Определение батиметрии в прибрежной зоне Чёрного моря по спектральному коэффициенту яркости моря

С.В. Федоров, С.В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mails: s.fedorov@mhi-ras.ru, sstanichny@mail.ru

Работа посвящена демонстрации возможности восстановления батиметрии в прибрежной зоне Чёрного моря по данным измерений спутниковых сканеров в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. Использована методика восстановления спутниковой батиметрии по спектральному коэффициенту яркости моря. В условиях оптически мелкой воды солнечное излучение достигает дна и отражается назад к поверхности. Таким образом, спектральный коэффициент яркости содержит информацию о глубине и типе донного субстрата, что позволяет решить обратную задачу по восстановлению глубины. Определение спектрального коэффициента яркости осуществлялось по снимкам Sentinel-2/MSI. Атмосферная коррекция выполнялась в программном обеспечении ACOLITE. Методика восстановления глубины заключалась в построении индексной характеристики (псевдоглубины), равной отношению логарифмов коэффициента яркости на двух спектральных каналах с различной степенью поглощения солнечного излучения. Пересчёт полученной характеристики в глубину осуществлялся на основе линейной зависимости, коэффициенты которой калибровались по навигационным картам. Данный метод позволяет восстанавливать глубину с пространственным разрешением, равным размеру пикселя спутникового снимка. Это позволило обнаружить неоднородности рельефа дна малых размеров в прибрежной зоне Бакальской косы. Область применимости метода зависит от прозрачности вод и не превышает 20 м по глубине.

Ключевые слова: спутниковая батиметрия, Sentinel-2, Чёрное море, бухта Казачья, Бакальская коса

Одобрена к печати: 13.12.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-39-49

Введение

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли из космоса широко используются для изучения различных гидрофизических процессов, происходящих в океане, включая определение глубины моря (Пиваев и др., 2020; Юровская и др., 2019; Воссіа et al., 2015; Brusch et al., 2011; Lee et al., 1999; Lyzenga, 1981; Philpot, 1989; Stumpf et al., 2003). Пространственное разрешение современных спутниковых изображений в видимом диапазоне составляет 10-50 м (снимки высокого разрешения) и 1-5 м (снимки сверхвысокого разрешения), что позволяет проводить мониторинг изменения глубины в областях, наиболее подверженных эрозии и переносу донных отложений, а также различать изменения рельефа дна, сопоставимые с размером пикселя снимка. Согласно Международной гидрографической организации (*англ*. International Hydrographic Organization — IHO), спутниковая батиметрия (определённая по спутниковым данным) может рассматриваться как важный источник для оценки актуальности имеющихся навигационных карт, рационального планирования мест проведения судовых измерений глубины, а в местах, где такие измерения не проводятся, становится единственным доступным инструментом мониторинга изменчивости глубины (Pe'eri et al., 2014; The International..., 2017).

В условиях оптически мелкой воды солнечное излучение достигает дна и отражается назад к поверхности. Суммарная яркость восходящего из воды излучения в этом случае является функцией оптически активных компонент морской воды и отражающих свойств поверхности дна (его альбедо). Основываясь на том, что ослабление света в воде изменяется экспоненциально с глубиной и описывается законом Бугера, можно решить обратную задачу — оценить глубину по яркости восходящего излучения. Известны полуаналитические (Dekker et al., 2011; Lee et al., 1999) и эмпирические (Lyzenga, 1981; Lyzenga et al., 2006; Philpot, 1989; Stumpf et al., 2003) методы определения батиметрии по оптическим изображениям сканеров цветности океана.

Наибольшее распространение из-за своей простоты получили эмпирические методы (Lyzenga et al., 2006; Stumpf et al., 2003), устанавливающие корреляционную зависимость яркости восходящего излучения на разных длинах волн от глубины моря. Преимущество этих методов состоит в том, что батиметрию можно определять с пространственным разрешением, равным разрешению спутникового снимка. Погрешность определения глубины составляет не более 20 % в диапазоне глубин 0–6 м. Недостатком является чувствительность к прозрачности вод и глубине проникновения солнечного света в воду. Поэтому данные методы ограничены акваториями с относительно чистыми (прозрачными) водами и глубинами до 20 м. Кроме того, для калибровки эмпирических соотношений требуются дополнительные натурные данные, а полученные калибровочные коэффициенты непереносимы на другие регионы и моря.

В настоящей статье приводится реализация метода восстановления спутниковой батиметрии по спектральному коэффициенту яркости моря в прибрежной зоне Чёрного моря по данным космических снимков Sentinel-2/MSI (*англ*. MultiSpectral Instrument).

Материалы и методы

Область исследований

В качестве области исследования выбраны бухты Севастополя (в частности, бухты Двойная и Севастопольская) и Каркинитский зал. Одна из Севастопольских бухт — Бухта Двойная, состоящая из бухт Казачьей и Солёной. Здесь расположены воинские части Черноморского флота РФ, жилой микрорайон Севастополя, дикие пляжи с чистой водой.

Каркинитский зал. — часть Чёрного моря между северо-западным берегом Крымского п-ова и материком. Каркинитский зал. мелководен: в западной его части глубины достигают 36 м, а в восточной — 10 м. Здесь находятся два уникальных охраняемых природных объекта: Лебяжьи острова и ландшафтно-рекреационный парк «Бакальская коса». Последний расположен в мелководной Бакальской бух. (глубина до 8 м) и в настоящее время находится под угрозой исчезновения из-за естественных гидрологических процессов (сильных зимних штормов) и антропогенной деятельности (добычи песка), в связи с чем оказывается объектом пристального внимания общественности и учёных (Дивинский, Косьян, 2021).

Спутниковые снимки

Для оценки батиметрии использовались снимки спектрорадиометра MSI, установленного на спутниках Sentinel-2A/B (Drusch et al., 2012). Для определения спутниковой батиметрии по методике, описанной в п. «Методика определения глубины моря...», в формуле (3) использовались коэффициенты яркости моря, вычисленные в синем (490 нм), зелёном (560 нм) и красном (665 нм) каналах сканера MSI/Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Атмосферная коррекция снимков Sentinel-2 осуществлялась с помощью программного обеспечения ACOLITE (Vanhellemont, 2019).

Методика определения глубины моря по коэффициенту яркости моря

В оптически мелких водах суммарная спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) L_{t} , регистрируемая оптическим сенсором спутника, складывается из четырёх составляющих: СПЭЯ атмосферы L_{p} , СПЭЯ морской поверхности L_{s} , подповерхностной объёмной СПЭЯ L_{v} и СПЭЯ дна L_{b} (Su et al., 2008):

$$L_{t} = L_{b} + L_{v} + L_{s} + L_{p}.$$
 (1)

Параметр СПЭЯ атмосферы L_p — это поток излучения, попавшего на сенсор вследствие множественного рассеяния на частицах аэрозоля и молекулах газов, составляющих атмосферу. Под СПЭЯ морской поверхности L_s понимается излучение, связанное со всеми поверхностными эффектами: солнечным бликом, зеркальным отражением и т.п. Подповерхностная объёмная СПЭЯ L_v — это часть потока восходящего излучения, непосредственно связанная с содержанием в воде оптически активных компонентов (минеральной взвеси, пигментов фитопланктона, жёлтого вещества). СПЭЯ дна L_b — часть излучения, прошедшего всю водную толщу, отражённого от дна и попавшего на сенсор.

СПЭЯ дна L_b несёт в себе информацию о глубине моря и типе донного субстрата (песок, глина, кораллы, водоросли и т.д.). Для её извлечения из суммарного сигнала необходимо вычесть остальные три составляющие, определяемые в ходе атмосферной коррекции спутникового снимка. С учётом экспоненциального характера ослабления света с глубиной получается простая гидрооптическая модель для определения глубины в оптически мелких водах:

$$L(z) = L_b \cdot \exp(-Kz) + L_v, \tag{2}$$

где *z* — глубина; *K* — коэффициент ослабления света в восходящем и нисходящем направлениях.

В модели (2) имеются четыре неизвестных: коэффициент ослабления K, глубина моря z, СПЭЯ дна L_b , являющаяся функцией отражающей способности дна (его альбедо), и объёмная СПЭЯ L_v . Для решения обратной к модели (2) задачи вводят ряд упрощений, которые, строго говоря, редко выполняются. Если считать, что первичные гидрооптические характеристики и коэффициент диффузного ослабления света постоянны в пределах фрагмента спутникового снимка, то изменение СПЭЯ в формуле (2) будет происходить в основном за счёт отражения света от дна и пропорционально изменению глубины.

Широкое применение нашли линейный логарифмический (Lyzenga, 1981; Lyzenda et al., 2006) и нелинейный (Stumpf et al., 2003) алгоритмы. Нелинейный алгоритм обладает рядом преимуществ перед линейным: более прост в использовании, требует меньшего количества калибровочных измерений, менее чувствителен к вариациям альбедо дна, требует подбора только двух эмпирических коэффициентов вместо пяти, как в линейном алгоритме. По этим причинам в настоящей работе использовался нелинейный алгоритм (Stumpf et al., 2003).

Алгоритм (Stumpf et al., 2003) использует отношение логарифмов коэффициентов яркости моря в двух спектральных каналах, имеющих разные показатели поглощения. Так как свет ослабевает экспоненциально с глубиной, такой алгоритм позволяет получить линейную зависимость для глубины моря:

$$z = m_1 \cdot pSDB - m_0, \quad pSDB = \frac{\ln(n\pi R_{rs}(\lambda_i))}{\ln(n\pi R_{rs}(\lambda_j))},$$
(3)

где m_1, m_0 — коэффициенты линейной регрессии между глубиной и отношением натуральных логарифмов; pSDB — относительная глубина (или псевдоглубина); n — коэффициент, постоянный для всего снимка, подбирается таким образом, чтобы значения логарифмов было положительным при любых условиях (принимался равным 1000); R_{rs} — коэффициент яркости моря.

Так как синий цвет способен проникать на большие глубины, в числителе отношения логарифмов используется коэффициент яркости моря в каналах синей области спектра электромагнитного излучения. В знаменатель подставляют коэффициенты яркости в каналах зелёной или красной областях спектра, где поглощение света происходит быстрее. Соответствующие псевдоглубины далее будут обозначаться *pSDB*green и *pSDB*red.

Результаты и обсуждения

На *рис.* 1 (см. с. 42) показано распределение псевдоглубины *pSDB* green в бухтах Двойная и Камышовая по измерениям на каналах с центральными длинами волн 490 и 560 нм

26.07.2019. Здесь же нанесены изобаты, оцифрованные по гидрографическим картам масштаба 1:10 000 (ГУ «Госгидрография», Киев). Для снимков высокого разрешения Sentinel-2/MSI характерно проявление гребней поверхностного волнения в рассматриваемом районе. С одной стороны, эта особенность может использоваться для изучения параметров обрушения волн, а с другой — создаёт дополнительные трудности при оценке гидрооптических характеристик, так как гребни формируют дополнительный отражённый сигнал, регистрируемый сканером спутника. Волнение, хорошо заметное на шельфе Чёрного моря, проникает в бух. Камышовую, формируя в центральной глубоководной части бухты флуктуации коэффициента яркости, связанные с обрушением волновых гребней. Это искажает цветность моря и, следовательно, затрудняет точное определение глубины. В глубине бухты влияние поверхностных волн становится незаметным, и псевдоглубины соответствуют изменению рельефа дна. Практически на всех снимках Sentinel-2/MSI в районе бухт Казачья и Солёная цветность воды обусловлена отражением света от дна, что позволяет производить оценку глубины.



Рис. 1. Распределение псевдоглубины по снимку Sentinel-2A от 26.07.2019

Для оценки батиметрии в бух. Казачья по снимкам Sentinel-2/MSI за 26 и 31 июля 2019 г. и по гидрографическим картам масштаба 1:10 000 были оцифрованы глубины в 50 точках, которые использовались для определения коэффициентов линейной регрессии m_1 и m_0 в формуле (3). Оценки спутниковой батиметрии показаны на *рис. 2* и *3*. Оцифрованные по гидрографическим картам изобаты изображены цветными сплошными линиями. Чёрная линия соответствует изобате 0 м, цифровое значение остальных изобат приведено в верхнем левом углу рисунков. Спутниковая батиметрия показана цветной заливкой, цифровые значения которой приведены на шкале в верхнем правом углу рисунков.

Масштаб гидрографических карт не позволил с достаточной точностью оцифровать (определить координаты) изобат и точек, используемых для калибровки алгоритма. В итоге при наложении на спутниковые снимки с разрешением 10 м наблюдалось существенное смещение оцифрованных точек относительно береговой линии. Поэтому, располагая такими достаточно грубыми калибровочными данными, мы не надеялись получить восстановленные глубины с высокой точностью.

Как видно из *рис. 2* и *3* (см. с. 43), восстановленная батиметрия в целом повторяет основные особенности топографии дна по данным гидрографических карт. Визуально оценённые ошибки определения глубины составляют примерно 0,5 м до изобаты 12 м и 1-1,5 м для глубин выше 12 м. Эти ошибки связаны как с точностью вычислительного алгоритма, так и с недостаточной точностью снятия координат изобат по гидрографическим картам. Ухудшение точности на глубинах выше изобаты 12 м объясняется главным образом искажениями цветности моря из-за обрушающихся волн.



Рис. 2. Спутниковая батиметрия, восстановленная по снимку Sentinel-2A от 26.07.2019



Рис. 3. Спутниковая батиметрия, восстановленная по снимку Sentinel-2B от 31.07.2019

Пример восстановления батиметрии в районе Бакальской косы показан на *puc. 4*. Оцифрованные по гидрографическим картам изобаты изображены сплошными чёрными линиями, спутниковая батиметрия показана цветной заливкой, цифровые значения которой приведены на шкале в нижней части рисунка.

Несмотря на то, что район имеет неоднородный рельеф дна, характеризующийся песчаными отмелями и банками, а прозрачность воды часто уменьшается из-за взмученного песка, удалось восстановить основные особенности батиметрии. Буквой А на *рис. 4* (см. с. 44) обозначена Чуриумская банка с характерными глубинами 2–4 м. Спутниковая батиметрия показывает, что две песчаные отмели на Бакальской банке с характерными глубинами 4 м (обозначены буквой Б) с момента составления навигационных карт сместились западнее, в сторону глубоководной части залива, а область, обозначенная буквой В, стала глубже. В области Г спутниковые глубины составляют 5–6 м, хотя она расположена между изобатами 8 и 10 м. Это связано с тем, что оптические свойства воды здесь и вдоль береговой линии определяются минеральной взвесью. Находящаяся в воде взвесь значительно увеличивает рассеянный свет, повышая спектральный коэффициент яркости моря, что воспринимается алгоритмом как уменьшение глубины моря.



Рис. 4. Спутниковая батиметрия в северо-восточной части Каркинитского зал.



Рис. 5. Батиметрия в районе прибрежной зоны Бакальской косы: *а* — спутниковая батиметрия; *б* — батиметрия по сонарным измерениям (фрагмент рис. 2 из работы (Руднев, 2018)); *в* — псевдоглубина *pSDB*red; *г* — псевдоглубина *pSDB*green

Особый интерес представляет рельеф прибрежной зоны в районе Бакальской косы, который сильно изменился за последнее десятилетие (и продолжает меняться) вследствие добычи песка на косе и воздействия сильных штормов. Сведения о современном состоянии рельефа дна в этом районе получены в работе (Руднев, 2018) по данным эхолотной съёмки с высоким разрешением. На *рис. 5a* (см. с. 44) показана спутниковая батиметрия в прибрежной зоне северной части Бакальской косы и острова, а на *рис. 56* — батиметрия, построенная по данным измерений (Руднев, 2018, рис. 2).

На обеих батиметрических картах есть как общие черты, так и значительные расхождения. С восточной стороны косы (со стороны Бакальской бух.) имеет место резкий свал глубин. По спутниковым оценкам, глубины здесь составляют от 5,7 до 7,5 м, что соответствует значениям, полученным по данным сонарных измерений. С западной стороны косы (со стороны Каркинитского зал.), где глубины изменяются плавно, имеются существенные расхождения. У западной части острова спутниковые глубины составляют 5,7-6,4 м, хотя по измерениям глубины здесь не превышают двух метров. У северной оконечности косы спутниковые глубины изменяются в диапазоне 3,6-4 м, а по данным измерений составляют 2 м. В проливе между оконечностью косы и островом глубины составили 3,5-4,5 и 3 м соответственно по данным спутниковых и натурных измерений. В районе отмели, от которой начинается Бакальская банка, глубины изменяются от 3 до 5 м, оценки спутниковых глубин составили 4,5-5,2 м.

Такое большое различие может быть объяснено следующим. Во-первых, количеством и качеством калибровочных изменений. Калибровка зависимости (3) для этой части Чёрного моря производилась по девяти точкам в интервале глубин 2,4–15 м. В целом по всей области это позволило получить сопоставимые результаты, но в зоне малых глубин требовалось введение дополнительных калибровочных точек, получить которые по картам масштаба 1:10 000 и привязать к спутниковому снимку с разрешением 10 м было затруднительно. Во-вторых, различным поглощением света на разных спектральных каналах и, как следствие, различной чувствительностью к изменению глубины. В работе (Caballero, Stumpf, 2019) отмечается, что псевдоглубины *pSDB*green, рассчитанные по комбинации синего и зелёного каналов, показывают плохую точность для глубин менее 3 м. Псевдоглубины pSDBred, рассчитанные по синему и красному каналам, значительно чувствительнее в диапазоне глубин менее 5-6 м. На *рис. 5в, г* показано распределение псевдоглубин *pSDB* red и *pSDB* green соответственно. Видно, что *pSDB*red, изменяющаяся в диапазоне 0,926–1,246, практически полностью воспроизводит особенности распределения батиметрии между северной частью косы и островом (см. *рис. 56*); *pSDB*green, величины которой варьируются от 0,846–0,864, практически не различает глубины менее 5 м.

Особо стоит отметить возможность спутниковой батиметрии обнаруживать мелкомасштабные неоднородности рельефа дна. В результате промеров глубин в работе (Руднев, 2018) в западной части акватории Бакальской косы обнаружены два подводных вала, идущих вдоль береговой линии. Их пространственное положение показано коричневыми пунктирной и штрихпунктирной линиями на *рис. 56*. В результате пространственного осреднения измерений при построении батиметрической карты они сгладились. Но на карте спутниковой батиметрии чётко просматривается неоднородность, совпадающая с положением гребня глубоководного вала (показана белой стрелкой). Оценки глубины здесь составили от 3,1 до 3,9 м. По данным измерений глубина залегания вершины вала варьировалась от 0,6 до 2,6 м. Ближе к берегу имеется менее выраженная неоднородность, которая совпадает с положением прибрежного вала (показана чёрной стрелкой). Между положениями гребней валов на спутниковой батиметрии заметна область с увеличением глубины, вероятно соответствующая впадине между двумя валами.

На распределении псевдоглубины *pSDB*red (см. *puc. 56*) эти неоднородности выражены более отчётливо: неоднородность, совпадающая с положением глубоководного вала, показана белыми стрелками, а с положением прибрежного вала — чёрными точками. Группа неоднородностей, обозначенная чёрной стрелкой, вероятно, может соответствовать похожим песчаным валам или дюнам.

Заключение и выводы

В статье продемонстрированы возможности использования мультиспектральных спутниковых снимков для восстановления батиметрии в прибрежной зоне Чёрного моря по спектральному коэффициенту яркости моря. Несмотря на то что метод имеет ограничения по условиям применимости, он, несомненно, представляет собой хороший инструмент для оценки глубины моря, анализа изменчивости рельефа дна, особенно в отсутствии регулярных судовых наблюдений, обнаружения областей с быстроменяющимся рельефом дна, требующих дальнейшего более глубокого исследования.

Спутниковая батиметрия, восстановленная по коэффициенту яркости моря, обладает высоким пространственным разрешением, равным размеру пикселя сканера цветности, что позволяет обнаруживать неоднородности дна малых размеров. Эта способность продемонстрирована на примере обнаружения подводных валов в прибрежной зоне Бакальской косы. В отличие от метода, описанного в работе (Федоров, Станичный, 2021), данный подход даёт возможность получать оценки глубины внутри бухт. Область применения по глубине не более 20 м. На качество определения глубины существенно влияют оптически активные компоненты, особенно взвесь, наличие которой приводит к переоценке глубины. Существует два пути решения этой проблемы: подобрать спутниковый снимок с благоприятными условиями — отсутствием волнения, цветения и взвеси; использовать временную серию мультиспектральных снимков (Caballero, Stumpf, 2020). Последний подход позволяет разделить области, где яркость зависит от глубины (слабо меняется со временем) и где она зависит от свойств воды (быстро меняется со временем). В результате такого разделения может быть составлен композитный снимок, по которому будет восстановлена батиметрия.

Вследствие спектрального характера поглощения света водой спектральные каналы спутника имеют различную чувствительность к изменению глубины воды. Для восстановления глубины менее 5–6 м наиболее подходит комбинация синего и красного каналов, а для больших глубин – синего и зелёного. Соответственно, такой подход требует отдельной калибровки для каждой комбинации с последующим совмещением результатов на одной батиметрической карте (Caballero, Stumpf, 2020).

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-05-00752а. Методика определения батиметрии по коэффициенту яркости моря разрабатывалась в рамках темы госзадания № 0555-2021-0003.

Литература

- 1. Дивинский Б. В., Косьян Р.Д. Гидродинамические условия деградации Бакальской косы (Западный Крым) // Морской гидрофиз. журн. 2021. Т. 37. № 3. С. 288–304. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-288-304.
- 2. *Пиваев П. Д., Кудрявцев В. Н., Балашова Е. А., Шапрон Б.* Особенности проявления донной топографии на спутниковых РСА-изображениях // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 3. С. 313–328. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-3-313-328.
- 3. *Руднев В. И.* Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 15–21. DOI: 10.22449/2413-5577-2018-4-15-21.
- 4. *Федоров С. В., Станичный С. В.* Определение спутниковой батиметрии в прибрежной зоне Чёрного моря по полю поверхностных волн // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 85–96. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-85-96.
- 5. Юровская М. В., Кудрявцев В. Н., Станичный С. В. Восстановление кинематических характеристик поверхностного волнения и батиметрии по многоканальным оптическим снимкам комплекса «Геотон-Л1» на спутнике «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 218–226. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-218-226.
- 6. *Boccia V., Renga A., Moccia A., Zoffoli S.* Tracking of Coastal Swell Fields in SAR Images for Sea Depth Retrieval: Application to ALOS L-Band Data // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. No. 7. P. 3532–3540. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2418273.

- Brusch S., Held P., Lehner S., Rosenthal W., Pleskachevsky A. Underwater Bottom Topography in Coastal Areas from TerraSAR-X Data // Intern. J. Remote Sensing. 2011. V. 32. No. 16. P. 4527–4543. DOI: 10.1080/01431161.2010.489063.
- 8. *Caballero I.*, *Stumpf R. P.* Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2019. V. 226. 106277. DOI: 10.1016/j. ecss.2019.106277.
- 9. *Caballero I., Stumpf R. P.* Towards Routine Mapping of Shallow Bathymetry in Environments with Variable Turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B Satellites Mission // Remote Sensing. 2020. V. 12(451). DOI: 10.3390/rs12030451.
- Dekker A. G., Phinn S. R., Anstee J., Bissett P., Brando V. E., Casey B., Fearns P., Hedley J., Klonowski W., Lee Z. P., Lynch M., Lyons M., Mobley C. D., Roelfsema C. Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments // Limnology. Oceanography. Methods. 2011. No. 9. P. 396–425. DOI: 10:4319/10m.2011.9.396.
- Drusch M., Bello U. D., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. L. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 120. P. 25–36. DOI: 10.1016/J.RSE.2011.11.026.
- Lee Z. P., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model // Applied Optics. 1999. V. 37(27). P. 6329–6338. DOI: 10.1364/ ao.37.006329.
- 13. Lyzenga D. R. Remote Sensing of Bottom Reflectance and Water Attenuation Parameters in Shallow Water Using Aircraft and Landsat Data // Intern. J. Remote Sensing. 1981. V. 2. No. 1. P. 71–82. DOI: 10.1080/01431168108948342.
- 14. *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. No. 8. P. 2251–2259. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909.
- 15. *Pe'eri S., Azuike C., Parrish C.* Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness // Marine Geodesy. 2014. V. 37. P. 293–314. DOI: 10.1080/01490419.2014.902880.
- 16. *Philpot W.* Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery // Applied Optics. 1989. V. 28. P. 1569–1578. DOI: 10.1364/AO.28.001569.
- 17. *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.
- Su H., Liu H., Heyman W.D. Automated Derivation of Bathymetric Information from Multi-Spectral Satellite Imagery Using a Non-Linear Inversion Model // Marine Geodesy. 2008. V. 31. P. 281–298. DOI: 10.1080/01490410802466652.
- 19. The International Hydrographic Review / International Hydrographic Organization. Monaco, 2017. 53 p. URL: https://www.iho.int/mtg_docs/IHReview/2017/IHR_November2017.pdf.
- Vanhellemont Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 225. P. 175–192. DOI: 10.1016/J.RSE.2019.03.010.

Satellite-derived bathymetry in the coastal zone of the Black Sea from remote sensing reflectance

S.V. Fedorov, S.V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mails: s.fedorov@mhi-ras.ru, sstanichny@mail.ru

The work is devoted to demonstrating the possibility of retrieving bathymetry in the coastal zone of the Black Sea from satellite measurements in the optical range of the electromagnetic spectrum. The method for the retrieval of satellite-derived bathymetry based on remote sensing reflectance is used. In optically shallow water, solar radiation reaches the bottom and is reflected back to the surface.

Thus, remote sensing reflectance contains information about the depth and bottom substrate type, which makes it possible to solve the inverse problem of depth retrieval. Remote sensing reflectance was determined from Sentinel-2 MSI images. Atmospheric correction was performed in the ACOLITE software. The method of depth assessment consisted in calculating an index characteristic (pseudo-depth) equal to the ratio of the logarithms of remote sensing reflectance in two spectral bands with different absorption of solar radiation. Conversion of the obtained index into depths was carried out on the basis of a linear relationship with coefficients calibrated according to navigation maps. This method allows reconstructing bathymetry with a spatial resolution equal to pixel size of a satellite image. It helped to detect small inhomogeneities of the bottom relief in the coastal zone of Bakalskaya Spit. The applicability of this method depends on water transparency and does not exceed a depth of 20 m.

Keywords: satellite-derived bathymetry, Sentinel-2, Black Sea, Kazachya Bay, Bakalskaya Spit

Accepted: 13.12.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-39-49

References

- 1. Divinsky B. V., Kosyan R. D., Hydrodynamic Conditions of the Bakalskaya Spit Degradation (Western Crimea) over the Past 30 Years, *Physical Oceanography*, 2021, Vol. 28(3), pp. 266–281, DOI: 10.22449/1573-160X-2021-3-266–281.
- Balashova E.A.. Chapron B., SAR 2. Pivaev P. D., Kudryavtsev V.N., Imaging Features of Physical Oceanography, 2020, Vol. 27(3), pp. 290–304, Shallow Water Bathymetry. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-3-290-304.
- 3. Rudnev V.I., Peculiarities of the bottom relief of the Bakalskaya Spit foreshore, *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2018, No. 4, pp. 15–21 (in Russian), DOI: 10.22449/2413-5577-2018-4-15-21.
- 4. Fedorov S. V., Stanichny S. V., Satellite-derived bathymetry in the coastal zone of the Black Sea from the surface wave field, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 85–96 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-85-96.
- Yurovskaya M. V., Kudryavtsev V. N., Stanichnyi S. V., Reconstruction of surface wave kinematic characteristics and bathymetry from Geoton-L1 multichannal optical images from Resurs-P satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 218–226 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-218-226.
- 6. Boccia V., Renga A., Moccia A., Zoffoli S., Tracking of Coastal Swell Fields in SAR Images for Sea Depth Retrieval: Application to ALOS L-Band Data, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, No. 7, pp. 3532–3540, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2418273.
- Brusch S., Held P., Lehner S., Rosenthal W., Pleskachevsky A., Underwater Bottom Topography in Coastal Areas from TerraSAR-X Data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2011, Vol. 32, No. 16, pp. 4527–4543, DOI: 10.1080/01431161.2010.489063.
- 8. Caballero I., Stumpf R. P., Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters, *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2019, Vol. 226, 106277, DOI: 10.1016/j. ecss.2019.106277.
- 9. Caballero I., Stumpf R. P., Towards Routine Mapping of Shallow Bathymetry in Environments with Variable Turbidity: Contribution of Sentinel-2A/B Satellites Mission, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(451), DOI: 10.3390/rs12030451.
- Dekker A. G., Phinn S. R., Anstee J., Bissett P., Brando V. E., Casey B., Fearns P., Hedley J., Klonowski W., Lee Z. P., Lynch M., Lyons M., Mobley C. D., Roelfsema C., Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments, *Limnology. Oceanography. Methods*, 2011, No. 9, pp. 396–425, DOI: 10:4319/lom.2011.9.396.
- Drusch M., Bello U. D., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. L., Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 120, pp. 25–36, DOI: 10.1016/J.RSE.2011.11.026.
- Lee Z. P., Carder K. L., Mobley C. D., Steward R. G., Patch J. S., Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model, *Applied Optics*, 1999, Vol. 37(27), pp. 6329–6338, DOI: 10.1016/J. RSE.2011.11.026.
- 13. Lyzenga D. R., Remote Sensing of Bottom Reflectance and Water Attenuation Parameters in Shallow Water Using Aircraft and Landsat Data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1981, Vol. 2, No. 1, pp. 71–82, DOI: 10.1080/01431168108948342.

- 14. 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, No. 8, pp. 2251–2259, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909.
- 15. Pe'eri S., Azuike C., Parrish C., Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness, *Marine Geodesy*, 2014, Vol. 37, pp. 293–314, DOI: 10.1080/01490419.2014.902880.
- 16. Philpot W., Bathymetric Mapping with Passive Multispectral Imagery, *Applied Optics*, 1989, Vol. 28, pp. 1569–1578, DOI: 10.1364/AO.28.001569.
- 17. 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.
- Su H., Liu H., Heyman W.D., Automated Derivation of Bathymetric Information from Multi-Spectral Satellite Imagery Using a Non-Linear Inversion Model, *Marine Geodesy*, 2008, Vol. 31, pp. 281–298, DOI: 10.1080/01490410802466652.
- 19. *The International Hydrographic Review*, International Hydrographic Organization, Monaco, 2017, 53 p., available at: https://www.iho.int/mtg_docs/IHReview/2017/IHR_November2017.pdf.
- 20. Vanhellemont Q., Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 225, pp. 175–192, DOI: 10.1016/J.RSE.2019.03.010.