

В.В.Крыленко¹, М.В.Крыленко¹, А.А.Алейников²

¹Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН, г.Москва

²ИТЦ «СКАНЭКС», г.Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА БАКАЛЬСКОЙ БАНКИ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ *SENTINEL-2*

Приведены результаты исследований подводного рельефа района Бакальской банки при помощи детальных цифровых моделей рельефа, которые построены на основе обработки космических снимков *Sentinel-2*. Выявлены разнообразные гидрогенные мезоформы подводного рельефа, отмечены участки антропогенного изъятия грунта. Особо следует отметить наличие не имеющей аналогов на подобных аккумулятивных формах региона системы устойчивых субпараллельных ложбин, перпендикулярных продольной оси Бакальской банки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *подводный рельеф, эрозионно-аккумулятивные формы, Sentinel-2, Бакальская банка, Каркинитский залив, Черное море*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-2-30-39

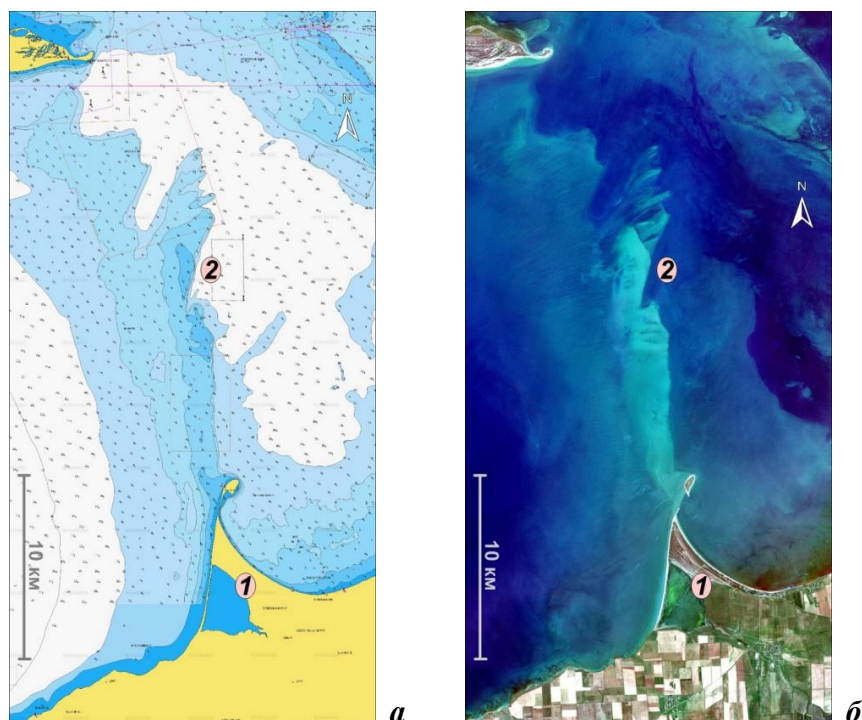
Введение. Характерной чертой некоторых крупных аккумулятивных форм Азово-Черноморского региона является наличие протяженных подводных отмелей. Исследование строения и динамики рельефа этих аккумулятивных форм позволяет выявить механизмы их образования и эволюции, оценить состав, значение и изменчивость действующих факторов. Главной задачей изложенных в настоящей статье исследований было получение актуальной информации о строении подводных частей крупных морских аккумулятивных форм, а также о наличии и величинах их динамики.

Бакальская коса расположена в Черном море (рис.1), это крупнейшая аккумулятивная форма северо-западного побережья Крымского п-ова. Подводным продолжением Бакальской косы является Бакальская банка. Основу бюджета наносов аккумулятивного тела составляют продукты абразии берегов и поступающая с подводного склона ракуша. Его современное развитие определяется изменениями количества, направления и интенсивности штормов, снижением объема поступающих наносов, антропогенным изъятием наносов. Совместным итогом этих процессов стало отделение дистальной части Бакальской косы с образованием острова в 2010 г. (рис.1) [1].

Географическое положение объекта определяет специфику гидродинамического режима прилегающей акватории: для западной и восточной сторон косы волновой режим и режим течений существенно различны [2]. В волновом режиме преобладают волнения западного и юго-западного направлений, по мощности и продолжительности действия они значительно превосходят волнение восточного и северо-восточного направлений. При этом повторяемость и скорости течений, направленных со стороны открытого моря в Каркинитский залив и обратно, сравнимы. Максимальные значения

© В.В.Крыленко, М.В.Крыленко, А.А.Алейников, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.2. С.30-39.



Р и с . 1. Представление подводного рельефа района Бакальской косы (1) с указанием местоположения Бакальской банки (2): навигационная карта (а), снимок *Sentinel-2* за 22 сентября 2018 г. (б).

скоростей течений могут достигать 0,7 м/с [2]. Таким образом, в развитии аккумулятивной формы чередуются периоды с преобладающим влиянием либо волн, либо течений. Соответственно, меняется направление и характер движения наносов. В ходе своего развития под действием сильного западного волнения аккумулятивное тело смещалось на восток, что отразилось в его поперечном профиле: западный склон пологий, восточный – крутой. Однако, под действием течений, направленных с северо-востока, вдоль оси аккумулятивного тела образуются специфические формы рельефа. Эти формы и их динамика представляют научный интерес как интегральный результат действия гидро-литодинамических процессов. Имеющиеся навигационные карты не вполне отражают детали форм подводного рельефа, различимые на современных космических снимках (рис.1).

Материалы и методы. Методы изучения надводного рельефа к настоящему времени включают широкий спектр прямых и дистанционных измерений [3 – 5]. Набор методов изучения подводного рельефа значительно скромнее. Традиционная батиметрическая съемка обширных акваторий требует больших материальных и временных затрат. В мелководных районах, где одновременно необходима высокая детализация подводного рельефа и наблюдается его наибольшая изменчивость, батиметрическая съемка с борта судна затруднена.

Появление спутников, оснащенных спектрометрами высокого и среднего разрешения для регистрации излучения в большом количестве спек-

ральных каналов, открыло новые возможности для изучения подводного рельефа. В настоящее время разработан ряд алгоритмов расчетов глубин водных объектов с использованием данных дистанционного зондирования. Метод «Stumpf (2003)» [6] и усовершенствованный метод «Lyzenga (2006)» [7] являются часто используемыми из-за простых вычислений и минимального количества вводной информации. Указанные методы обычно используют информацию, содержащуюся в каналах видимого спектра *Green* и *Blue*. Дополнительно для атмосферной коррекции и устранения солнечных бликов используется красный и ближний инфракрасный каналы (*Red* и *NIR*).

После запуска в 2015 г. спутника дистанционного зондирования *Sentinel-2* исследователи стали использовать его данные для батиметрических работ. Интерес к нему объясняется возможностью бесплатного получения данных спектральных каналов *Blue*, *Green*, *Red* и *NIR* разрешением 10 м. С учетом этих факторов, в представленной работе методом исследования подводного рельефа района Бакальской банки было выбрано батиметрическое картографирование на основе обработки дистанционных данных *Sentinel-2*. Помимо финансовой составляющей, в пользу выбора данных снимков послужила высокая частота съемок и большой пространственный охват. В 2017 г. J. Chybicki и его коллеги [8] использовали данные *Sentinel-2* для изучения подводного рельефа в Балтийском море. В [8] при вычислении глубин от 0 до 16 м применялся эмпирический метод «Stumpf (2003)». Подобные исследования были выполнены для ряда акваторий в Средиземном море [9].

Черное море отличается повышенной мутностью воды, возникающей в результате разрушения берегов, действия волн на донные отложения, развития биологических процессов, поступления речного стока. По данным сравнительного тестирования [10], при построении карт глубин на основе данных дистанционного зондирования для акваторий Балтийского, Белого и Черного морей оба метода – «Stumpf (2003)» и «Lyzenga (2006)» – дали удовлетворительные результаты. В акваториях с мутными водами несколько лучшие результаты [10] показывал алгоритм «Lyzenga (2006)». В нашей работе в качестве расчетного алгоритма для батиметрического картографирования были использованы оба метода – «Stumpf (2003)» и «Lyzenga (2006)».

Использовались данные спутника *Sentinel-2* периода 2017 – 2018 гг., уровень обработки 1С [11]. На первом этапе был произведен визуальный анализ имеющихся снимков. Критериями отбора было выполнение условий: отсутствие облачности над исследуемой акваторией, отсутствие сильного волнения и поверхностной пленки, минимальная площадь зон повышенной мутности. На следующем этапе была проведена предварительная обработка изображений, включающая в себя атмосферную коррекцию, коррекцию солнечных бликов, создание маски водной поверхности.

Атмосферная коррекция проводилась в модуле *Sen2Core* программы *ESA SNAP (Sentinel Application Platform)*. Модуль выполняет задачи атмосферной коррекции данных *Sentinel-2* с получением изображения с введенной поправкой на нижнюю границу атмосферы *BOA (Bottom-Of-Atmosphere)* [11]. Для коррекции солнечных бликов использовался алгоритм Hedley (2005) [12]. Для устранения бликов данный алгоритм использует корреляцию между видимым (*Red*) и ближним инфракрасным каналом *NIR*. Маска водной по-

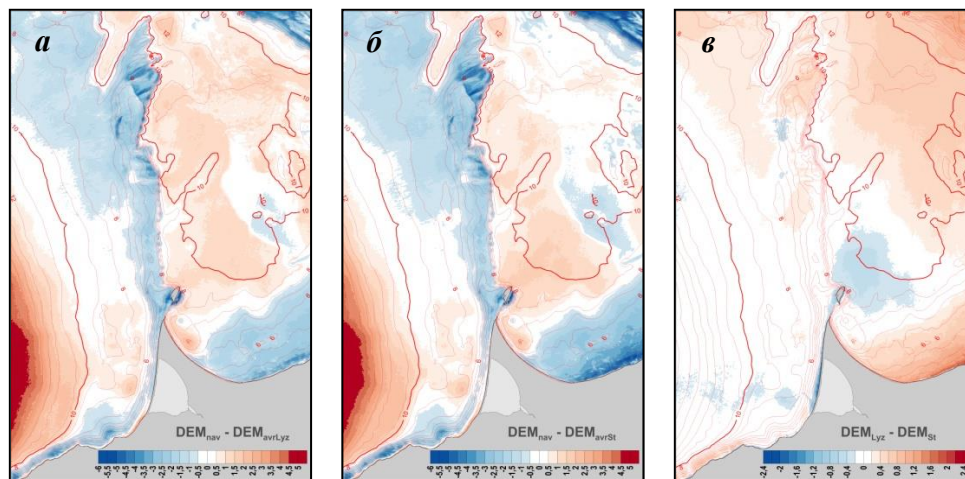
верхности рассчитывалась с использованием формулы *NDWI* («*normalized difference water index*»): $NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR)$. Полученная маска водной поверхности использовалась для определения положения уреза.

Построение карт глубин производилось с использованием сертифицированного программного обеспечения *ScanEx Image Processor*. Для получения батиметрической информации методом «*Stumpf (2003)*» мы использовали каналы *Blue* и *Green*, методом *Lyzenga (2006)* – *Blue*, *Green* и *Red* каналы. В качестве опорной карты использовались морские навигационные карты и данные прямых акустических батиметрических измерений, выполненных в 2018 г. Институтом океанологии им. П.П.Ширшова РАН [13].

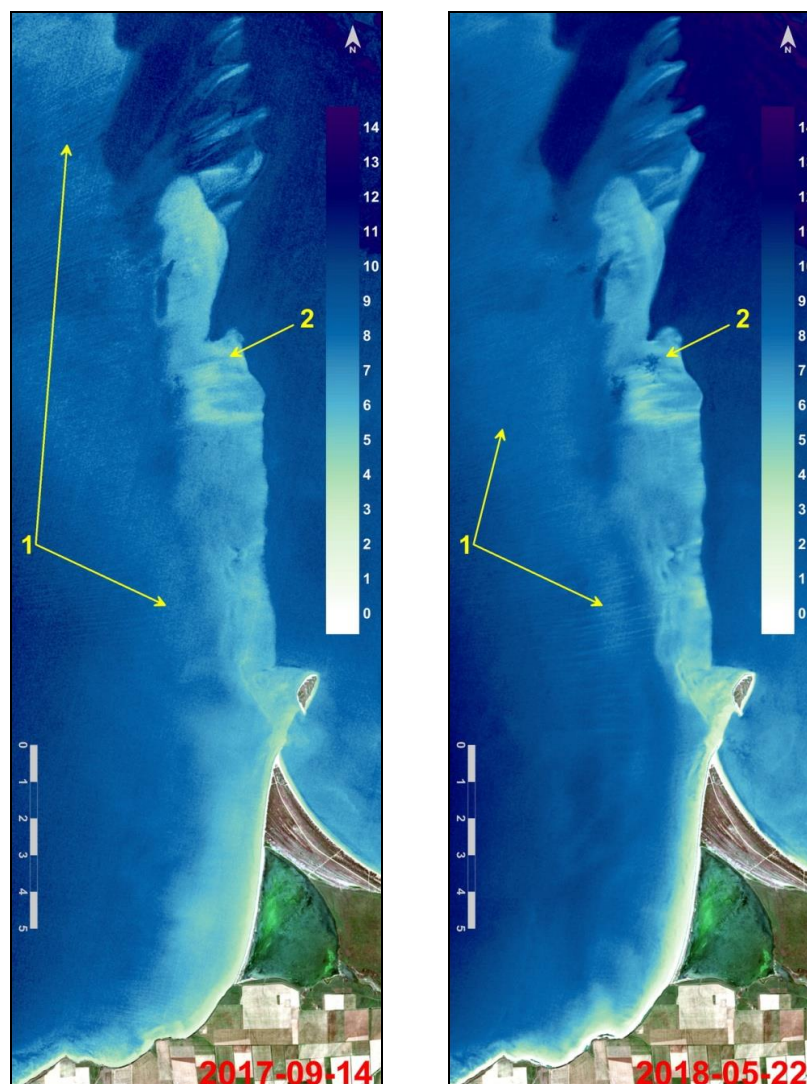
Для района Бакальской банки с глубинами 0 – 16 м по снимкам за разные даты с использованием обоих алгоритмов были построены цифровые модели подводного рельефа (ЦМР). Далее была проведена оценка точности с использованием данных прямых промеров, выполненных в 2018 г. в прибрежной зоне Бакальской косы [13], и данных, полученных с навигационных карт (для Бакальской банки и прилегающей акватории Каркинитского залива).

Сравнение заключалось в создании разностных цифровых моделей (РЦМ), получаемых вычитанием ЦМР, построенной определенным методом, из ЦМР, построенных другим методом либо по данным навигационных карт или промеров. Построенные РЦМ (рис.2) оценивались на наличие, величину и распределение ареалов искажений, после чего выполнялся анализ и выявление причин этих искажений.

Сопоставление ЦМР, построенных по снимкам за разные даты, показало, что пространственное положение элементов рельефа совпадает (рис.3). Точность определения глубины не позволяет производить выполнение количественных оценок (к примеру – изменение объемов донного грунта за межсъемочный период). Точность определения относительных превышений и планового положения форм подводного рельефа достаточна для выполнения



Р и с . 2 . РЦМ, полученные вычитанием ЦМР навигационной карты и осредненной по 5-ти снимкам ЦМР, построенной методом: «*Lyzenga (2006)*» (а); «*Stumpf (2003)*» (б). РЦМ, полученная вычитанием из осредненной по 5-ти снимкам ЦМР, построенной методом «*Lyzenga (2006)*», ЦМР, построенной методом «*Stumpf (2003)*» (в).



Р и с . 3 . Батиметрические карты, построенные по разновременным снимкам: 1 – расположение гидрогенных донных форм на поверхности реликтового аккумулятивного тела; 2 – участок техногенного изъятия грунта.

ряда морфометрических работ: качественных и количественных оценок изменений конфигурации и планового смещения гидрогенных форм (рис.3).

Различия с навигационной картой объясняются её меньшей детализацией и изменением дна, произошедшем со времени создания карты: для ряда участков (к востоку от банки) имеются сомнения в соответствии навигационной карты реальным глубинам. К сожалению, получение актуальных данных на всю исследуемую акваторию невозможно по ряду причин.

На отдельных участках имеются погрешности определения глубин, связанные с наличием пятен мутности в зонах с высокой гидродинамической активностью (прибойной зоне и проливах) или при техногенном отборе грунта. Наиболее действенным методом повышения точности является использо-

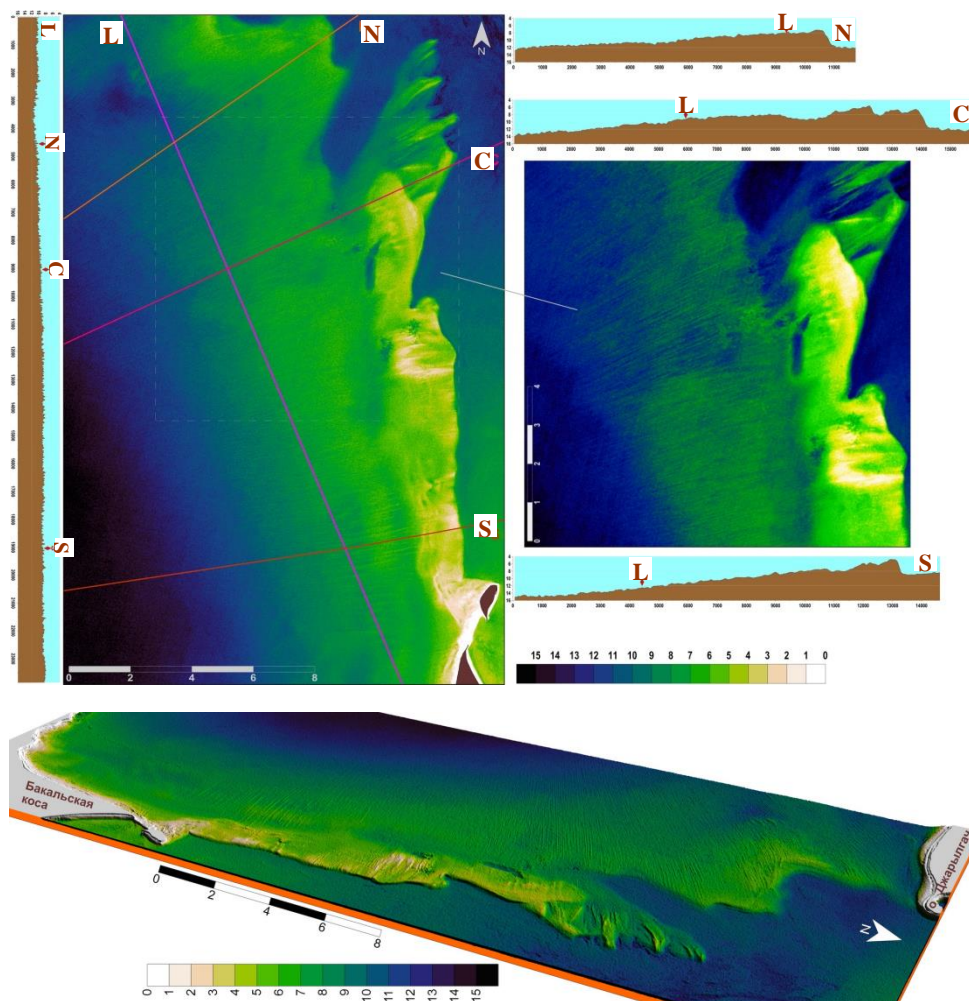


Рис. 4. Пример морфометрических измерений гидрогенных форм и 3D-модель подводного рельефа Бакальской банки (осредненная по 3-м съемкам 2018 г. ЦМР). L, N, C, S – продольные и поперечные профили.

вание съемки, выполненной при отсутствии зон мутности. Поскольку идеальных условий не бывает, для построения модели рельефа всей исследуемой акватории следует использовать комбинацию из нескольких (близких по срокам) снимков, где зоны мутности не совпадают.

Результаты и обсуждение. Общий рельеф района носит унаследованный характер, в основе аккумулятивного тела Бакальской банки лежит древняя аккумулятивная форма замыкающего типа [14, 15]. Современное аккумулятивное тело Бакальской банки формировалось вдоль оси древней пересыпи, но оказалось смещено к востоку (рис.3, 4) в результате изменения планового положения уреза при подъеме уровня моря, абразии коренного берега и под действием преобладающего волнения [1, 14, 15].

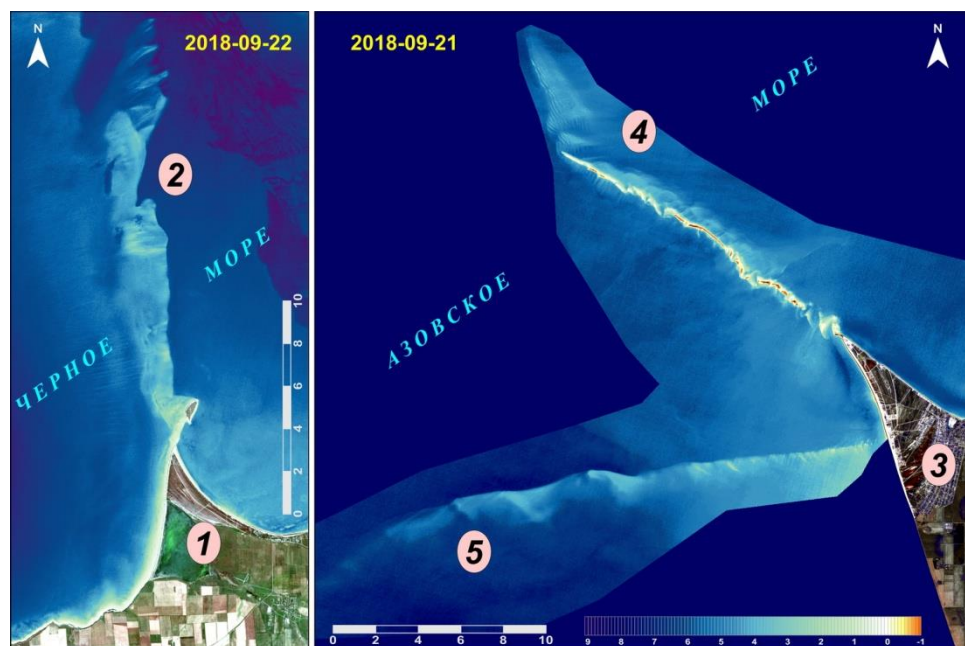
Бакальская банка имеет вытянутую форму, с соотношением длины к ширине примерно 10 : 1. Основное аккумулятивное тело современной Ба-

кальской банки имеет асимметричный поперечный профиль (рис.4), отражающий генеральное смещение основной массы наносов к востоку под действием преобладающих по мощности [2] волнений западных – юго-западных направлений, охватывающих своим воздействием всю толщу воды. Восточный край банки крутой, превышение его поверхности над прилегающим дном Каркинитского залива (высота подводного уступа) составляет 5 – 5,5 м. Западный склон пологий. Тела современной и реликтовой аккумулятивных форм соприкасаются, местами между ними прослеживается широкая (до 1 км), но неглубокая ложбина с пологими бортами.

Анализ строения подводного рельефа Бакальской банки, проведенный на основе построенных детальных моделей рельефа, показал, что поверхность как древней, так и современной аккумулятивной формы осложнена вторичными положительными и отрицательными формами мезорельефа (рис.3, 4), о параметрах которых ранее было известно мало. Вероятно, эти формы образуются под действием сложного сочетания разнонаправленных морских течений.

Вдоль оси Бакальской банки расположены подвижные отмели, имеющие чаще всего каплевидную или дуговидную конфигурацию (рис.5). Эти аккумулятивные формы образуются из наносов, поступающих с подводного западного склона и (или) с продольным потоком наносов со стороны Бакальской косы. Отмели находятся в зоне воздействия слабых по мощности [2], но отличающихся высокой повторяемостью волнений восточных – северо-восточных направлений. Это волнение не может изменить положение основного объема наносов, отложенных на больших глубинах, но определяет динамику отмелей. Данные формы рельефа имеют аналоги в других акваториях Азово-Черноморского региона, например, – банка Еленина и подводная отмель в районе косы Долгой (рис.5) (Азовское море, Краснодарский край).

К западу от современной Бакальской банки обнаружена система субпараллельных прямолинейных ложбин и разделяющих их валов, покрывающих всю поверхность реликтового аккумулятивного тела. Морфометрические измерения, проведенные по цифровым моделям, позволили оценить параметры выявленных форм. Протяженность ложбин достигает 5 – 6 км, они ориентированы по нормали к продольной оси Бакальской банки на конкретном участке. Превышение валов над дном ложбин, в зависимости от участка, составляет от 1 до 1,5 м. Ширина ложбин, также в зависимости от участка, составляет от 50 до 150 м. Характеристики выявленных форм позволяют предположить их эрозионное происхождение. Мощные компенсационные течения, формирующиеся в придонных слоях восточной части Каркинитского залива при действии волн западных – юго-западных направлений и направленные к западу, при прохождении над Бакальской банкой резко усиливаются. Древнее аккумулятивное тело, расположенное к западу, сложено уплотненными песками с примесью гальки и ракушки. Под действием придонных течений в отложениях могли сформироваться постепенно удлиняющиеся эрозионные врезы. Относительная стационарность течений и сравнительно высокая устойчивость донных отложений способствуют стабильности образовавшихся форм рельефа. При сравнении разновременных снимков периода 2016 – 2019 гг. не отмечено изменений в пространственной структуре указанных форм (в отличие от подвижных отмелей вдоль оси Бакальской банки).



Р и с . 5 . Крупные аккумулятивные формы Азово-Черноморского региона и их подводные элементы (использованы ЦМР по снимкам на указанные даты): Бакальская коса (1), Бакальская банка (2), коса Долгая (3), подводная отмель косы Долгая (4), банка Еленина (5).

Также, анализ цифровой модели подводного рельефа позволил выявить в центральной части Бакальской банки участки техногенного отбора грунта, в том числе продолжающегося в настоящее время (рис.3).

Выводы. Выполнено построение батиметрических цифровых моделей по космическим снимкам *Sentinel-2* для мелководной части Каркинитского залива Черного моря. С использованием алгоритмов «Stumpf (2003)» и «Lyzenga (2006)» построены ЦМР дна обширной акватории района Бакальской банки. Анализ результатов показал применимость обоих алгоритмов для создания батиметрических моделей. Используемые методики обработки снимков и вычисления глубин позволяют использовать полученные ЦМР для морфометрических работ в исследуемом районе в пределах глубин 0 – 10 м. На больших глубинах данная методика не позволяет получить достоверные результаты.

Установлено наличие разнообразных малоизученных форм современного подводного мезорельефа района Бакальской банки: подвижных отмелей вдоль оси банки и области субпараллельных ложбин, перпендикулярных её оси. Построенные цифровые модели дали возможность получить морфометрические характеристики выявленных элементов рельефа.

Таким образом, данные с некоммерческого спутника *Sentinel-2* могут быть эффективным средством для научных исследований рельефа мелководных акваторий. Использование данных *Sentinel-2* для создания батиметрических моделей позволяет сократить время и стоимость работ по сравнению с традиционными технологиями. Дальнейшее совершенствование ис-

пользованной методики и статистическая обработка полученных данных позволит существенно повысить точность определения абсолютных значений глубины и даст возможность изучать динамику подводного рельефа.

Отработка методики, получение натуральных данных, проведение расчетов и анализ рельефа выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-05-00333 и 18-55-34002). Используются данные по рельефу косы Долгой, полученные при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-45-230004). Данные по гидро-литодинамическому режиму акватории получены в рамках темы госзадания № 0149-2019-0014. Помощь в получении данных дистанционного зондирования оказал SCANEX R&D Centre (Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю.Н., Косьян Р.Д.* Бакальская коса – уникальный природный объект Крымского полуострова (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.2-14.
2. *Дивинский Б.В.* Гидродинамические условия вод в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.31-39.
3. *Крыленко В.В., Крыленко М.В.* Высокоточная съемка рельефа Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4.– С.65-72.
4. *Krylenko M., Krylenko V., Kosyan R.* Accumulative coast dynamics estimation by satellite camera records // 3rd Intern. Conf. on remote sensing and geoinformation of the environment. Book Series: Proceedings of SPIE.– 2015.– v.9535.– P.95351K.
5. *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.
6. *Stumpf R., Holderied K., Sinclair M.* Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnol. Oceanogr.– 2003.– v.48(1)– P.547-556.
7. *Lyzenga D.R., Malinas N.P., Tanis F.J.* Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.– 2006.– v.44(8)– P.2251-2259.
8. *Chybicki J.* Mapping south Baltic near-shore bathymetry using Sentinel-2 observations // Polish Maritime Research.– 2017.– v.24.– P.15-25.
9. *Traganos D., Poursanidis D., Aggarwal B., Chrysoulakis N., Reinartz P.* Estimating Satellite-Derived Bathymetry (SDB) with the Google Earth Engine and Sentinel-2 // Remote Sens.– 2018.– v.10(6)– С.859-877.
10. *Батиметрическое картографирование в прибрежной зоне на основе материалов дистанционного зондирования Земли / Отчет по НИР.– М.: ООО Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС», 2018.– 91 с.*
11. *Sentinel Online technical website.* [Электронный ресурс].– URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения 03.02.2019).
12. *Hedley J.D., Harborne A.R., Mumby P.J.* Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos // Intern. J. Remote Sensing.– 2005.– v.26(10)– P.2107-2112.

13. Руднев В.И. Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.4. – С.15-21.
14. Зенкович В.П. Бакальская коса // Сб. труд. Института океанологии АН СССР.– 1955.– № 4.– С.86-101.
15. Зенкович В.П. Берега Чёрного и Азовского морей.– М.: Гос. Изд-во геогр. лит., 1958.– 371 с.

Материал поступил в редакцию 15.03.2019 г.
После доработки 15.05.2019 г.

V.V.Krylenko, M.V.Krylenko, A.A.Aleinikov

RESEARCH OF THE BAKALSKAYA BANK UNDERWATER RELIEF BY SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES

The Bakalskaya Bank underwater relief is studied. Digital elevation models are built using Sentinel-2 satellite images. Hydrogenous mesoforms of underwater relief are identified, areas of anthropogenic soil removal are noted. The presence of a system of subparallel troughs, perpendicular to the longitudinal axis of the Bakalskaya Bank is noted. They have no analogues on similar accumulative forms of the region.

KEYWORDS: underwater relief, Sentinel-2 satellite images, erosion-accumulative form, the Bakalskaya Bank, the Karkinitsky Bay, the Black Sea