

УДК: 551.435.323, 528.854

DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-330-338

В.В. Кулыгин¹, С.А. Мисиров²

ВЫДЕЛЕНИЕ БЕРЕГОВЫХ ВАЛОВ НА КОСЕ ДОЛГАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Изучение морфологии грядово-ложбинных систем на аккумулятивных береговых формах позволяет проводить реконструкцию их развития. Пространственная ориентация и высота береговых валов дает информацию о преобладании тех или иных процессов на разных временных отрезках. Коса Долгая, являющаяся одной из крупнейших аккумулятивных форм Азовского моря, характеризуется наличием хорошо различимых генераций песчано-ракушечных валов. В статье рассматривается возможность использования различных данных дистанционного зондирования для выделения береговых валов на косе Долгая.

В работе используются данные наземных измерений высотных отметок, выполненных в ходе экспедиции летом 2020 г. Приведены статистические характеристики валов на исследуемом участке косы. Проведен анализ возможности выделения береговых валов на косах по спутниковым оптическим снимкам высокого разрешения. Сделан вывод о невозможности однозначного определения валов, поскольку оптические характеристики почвенного и растительного покровов на косе Долгая не позволяют однозначно разделять формы микрорельефа.

Вторым источником данных дистанционного зондирования выступила аэросъемка части косы Долгой с использованием беспилотного летательного аппарата «Phantom 3 PRO» с последующей фотограмметрической обработкой полученных цифровых снимков. Рассмотрены этапы обработки результатов съемки для построения цифровой модели рельефа и ортофотоплана исследуемого участка. Качество полученной цифровой модели рельефа оценивалось путем сравнения с наземными измерениями отметок высот. В статье обсуждаются причины возникновения погрешности при создании цифровой модели рельефа. Отмечено, что построение цифровой модели рельефа приемлемого качества возможно только для участков косы с разреженным растительным покровом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: съемка рельефа, аккумулятивные формы, коса Долгая, дистанционные методы, беспилотный летательный аппарат

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», ул. Чехова, д. 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия; e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», ул. Чехова, д. 41, 344006, Ростов-на-Дону, Россия; e-mail: sam.misirov@gmail.com

Valerii V. Kulygin¹, Samir A. Misirov²

BEACH RIDGES DETECTION ON THE DOLGAYA SPIT BASED ON REMOTE SENSING DATA

ABSTRACT

The study of the ridge systems' morphology on accumulative coastal *landforms* makes it possible to reconstruct their development. The spatial orientation and height of the beach ridges provide information on the predominance of certain processes at different time intervals. The Dolgaya Spit, which is one of the largest accumulative forms of the Sea of Azov, is characterized by the presence of well-distinguishable generation of sand-shell ridges. The article discusses the possibility of using various remote sensing data to identify beach ridges on the Dolgaya Spit.

In this study the data of ground measurements of elevation points performed during the expedition in the summer of 2020 are used. The statistical characteristics of the ridges on the investigated area of the spit are given. The analysis of the possibility of identifying beach ridges on the spit based on high-resolution satellite optical images has been done. It was concluded that it is impossible to unambiguously determine the ridges, since the optical characteristics of the soil and vegetation cover on the Dolgaya Spit do not allow separation of the microrelief forms.

The second source of remote sensing data was aerial photography of a part of the Dolgaya Spit using the unmanned aerial vehicle "Phantom 3 PRO", followed by photogrammetric processing of the obtained digital images. The stages of processing the survey results for the construction of a digital elevation model and an orthomosaic of the investigated area are considered. The quality of the obtained digital elevation model was assessed by comparison with ground measurements of elevation points. The article discusses the source of errors in the obtained digital elevation model. It is noted that the construction of a digital elevation model with acceptable quality is possible only for the spit's regions with sparse vegetation cover.

KEYWORDS: relief survey, accumulative landforms, Dolgaya Spit, remote methods, unmanned aerial vehicle

ВВЕДЕНИЕ

Исследование особенностей строения рельефа аккумулятивных форм позволяет уточнять закономерности их развития под влиянием различных факторов. В Азовском море большая часть аккумулятивных форм представлена косами, расположенными по всему побережью. Особый интерес представляет коса Долгая, которая является одной из крупнейших аккумулятивных форм Азовского моря. Она выступает в роли аккумулятивного барьера, ограничивая с юго-запада Таганрогский залив и существенно влияя на его гидрологический и гидрохимический режимы. Значительная часть поверхности косы Долгой имеет грядово-ложбинный рельеф. В работах [Алейникова, Крыленко, 2018; Матишов и др., 2020б] отмечается, что на космических снимках виден ландшафтный рисунок косы, носящий сегментно-веерный характер, связанный с формированием причлененных друг к другу песчано-ракушечных валов и ложбинных понижений между ними. Подобная информация о расположении и морфометрических характеристиках валов позволяет уточнять детали процесса развития косы.

¹ Federal State Budget Institution of Science "Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", st. Chehova, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail*: kulygin@ssc-ras.ru

² Federal State Budget Institution of Science "Federal Research Center The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", st. Chehova, 41, 344006, Rostov-on-Don, Russia; *e-mail*: sam.misirov@gmail.com

В настоящее время в число методов изучения рельефа, наряду с прямыми наземными измерениями, включены дистанционные методы (космическая и аэросъемка), например, [Wernette et al., 2016; Guha et al., 2018; Крыленко, Крыленко, 2018]. В связи с этим целью настоящей работы стало исследование возможности использования различных данных дистанционного зондирования для выделения береговых валов на косе Долгая.

Достоинством дистанционных методов является значительный пространственный охват, обычно сопровождающийся снижением детализации по сравнению с наземными измерениями. Разрешения доступных радиолокационных снимков недостаточно для изучения микроформ рельефа. Поэтому в работе рассматривались два источника данных дистанционного зондирования: оптические спутниковые снимки высокого разрешения и съемка с беспилотного летательного аппарата, оснащенного цифровой камерой высокого разрешения. В первом случае имеются изображения со значениями некоторых спектральных каналов оптического диапазона конкретного участка земной поверхности, позволяющие классифицировать его части как некоторые объекты. Во втором случае по результатам съемки строится полноценная цифровая модель рельефа (ЦМР), позволяющая получить не только плановое местоположение валов, но и их высотные характеристики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Летом 2020 г. Южный научный центр РАН провел комплексную экспедицию на косу Долгая [Матишов и др., 2020а], в ходе которой в том числе выполнялись работы по изучению микрорельефа прибрежной зоны. Для исследования был выбран участок на юго-западном берегу косы, характеризующийся наличием хорошо различимых береговых валов (рис. 1).

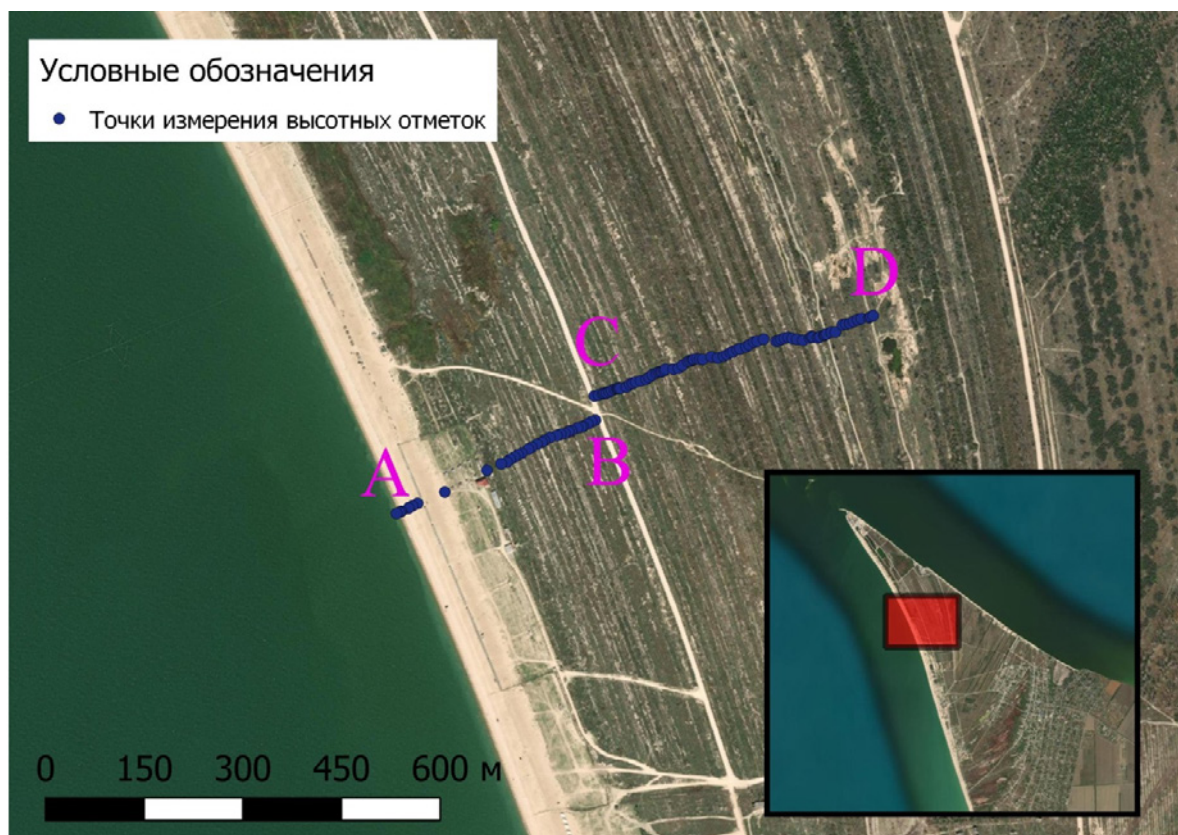


Рис. 1. Схема маршрута изучения микрорельефа прибрежной зоны косы Долгой
Fig. 1. The route of beach ridges studying in the coastal zone of the Dolgaya Spit

Измерения отметок высот выполнялись с помощью высокоточного ГНСС приемника «EFT M4 GNSS» вдоль пешего маршрута, состоящего из двух частей (рис. 1).

Восточная часть маршрута начиналась в точке С около перекрестка и следовала по азимуту 75° до точки D. Общая протяженность маршрута составила 456 м. Западная часть маршрута начиналась в точке В около перекрестка и следовала по азимуту 239° до точки А, соответствующей урезу воды. Протяженность западной части маршрута составила 335 м.

Над западной частью маршрута также была проведена съемка при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) «Phantom 3 PRO». Площадь участка съемки составила около 20 тыс. м² (2 га). 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 аэрофотосъемки перед ее началом было произведено размещение и геодезическая привязка 5 наземных опознавательных знаков, расположенных по схеме «конверт». Контрольные точки для пространственной привязки аэрофотосъемки отмечались геодезическим GNSS приемником «EFT M4 GNSS».

В ходе аэрофотосъемки были получены 277 снимков. На предварительном этапе были удалены дублирующиеся и некачественные изображения. Для дальнейшей обработки использовалось программное обеспечение Agisoft MetaShape, позволяющее создавать 3D модели и ортофотопланы на основе цифровых фотографий. Сначала производилась процедура выравнивания фотографий, в ходе которой выполнялся поиск характерных точек и выявление соответствий между фотографиями с последующим построением разреженного облака точек (трехмерного представления связующий точек). Далее на основе рассчитанных положений камеры строилось плотное облако точек, и проводилась автоматическая классификация точек, с целью выявления класса точек «Земля». Результат автоматической классификации был проверен в ручном режиме для выявления ошибок и удаления ложных точек. На основе полученных данных была построена цифровая модель рельефа и ортофотоплан исследуемого участка.

Построенная ЦМР сравнивалась с результатами наземных измерений отметок высот. Для оценки качества построенной ЦМР использовались такие показатели как средняя абсолютная ошибка и среднеквадратическое отклонение.

По результатам полевых данных было получено, что ширина валов на исследуемом участке косы Долгая варьируется от 5,7 до 29,3 м (среднее значение около 13,5 м) [Матишов и др., 2020а]. Так как пространственное разрешение снимка должно быть в 2 раза меньше, чем минимальный размер объектов, которые предполагается дешифровать, то для выделения валов следует использовать снимки с разрешением 3 м и менее. В связи с этим в качестве оптического снимка использовался композит World Imagery Esti в субметровом разрешении.

Идея использования цветочных каналов оптических снимков для идентификации элементов рельефа основана на важной роли микрорельефа в формировании почвенного и растительного покровов. Элементы микрорельефа способствуют локализации участков с различными тепловыми и влажностными характеристиками, что приводит к дифференциации участков земной поверхности по их оптическим свойствам.

Методы дешифрирования изображения для выделения различных объектов можно разделить на две группы: основанные на независимом рассмотрении отдельных пикселей и учитывающие зависимости между соседними пикселями. В первом случае отнесение того или иного пикселя к некоторому классу основано только на значении цветочных каналов. Во втором случае задача идентификации береговых валов сводится к поиску квазилинейных объектов на изображении. В качестве методов поиска квазилинейных объектов использовался алгоритм поиска границ Канни.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам промеров высотных отметок был построен профиль рельефа на двух участках маршрута (рис. 2). Получены статистические характеристики береговых валов на этих участках [Матишов и др., 2020а].

Расстояние от уреза воды до вершины берегового вала составило 35 м. Высота берегового вала над уровнем воды равна 2,3 м (абсолютная отметка 2,1 м Балтийской системы высот (БСВ)). За береговым валом следует широкая полоса (115 м) измененного рекреацией пляжа, после которого начинается серия береговых валов. На расстоянии около 700 м от уреза воды расположены две глубокие канавы, имеющие антропогенное происхождение. Перепады глубин, связанные с этими канавами, игнорировались при расчете высотных характеристик валов.

На протяжении восьмисот метрового участка было выделено 44 вала. Средняя высота вала на западном участке составила 0,7 м, на восточном – 0,3 м. Разница в высотных отметках береговых валов сравнительно небольшая (размах по всему маршруту составляет около 1 м): большей высоты достигают недавно сформированные валы на западной части косы, а по мере передвижения к востоку высота валов снижается.

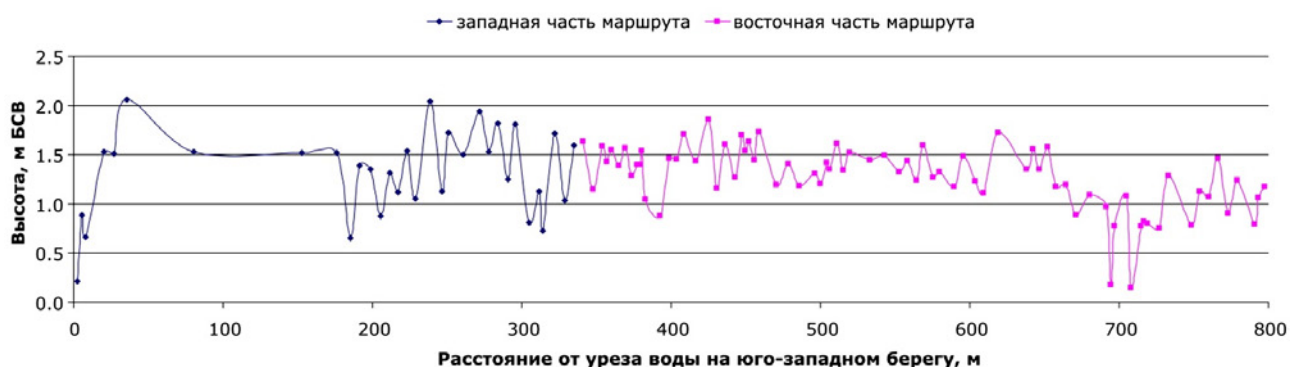


Рис. 2. Рельеф прибрежной зоны косы Долгой вдоль маршрута изучения береговых валов (июль, 2020 г.)

Fig. 2. The relief of the coastal zone of the Dolgaya Spit along the route of beach ridges studying (July, 2020)

Основой дешифрирования оптических спутниковых снимков является выявление геоботанических признаков как индикаторов расположения береговых валов. Визуальный осмотр в ходе выполнения пешего маршрута позволил установить, что темные полосы на снимках относятся к задернованной ракушке, а светлые – к ракушке свободной от растительности. При этом каждый тип полосы может приходиться как на гребень вала, так и на понижение между ними. Таким образом, в данном случае растительность не позволяет однозначно выделять линейные элементы рельефа.

Об этом же свидетельствует анализ спутникового снимка. Высотные отметки, полученные в ходе экспедиции, были разделены на два класса: относящиеся к гребню вала и к низине между соседними береговыми валами. Для этих же точек измерений из композита World Imagery Esri были извлечены значения трех цветовых каналов (красный (R), зеленый (G), синий (B)). Как видно на рисунке 3а, нет четкой зависимости между классом точки (возвышенность – красные точки, низина – синие точки) и цветом на изображении (т.е. типом подстилающей поверхности). Наблюдается сильное пересечение между классами, и разделить их на основе цветовых каналов нельзя, что отражается на гистограммах (рис. 3 б–г).

Об этом же говорят низкие коэффициенты корреляции Пирсона между высотными отметками и цветовыми каналами снимка, равные -0.128 , -0.116 и -0.108 для каналов R, G, B соответственно. Тем не менее, тот факт, что все коэффициенты отрицательны, говорит о том, что возвышенности приурочены к более светлому фону, а низины – к более темному. По результатам статистического теста хи-квадрат все нулевые гипотезы о независимости цветовых каналов и класса высотных отметок приняты с уровнем значимости 0.05. Таким образом, попиксельная информация с оптических снимков не позволяет качественно идентифицировать береговые валы на косе Долгая.

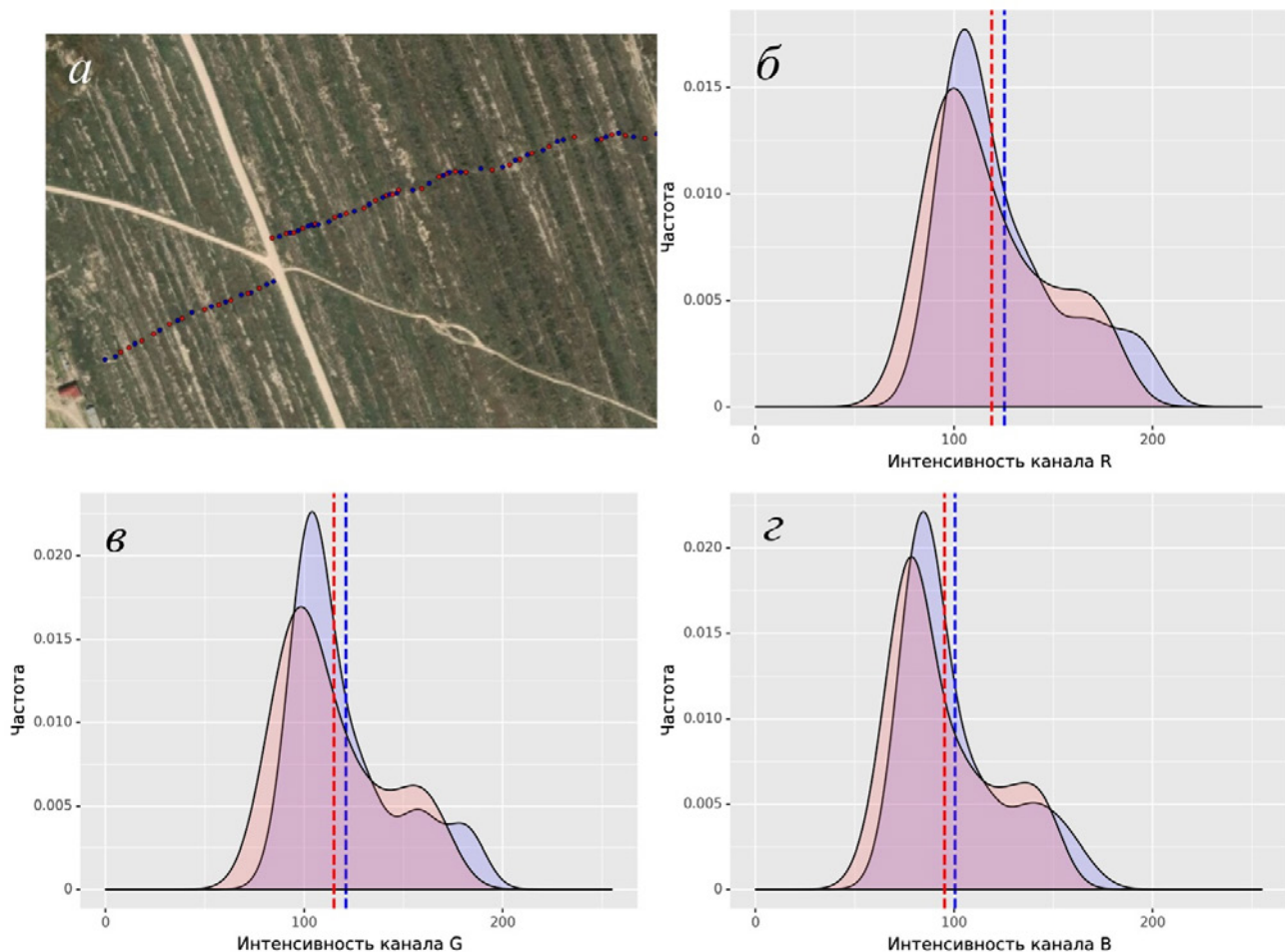


Рис. 3. Классификация измеренных высотных отметок на гребни валов (красный цвет) и низины между валами (синий цвет): а – точки измерений на фоне композита World Imagery Esri; б, в, г – гистограммы каналов R, G, B для двух классов, вертикальные пунктирные линии соответствуют среднему значению интенсивности канала точек каждого класса

Fig. 3. Classification of the measured elevations points into ridges (red) and valleys between the ridges (blue): а – measurement points against the background of the World Imagery Esri; b, c, d – histograms of the R, G, B channels for two classes, vertical dashed lines correspond to the average value of the channel intensity of the points of each class

Использование метода Канни для выделения квазилинейных объектов также не дало удовлетворительных результатов. Поскольку антропогенные линейные объекты (дороги, тропинки, лесопосадки) имеют на снимке большую контрастность, чем береговые валы, то именно эти объекты выделяются алгоритмом в первую очередь.

По результатам обработки данных съемки с БПЛА над западным участком маршрута были построены ортофотоплан (рис. 4) и ЦМР с пространственным разрешением 0,05 м.

Результат сравнения ЦМР с наземными измерениями высотных отметок представлен на рис. 5. Средняя абсолютная ошибка составила 0,17 м; среднеквадратическое отклонение – 0,22 м. Полученная погрешность во многом связана с растительным покровом, т.к. ЦМР строится по среднему уровню растительности, что вносит искажения в значения высотных отметок.



Рис. 4. Ортофотоплан участка исследований на косе Долгая
Fig. 4. Orthomosaic of the investigated area on the Dolgaya Spit



Рис. 5. Сравнение профиля рельефа, полученного из ЦМР, построенной по результатам аэрофотосъемки (а) и измерений отметок высот (б)

Fig. 5. Comparison of relief profile obtained from the DEM, constructed from the results of aerial photography (a) and measurements of elevation points (b)

На исследуемом участке косы перепад микрорельефа (рис. 2) соизмерим с перепадом высот растительного покрова (высота 0,2–0,5 м), что и привело к сравнительно высоким значениям погрешности. Кроме того, некоторые валы и понижения между ними приходится на посадки кустарников шиповника высотой 1,5–2 м. Устранение подобных погрешностей весьма затруднительно и может быть выполнено только при наличии наземных измерений отметок высот в местах посадок.

ВЫВОДЫ

Трудности современного выявления наиболее высоких генераций валов связаны отчасти с тем, что к концу 1970-х гг. вся поверхность косы Долгой была перепланирована и разборонована для обеспечения мелиоративных и строительных работ. Активно ведущаяся хозяйственная деятельность (выравнивание участков земли, рытье карьеров, посадка деревьев и кустарников и т.д.) сыграла негативную роль в процессе изучения косы.

По результатам экспедиционных наблюдений на косе Долгой выявлены принципиальные трудности идентификации валов на спутниковых снимках. Оптические характеристики почвенного и растительного покровов не позволяют однозначно идентифицировать формы микрорельефа, а следовательно, информации только оптических снимков недостаточно для качественного выделения береговых валов.

В связи с высокой долей задернованности исследуемого участка косы, построение цифровых моделей рельефа на основе съемки с беспилотных летательных аппаратов дает достаточно шумный результат. Однако на текущий момент использование таких цифровых моделей является наиболее приемлемым методом расчета морфометрических характеристик береговых валов.

Следует отметить, что построение цифровой модели рельефа приемлемого качества возможно только для участков косы с разреженным растительным покровом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФ, грант № 20-17-00196. Анализ алгоритмов обработки изображений проведен в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 01201363188.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 20-17-00196. The analysis of image processing algorithms was carried out under the state assignment research of SSC RAS, project No. 01201363188.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алейникова А.М., Крыленко В.В. Динамика ландшафтов косы Долгая. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 3. С. 379–385.
2. Крыленко В.В., Крыленко М.В. Высокоточная съемка рельефа Бакальской косы. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 65–72. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-4-65-72.
3. 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. 2020а. Т. 16. № 3. С. 26–39. DOI: 10.7868/S25000640200304.
4. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Титов В.В. Исследования отложений кос Азовского моря (на примере косы Долгой). Океанология. 2020б. Т. 60. № 1. С. 158–161. DOI: 10.31857/S0030157420010165.

5. *Guha A., Roy P., Singh W., Kumar K.V.* Integrated use of LANDSAT 8, ALOS-PALSAR, SRTM DEM and ground GPR data in delineating different segments of alluvial fan system in Mahananda and Tista rivers, West Bengal, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2018. V. 46. No. 4. P. 501–514.
6. *Wernette P., Houser C., Bishop M.P.* An automated approach for extracting Barrier Island morphology from digital elevation models. *Geomorphology*. 2016. V. 262. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.02.024.

REFERENCES

1. *Aleinikova A.M., Krylenko V.V.* Dynamics of landscapes on the Dolgaya Spit. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018. V. 26. No. 3. P. 379–385. (in Russian).
 2. *Guha A., Roy P., Singh W., and Kumar K.V.* Integrated use of LANDSAT 8, ALOS-PALSAR, SRTM DEM and ground GPR data in delineating different segments of alluvial fan system in Mahananda and Tista rivers, West Bengal, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2018. V. 46. No. 4. P. 501–514.
 3. *Krylenko V.V., Krylenko M.V.* Experience of high-accuracy survey of the Bakalskaya Spit relief. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2018. No. 4. P. 65–72. (in Russian). DOI: 10.22449/2413-5577-2018-4-65-72.
 4. *Matishov G.G., Polshin V.V., Kulygin V.V., Titov V.V., Kovalenko E.P., Sushko K.S.* New data on the structure of the Dolgaya Spit of the Sea of Azov (drilling, exploration of outcrops, malacofauna). *Science in the south of Russia*, 2020a. V. 16. No. 3. P. 26–39. (in Russian). DOI: 10.7868/S25000640200304.
 5. *Matishov G.G., Polshin V.V., Titov V.V.* Studies of the Sediments of the Sea of Azov (on the Example of Dolgaya Spit). *Oceanology*. 2020b. V. 60. No. 1. P. 138–141. DOI: 10.1134/S0001437020010166.
 6. *Wernette P., Houser C., Bishop M.P.* An automated approach for extracting Barrier Island morphology from digital elevation models. *Geomorphology*. 2016. V. 262. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.02.024.
-