

Определение глубины акватории в прибрежной зоне Крыма с различными типами дна по измерениям беспилотных летательных аппаратов

Б. А. Новиков, А. А. Кубряков, С. В. Федоров

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: alsha996@yandex.ru

В настоящей работе на основе измерений с оптической камеры, установленной на коммерческом беспилотном летательном аппарате (БПЛА) и регистрирующей сигнал в трёх оптических каналах (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий), проводится восстановление батиметрии в прибрежной мелководной зоне Крымского п-ова. Для оценки чувствительности метода он был применён отдельно для участков с различным типом подстилающей поверхности дна. Для этой цели авторы предлагают метод классификации с использованием вегетационного индекса для морской среды VDVI (*англ.* Visible-band difference vegetation index), который позволил оценить площади, занятые макрофитобентосом и песком. Результаты показали, что использованный алгоритм слабо зависит от подстилающей поверхности и позволяет определять глубину для участков со смешанным типом дна. Предложенные методы дают возможность за одну съёмку БПЛА определять площадную изменчивость (размером несколько квадратных километров) топографии дна с высоким разрешением (~10 см) и осуществлять оперативный мониторинг изменения глубины и характеристик подстилающей поверхности дна. Такие данные в перспективе позволят уточнить имеющиеся представления о процессах формирования и изменчивости топографии дна, развитии макрофитобентоса под влиянием различных гидродинамических процессов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), батиметрия, Чёрное море, макрофитобентос, оптические измерения, дистанционные методы

Одобрена к печати: 12.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-209-221

Введение

Рельеф дна в прибрежной мелководной зоне играет важную роль во многих сферах жизнедеятельности человека. Прибрежная морская акватория считается наиболее динамичной из всех зон мирового океана, где обитает большинство видов морской флоры и фауны. Данные о рельефе подводной части и характере дна необходимы для безопасной навигации, ведения рационального природопользования, рыбного промысла, строительства береговых сооружений, рекреационных комплексов и многого другого.

Основным источником данных о батиметрии выступают судовые промеры глубин, например с помощью эхолотов. Эти данные обладают высокой точностью, однако имеют ограниченное пространственно-временное покрытие. Получение масштабных по площади и частых по времени данных батиметрии методом судовых измерений связано с существенными финансовыми затратами.

В связи с этим появляется всё больше методов определения характеристик дна на основе дистанционного зондирования земли. Дистанционные методы открывают возможность площадного анализа характеристик среды с минимальными затратами по времени. Методы определения глубины моря и получения информации о рельефе дна по данным мультиспектральных сканеров с использованием изображений в оптическом диапазоне электромагнитного спектра начали разрабатывать ещё с 1970-х гг. (Lyzenga, 1978). В дальнейшем эти методы развивались и применялись во многих работах для анализа данных оптических, но уже спутниковых измерений (Jupp, 1988; Lyzenga, 1981; Lyzenga et al., 2006; Philpot, 1989; Stumpf et al., 2003). Суть данных методов заключается в установлении регрессионной зависимости между

глубиной моря и измеренной отражённой составляющей яркости дна в одном или нескольких спектральных каналах. По мнению авторов метода, типы подстилающей поверхности незначительно влияют на спектральные характеристики отражённой компоненты яркости морского дна и не оказывают влияния на результат восстановления батиметрии. Дистанционные оптические измерения позволяют определять характер подстилающей поверхности дна, что широко используется для исследования распределения отдельных бентосных сообществ (Барымова, Кокорин, 2018; Блинова и др., 2005; Jiang et al., 2020) и кораллов (Fallati et al., 2020).

В последнее время активно развиваются измерения с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Коммерческие БПЛА предоставляют возможность относительно экономически оправданного и оперативного решения задачи мониторинга морской среды с помощью данных очень высокого разрешения. БПЛА имеют и ряд других преимуществ по сравнению со спутниковыми измерениями. Например, облачность не становится препятствием для измерений, а из-за малых высот съёмки влияние атмосферного рассеяния на получаемые данные менее сильно. Данные с БПЛА, в частности, использовались для исследования динамики субмезомасштабных вихрей (Кубряков и др., 2021) и речных плумов (Korshenko et al., 2020), эволюции берегов (Крыленко, Крыленко, 2020; Репкина и др., 2020; Angnuireng et al., 2020), волновых процессов (Дулов, Юровская, 2021), распространения бентосных сообществ в береговой зоне (Панкеева и др., 2019, 2020; Wei et al., 2022), а также для мониторинга нефтяных пятен (Мамедов, 2019) и других загрязнений (Konstantinos et al., 2019). Фото- и видеоборудование, устанавливаемое на БПЛА, позволяет получать информацию в оптическом диапазоне электромагнитного спектра (Юровская и др., 2018; Rossi et al., 2020). Далее специальными методами и алгоритмами извлекаются данные о яркости пикселей в стандартных для человеческого глаза цветовых палитрах — красной, зелёной и синей — и в соответствующем интервале электромагнитных волн. В ряде работ демонстрируется возможность использования БПЛА для определения глубин дна прибрежной зоны (Bergsma et al., 2019). Для восстановления батиметрии используется метод спектрального анализа яркости дна (Rossi et al., 2020), оценка глубины проводится на основе видеосъёмки эволюции поверхностного волнения (Bergsma et al., 2019). Спутниковые измерения представляются важным компонентом в алгоритме получения характеристик изучаемого явления, однако, как и судовые измерения, они имеют свои ограничения, например связанные с состоянием атмосферы.

Цель настоящей работы — разработать алгоритм, который позволит оценить возможности восстановления батиметрии в прибрежной мелководной зоне Чёрного моря, используя при этом данные коммерческих малых беспилотных аппаратов, а также попытаться оценить чувствительность используемого алгоритма к типу подстилающей поверхности.

В разд. «Данные» даётся описание используемых данных БПЛА. В разд. «Определения глубины по оптическим данным БПЛА» описываются методы восстановления глубины моря, а также методы классификации подстилающей поверхности и выделения ареала произрастания морской флоры.

Впервые для прибрежной акватории Чёрного моря предлагается использовать малые беспилотные летательные аппараты с целью исследования, наблюдения и прогнозирования развития среды параллельно с накоплением фото- и видеоматериалов изучаемых полигонов с малых высот. Такой подход, наряду с возможностью покрытия относительно больших площадей (до 2 км² за один полёт), может обеспечить высокую репрезентативность информации и выполнение поставленных исследовательских задач в кратчайшие сроки. Таким образом, имеется возможность фиксировать не только долгосрочные изменения, но и, например, последствия разрушительных природных явлений — штормов. Данные, полученные таким методом, имеют перспективы применения и в хозяйственной сфере. Они могут служить подспорьем для устойчивого развития региона, помогая, например, оценить краткосрочную и долгосрочную антропогенную нагрузку на среду. При постановке задачи планомерного мониторинга предлагаемым методом имеется возможность формирования базы данных, у которой ещё нет аналогов.

Данные

В работе используются композиции снимков в стандартных для человеческого глаза цветовых диапазонах — красном, зелёном и синем. Таким образом, полученные фотографии уже на стадии полёта БПЛА становятся реальным отображением наблюдаемой среды. Качество снимков и высокое разрешение позволяют классифицировать отдельные элементы водного рельефа.

Фотографии водной среды, используемые в исследовании, сделаны с помощью фотоборудования DJI FC6310, установленного на БПЛА (квадрокоптер) DJI Phantom 4 adv. Камера, оснащённая дюймовой матрицей, имеет угол обзора в 84° и крепится на гиросtabilизирующем подвесе. Полевая часть работы проводилась 22 июня 2018 г. в районе м. Каменный на северо-западе Крымского п-ова, выбранное место показано на *рис. 1*. Карта-схема полигона разделена на три части: на *рис. 1а* показано расположение м. Каменный относительно Бакальской косы, на *рис. 1б* — расположение полигона исследований относительно всего Крымского п-ова, на *рис. 1в* — результат аэрофотосъёмки с БПЛА (ортофотоплан полигона). Аэрофотосъёмка выполнялась в полдень, средняя высота полёта беспилотного летательного аппарата составляла 75 м над поверхностью моря. Во время съёмки по данным натурных наблюдений и метеосводки района наблюдалась нулевая облачность. Такие параметры съёмки позволяют минимизировать количество бликов от водной поверхности, избежать затенения водной толщи, а также облегчают классификацию подстилающей породы и ареала морской флоры. При съёмке строго в нади́р наложение снимков в продольном перекрытии составило 65 % к смежным снимкам, в поперечном — 35 %. Общая площадь покрытия составила $0,35 \text{ км}^2$, количество снимков — 40 шт.

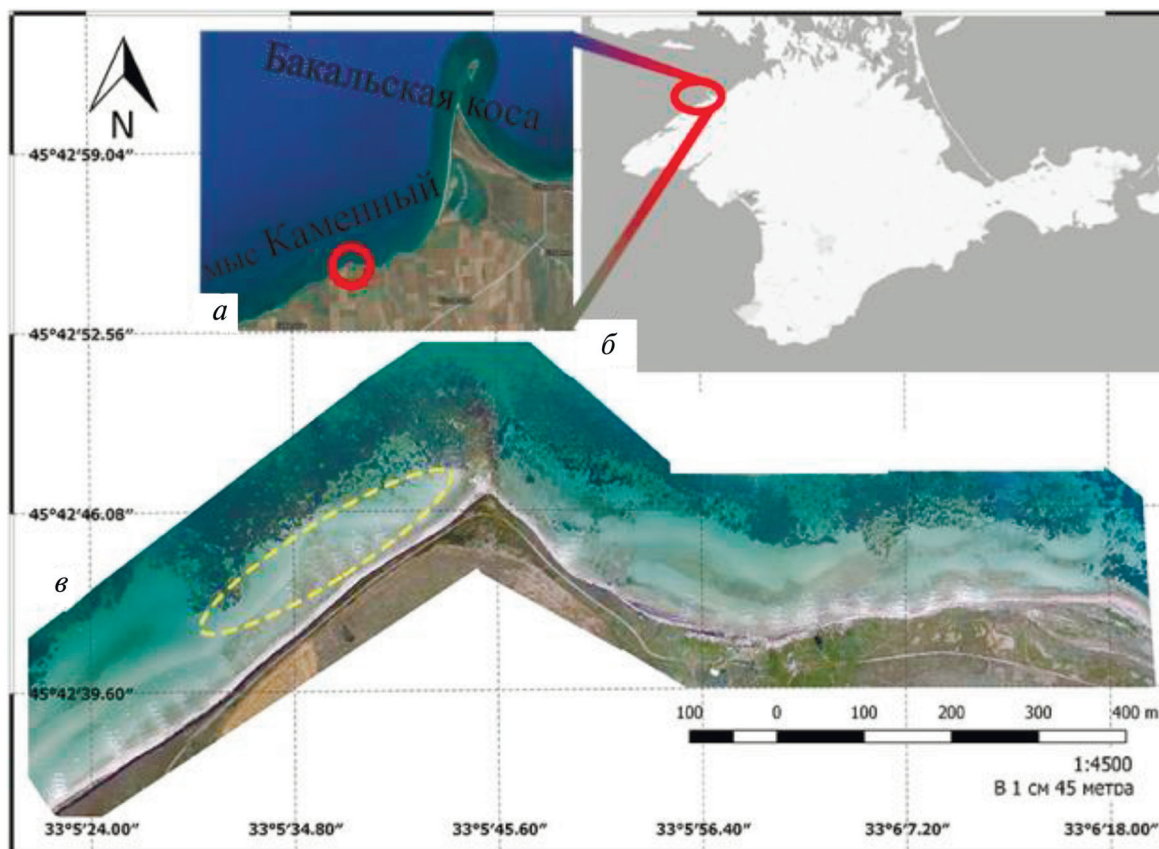


Рис. 1. Полигон проведения аэрофотосъёмки: *а* — расположение м. Каменный относительно Бакальской косы; *б* — расположение полигона исследований относительно всего Крымского п-ова; *в* — ортофотоплан м. Каменный, выполненный по аэрофотоснимкам, полученным с помощью БПЛА (DJI Phantom 4 Advanced); жёлтым пунктиром обозначен основной район накопления наносов

Полученные снимки размером 5472×3078 пикселей с разрешением 72 dpi формата JPG были объединены в программном пакете Metashape в один снимок размером 40840×18938 пикселей разрешения 96 dpi, результат показан на *рис. 1в*. Изображение характеризуется большим пространственным разрешением (1 пиксель соответствует 6,1 см), что намного выше разрешения доступных данных спутниковых снимков (например, Sentinel-2 имеет разрешение 10 м). Детали, такие как береговая линия, площади макрофитобентоса, чётко различимы.

Для первичной фильтрации возможных погрешностей съёмки и шумов, вызванных незначительным поверхностным волнением, а также с целью ускорения работы алгоритма была проведена медианная фильтрация для трёх спектральных каналов (красного, синего и зелёного) ортофотоплана отдельно друг от друга методом нелинейной медианной фильтрации с условно взятым окном 7×7 пикселей.

Кроме этого, на изображении имеются осветлённые области вблизи берега, связанные с солнечным бликом от обрушений волн. В северной части снимка возникновение таких областей также связано с солнечным бликом, часть которого проявляется на отдельных фотографиях и остаётся после выполнения операции создания ортофотоплана. Эти области характеризуются ярко-белым цветом и наибольшими значениями коэффициентов яркости во всех каналах. Для исключения данных областей использовался следующий фильтр: те пиксели, яркость которых превышает 95 % в трёх спектральных каналах (красном, синем, зелёном) по отношению к среднему значению коэффициентов яркости всех пикселей, не использовались в дальнейшем анализе.

Определение глубины по оптическим данным БПЛА

Метод восстановления глубины

Первым шагом необходимо выполнить переход от значений расстояний в пикселях к метровой системе координат путём решения уравнения:

$$\mu_x = \frac{x}{r_x} = \frac{2h \cdot \operatorname{tg}(a_x/2)}{r_x}, \quad (1)$$

где μ_x — размер стороны квадрата пикселя на изображении (в мм/пиксель); x — фактическое расстояние на местности; r_x — разрешение камеры (5472×3078); h — высота полёта (75 м); a_x — угол обзора камеры (84°).

Далее, имея данные о фактическом масштабе изучаемых явлений, полученном в уравнении (1), приступим к математической обработке.

Суть используемого метода заключается в установлении регрессионной зависимости глубины моря от яркости пикселей в нескольких спектральных каналах стандартного RGB-снимка (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий).

Яркость восходящего излучения L_t , измеряемую БПЛА, можно представить как сумму нескольких компонент:

$$L_t = L_b + L_v + L_s + L_p. \quad (2)$$

Здесь L_s — вклад отражения от поверхности воды; L_p — вклад рассеяния в атмосфере; L_b — это яркость дна (попавшая на сенсор часть излучения, прошедшего всю водную толщу и отражённого от дна); яркость дна несёт в себе информацию о характере подстилающей поверхности, её типе (песок, бентос, горные породы и т. д.), характеристиках и глубине акватории; L_v — яркость от толщи океана, которая зависит от содержащихся в воде оптически активных компонентов (фитопланктона, взвеси).

Фотографии были получены вне блика в условиях низкого ветра, тогда L_s можно принять равным нулю. Поскольку в отличие от спутниковых снимков материал был получен с малых высот (до 100 м) в условиях однородной атмосферы, будем считать, что влияние атмосферы на изменчивость сигнала крайне мало: $L_p = 0$.

Сигнал, выходящий из-под поверхности воды, изменяется в зависимости от глубины. При анализе фотографического материала наблюдается изменение цвета воды в зависимости от удаления от берега. Важным этапом представляется анализ изменения отражаемого сигнала в каждом из трёх спектральных каналов. На *рис. 2* представлен пример разреза поперёк к берегу, на котором отчётливо видно уменьшение коэффициентов яркости в красном канале по сравнению с зелёным и синим каналами. Такое уменьшение вызвано интенсивным поглощением излучения в красном канале и уменьшением вклада отражения от дна (L_b) по сравнению с сигналом от толщи вод (L_v) при увеличении глубины.

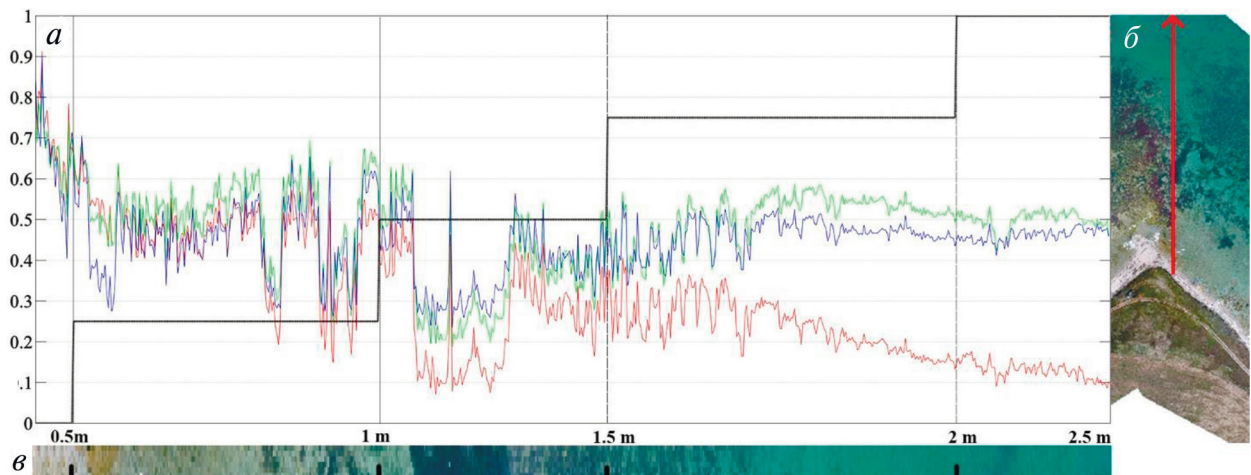


Рис. 2. График изменения яркости пикселей в красном, зелёном и синем каналах вдоль разреза поперёк к берегу (*а*); положение разреза (*б*); детальное изображение изменения цвета на фотоснимке в зависимости от глубины (*в*)

Согласно закону Бугера, свет, проходящий через поглощающую среду, ослабляется экспоненциально с глубиной:

$$L(z) = L(0) \cdot \exp(-Kz), \quad (3)$$

где z — глубина; $L(0)$ — яркость на поверхности моря; K — коэффициент диффузного ослабления света.

Тогда отношения (2) и (3) приводят к формуле:

$$L = L_b \cdot \exp(-Kz) + L_v. \quad (4)$$

Отсюда, согласно (Lyzenga, 1978; Philpot, 1989), можно оценить глубину как функцию яркости от глубины и альбедо дна и коэффициента диффузного ослабления света следующим образом, получив формулу:

$$z = \frac{\ln(A_d - L_\infty) - \ln(L - L_\infty)}{K}. \quad (5)$$

Здесь A_d — альбедо дна; L_∞ — яркость глубокой воды; K — коэффициент диффузного ослабления света.

При условии, что отношение яркости дна на двух длинах волн остаётся постоянным для разных типов дна (Lyzenga, 1978), получим зависимость:

$$z = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cdot \ln[L(\lambda_i) - L_\infty(\lambda_i)]. \quad (6)$$

Здесь a_0 , a_i — константы, полученные эмпирическим путём. Данный метод имеет ограничения для случаев, когда альбедо дна меньше яркости глубокой воды. Тогда аргумент натурального логарифма получается отрицательным. Описанные ситуации нередки и характерны, например, для дна, обильно покрытого морскими водорослями. В этих случаях пиксели снимка в райо-

не оптически мелкой воды выглядят темнее (обладают меньшей яркостью). Этому недостатка лишена нелинейная логарифмическая модель (7), описанная в работе (Stumpf et al., 2003):

$$z = m_1 \frac{\ln(nL(\lambda_1))}{\ln(nL(\lambda_2))} - m_0. \quad (7)$$

Здесь n , m_0 , m_1 — эмпирические константы; $L(\lambda_i)$ — яркость, измеренная в двух различных каналах.

Выделение областей, занятых песком и бентосом

Формулы (4)–(6) будут выполняться в условиях горизонтальной и вертикальной однородности освещения, яркости дна, коэффициента ослабления света. В нашем случае мы рассматриваем квазисинхронную съёмку относительно небольшого участка акватории в безветренную погоду. Поэтому будем считать, что коэффициент ослабления приблизительно однороден по пространству.

Одним из основных этапов анализа изображения становится определение объектов исследования по полученным фотографиям, при этом с опорой на фактические данные о полигоне, полученные методом *in situ* в ходе полевой экспедиции. В полевых исследованиях принимал участие дайвер, снабжённый фото- и видеоаппаратурой, способной производить съёмку под водой (GoPro Hero5), который методом визуальной регистрации, а также записыванием видеоматериала выделял места произрастания морской флоры. Впоследствии на аэрофотоснимках уточнялись границы обитания макрофитобентоса и границы его отсутствия. В районе полигона исследований донные осадки были представлены песком, мелкой галькой и в ряде районов крупными валунами, плотно покрытыми морской флорой (см. рис. 1в). Зелёные и бурые области на снимке соответствуют макрофагам или другим видам морской донной растительности, жёлтые и бежевые области представляются песком или другими донными отложениями. Более светлые жёлтые области могут говорить о наличии отдели — изменении глубины дна. Таким образом, альbedo дна исследуемого полигона значительно меняется, в первую очередь из-за влияния бентоса.

Для оценки возможного влияния альbedo дна на коэффициенты m_0 , m_1 (формула (7)) и дальнейшего восстановления глубины дна акватория была разделена на области, занятые только песком и только видами макрофитобентоса.

Для выделения донной растительности был применён вегетационный индекс для морской среды VDVI (*англ.* Visible-band difference vegetation index) (Xiaopeng et al., 2020):

$$VDVI = \frac{2L_{green} - L_{red} - L_{blue}}{2L_{green} + L_{red} + L_{blue}}, \quad (8)$$

где L_{green} — коэффициент яркости зелёного канала изображения; L_{red} — коэффициент яркости красного канала; L_{blue} — коэффициент яркости синего канала.

Согласно (Xiaopeng et al., 2020), области, занятые бентосом, определялись как пиксели с величиной VDVI, выраженной уравнением (8), больше определённой безразмерной константы. Константа, полученная эмпирическим путём (по формуле (9)) для рабочего полигона исследований, составляет 0,33:

$$Benthos = \sqrt{(VDVI)^2} < 0,33. \quad (9)$$

Результат выделения макрофитобентоса на основе рассчитанного коэффициента VDVI с наложением на исходный снимок представлен на рис. 3 (см. с. 215). Визуальное сопоставление полученных данных с исходным фото показывает, что этот алгоритм позволяет достаточно точно выделять области с макрофитобентосом. В результате для исследуемой акватории площадь дна, занятая бентосом, составила 49,94 % от всей площади акватории, или 0,16 км². Площади, не занятые морской растительностью, были отнесены к площадям донных отложений песка.

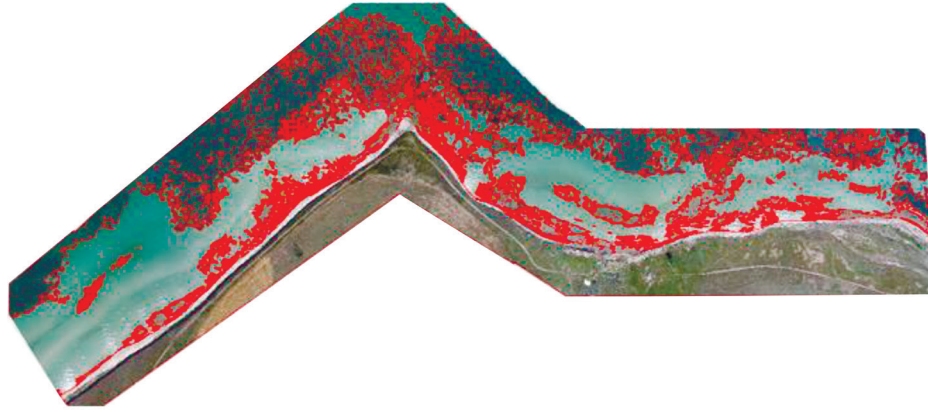


Рис. 3. Результат выделения сообществ макрофитобентоса. Красным контуром выделены сообщества макрофитобентоса

Восстановление глубины дна в прибрежной части Северного Крыма по данным БПЛА

Для определения коэффициентов m_1 и m_0 для формулы (7) в качестве первичной оценки глубины дна были использованы данные о батиметрии, соответствующие коэффициенту H_0 , полученные на основе измерений судовых эхолотов (взяты с сайта производителя электронных навигационных карт Navionics, <https://www.navionics.com>) (рис. 4). Согласно представленным на сайте данным, глубина в исследуемой зоне меняется от 0 до 2,5 м.

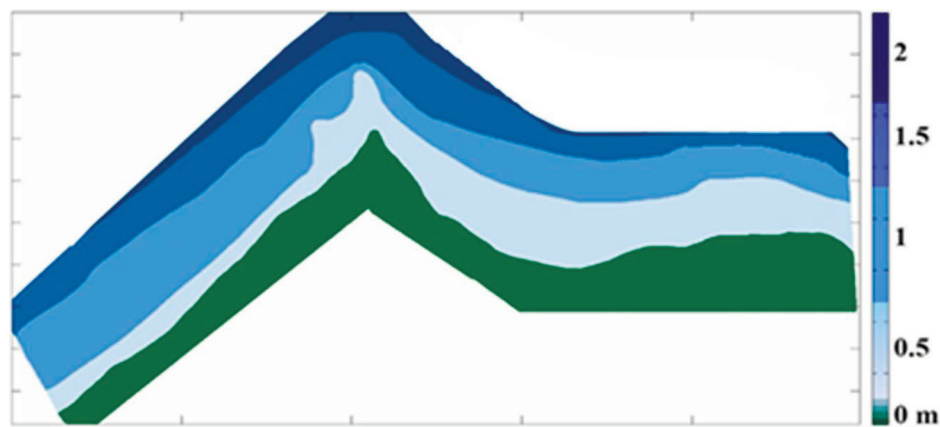


Рис. 4. Глубина дна исследуемого района (м) по данным сайта Navionics

Далее, данные об H_0 (см. рис. 4) интерполировались на пространственную сетку, соответствующую снимку БПЛА (см. рис. 1в). После этого для каждого интервала глубин рассчитывалось среднее отношение логарифмов значений яркости красного и синего каналов коэффициента A по формуле:

$$A = \frac{\ln(L_b)}{\ln(L_r)}$$

Для оценки влияния альбедо дна на восстановление глубины коэффициенты m_0 , m_1 были получены тремя разными способами: только для пикселей, соответствующих донной растительности, только по песку и для всей акватории в целом. Рассчитанные в результате зависимости показаны на рис. 5 (см. с. 237). Полученная зависимость аппроксимировалась линейной функцией. В результате были определены коэффициенты m_0 , m_1 .

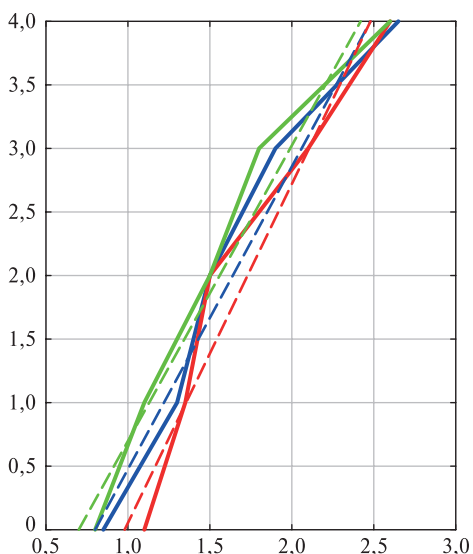


Рис. 5. Зависимость между глубиной по данным Navionics и отношением логарифмов яркости красного и синего каналов для пикселей только с морской флорой (красный цвет), только с песком (зелёный) и для карты без удалённых фрагментов (синий). Пунктирными линиями обозначена аппроксимация полученных кривых линейной функцией

Разница между полученными кривыми для различных типов дна оказалась невелика. Вычисленные коэффициенты представлены в таблице. Коэффициент m_1 менялся от $-1,67$ для песка до $-2,03$ для водорослей, что даёт абсолютную погрешность, вычисленную путём нахождения средней разницы для использования смешанного типа дна, в $35/2 \approx 17$ см. Коэффициенты m_0 варьировали от $2,34$ до $2,38$, т.е. относительная ошибка восстановления составляла менее 2% (определена нахождением процентной разницы).

Коэффициенты m_0 и m_1 , полученные для трёх вариантов анализа

	m_0	m_1
Песок	2,3796	$-2,0252$
Макрофитобентос	2,3383	$-1,6655$
Вся акватория	2,3422	$-1,7589$

Для оценки влияния типов дна на восстановление глубины с помощью вычисленных коэффициентов были получены три карты: для площадей, покрытых только морской флорой, для районов, где растительность отсутствует, и карта без удаления выбранных участков полигона (рис. 6, см. с. 217). Карты глубин, представленные на рис. 6, сильно схожи друг с другом. Различия для соседних областей, полученные методом вычитания значений глубины, невелики и не превышают 10 см. Таким образом, можно заключить, что представленный метод восстановления батиметрии по данным БПЛА позволяет пренебрегать разностью яркостных характеристик морской флоры и грунтов морского дна.

Проведённый анализ показывает, что оптические снимки БПЛА можно использовать для восстановления площадной изменчивости глубины для участков дна с разными характерами подстилающей поверхности. Результат восстановления глубины для всего снимка представлен на рис. 6в. Сравнение восстановленной по БПЛА глубины с исходным полем H_0 , полученным по данным Navionics, и их разница представлены на рис. 7 (см. с. 217). В целом полученные распределения достаточно хорошо согласуются (см. рис. 7в). Максимальные глубины фиксируются в районах, отдалённых от берега на 100–150 м (на ортофотоплане, по краям изображения), в северо-западном, северном и восточном районах, а минимальные — на всей ширине акватории, расположенной наиболее близко к береговой линии, и вдоль м. Каменный, находящегося в центре полигона.

Рисунок 7б демонстрирует возможность получения информации о батиметрии с очень высоким разрешением (~ 10 см в 1 пикселе) по данным БПЛА и исходного поля глубин малого разрешения. Конечное разрешение зависит в первую очередь от высоты полёта БПЛА, количества снимков, фактической части поперечного и продольного перекрытия. Кроме того, эти данные получены мгновенно, а не за некий осреднённый период времени измерений эхолотаторов проходящих судов. Таким образом, на карте, восстановленной по данным БПЛА, видно значительно большее количество деталей. На изображении в восточной части полигона выделяются аккумулятивные образования, которые также не выделены на данных, полученных с помощью эхолотации. Например, чётко выражено накопление наносов

вдоль мыса и западнее от него, что может говорить о преобладающей направленности течений в районе. Здесь глубины, полученные по данным БПЛА, на 0,5–1 м выше, чем по данным Navionics (см. рис. 7а). В то же время в восточной части района глубины на 0,5–1 м ниже. Отрицательные значения также отмечаются в северо-восточной части полигона, что может служить показателем выносного характера течений.

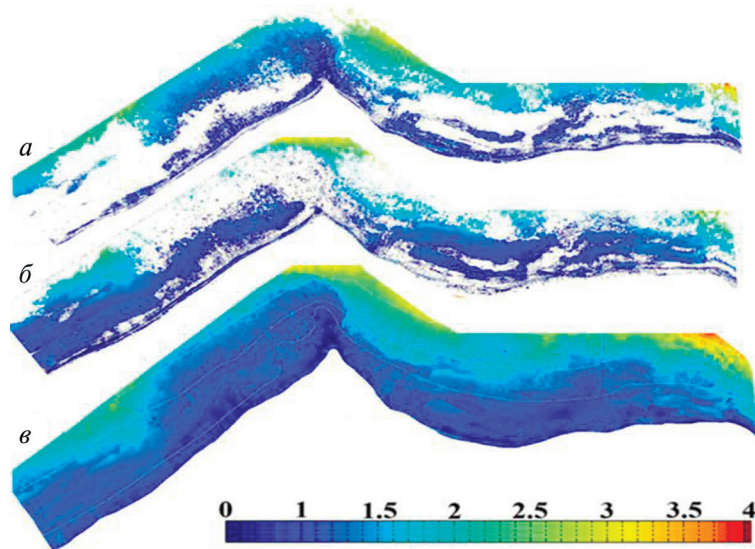


Рис. 6. Восстановленные карты глубин, полученные тремя методами: *а* — с удалением песка; *б* — с удалением морской флоры; *в* — без удалений пикселей

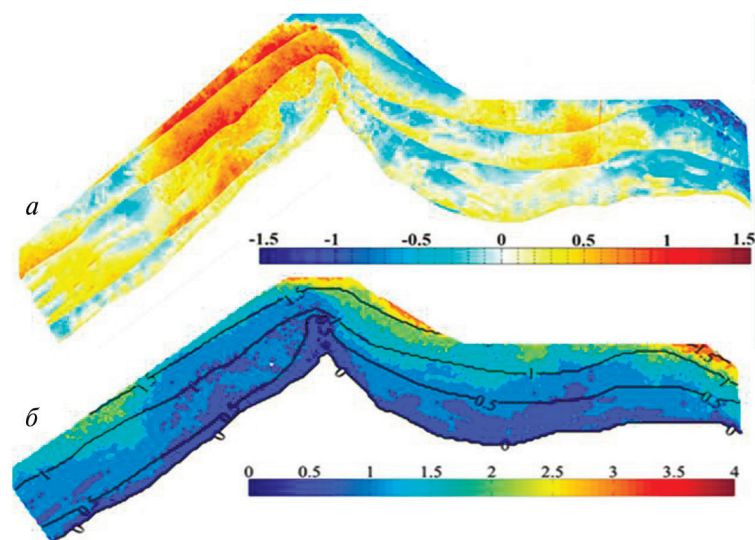


Рис. 7. Разность вычисленных значений поля восстановленной глубины H_{all} (без удаления пикселей песка и бентоса) и поля H_0 (данные, полученные с сайта Navionics) (*а*). Восстановленное по фотографии поле батиметрии (цветом показаны значения глубины) (*б*). Изобатами показана глубина h_0 (по данным с сайта Navionics)

Эти особенности выступают важным маркером в развитии прибрежной акватории и могут говорить о широком ряде процессов местного характера. Такие различия в глубинах могут быть вызваны перераспределением песчаных наносов, вызванных, например, штормами, к моменту проводимой съёмки БПЛА. В результате чего мы видим пример актуализации информации, имеющейся по данным эхолотации, с помощью данных, полученных предложенным методом, что позволяет создать систему оперативного мониторинга изменений прибрежной акватории моря.

Заключение

В настоящей работе предложена методика определения глубины акватории по оптическим измерениям коммерческих беспилотных аппаратов в трёх цветовых каналах (RGB). Для оценки применимости использования метода для участков с различной структурой дна процедура восстановления была проведена по отдельно выделенным участкам песка и макрофитобентоса. Результаты восстановления показали, что предложенный алгоритм слабо зависит от подстилающей поверхности и позволяет определять глубину для участков со смешанным типом дна. Разработанные методы определения рельефа дна на основе данных БПЛА были впервые применены в российской практике. За одну съёмку они позволяют определять площадную изменчивость (площади размером несколько квадратных километров) топографии дна со сверхвысоким разрешением (~10 см). Данные о рельефе дна востребованы во многих океанографических задачах, например при моделировании гидродинамики вод и транспорта прибрежных наносов, оценке перспектив использования тех или иных берегозащитных сооружений. Простота и дешевизна измерений БПЛА позволяют осуществлять контроль за изменением топографии дна, например под воздействием штормовых волн, вихрей, течений, антропогенной деятельности и т. д. Эта информация даст возможность уточнить имеющиеся представления о важных процессах формирования и изменчивости топографии дна под влиянием различных гидродинамических процессов. Разработка методов оценки изменения площади, занятой бентосными водорослями, а также её изменчивости по пространству и сезонам в зависимости от влияния различных гидрофизических процессов (например, штормов) позволяет получить новые данные о закономерностях развития бентосной макрофауны и, несомненно, представляет значительную ценность для биологической океанографии.

Предложенный подход, наряду с возможностью покрытия достаточно больших площадей, способен обеспечить высокую репрезентативность информации вместе с возможностью выполнения поставленных исследовательских задач в кратчайшие сроки. Данные, полученные таким методом, могут служить подспорьем для устойчивого развития региона, для оценки краткосрочной и долгосрочной антропогенной нагрузки на среду.

Отметим ряд ограничений используемого метода. Восстановление батиметрии с удовлетворительной точностью возможно лишь в условиях достаточной однородности коэффициента поглощения света. Таким образом, в условиях неоднородности и мутности вод, вызванных, например, эрозией берега во время сильного ветра, определять глубины дна затруднительно. Ещё одной помехой оказываются области повышенного отражения света, связанные с влиянием солнечного блика и обрушений волн, которые также необходимо отфильтровывать при анализе.

Литература

1. Барымова А. А., Кокорин А. И. Применение БПЛА для аэрофотосъёмки с целью комплексного картирования прибрежных зон на примере литорали Карельского берега Белого моря // 2-я Студенческая науч. сессия УНБ «Беломорская» СПбГУ: тез. докл. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2018. С. 31–32.
2. Блинова Е. И., Вилкова О. Ю., Милютин Д. М., Пронина О. А., Штрик В. А., Miljutin D. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. М.: Изд-во ВНИРО, 2005. Вып. 3. 135 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.3592.1764.
3. Дулов В. А., Юровская М. В. Спектральные контрасты коротких ветровых волн в искусственных слайках по фотографиям морской поверхности // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 3. С. 373–386. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-373-386.
4. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Особенности выполнения высокоточной съёмки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // Бюл. науки и практики. 2020. Т. 6. № 2. С. 10–19. DOI: 10.33619/2414-2948/51/01.
5. Кубряков А. А., Лишаев П. Н., Чепыженко А. И., Алескерова А. А., Кубрякова Е. А., Медведева А. А., Станичный С. В. Влияние субмезомасштабных вихрей на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне Крыма по данным БПЛА, спутниковых и контактных измерений // Океанология. 2021. Т. 61. № 2. С. 182–197. DOI: 10.31857/S0030157421020106.

6. Мамедов И. Э. Вопросы использования беспилотных летательных аппаратов для обнаружения нефтяных пятен в прибрежной части морской акватории // Проблемы региональной экологии. 2019. № 4. С. 88–91. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14088.
7. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков А. Б. Картографирование донной растительности бухты Круглая (г. Севастополь, Черное море) // Экологич. безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 61–71. DOI: 10.22449/2413-5577-2019-3-61-71.
8. Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков Б. А. Опыт картографирования донной растительности (на примере бухты Ласпи, Чёрное море) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. № 6. № 4. С. 154–169. DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-154-169.
9. Репкина Т. Ю., Гуринов А. Л., Кублицкий Ю. А., Леонтьев П. А., Луговой Н. Н., Дудоркин Е. С., Перетрухина А. О. Новые данные о строении рельефа и послеледниковых отложений побережий пролива Горло и Онежского полуострова (Белое море) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. № 7. С. 168–163. DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10724.
10. Юровская М. В., Кудрявцев В. Н., Широков А. С., Надоля И. Ю. Натурные измерения спектра поверхностных волн по фотографиям с беспилотного мультикоптера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 245–257. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-245-257.
11. Angnuureng D. B., Jayson-Quashigah P. N., Almar R., Stieglitz T. C., Anthony E. J., Aheto D. W., Appeaning Addo K. Application of Shore-Based Video and Unmanned Aerial Vehicles (Drones): Complementary Tools for Beach Studies // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 394. DOI: 10.3390/rs12030394.
12. Bergsma E. W., Almar R., Rolland A., Binet R., Brodie K. L., Bak A. S. Coastal morphology from space: A showcase of monitoring the topography-bathymetry continuum // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 261. Art. No. 112469. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112469.
13. Fallati L., Saponari L., Savini A., Marchese F., Corselli C., Galli P. Multi-Temporal UAV Data and Object-Based Image Analysis (OBIA) for Estimation of Substrate Changes in a Post-Bleaching Scenario on a Maldivian Reef // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 2093. DOI: 10.3390/rs12132093.
14. Jupp D. L. Background and extension to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. // Proc. Remote Sensing of the Coastal Zone Intern. Symp. Gold Coast, Australia. 1988. P. IV2.1–IV2.19. <http://hdl.handle.net/102.100.100/265466?index=1>.
15. Konstantinos T., Apostolos P., Shungudzemwoyo P. G. Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018) // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. V. 79. P. 175–183. DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.011.
16. Korshenko E., Zhurbas V., Osadchiv A., Belyakova P. Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018 // Marine Pollution Bull. 2020. V. 160. Art. No. 11678. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.11678.
17. Lyzenga D. R. Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features // Applied Optics. 1978. V. 17. P. 379–383. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.17.000379>.
18. Lyzenga D. R. Remote sensing of bottom reflectance and Water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data // Remote Sensing. 1981. V. 2(1). P. 71–82.
19. Lyzenga D. R., Malinas N. P., Tanis F. J. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. P. 2251–2259. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909.
20. Philpot W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery // Applied Optics. 1989. V. 28. P. 1569–1578.
21. Rossi L., Mammi I., Pelliccia F. UAV-Derived Multispectral Bathymetry // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 3897. DOI: 10.3390/rs12233897.
22. Stumpf R. P., Holderied K., Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. P. 547–556. DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.
23. Wei Y., Jiang S., Tian L., Wei L., Jin J., Ibánhez J. S. P., Chang Y., Wei X., Wu Y. Benthic microbial biogeography along the continental shelf shaped by substrates from the Changjiang River plume // Acta Oceanologica Sinica. 2022. V. 41. P. 118–131. DOI: 10.1007/s13131-021-1861-8.
24. Xiaopeng J., Meng G., Zhiqiang G. A novel index to detect green-tide using UAV-based RGB imagery // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2020. V. 245. Art. No. 106943. DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106943.

Depth determination in the coastal water zone near the Crimean Peninsula with different seafloor types using unmanned aerial vehicle measurements

B. A. Novikov, A. A. Kubryakov, S. V. Fedorov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: *alsha996@yandex.ru*

In this article, the bathymetry is reconstructed in the coastal shallow water zone of the Crimean Peninsula based on measurements from an optical camera that records a signal in three optical channels (RGB), which is installed on a commercial unmanned aerial vehicle (UAV). The method was applied separately for areas with different types of underlying bottom surface to assess the sensitivity of the method. For this purpose, the authors propose a classification method using the vegetation index for the marine environment VDVI, which made it possible to estimate the areas occupied by macrophytobenthos and sand. The results show that the algorithm depends weakly on the underlying surface and allows determining the depth for areas with a mixed bottom type. The proposed methods make it possible to determine the areal variability (several square kilometers in size) of the bottom topography with a high resolution (~10 cm) and allows monitoring of changes in the depth and underlying bottom surface characteristics during one UAV survey. In the future, such data will make it possible to clarify the existing ideas about the processes of formation and variability of the bottom topography and development of macrophytobenthos under the influence of various hydrodynamic processes.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), bathymetry, Black Sea, macrophytobenthos, optical measurements, remote sensing methods

Accepted: 12.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-209-221

References

1. Barymova A. A., Kokorin A. I., The use of UAVs for aerial photography for integrated mapping of coastal zones on the example of the littoral of the Karelian coast of the White Sea, *2-ya Studencheskaya nauchnaya sessiya UNB "Belomorskaya" SPBGU* (2nd Student Scientific Session of the Educational and Research Station "Belomorskaia". Saint Petersburg State University), Saint Petersburg: Saing Petersburg State University, 2018, pp. 31–32 (in Russian).
2. Blinova E. I., Vilkova O. Yu., Milyutin D. M., Pronina O. A., Shtrik V. A., Miljutin D., *Metody landshaftnykh issledovaniy i otsenki zapasov donnykh bespozvonochnykh i vodoroslei morskoi pribrezhnoi zony* (Methods of landscape research and assessment of stocks of benthic invertebrates and algae of the marine coastal zone), Moscow: VNIRO, 2005, Issue 3, 135 p. (in Russian), DOI: 10.13140/RG.2.1.3592.1764.
3. Dulov V. A., Yurovskaya M. V., Spectral Contrasts of Short Wind Waves in Artificial Slicks from the Sea Surface Photographs, *Physical Oceanography*, 2021, Vol. 28(3), pp. 348–360, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-348-360.
4. Krylenko M. V., Krylenko V. V., Features of performing high-precision survey of the abrasion coast relief by UAV, *Byulleten' nauki i praktiki*, 2020, Vol. 6, No. 2 (in Russian), DOI: 10.33619/2414-2948/51/01.
5. Kubryakov A. A., Lishaev P. N., Chepyzhenko A. I., Aleskerova A. A., Kubryakova E. A., Medvedeva A. A., Stanichny S. V., Impact of submesoscale eddies on the transport of suspended matter in the coastal zone of Crimea based on drone, satellite, and in situ measurement data, *Oceanology*, 2021, Vol. 61, No. 2, pp. 159–172, DOI: 10.1134/S0001437021020107.
6. Mamedov I. E., Issues of applying unmanned aerial vehicles for detecting oil slicks in coastal sea waters, *Problemy regional'noi ekologii*, 2019, Vol. 4, pp. 88–91 (in Russian), DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14088.
7. Pankeeva T. V., Mironova N. V., Novikov A. B., Mapping of bottom vegetation of Kruglaya Bay (The Black Sea, Sevastopol), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2019, Vol. 3, pp. 61–71 (in Russian), DOI: 10.22449/2413-5577-2019-3-61-71.
8. Pankeeva T. V., Mironova N. V., Novikov B. A., Experience in mapping bottom vegetation (for example of Laspi Bay, Black Sea), *Geopolitika i ekogeodinamika regionov*, 2020, Vol. 6(4), pp. 154–169 (in Russian), DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-154-169.

9. Repkina T. Yu., Gurinov A. L., Kublitskiy Yu. A., Leontiev P. A., Lugovoi N. N., Dudorkin E. S., Peretrakhina A. O., New data on the relief and postglacial deposits of the shores of the gorlo strait and Onega Peninsula (White Sea), *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii*, 2020, No. 7, pp. 168–163 (in Russian), DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10724.
10. Yurovskaya M., Kudryavtsev V., Shirokov A. S., Nadolya I. Yu., Field measurements of the sea surface wave spectrum from photos of sunglitter taken from drone, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, pp. 245–257 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-245-257.
11. Angnuureng D. B., Jayson-Quashigah P. N., Almar R., Stieglitz T. C., Anthony E. J., Aheto D. W., Appeaning Addo K., Application of Shore-Based Video and Unmanned Aerial Vehicles (Drones): Complementary Tools for Beach Studies, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 394, DOI: 10.3390/rs12030394.
12. Bergsma E. W., Almar R., Rolland A., Binet R., Brodie K. L., Bak A. S., Coastal morphology from space: A showcase of monitoring the topography-bathymetry continuum, *Remote Sensing of Environmen*, 2021, Vol. 261, Art. No. 112469, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112469.
13. Fallati L., Saponari L., Savini A., Marchese F., Corselli C., Galli P., Multi-Temporal UAV Data and Object-Based Image Analysis (OBIA) for Estimation of Substrate Changes in a Post-Bleaching Scenario on a Maldivian Reef, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 2093, DOI: 10.3390/rs12132093.
14. Jupp D. L., Background and extension to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters, *Proc. Remote Sensing of the Coastal Zone Intern. Symp., Gold Coast, Australia*, 1988, pp. IV2.1–IV2.19, <http://hdl.handle.net/102.100.100/265466?index=1>.
15. Konstantinos T., Apostolos P., Shungudzemwoyo P. G., Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018), *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, Vol. 79, pp. 175–183, DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.011.
16. Korshenko E., Zhurbas V., Osadchiev A., Belyakova P., Fate of river-borne floating litter during the flooding event in the northeastern part of the Black Sea in October 2018, *Marine Pollution Bull.*, 2020, Vol. 160, Art. No. 11678, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111678.
17. Lyzenga D. R., Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features, *Applied Optics*, 1978, Vol. 17, pp. 379–383, <http://dx.doi.org/10.1364/AO.17.000379>.
18. Lyzenga D. R., Remote sensing of bottom reflectance and Water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data, *Remote Sensing*, 1981, Vol. 2(1), pp. 71–82.
19. Lyzenga D. R., Malinas N. P., Tanis F. J., Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, pp. 2251–2259, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909.
20. Philpot W. D., Bathymetric mapping with passive multispectral imagery, *Applied Optics*, 1989, Vol. 28, pp. 1569–1578.
21. Rossi L., Mammi I., Pelliccia F., UAV-Derived Multispectral Bathymetry, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 3897, DOI: 10.3390/rs12233897.
22. Stumpf R. P., Holderied K., Sinclair M., Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnology and Oceanography*, 2003, Vol. 48, pp. 547–556, DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.
23. Wei Y., Jiang S., Tian L., Wei L., Jin J., Ibánhez J. S. P., Chang Y., Wei X., Wu Y., Benthic microbial biogeography along the continental shelf shaped by substrates from the Changjiang River plume, *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, Vol. 41, pp. 118–131, DOI: 10.1007/s13131-021-1861-8.
24. Xiaopeng J., Meng G., Zhiqiang G., A novel index to detect green-tide using UAV-based RGB imagery, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, Vol. 245, Art. No. 106943, DOI: 10.1016/j.ecss.2020.106943.