

В.В.Крыленко, М.В.Крыленко

Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН, г.Москва

ВЫСОКОТОЧНАЯ СЪЕМКА РЕЛЬЕФА БАКАЛЬСКОЙ КОСЫ

Приведены результаты адаптации методики высокоточной съемки наземного рельефа с помощью беспилотного летательного аппарата для условий Бакальской косы. Анализ полученных результатов показал, что данный вид съемки для рассматриваемого природного объекта является оптимальным, но имеет ряд ограничений. В число достоинств метода входит низкая себестоимость, оперативность получения данных. Недостатками метода является сложность обработки и интерпретации данных при наличии плотного растительного покрова и в зоне заплеска. Соответственно, эти ограничения следует учитывать при организации дальнейших съемок как на Бакальской косе, так и на подобных аккумулятивных формах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *морские берега, аккумулятивные формы, съемка рельефа, Бакальская коса, Крымский полуостров*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-4-65-72

Введение. Морские береговые аккумулятивные формы – важный и интенсивно используемый природный ресурс [1]. Рельеф морских береговых аккумулятивных форм являлся и является важным предметом изучения как в научных, так и в прикладных исследованиях. Выявление особенностей строения рельефа аккумулятивных форм позволяет уточнить закономерности их эволюции и современной динамики под влиянием природных и антропогенных факторов [2].

Методы изучения рельефа долгое время включали лишь прямые наземные измерения. Недостатками наземных измерений являются малый пространственный охват, трудоемкость, резко возрастающая при необходимости большей детализации, и низкая оперативность. При исследовании морских берегов для упрощения работ и повышения их оперативности чаще всего проводились натурные геодезические измерения только вдоль небольшого числа поперечных и продольных профилей с выделением основных форм рельефа и положения береговой линии. Выявление микроформ рельефа такими методами было невозможно.

С развитием авиации, а затем и космической отрасли, в изучении рельефа на первый план стали выходить дистанционные методы [3 – 7]. Эти методы включали получение более или менее точных стереопар снимков, их оптическую и геометрическую коррекцию и последующую фотограмметрическую обработку. Выигрыш в пространственном охвате чаще всего сопровождался ухудшением детализации рельефа. Кроме того, требовалось привлечение дорогостоящих технических средств, на ряде этапов требовалась специальная, как правило, ручная обработка материалов, что снижало оперативность получения требуемых данных.

© В.В.Крыленко, М.В.Крыленко, 2018

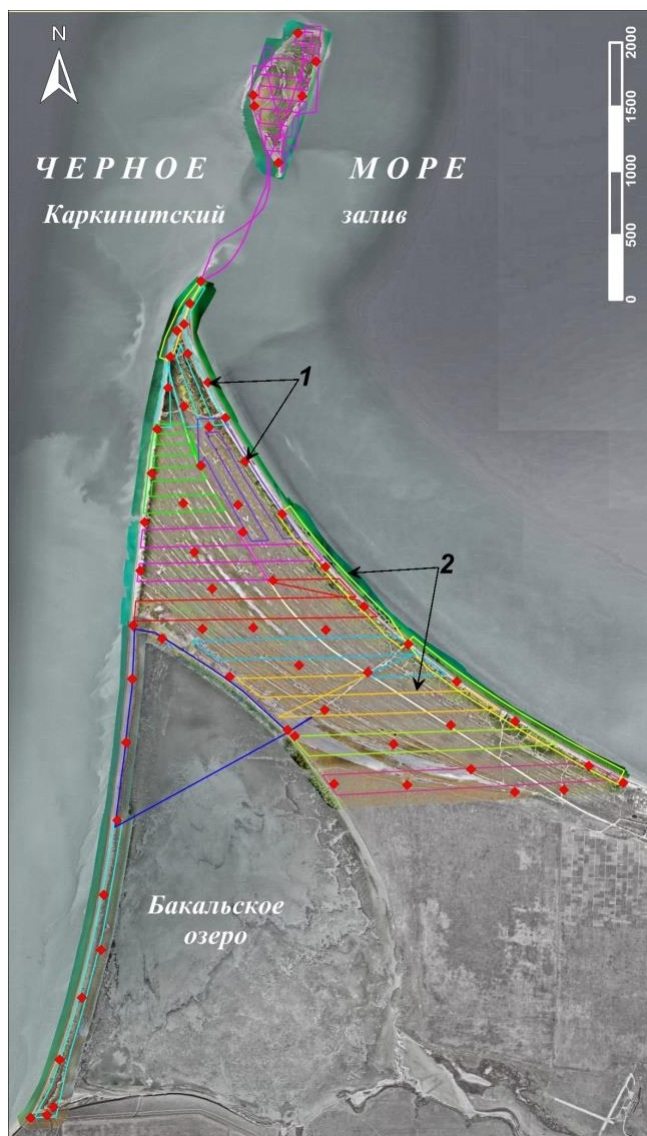
Существенный прорыв в съемках рельефа произошел после развития технологий компьютерной обработки исходных данных и разработки технологии лазерного сканирования. Лазерное сканирование, особенно воздушное, позволяет получить поле точек с недостижимой ранее плотностью для практически неограниченных площадей, в том числе труднодоступных [8]. Тем не менее, в связи с относительно высокой энергоемкостью, габаритами и весом съемочного оборудования, для проведения съемки требуются достаточно крупные летательные аппараты, что значительно удорожает съемку.

Для научных исследований рельефа аккумулятивных морских береговых форм чаще всего требуется оперативность (связанная с высокой изменчивостью), детальность (многие процессы выражены лишь в микрорельефе), малая трудоемкость, дешевизна. Практически всем перечисленным требованиям отвечает съемка рельефа, выполняемая с помощью небольших беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных цифровыми камерами высокого разрешения, системой стабилизации и ориентации в пространстве. Для исследований Бакальской косы в 2018 г. [9] нами была использована интеллектуальная камера, установленная на квадрокоптере *Fantom 4Pro+*.

Методика получения и обработки данных. С 2017 г. для анализа состояния ландшафтно-морфологической структуры Бакальской косы используется технология аэрофотосъемки с БПЛА [10]. В 2018 г. была выполнена съемка всей сухопутной части Бакальской косы с последующей фотограмметрической обработкой полученных цифровых снимков с целью составления высокдетальных ортофотопланов и построения цифровых моделей рельефа (ЦМР). В целом, для съемок Бакальской косы была использована методика, ранее примененная нами при исследовании рельефа косы Долгой (Азовское море) [5]. Перед началом аэрофотосъемки для пространственной привязки было произведено размещение 65 наземных реперов, равномерно распределенных по всей площади косы (рис.1). При размещении реперов учитывались конфигурация и рельеф косы, схема планируемых траекторий пролетов БПЛА, наличие и состояние растительного покрова, вероятность антропогенного воздействия. Реперы (круги красного цвета диаметром 22 см) закреплялись на уровне грунта. Общая площадь, покрытая съемкой, составила 7 км². Определение точных координат наземных реперов производилось с помощью оборудования спутниковой системы позиционирования фирмы *Leica Geosystems* [12, 13]. В состав оборудования входили два двухчастотных приемных устройства (*Leica GS 10*, *Leica GS 15*), обрабатывающие сигналы навигационных спутников *GPS* и *ГЛОНАСС*.

Для обеспечения сплошной съемки с требуемым для фотограмметрической обработки перекрытием были выполнены 16 полетов общей протяженностью 85,5 км [11]. В результате аэрофотосъемки были получены 3098 снимков, распределенных по маршрутам съемки с 30 % поперечным и 60 % продольным перекрытием. Кроме того, за счет работы навигационного комплекса БПЛА были получены параметры внешнего ориентирования снимков. После проведения съемки была проведена первичная обработка полученных цифровых фотоснимков и построение ортофотоплана [11].

Для обработки аэрофотоснимков использовалось программное обеспечение *Agisoft PhotoScan*, позволяющее создавать высококачественные 3D моде-



Р и с . 1 . Схема расположения точек привязки (1) и маршрутов пролета (2).

ли объектов на основе цифровых фотографий методами цифровой фотограмметрии (ЦФ) [8]. Подобная технология ранее была применена для изучения рельефа Анапской пересыпи и косы Долгая [12, 13]. На первом этапе обработки *PhotoScan* находит общие точки фотографий («связующие точки») и по ним определяет параметры камер: положение, ориентацию, внутреннюю геометрию (фокусное расстояние, параметры дисторсии и т.п.). Далее на основе рассчитанных положений камер и используемых фотографий произведено построение плотного облака точек (точек фотограмметрической обработки (ТФО)). Это поле точек подобно (кроме некоторых параметров) облакам точек лазерного отражения (ТЛО), и на его основе строится цифровая модель поверхности.

В нашем случае на базе плотного поля точек была построена полигональная модель поверхности, использованная для создания текстурированной модели и ортофотоплана. На основе цифровых фотографий и модели поверхности произведено построение единого обзорного ортофотоплана [11] на всю сухопутную часть Бакальской косы с пространственным разрешением 0,1 м. Для ключевых участков (остров и пересыпь Бакальского озера) построены ортофотопланы с разрешением 0,05 м.

Классификация полученного плотного поля ТФО с целью выделения класса точек «земля» производилась при помощи программного пакета *TerraScan (TerraSolid, Финляндия)* на платформе *MicroStation V8 (Bentley Systems, США)*. Фильтрация облака точек (определение ложных отражений) осуществляется в *TerraScan* по итерационному принципу с использованием стандартных инструментов классификации «*low points*», «*air points*», «*isolated points*», «*below surface*» [8]. Инструмент «*low points*» позволяет выделить обособленные точки и их группы, расположенные ниже основного облака точек и не описывающие реально существующие объекты. Инструмент «*air points*» позволяет выделить ТФО реальных объектов, расположенных значительно выше уровня земной поверхности и не являющихся топографическими: птицы, облака, дым и т.п. Инструмент «*isolated points*» позволяет выделить ложные ТФО на основании их обособленности от остального облака точек. Инструмент «*below surface*» используется для отбора ложных точек, находящихся ниже основной поверхности. После автоматической классификации был проведен контроль для выявления и устранения ошибок классификации. Контроль проводился методами оценки плотности покрытия классифицированными точками, профилирования облака точек, визуального анализа 3D модели, построенной по точкам земли с ручным отбором ложных отражений. Использование перечисленных инструментов позволило свести к минимуму возможность ошибок и ускорить процесс обработки данных. Точки, классифицированные как «земля», были сохранены в виде отдельных файлов для построения моделей *GRID* и дальнейшего анализа в программах *SAGA* и *Golden Software Surfer*.

Надо отметить, что обработка данных в *Agisoft PhotoScan* и *TerraScan* на всех этапах требует введения оператором целого ряда параметров и их комбинаций, зависящих от типа изучаемой поверхности, качества исходных снимков, количества и взаимного расположения снимков, конфигурации полигона, требуемой точности. Достижение оптимального варианта возможно лишь после многочисленных итераций и требует значительного времени.

Результаты и обсуждение. В ходе построения ортофотоплана были отмечены артефакты изображения, ухудшающие точность ЦМР. Для устранения этих артефактов и построения высокоточной ЦМР для всей поверхности косы необходима дополнительная оптическая коррекция фотоснимков, снятых при разном освещении. Эта работа к настоящему времени еще не завершена. Кроме того, процесс построения ЦМР с максимальными требованиями к точности требует значительного времени расчетов. В связи с этим, для получения обзорной ЦМР всей Бакальской косы была проведена обработка всего набора снимков, но с пониженными требованиями к точности. По полученным данным была построена ЦМР с плановой и высотной

точностью 0,2 м. Одновременно для анализа возможной точности метода были отобраны несколько участков, отснятых при наиболее благоприятных условиях. Для этих участков был проведен полный цикл обработки на максимально возможных параметрах. По полученным данным были построены ЦМР с плановой и высотной точностью 0,1 м, что позволяет строить высокоточные поперечные профили между любыми точками (рис.2, 3).

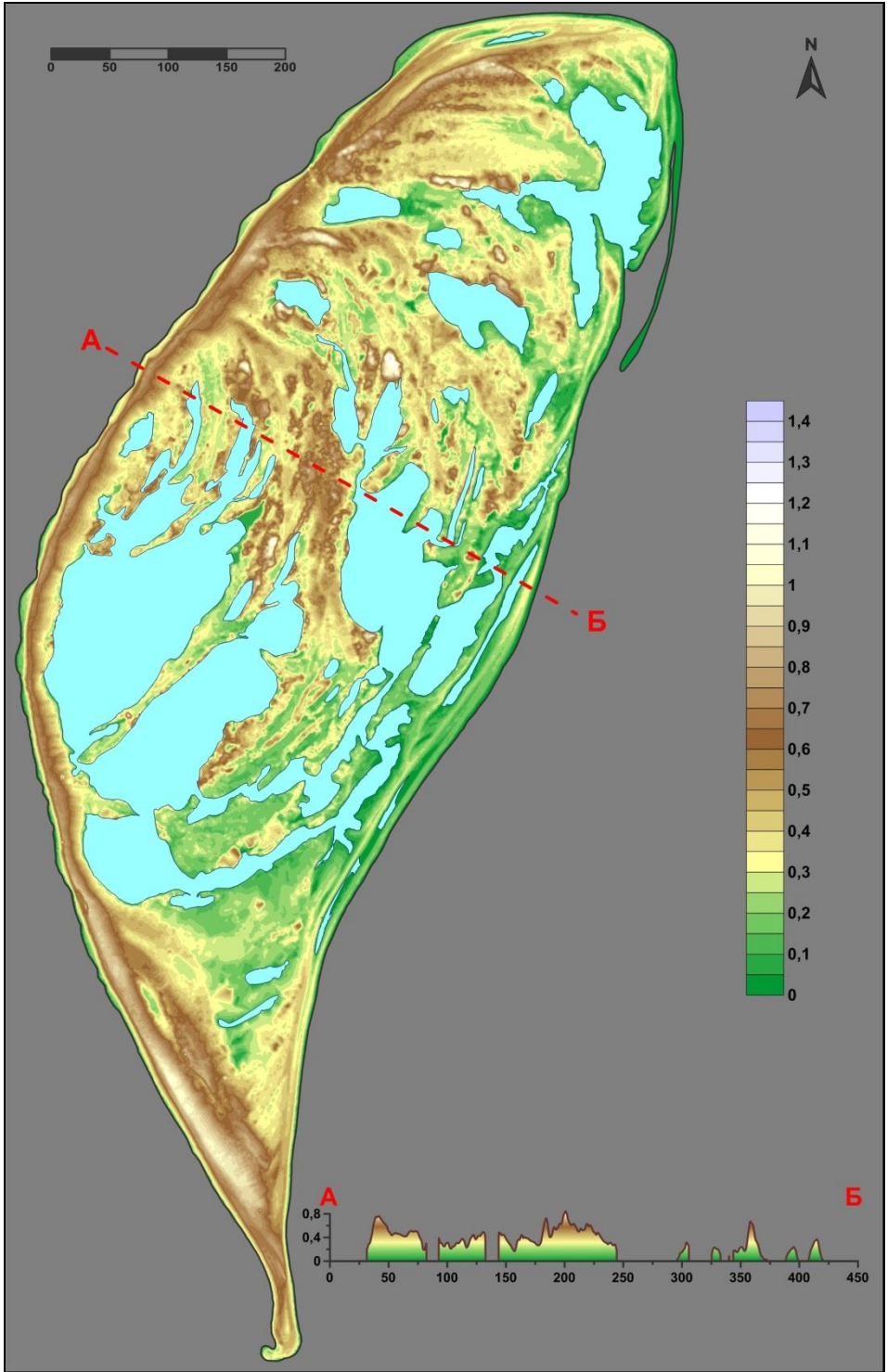
Надо отметить, что построение ЦМР для всей Бакальской косы с указанной точностью никогда ранее не выполнялось и не было реализуемо традиционными методами. По имеющимся на настоящий момент результатам можно выполнять комплексный морфометрический анализ, исследовать взаимосвязь рельефа и других элементов геосистемы косы, выявлять действующие механизмы рельефообразования. Дальнейшая обработка данных позволит существенно повысить точность и даст возможность изучать особенности строения микро- и нанорельефа на большей части косы.

Проведенный анализ корректности построения ЦМР по данным съемки показал, что имеется некоторая погрешность, связанная с наличием на отдельных участках практически сплошного растительного покрова. Соответственно, цифровая модель строится по среднему уровню растительности, что на ЦМР отображается как увеличение высотной отметки. Поскольку на наиболее динамичных участках косы (прибрежная и дистальная части) растительный покров отсутствует или разрежен, на точности измерений данная погрешность не сказалась. При необходимости анализа рельефа всей косы оптимально проведение съемки в период наименьшего развития растительного покрова (ранняя весна сразу после схода снежного покрова).

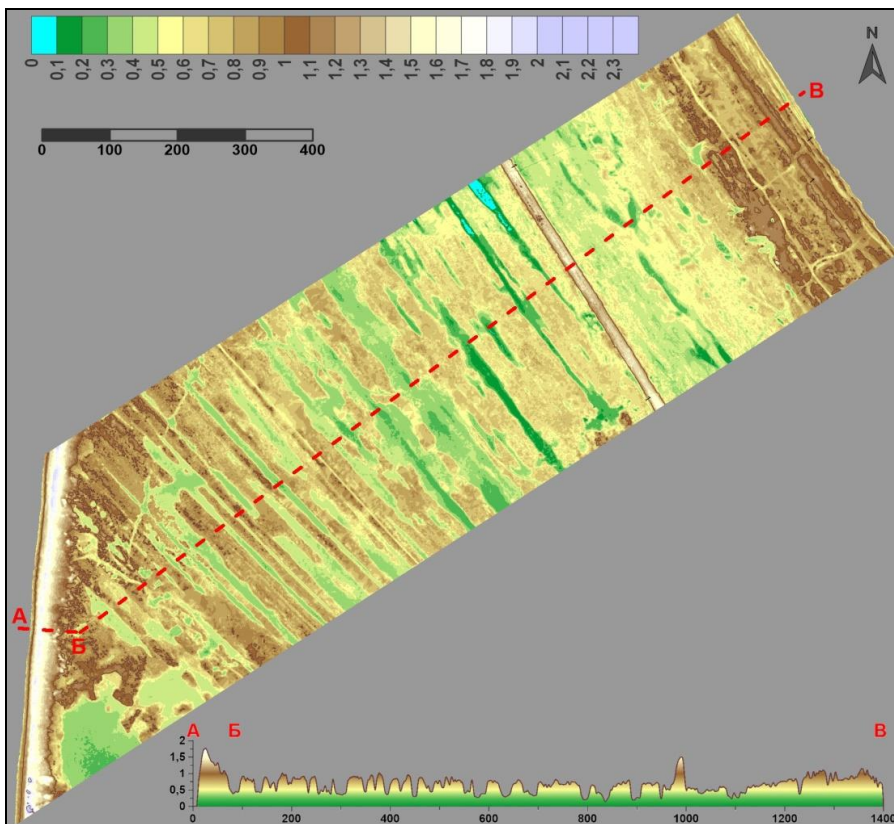
Еще одним ограничением использованного метода съемки явилось образование ложных отражений в зоне заплеска или на поверхности воды на внутренних водоемах. Большая часть этих отражений была автоматически отфильтрована в процессе классификации, однако в ряде случаев потребовалась ручная коррекция облака точек. К сожалению, подобная фильтрация приводит к существенной потере данных о рельефе в приурезовой части (подобный недостаток отмечен и при лазерной съемке). Наиболее действенным методом для повышения точности является проведение съемки в период высокого стояния солнца для снижения количества бликов и при отсутствии волнения (малой ширине заплеска).

Выводы. В 2018 г. нами была отснята вся наземная часть Бакальской косы и проведена обработка полученных материалов, имеющая целью построение ЦМР для всей косы. Оценка точности построенных по цифровым аэрофотоснимкам ЦМР на отдельные участки косы показала, что выбранные методики съемки и последующей обработки позволяет использовать их для большей части морфометрических работ в пределах пляжей и дистальной части косы. Получение в весьма короткие сроки высокоточной ЦМР для всей площади крупного аккумулятивного тела, каким является Бакальская коса, ранее не было достижимо традиционными методами изучения рельефа. Дистанционное изучение рельефа с помощью дронов может и должно стать необходимым элементом экспедиционных исследований морских берегов.

К сожалению, данный метод не позволяет получать точные данные в зоне заплеска, так как там формируются ложные отражения, и при наличии густого



Р и с . 2 . Фрагмент ЦМР и поперечный разрез (остров Бакальской косы).



Р и с . 3 . Фрагмент ЦМР и поперечный разрез Бакальской косы.

растительного покрова, так как отсутствуют точки типа «земля». Тем не менее, несмотря на наличие ограничений метода, значительно лучшая доступность получения данных о строении рельефа на основе обработки цифровых фотографий, полученных при помощи БПЛА, дает преимущество методам цифровой фотограмметрии при оперативном изучении аккумулятивных форм с неплотным растительным покровом.

Полевые работы, обработка и анализ снимков, создание ЦМР выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект №14-17-00547), методика съемки крупных аккумулятивных форм разработана и апробирована при финансовой поддержке РФФИ (проекты 16-45-230321 и 18-05-00333).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косьян Р.Д., Крыленко В.В.* Современное состояние морских аккумулятивных берегов Краснодарского края и их использование.– М.: Научный мир, 2014.– 256 с.
2. *Иванов В.А., Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф., Харитоновна Л.В., Шутов С.А.* Современное состояние и эволюция Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012.– вып.26, т.1.– С.8-15.
3. *Kosyan R.D., Goryachkin Yu.N., Krylenko V.V., Dolotov V.V., Krylenko M.V., Godin E.A.* Crimea and Caucasus accumulative coasts dynamics estimation using satellite pictures // *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*– 2012.– 12.– P.385-390.

4. *Крыленко В.В., Крыленко М.В.* Оценка динамики уреза аккумулятивного берега при помощи спутниковых снимков // Междунар. конф. ИнтерКарто/ИнтерГИС-21 «Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение». – Краснодар, 2015. – С.439-446.
5. *Krylenko M., Krylenko V., Kosyan R.* Accumulative coast dynamics estimation by satellite camera records // The 3rd Intern. conf. on remote sensing and geoinformation of the environment. – Book Series: Proc. of SPIE. – 2015. – v.9535. – P.95351K.
6. *Крыленко В.В., Алейников А.А., Бойко Е.С., Крыленко М.В.* Оценка динамики береговой линии косы Долгая при помощи спутниковых снимков // Географические исследования Краснодарского края. – Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2016. – вып.10. – С.253-260.
7. *Крыленко В.В., Крыленко М.В.* Современные методы изучения динамики рельефа морских береговых аккумулятивных форм // Междунар. научно-техн. конф. «Системы контроля окружающей среды». – Севастополь: ИПТС, 2016. – С.42-43.
8. *Войко Е., Krylenko V., Krylenko M.* LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // The 3rd Intern. conf. on remote sensing and geoinformation of the environment. – Book Series: Proceedings of SPIE. – 2015. – v.9535. – P.95351Q.
9. *Горячкин Ю.Н., Косьян Р.Д.* Бакальская коса – уникальный природный объект Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – вып.4. – С.5-14.
10. *Kharitonova L.V., Kos'yan R.D., Goryachkin Yu.N., Krylenko V.V., Krylenko M.V., Godin E.A.* Monitoring of the West Crimean coast by Drone // The 2nd International Youth Scientific and Practice Conference «Innovations in Geology, Geophysics and Geography». Sevastopol, 7-9 July, 2017. – М.: Pero, 2017. – P.44.
11. *Крыленко В.В., Руднев В.И.* Методика аэрофотосъемки Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – вып.4. – С.59-64.
12. *Крыленко В.В.* Применение оборудования ГНСС LEICA GEOSYSTEMS в научных исследованиях // Геопрофи. – М., 2013. – вып.5. – С.19-23.
13. *Krylenko M., Krylenko V.* Active registration method of the coast changes // The XIII Intern. MEDCOAST Congress «Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation». – Mugla: MEDCOAST Foundation, 2017. – v.2. – P.871-880.

Материал поступил в редакцию 9.10.2018 г.
После доработки 30.10.2018 г.

V.V.Krylenko, M.V.Krylenko

EXPERIENCE OF HIGH-ACCURACY SURVEY OF THE BAKALSKAYA SPIT RELIEF

The adaptation of technique of the high-precision survey of land relief using air drone for the Bakalskaya Spit conditions is presented. Analysis of the obtained results is showed that this type of survey for a given natural object is optimal, but has a number of limitations. The advantages of method are low cost, operability in the data gathering. The limitation of method is difficulty of the data processing and interpretation in the presence of dense vegetation cover and in the splash zone. Accordingly, these limitations should be taken into account when surveys are organized both on the Bakalskaya Spit and on similar accumulative forms.

KEYWORDS: sea coasts, accumulative form, survey of relief, the Bakalskaya Spit, the Crimean Peninsula