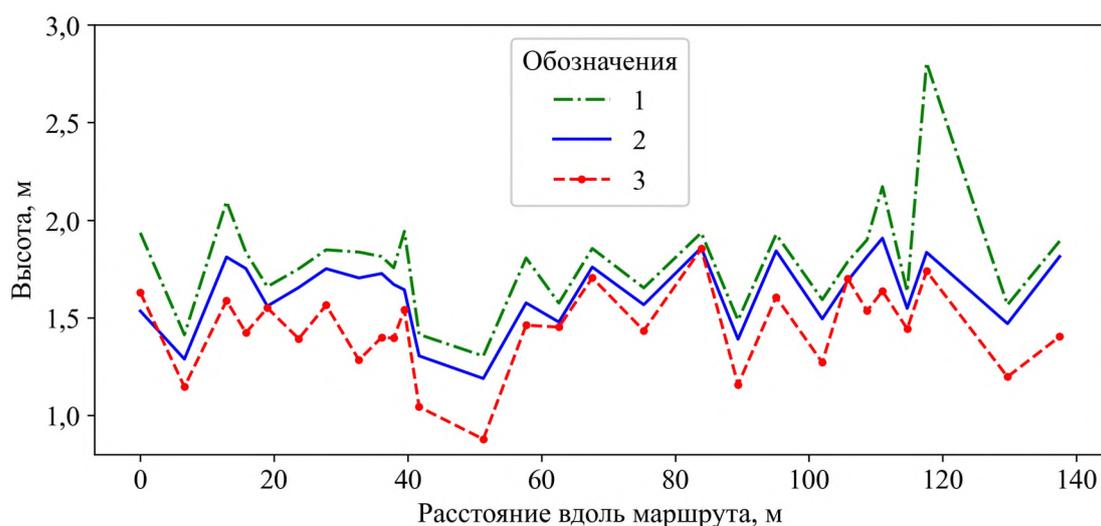


Рис. 3. Участок восточной части маршрута наземных наблюдений:

1 – профиль по цифровой модели поверхности; 2 – профиль по ЦМР; 3 – профиль по точкам наземных измерений

Для участка аэрофотосъемки было построено 290 профилей, на каждом из которых определялись высотные отметки гребней береговых валов. На соседних профилях выделено разное количество точек гребней, в следствии того, что траектории береговых валов прерываются. Особенно это характерно для районов антропогенных преобразований рельефа: участки дорог и тропинок, карьеры и т. д.

В результате применения автоматизированной процедуры в области исследования были выделены 35 валов (рис. 4, таблица). Линии, соответствующие насыпям вдоль дорог, были исключены вручную. В итоге береговые валы хорошо выделяются только в западной части участка аэрофотосъемки (на расстоянии примерно 780 м от юго-западного берега, исключая зону пляжа).

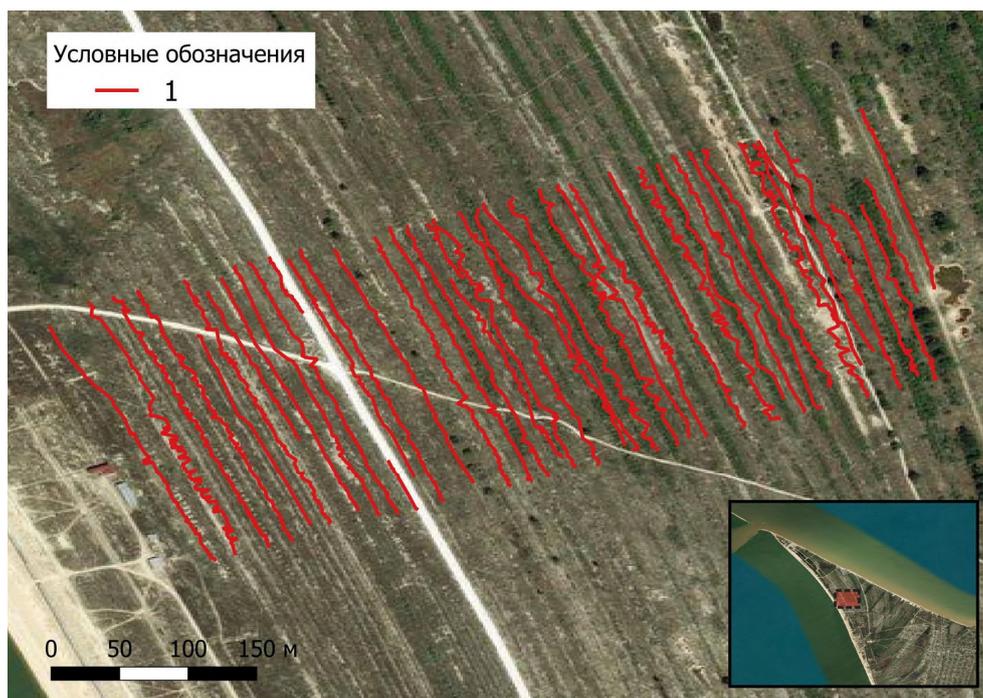


Рис. 4. Автоматически выделенные линии гребней береговых валов (1)

#### Характеристики береговых валов

Номер вала	Расчет по ЦМР		Оценка по наземным измерениям	
	Высота, м	Ширина, м	Высота, м	Ширина, м
1	0,65 ± 0,17	20,40 ± 3,54	–	–
2	0,52 ± 0,11	17,86 ± 4,46	0,7	19,9
3	0,49 ± 0,12	20,80 ± 3,78	0,5	11,7
4	0,61 ± 0,14	16,87 ± 2,33	1,0	17,7
5	0,34 ± 0,08	13,75 ± 2,77	0,6	13,8
6	0,43 ± 0,10	16,18 ± 2,64	0,4	17,4
7	0,53 ± 0,11	13,66 ± 2,62	0,6	12,8
8	0,43 ± 0,13	14,70 ± 4,88	1,0	14,4
9	0,36 ± 0,08	12,96 ± 2,94	0,4	9,1
10	0,76 ± 0,15	16,67 ± 3,42	1,0	14,7
11	0,45 ± 0,15	16,57 ± 5,38	0,4	9,2
12	0,42 ± 0,08	15,19 ± 4,49	0,7	18,6

Номер вала	Расчет по ЦМР		Оценка по наземным измерениям	
	Высота, м	Ширина, м	Высота, м	Ширина, м
13	0,55 ± 0,16	18,58 ± 3,87	0,3	12,7
14	0,45 ± 0,10	14,72 ± 2,14	0,7	14,1
15	0,40 ± 0,10	12,06 ± 2,04	0,4	12,6
16	0,43 ± 0,10	14,93 ± 4,91	0,2	6,1
17	0,48 ± 0,17	16,39 ± 4,39	0,5	14,9
18	0,47 ± 0,14	18,34 ± 3,97	0,2	15,2
19	0,39 ± 0,14	16,70 ± 4,94	0,1	14,2
20	0,38 ± 0,12	16,78 ± 4,84	0,3	9,3
21	0,38 ± 0,11	16,54 ± 3,92	0,2	17,8
22	0,41 ± 0,14	17,94 ± 4,33	0,2	19,4
23	0,35 ± 0,07	11,23 ± 3,73	0,2	11,9
24	0,41 ± 0,09	15,08 ± 3,18	0,4	11,1
25	0,34 ± 0,07	15,46 ± 5,09	0,4	19,2
26	0,54 ± 0,13	18,98 ± 4,22	0,6	29,3
27	0,47 ± 0,14	14,33 ± 3,73	0,2	8,4
28	0,37 ± 0,06	13,77 ± 3,25	0,4	11,1
29	0,34 ± 0,11	12,89 ± 2,74	0,3	13,5
30	0,74 ± 0,35	18,56 ± 4,38	0,2	20,5
31	0,70 ± 0,22	15,70 ± 4,19	0,3	10,9
32	0,50 ± 0,25	16,25 ± 3,81	0,5	21,2
33	0,57 ± 0,34	14,77 ± 3,00	0,3	11,6
34	0,48 ± 0,20	17,04 ± 5,02	0,6	13,2
35	0,80 ± 0,36	17,91 ± 3,72	0,4	17,4

*Примечания.* Береговые валы пронумерованы в порядке следования от юго-западного берега; высота и ширина валов дана в форме «среднее значение ± среднее квадратичное отклонение»; «—» – отсутствие данных.

Средняя высота валов составила 0,48 м при амплитуде от 0,34 до 0,8 м. Абсолютные перепады высот вдоль валов незначительные, о чем говорит среднее квадратичное отклонение. Среднее по всем валам среднее квадратичное отклонение высоты равно 0,14 м, минимум 0,06 м, максимум 0,36 м. Однако относительно высоты валов эта величина существенна (средний коэффициент вариации 30 %), что затрудняет идентификацию гребня вала при визуальном анализе на месте и говорит в пользу использования для этих целей автоматизированных методов.

Ширина валов варьируется от 11,2 до 20,8 м при среднем значении 16 м. Средний уровень

вариации ширины валов немного ниже, чем у высоты и составляет 24 %. Среднее по всем валам среднее квадратичное отклонение ширины равно 3,8 м, с размахом от 2 до 5,4 м.

Сравнение результатов работы автоматизированного выделения валов с данными наземной съемки показывает не совсем однозначное соответствие (см. таблицу). При этом видно, что локальные точечные измерения дают смещенную оценку морфологических характеристик.

Тем не менее оценки высоты вала по наземным наблюдениям находятся в пределах двух стандартных отклонений для 85 % точек; оценки ширины вала – для 94 % точек.

Данные, приведенные в таблице, количественно подтверждают полученный ранее результат [24, 25] о закономерностях распространения береговых валов на косе. При движении от юго-западного берега к центру косы наблюдается незначительное уменьшение как высоты, так и ширины береговых валов.

### Заключение

Материалы съемки с БПЛА позволяют подготавливать детальные ЦМР с точностью, достаточной для исследования микро- и нанорельефа в береговой зоне.

При построении ЦМР для территорий, характеризующихся высокой степенью шумовой компоненты, необходимо проводить фильтрацию как на уровне облака точек, так и после создания цифровой поверхности пе-

ред проведением геоморфологического анализа.

После фильтрации ЦМР удалось заметно снизить влияние растительного покрова на качество ЦМР, однако погрешности остались существенными (достигающие половины высоты береговых валов) и предложенный в работе метод требует доработки.

Разработанная автоматизированная процедура выделения линий гребня береговых валов по ЦМР позволяет эффективно оценить расположение валов в береговой зоне с грядово-ложбинный рельефом.

По результатам БПЛА съемки построена ЦМР для участка косы Долгая, из которой с использованием автоматизированной процедуры извлечена информация по береговым валам. Средние размеры валов составили: высота 0,5 м, ширина 16 м.

*Разработка алгоритма выделения линий гребня валов проведена в рамках выполнения ГЗ ЮИЦ РАН, № гр. проекта 122013100131-9. Расчет и исследование морфометрических характеристик косы Долгая выполнено при финансовой поддержке РФФ, грант № 20-17-00196.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 (12). – P. 6880–6898. – DOI 10.3390/rs5126880.
2. Gonçalves J. A., Henriques R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 104. – P. 101–111. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009.
3. Brunier G., Fleury J., Anthony E. J., Gardel A., Dussouillez P. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach // *Geomorphology*. – 2016. – Vol. 261. – P. 76–88. – DOI 10.1016/j.geomorph.2016.02.025.
4. Turner I. L., Harley M. D., Drummond C. D. UAVs for coastal surveying // *Coastal Engineering*. – 2016. – Vol. 114. – P. 19–24. – DOI 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.
5. Guisado-Pintado E., Jackson D. W. T., Rogers D. 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone // *Geomorphology*. – 2019. – Vol. 328. – P. 157–172. – DOI 10.1016/j.geomorph.2018.12.013.
6. Ламков И. М., Чермошенцев А. Ю., Арбузов С. А., Гук А. П. Исследование возможностей применения квадрокоптера для съемки береговой линии обводненного карьера с целью государственного кадастрового учета // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 200–209.
7. Зарипов А. С. Особенности создания трехмерной цифровой модели Центрального планировочного района города Перми по данным аэрофотосъемки // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 160–168.
8. Zeybek M., Sanlioglu I. Point cloud filtering on UAV based point cloud // *Measurement*. – 2019. – Vol. 133. – P. 99–111. – DOI 10.1016/j.measurement.2018.10.013.
9. Anders N., Valente J., Masselink R., Keesstra S. Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds // *Drones*. – 2019. – Vol. 3(3). – P. 61. – DOI 10.3390/drones3030061.
10. Голяндина Н. Э., Усевич К. Д., Флоринский И. В. Анализ сингулярного спектра для фильтрации цифровых моделей рельефа // *Геодезия и картография*. – 2008. – № 5. – С. 21–28.
11. Wei Z., Han Y., Li M., Yang K., Yang Y., Luo Y., Ong S.-H. A Small UAV Based Multi-Temporal Image Registration for Dynamic Agricultural Terrace Monitoring // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9 (9). – P. 904. – DOI 10.3390/rs9090904.

12. Skarlatos D., Vlachos M. Vegetation removal from UAV derived DSMS, using combination of rgb and nir imagery // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2018. – Vol. IV-2. – P. 255–262. – DOI 10.5194/isprs-annals-IV-2-255-2018.
13. Флоринский И. В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2016. – Т. 11, № 1. – Режим доступа: [http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/PDF-files/2227-9490e-aprov\\_r\\_e-ast11-1.2016.71.pdf](http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/PDF-files/2227-9490e-aprov_r_e-ast11-1.2016.71.pdf).
14. Флоринский И. В. Точный метод расчета локальных характеристик рельефа // *Геодезия и картография*. – 2009. – № 4. – С. 19–23.
15. 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 // *Journal of Coastal Research*. – 2009. – No. 53. – P. 59–65. – DOI 10.2112/SI53-007.1.
16. Gao Y. Algorithms and software tools for extracting coastal morphological information from airborne LiDAR data: master thesis. – Texas : A&M University, 2009. – P. 135.
17. Singh S., Kumar K. V., Rao M. J. Utilization of LiDAR DTM for Systematic Improvement in Mapping and Classification of Coastal Micro-Geomorphology // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 48 (5). – P. 805–816. – DOI 10.1007/s12524-020-01114-7.
18. 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. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-2-115-127.
19. Mitasova H., Hardin E., Starek M. J., Harmon R. S., Overton M. F. Landscape dynamics from LiDAR data time series. *Geomorphometry*. 2011. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geospatial.ncsu.edu/osgeorel/pubpdf/Mitasova2011geomorphometry.pdf>.
20. Wernette P., Houser C., Bishop M. P. An automated approach for extracting Barrier Island morphology from digital elevation models // *Geomorphology*. – 2016. – Vol. 262. – P. 1–7. – DOI 10.1016/j.geomorph.2016.02.024.
21. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Возможности изучения рельефа и динамики береговой линии аккумулятивных форм по данным дистанционного зондирования на примере геосистемы Косы Долгая // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 58–70.
22. Артюхин Ю. В. Генезис, морфология и развитие аккумулятивных барьеров Азовского моря и Керченского пролива – кос Долгая и Тузла // *Азовского море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Черном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования сб. науч. ст. / гл. ред. акад. Г. Г. Матишов, акад. В. А. Иванов*. – Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2012. – С. 165–175.
23. Florinsky I. V., Kuryakova G. A. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale // *International Journal of Geographic Information Science*. – 2000. – Vol. 14, No. 8. – P. 815–832.
24. Матишов Г. Г., Польшин В. В., Кулыгин В. В., Титов В. В., Коваленко Е. П., Сушко К. С. Новые данные о строении косы Долгой Азовского моря (бурение, исследование обнажений, малакофауна) // *Наука Юга России*. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 26–39. – DOI 10.7868/S25000640200304.
25. Кулыгин В. В., Мисиров С. А. Выделение береговых валов на косе Долгая с использованием данных дистанционного зондирования // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. – 2021. – Т. 27, ч. 1. – С. 330–338. – DOI 10.35595/2414-9179-2021-1-27-330-338.
26. Golyandina N. E., Nekrutkin V. V., Zhigljavsky A. A. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. – London : Chapman and Hall/CRC, 2001. – 305 p.
27. Fischler M. A., Bolles R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // *Communications of the ACM*. – 1981. – Vol. 24, Issue 6. – P. 381–395. – DOI 10.1145/358669.358692.

### Об авторах

*Валерий Валерьевич Кулыгин* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

*Самир Айдынович Мисиров* – младший научный сотрудник.

Получено 04.07.2022

© В. В. Кулыгин, С. А. Мисиров, 2022

## Identification of morphometric features of the beach ridges on the Dolgaya spit using digital elevation model

V. V. Kulygin<sup>1\*</sup>, S. A. Misirov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,  
Rostov-on-Don, Russian Federation

\* e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

**Abstract.** In the last decade, digital elevation models (DEMs) based on surveys from unmanned aerial vehicles (UAVs) have been increasingly used to obtain quantitative characteristics of geomorphological objects of the coastal systems. The information of the morphological objects structure obtained with the help of such DEMs makes it possible to refine the details of the large coastal forms development. The aim of the work is to identify micro relief forms on the Dolgaya Spit, in particular, beach ridges, based on UAV survey. The need for filtering both at the point cloud level and after the creation of a DEM before conducting a geomorphological analysis is discussed in the article. An automated procedure for identifying the lines of the coastal ridges crests based on the DEM is given. Coastal ridges in the central part of the Dolgaya Spit and calculation of their morphometric characteristics are presented. Their average height is about 0.5 m, the width — 16 m. Analysis of the automated identification of coastal ridges crests and their comparison with ground-based observations showed a significant scatter in the values of morphometric characteristics along the ridges and, as a result, a bias in their point estimates during direct ground-based measurements.

**Keywords:** digital elevation model, unmanned aerial vehicle, filtration, RANSAC, morphometric characteristics, beach ridges, Dolgaya Spit

### REFERENCES

1. Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5(12), 6880–6898. doi: 10.3390/rs5126880.
2. Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009.
3. Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E. J., Gardel, A., & Dussouillez, P. (2016). Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, 261, 76–88. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.02.025.
4. Turner, I. L., Harley, M. D., & Drummond, C. D. (2016). UAVs for coastal surveying. *Coastal Engineering*, 114, 19–24. doi: 10.1016/j.coastaleng.2016.03.011.
5. Guisado-Pintado, E., Jackson, D. W. T., & Rogers, D. (2019). 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone. *Geomorphology*, 328, 157–172. doi: 10.1016/j.geomorph.2018.12.013.
6. Lamkov, I. M., Chermoshentsev, A. Yu., Arbuzov, S. A., & Guk, A. P. (2016). Study of the possibilities of using a quadrocopter to survey the coastline of a flooded quarry for the purpose of state cadastral registration. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 200–209 [in Russian].
7. Zaripov, A. S. (2020) Features of creating a three-dimensional digital model of the Central planning area of the city of Perm according to aerial photography. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(3), 160–168 [in Russian].
8. Zeybek, M., & Sanlioglu, I. (2019). Point cloud filtering on UAV based point cloud. *Measurement*, 133, 99–111. doi: 10.1016/j.measurement.2018.10.013.
9. Anders, N., Valente, J., Masselink, R., & Keesstra, S. (2019). Comparing Filtering Techniques for Removing Vegetation from UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Drones*, 3(3), P. 61. doi: 10.3390/drones3030061.
10. Golyandina, N. E., Usevich, K. D., & Florinskiy, I. V. (2008). Singular Spectrum Analysis for Filtering Digital Elevation Models. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 21–28 [in Russian].
11. Wei, Z., Han, Y., Li, M., Yang, K., Yang, Y., Luo, Y., & Ong, S.-H. (2017). A Small UAV Based Multi-Temporal Image Registration for Dynamic Agricultural Terrace Monitoring. *Remote Sensing*, 9(9), P. 904. doi: 10.3390/rs9090904.
12. Skarlatos, D., & Vlachos, M. (2018). Vegetation removal from UAV derived DSMS, using combination of rgb and nir imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2, 255–262. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-255-2018.

13. Florinskiy, I. V. (2016). An Illustrated Introduction to Geomorphometry. *Elektronnoe nauchnoe izdanie Al'manakh Prostranstvo i Vremya [Electronic Scientific Publication Almanac Space and Time]*, 11(1). Retrieved from [http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/PDF-files/2227-9490e-aprovr\\_e-ast11-1.2016.71.pdf](http://j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/PDF-files/2227-9490e-aprovr_e-ast11-1.2016.71.pdf) [in Russian].
14. Florinskiy, I. V. (2009). Accurate Method for Calculating Local Terrain Characteristics. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 4, 19–23 [in Russian].
15. Stockdon, H. F., Doran, K. S., & Sallenger, Jr. A. H. (2009). Extraction of lidar-based dune-crest elevations for use in examining the vulnerability of beaches to inundation during hurricanes. *Journal of Coastal Research*, 53, 59–65. doi: 10.2112/SI53-007.1.
16. Gao, Y. (2009) *Algorithms and software tools for extracting coastal morphological information from airborne LiDAR data: master thesis*. Texas A&M University, 135 p.
17. Singh, S., Kumar, K. V., & Rao, M. J. (2020). Utilization of LiDAR DTM for Systematic Improvement in Mapping and Classification of Coastal Micro-Geomorphology. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(5), 805–816. doi: 10.1007/s12524-020-01114-7.
18. Drugov, M. D., Tutubalina, O. V., & Krylenko, V. V. (2021). 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). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern Problems of the Earth Remote Sensing from Space]*, 18(2), 115–127. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-115-127 [in Russian].
19. Mitasova, H., Hardin, E., Starek, M. J., Harmon, R. S., & Overton, M. F. (2011). Landscape dynamics from LiDAR data time series. *Geomorphometry*. Retrieved from <https://geospatial.ncsu.edu/osgeorel/pub-pdf/Mitasova2011geomorphometry.pdf>.
20. Wernette, P., Houser, C., & Bishop, M. P. (2016). An automated approach for extracting Barrier Island morphology from digital elevation models. *Geomorphology*, 262, 1–7. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.02.024.
21. Krylenko, V. V., Krylenko, M. V., & Aleynikov, A. A. (2021). Study of the relief and coastline dynamics of large coastal accumulative forms according to remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(3), 58–70 [in Russian].
22. Artyukhin, Yu. V. (2012). Genesis, morphology and development of accumulative barriers of the Sea of Azov and the Kerch Strait – Dolgaya and Tuzla spits. In *Azovskogo more, Kerchenskiy proliv i predprolivnyye zony v Chernom more: problemy upravleniya pribrezhnyimi territoriyami dlya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti i ratsional'nogo prirodopol'zovaniya [Sea of Azov, the Kerch Strait and Pre-Strait Zones in the Black Sea: Problems of Managing Coastal Territories to Ensure Environmental Safety and Rational Nature Management]* (pp. 165–175). Rostov-on-Don: SSC RAS Publ. [in Russian].
23. Florinsky, I. V., & Kuryakova, G. A. (2000). Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations – exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographic Information Science*, 14(8), 815–832.
24. Matishov, G. G., Polshin, V. V., Kulygin, V. V., Titov, V. V., Kovalenko, E. P., & Sushko, K. S. (2020). New data on the structure of the Dolgaya Spit of the Sea of Azov (drilling, exploration of outcrops, malacofauna). *Nauka Yuga Rossii [Science in the South of Russia]*, 16(3), 26–39. doi: 10.7868/S25000640200304 [in Russian].
25. Kulygin, V. V., & Misirov, S. A. (2021). Beach ridges detection on the Dolgaya Spit based on remote sensing data. *InterCarto. InterGIS [InterCarto. InterGIS]*, 27(1), 330–338. doi: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-330-338 [in Russian].
26. Golyandina, N. E., Nekrutkin, V. V., & Zhigljavsky, A. A. (2001). *Analysis of time series structure: SSA and related techniques*. London: Chapman and Hall/CRC, 305 p.
27. Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395. doi: 10.1145/358669.358692.

#### Author details

Valerii V. Kulygin – Ph. D., Leading Researcher.

Samir A. Misirov – Junior Researcher.

Received 04.07.2022

© V. V. Kulygin, S. A. Misirov, 2022