

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

УДК 528.8

DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-77-89

Развитие геосистемы косы Тузла в XIX–XXI вв.

В. В. Крыленко^{1}, М. В. Крыленко¹*

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Российская Федерация

* e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Аннотация. Коса Тузла – это крупная аккумулятивная береговая форма, расположенная на юге Керченского пролива, соединяющего Азовское и Черное моря. Хозяйственная деятельность на морских побережьях Азово-Черноморского региона постоянно усиливается. Нагрузка на береговые геосистемы возрастает, нарушается естественное равновесие в процессах развития берегов. Одновременно происходят глобальные и региональные изменения природных условий, в первую очередь – климатических и гидрологических. Мониторинг динамики береговой линии является необходимой составляющей для успешного управления береговой зоной. Анализ динамики берегов косы Тузла в данной статье основан на изучении современных и архивных географических карт и данных дистанционного зондирования. Установлено, что в последнее столетие наблюдались как рост, так и размыв этой аккумулятивной формы. В целом, ее динамика определяется соотношением объема поступающих наносов и характером гидродинамических процессов в Керченском проливе. Проведенный анализ старинных карт, архивных и современных космических снимков показал, что часть надводного аккумулятивного тела всегда сохранялась от полного размыва в виде острова. Значительная часть изменений косы Тузла в XXI веке инициирована техногенным воздействием. В 2003 г. часть береговой линии косы Тузла была техногенно стабилизирована. В 2016–2020 гг. были сооружены автомобильный и железнодорожный мосты через Керченский пролив, которые проходят по дамбе косы Тузла и острову Тузла. В настоящее время коса Тузла развивается как природно-техногенная геосистема.

Ключевые слова: Азовское море, аккумулятивная форма, дистанционные методы, динамика берега, мониторинг

Введение

Хозяйственная деятельность на побережьях Черного и Азовского морей в последние десятилетия характеризуется положительной динамикой. Нагрузка на береговые геосистемы возрастает, что ведет к деградации отдельных их компонентов и нарушает естественное равновесие в процессах развития берегов. Кроме того, морские берега, особенно аккумулятивные, очень динамичны, а происходящие на них природные процессы могут принимать неблагоприятный для хозяйственного использования характер [1, 2]. В усло-

виях изменений природных условий и роста интенсивности антропогенного воздействия необходимо проводить мониторинг происходящих на морских берегах процессов.

Коса Тузла – это аккумулятивная береговая форма, расположенная на юге Керченского пролива, соединяющего Азовское и Черное моря (рис. 1). Формирование большинства существующих в настоящее время береговых аккумулятивных форм на побережье Черного и Азовского морей началось в середине первого тысячелетия нашей эры [3, 4]. Современная коса Тузла возникла при уровне моря на 1,5–2,0 м ниже современного 1,0–1,5 тыс. лет назад [5].



Рис. 1. Схема восточного берега Керченского пролива

Первые исторические сведения о существовании аккумулятивной формы в районе современной косы Тузла относятся к периоду древнегреческого освоения Азово-Черноморского побережья в античное время [6]. К первым достоверным картографическим данным можно отнести изображения косы Тузла на морских картах итальянских мореплавателей XIV в. В 1771 г. была выполнена гидрографическая инструментальная съемка и составлена морская карта Керченского пролива, на которой изображена коса Тузла как цепь островов. В последние 100 лет научным исследованием косы Тузла занимались М. Н. Кабасников, В. П. Зенкович, Е. Н. Невеский, В. Л. Болдырев, В. М. Пешков, В. А. Иванов, Е. И. Игнатов, С. В. Чистов, Л. В. Поротов и ряд других ученых [5, 7–10].

С 2003 г. на геосистему косы Тузла оказывает сильнейшее техногенное воздействие, связанное с возведением ряда гидротехнических и транспортных объектов, существенно

изменивших гидро-литодинамические условия. В настоящее время появилась необходимость качественно и количественно оценить динамику аккумулятивной формы за последние десятилетия. Необходимо понимать, какие из изменений являются продолжением природной эволюции геосистемы, а какие – следствием антропогенного воздействия. Кроме того, в последние годы появились новые методы географических исследований, позволяющие получить совершенно новую информацию о различных компонентах береговых геосистем и закономерностях их развития. Прежде всего, это дистанционные методы, позволяющие оперативно изучать строение и динамику берегов. В представленной работе на основе данных, полученных со спутниковых снимков разных лет и архивных географических карт, проанализированы особенности эволюции геосистемы косы Тузла, в частности – динамика ее береговой линии, за последние 250 лет.

Материалы и методы

Анализ динамики геосистемы косы Тузла в данной статье основан на изучении современных и архивных географических карт и данных дистанционного зондирования. На сегодняшний день доступные для использования спутниковые снимки очень разнообразны по разрешению, спектральному диапазону, технологии получения и другим свойствам. Использование данных дистанционного зондирования обусловлено тем, что снимок является фактографической моделью местности в конкретный момент времени [11].

До 60-х гг. XX века основным, а часто – единственным источником данных о положении береговой линии служили географические карты. К сожалению, наносимая на них информация по объективным и субъективным причинам зачастую искажалась. Поэтому была проведена геометрическая коррекция картографических изображений. Привязка карт производилась с помощью ПО Global Mapper. В качестве базовых снимков, к которым производилась привязка, использовались космические снимки с известными параметрами, снятые до начала интенсивной техногенной трансформации изучаемой территории, связанной со строительством мостового перехода. Основной сложностью привязки было малое количество контрольных точек, достоверно определяемых как на архивных картах, так и на современных снимках. Были использованы сохранившиеся до настоящего времени здания, линейные объекты [12]. Привязка по формам рельефа не производилась, так как за прошедшее время они могли существенно трансформироваться.

Другим важным источником информации о предшествующем состоянии косы Тузла являются архивные материалы аэро- и космической съемки. Аккумулятивные берега очень динамичны, и для выявления тенденций их развития нужно анализировать данные за максимально возможный срок. Для изучаемого региона наиболее старыми доступными материалами дистанционного зондирования являются космические снимки 1960–70-х гг., в настоящее время предоставляемые для научных исследований Геологической служ-

бой США [13]. Обработка пространственных данных и архивных космических снимков производилась с использованием ПО Scanex Image Processor. Геометрическая трансформация растра или вектора проводилась по полиномиальной модели третьей степени. Оцениваемая точность плановой привязки в пределах 5 м. После привязки карт, снимков и векторных данных, производилось снятие количественной информации. Дальнейшая обработка и визуализация данных производилась в программных пакетах Microsoft Excel и Golden Software. Наличие исторических карт и ряда последовательных космических съемок позволило изучить динамику берегов косы Тузла за длительный период.

При обработке и интерпретации данных, полученных дистанционными методами, часто требовалось определение границ водных объектов для анализа динамики береговой линии. Нами использовались серии снимков с некоммерческих спутников Sentinel-2, оснащенных мультиспектральным сенсором MSI, выполняющим съемку в 13 спектральных каналах [14–16]. В пользу выбора данных Sentinel-2 послужила высокая частота съемки; пространственный охват; наличие необходимых спектральных каналов. Детальности снимков Sentinel-2 достаточно для определения положения береговой линии, элементов рельефа и ландшафтно-морфологической структуры объектов. Для автоматической обработки снимков применялось программное обеспечение Scanex Image Processor. Маска водной поверхности рассчитывалась с использованием индекса NDWI [17]. Значения в растрах разделялись на воду и сушу и конвертировались в векторный класс объектов. Периметры и площади полигонов соответствовали длине береговой линии и площади рассматриваемых акваторий или островов [18].

Результаты

Коса Тузла протягивается на северо-запад от одноименного мыса Таманского полуострова, представленного частично отмершими клифами высотой 15 м. Наиболее устойчивая корневая часть косы является треугольной в плане аккумулятивной формой двусторон-

него питания. Общая длина этой части аккумулятивного тела до начала свободной косы около 2 км с западной стороны и около 1 км со стороны Таманского залива. На севере аккумулятивное тело косы Тузла от крымского берега отделяет Павловская узость, расположенная между мысом Павловский (Керченский п-ов) и СЗ оконечностью о. Тузла (см. рис. 1).

Как показывает анализ карт XVIII–XIX вв., надводная часть косы Тузла в этот период состояла из отдельных частей (рис. 2). В первой лоции Черного моря коса [19] описывается как суша, вытянутая от Тамани в виде небольших низменных островков. Общая длина косы составляла тогда около 11 км. В течение XIX в. наблюдался процесс роста надводного тела косы. В 1817 г. аккумулятивное тело состояло из трех островов, а с 1833 г. на картах коса представляет собой длинную прикорневую часть и небольшой остров, отделенный проливом (рис. 2). Длина острова и ширина

отделяющего его пролива постоянно изменялись.

Во второй половине XIX в. надводное тело косы Тузла выдвигалось в сторону Керченского п-ова. Это сопровождалось сужением Павловской узости до 3,36 км в 1871–1874 гг. и до 1,87 км в 1901 г. Можно предположить, что наличие сплошного надводного тела способствовало более быстрому переходу наносов в дистальную часть косы Тузла, в прикорневой части при этом формировался дефицит наносов. Постепенно сократилась и подпитка наносами дистальной части, начался ее размыв. Во второй декаде XX в. дистальная часть сократилась на 1,5 км [5], на месте размывтой части косы сформировалась отмель с глубинами от 0,2 до 0,8 м. В этот период оконечность косы обособилась в виде небольшого острова (рис. 3), а в образовавшемся проливе начали формироваться загнутые к северу дистальные отростки.

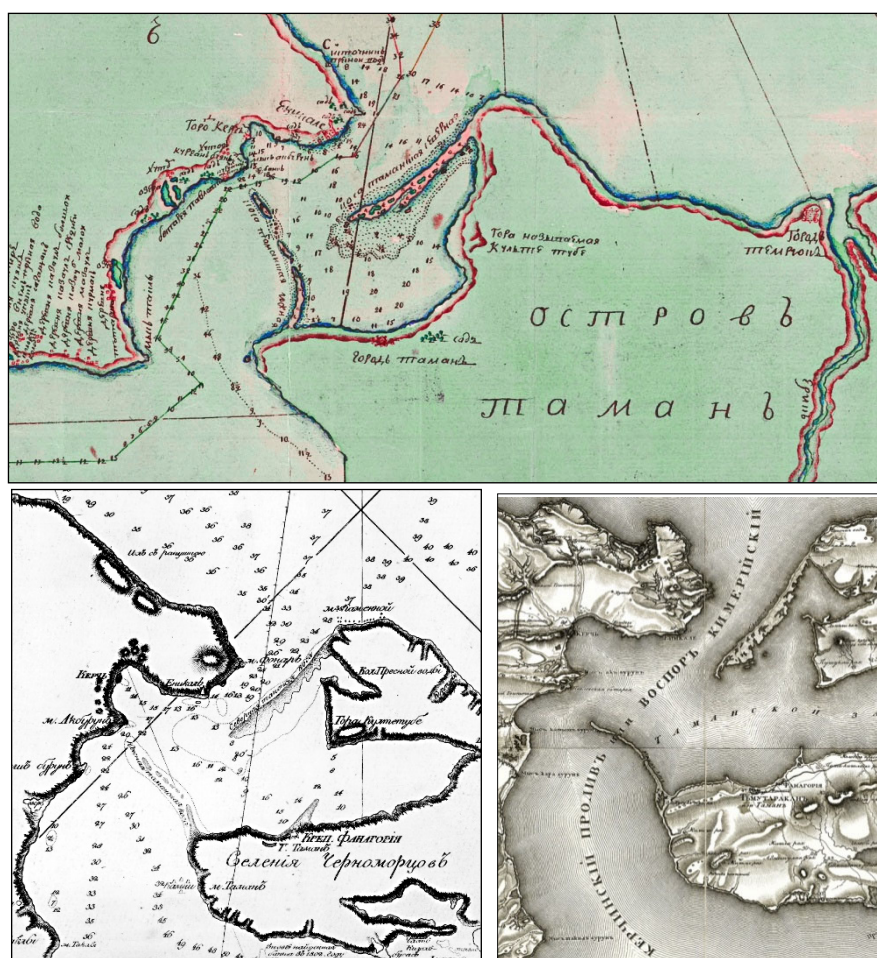


Рис. 2. Аккумулятивные формы Керченского пролива на старинных картах: сверху карта 1771 г.; слева – 1803 г.; справа – 1817 г. [22]

Водообмен между Азовским и Черным морями осуществлялся исключительно через Павловскую узость, где при сильных штормах образовывался значительный градиент уровней [20]. Такая ситуация во время сильного Ю-ЮЗ шторма 25.11.1925 г. способствовала быстрому расширению прорана, образовавшегося в прикорневой части косы. В условиях дефицита наносов проран быстро расширялся за счет размыва образовавшегося о. Тузла (рис. 3). Примерно к 1953 г. произошла стабилизация контура острова, в этот момент ширина Тузлинской промоины составляла около 4 км, протяженность о. Тузла колебалась в пределах 6,5–7,0 км, его мак-

симальная ширина составляла 500 м [8, 21]. Через Тузлинскую промоину стало проходить до 10–20 % расходов вод всего пролива [20]. Увеличение общего сечения пролива способствовало снижению градиентов уровня, а ветровые волны способствовали перемещению наносов на СЗ от расширявшейся промоины вдоль ЮЗ и СВ берегов острова. Анализ топокарт 1940-х гг. космических снимков 1960-х гг. показывает, что к 1941 г. отделенный ранее северный остров вновь соединился с о. Тузла (см. рис. 3). Более того, к 1966 г. северная оконечность о. Тузла на километр выдвинулась в сторону крымского берега.

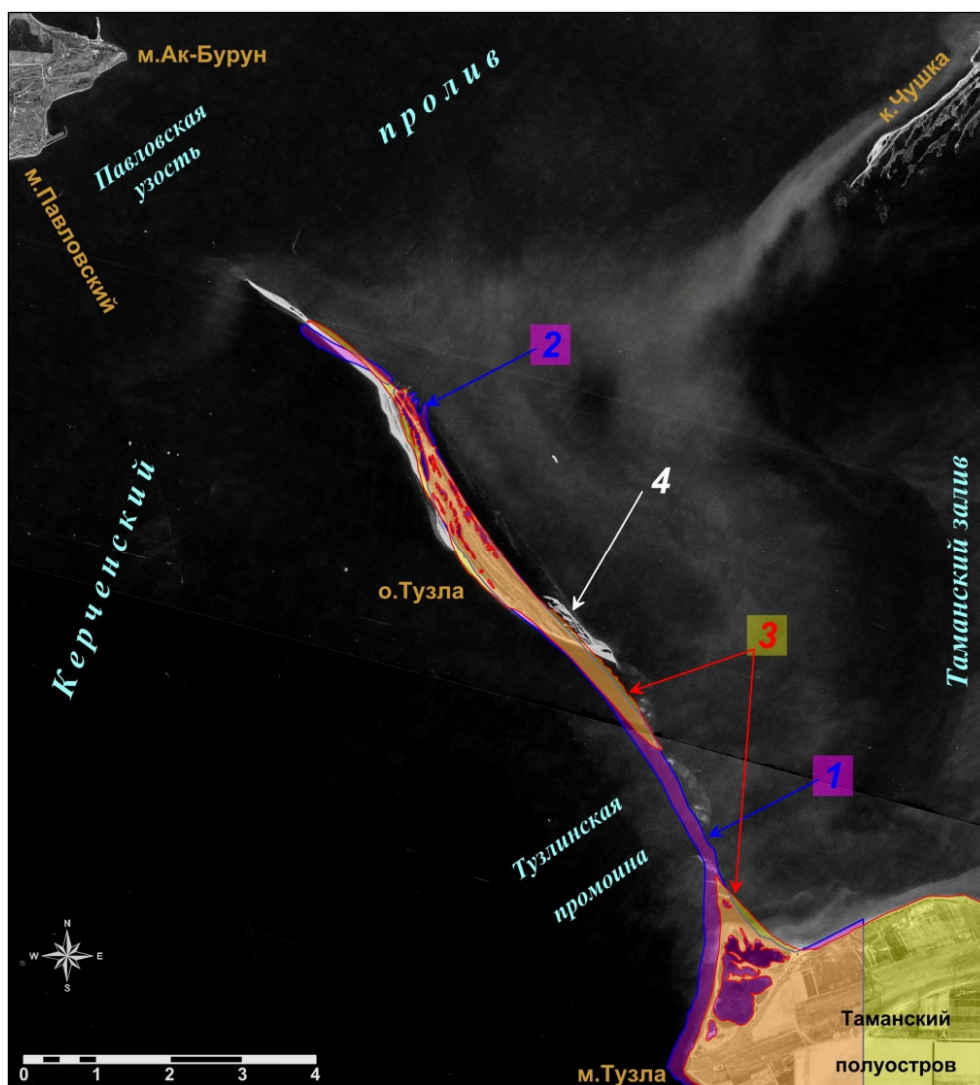


Рис. 3. Развитие аккумулятивных форм косы Тузла в 1920–1960 гг.:

1 – контур косы к середине 1920-х гг. (топокарта); 2 – образование дистальных отрогков в проливе между оконечностью косы и отделившимся от нее островом в 1920-х гг.; 3 – контур корневой части косы и острова Тузла в 1941 г. (топокарта); 4 – остров Тузла на космическом снимке CORONA 21.08.1966 [13]

В результате действия переменных течений наблюдались колебания длины промоины в пределах 3,5–4,5 км. В промоине наблюдалась высокая изменчивость подводного рельефа (рис. 3, 4), в том числе образование островов длиной до 1 км, существовавших от нескольких месяцев до двух лет.

Глубины вдоль продольной оси аккумулятивного тела составляли от 0,5 до 3,0 м, а сама ось с 1925 по 2003 г. сместилась на 0,8–1,0 км к СВ. Следует отметить, что скорость этого смещения между 1920 г. и второй половиной 1960-х гг. была ниже, чем в период 1965–2003 гг. (см. рис. 4).

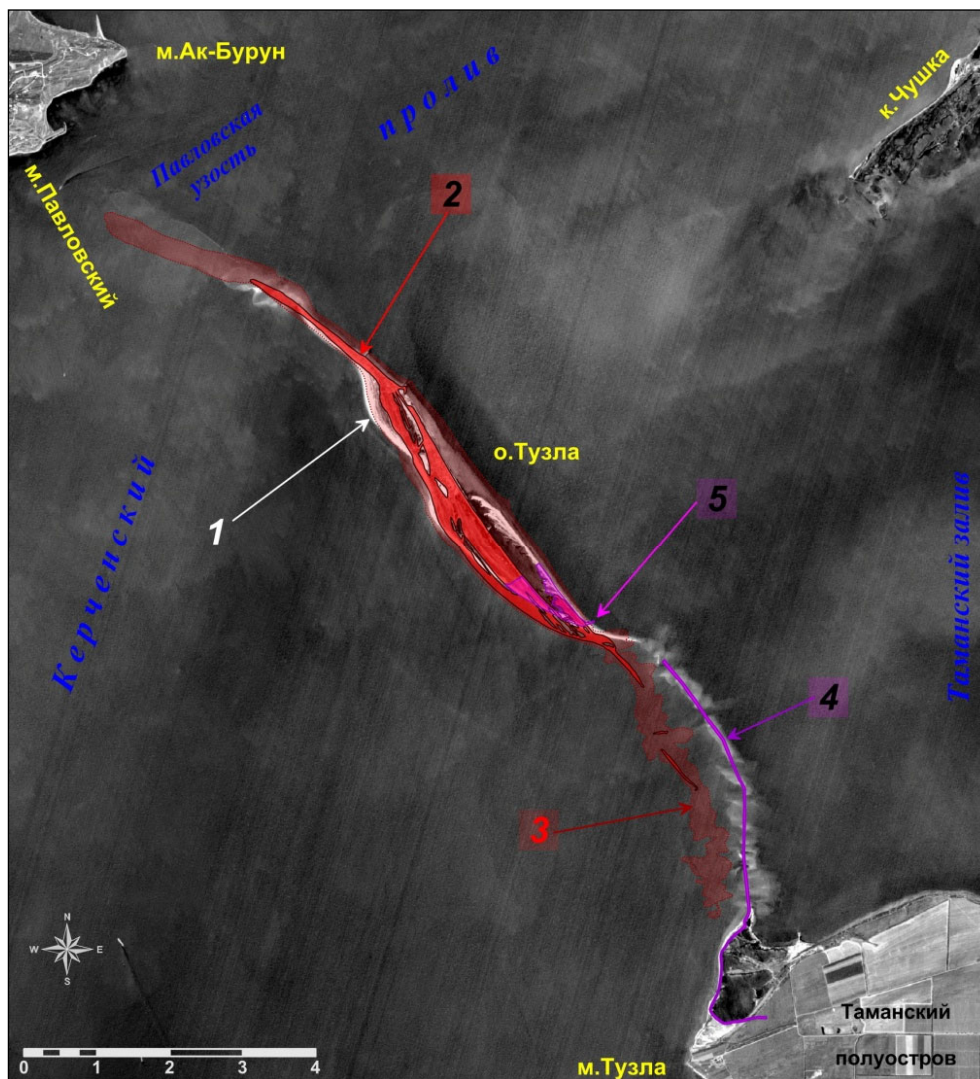


Рис. 4. Развитие аккумулятивных форм косы Тузла с 1965 по 2003 г.:

1 – о. Тузла 18.06.2003 на космическом снимке IRS-PAN-1D [23]; 2, 3 – соответственно – контуры острова и отмели Тузла 23.07.1965 (с космического снимка CORONA [13]); 4, 5 – соответственно – контуры дамбы и южной оконечности о. Тузла 18.05.2005 с космического снимка IRS-PAN-1D [23]

Сложный режим, в котором формировалось аккумулятивное тело косы, нашел отражение в рельефе о. Тузла. Внутренний рельеф острова представляет собой сложный узор из отмерших береговых валов, дистальных отростков и вытянутых вдоль протяженности

острова лагун. При удлинении или смещении аккумулятивного тела, образовавшиеся ранее выступы берега частично размывались, а вогнутости между выступами отчленились новыми валами или заполнялись наносами. Юго-западный берег о. Тузла до начала тех-

ногенного преобразования был представлен высоким и широким береговым валом, постепенно смещавшимся на СВ. Несмотря на явные признаки наличия вдольберегового потока наносов, направленного на СЗ, вдоль этого берега часто наблюдалось формирование одного, реже – двух подводных валов. Одновременно, практически точно на юг от острова прослеживаются протяженные (до 6 км) узкие языки наносов (рис. 5). Ориентация этих форм указывает на их образование под действием стоковых течений, направленных из Азовского моря. С 1965 по 2019 г. произошло небольшое вдольбереговое смещение этих форм, но общая конфигурация осталась прежней. Поверхность перечисленных дон-

ных форм осложнена сетью валов и ложбин, чередующихся с шагом 30–40 м. Северо-восточный берег острова низменный, покрытый околководной растительностью. Как правило, вдоль всего берега формируется невысокий береговой вал, соединяющий выступы берега. На подводном склоне этой стороны острова наблюдается формирование серии (до 10 штук) невысоких подводных валов, вдоль оси которых, в свою очередь, происходило выдвигание надводных дистальных отростков, направленных со стороны ЮВ оконечности острова на СЗ. По мере удлинения этих отростков они отчленили часть прилегающей к острову акватории, образуя вытянутые лагуны (см. рис. 4).

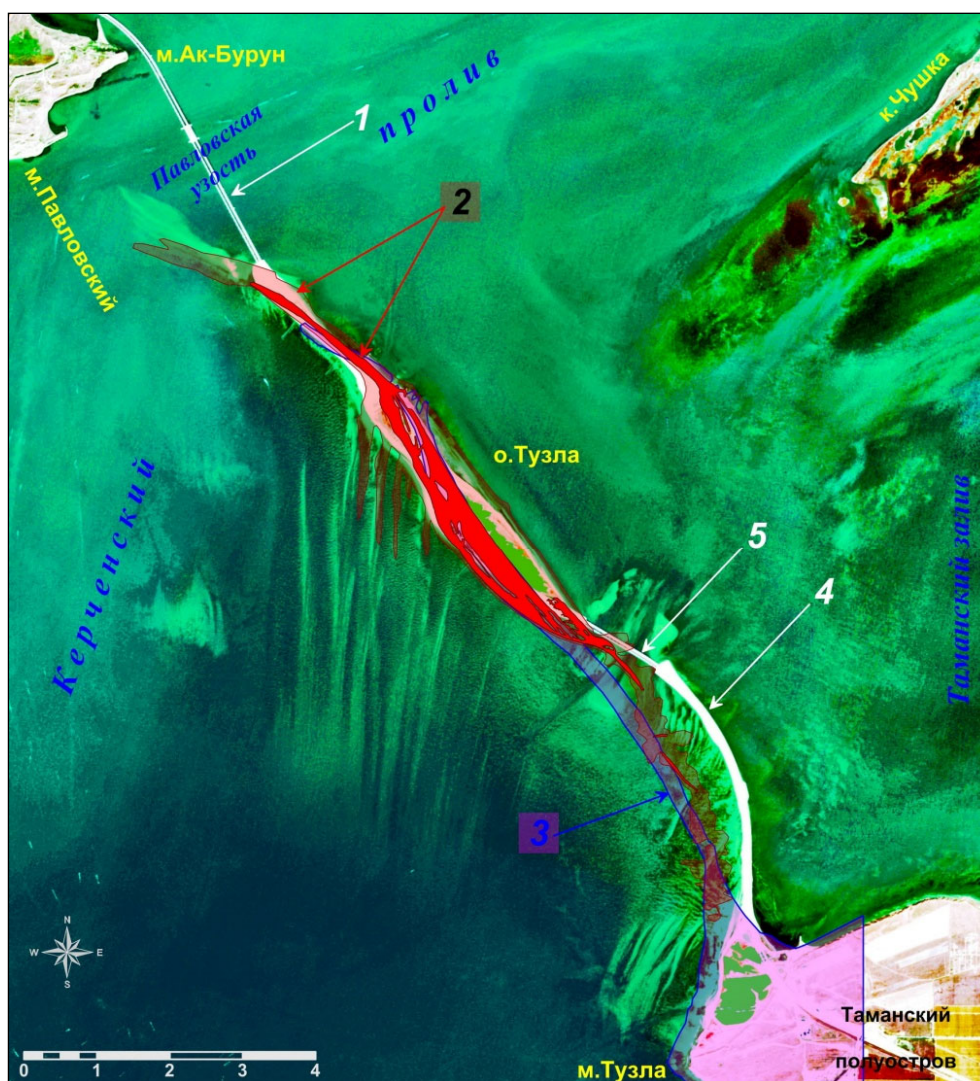


Рис. 5. Развитие аккумулятивных форм косы Тузла в 1920–2019 гг.:

1 – мост через Павловскую устьев; 2 – контур острова и отмели Тузла 23.07.1965 (с космического снимка CORONA [13]); 3 – контур косы к середине 1920-х гг. (топокарта); 4 – дамба Тузла 21.08.1966 на космическом снимке Sentinel-2A [15]; 5 – мост через Тузлинскую промину

Осенью 2003 г. было произведено восстановление южной части косы Тузла отсыпкой дамбы их природного камня (мшанковые известняки). Протяженность дамбы составляет 3,8 км (см. рис. 4, 5), ширина подводной части 41–60 м (среднее – 48 м), надводной – 20–28 м [5]. Общий объем материала в теле дамбы составил 580 тыс. м³.

После создания дамбы вдоль нее начались подвижки наносов в сторону промоины, в результате часть наносов стала теряться на глубине. В 2004 г. на оголовке дамбы были построены две поперечных каменно-набросных шпоры длиной по 20 м, которые блокировали утечку материала [5], после чего в головной части дамбы ширина пляжа достигла 30 м (см. рис. 5). Вдоль дамбы стал формироваться пляж средней шириной 7–8 м, на остатках отмелей образовались аккумулятивные тела в виде двойных кос шириной до 15–25 м (см. рис. 5). Наибольший рост наблюдался со стороны Черного моря.

После частичного воссоздания косы Тузла в сохранившемся участке Тузлинской промоины шириной 280 м произошла интенсификация течений и активизировался размыв ЮВ части о. Тузла. В результате ширина промоины увеличилась от 500 м в 2004 г. до 1 200 м в 2007 г. Этому способствовало техногенное углубление промоины, а также перехват оголовком дамбы наносов, поступающих со стороны Таманского п-ова. По данным натурных наблюдений [20] в Тузлинской промоине сразу после сооружения дамбы в 2003 г. фиксировались скорости течений до 100–180 см/с. По мере увеличения сечения Тузлинской промоины скорости течений в ней уменьшились и не превышали 60 см/с [24, 25, 26]. С ослаблением течений в промоине и в результате проведения берегоукрепительных мероприятий на острове его контур стабилизировался [1, 17, 27].

Обсуждение

Конфигурация линии берега и дна Керченского пролива способствует образованию барьерной аккумулятивной формы, соединяющей берега Керченского и Таманского п-овов. Напротив, наличие мощного водообмена через Керченский пролив препятствует образо-

ванию сплошного аккумулятивного тела. Таким образом, динамика аккумулятивной формы определяется сочетанием двух основных факторов: объема поступающих наносов и интенсивностью гидродинамических процессов в проливе.

Волновое воздействие в проливе снижено сравнительно с открытым морем. Поэтому колебания уровня моря имеют большее значение для динамики берегов. С и СВ ветры являются нагонными для северной части пролива, а ЮЗ, Ю, ЮВ ветры – для южной части. Средний годовой размах колебаний уровня в проливе составляет около 85 см, а максимальный – до 121 см [20].

Для Керченского пролива характерны три типа течений: устойчивое Азовское – со стороны Азовского моря, устойчивое Черноморское – со стороны Черного моря и неустановившееся смешанное, переменное по направлению слабое течение. Повторяемость течений в среднем за год составляет для черноморского потока 38 %, азовского – 62 % [27].

Питание наносами современной косы Тузла идет преимущественно со стороны Черного моря, в меньшей степени – со стороны Таманского залива. Верхний слой аккумулятивного тела косы Тузла мощностью от 1,5–1,8 до 3,0–5,5 м сложен кварцевым песком с примесью гальки (поступающими с разрушающегося клифа) и ракушей [5].

Усиление циклонической активности и увеличение энергии волн с Черного моря (ЮЗ румбов) приводило к увеличению поступления наносов со стороны Черного моря, росту длины и мощности аккумулятивного тела с одновременным его смещением на СВ. Таким образом, в периоды избытка наносов и ослабления течений в проливе надводная часть аккумулятивного тела косы Тузла приобретала сплошной вид, а дистальная часть выдвигалась к СЗ. Судя по отсутствию упоминаний о сплошной косе на входе в пролив и ее отображения на картах, такая ситуация наблюдалась редко, поскольку увеличение длины косы сокращало сечение пролива и инициировало активизацию течений в нем, способствовавших размыву. Надводная часть аккумулятивного тела всегда сохранялась от полного размыва в виде островов и косы, поскольку сече-

ние вновь возрастало по мере размыва. В последнее столетие наблюдались как рост, так и размыв косы Тузла. Этот процесс продолжался вплоть до начала техногенного преобразования литодинамической системы косы.

Идея строительства моста через Керченский пролив рассматривалась долгое время в контексте крупного геополитического проекта евразийского перехода, который должен был усилить интеграционные и экономические связи между двумя континентами. Еще в XIX в. английское правительство изучало возможность строительства трансконтинентальной железной дороги, включающей переходы через Ла-Манш и Керченский пролив.

В 2016–2020 гг. были сооружены автомобильный и железнодорожный мосты через Керченский пролив. Они начинаются на Таманском п-ове и эстакадами проходят по дамбе и острову Тузла. Эстакада опирается на 595 опор, длина пролетов 55–63 м. Судходные пролеты автомобильного и железнодорожного мостов над фарватером проходят по полотнам длиной 227 м и высотой 45 м с подмостовым судходным габаритом высотой 35 м и шириной 185 м (см. рис. 5). В настоящее время берега острова Тузла техногенно стабилизированы. Ширина Павловской узости составляет около 3 км. Глубины от дистальной части косы до фарватера изменяются от 0,5 до 3 м.

О влиянии мостового перехода на динамику прилегающих берегов пока говорить рано, вероятно, это влияние будет несущественно отличаться от влияния дамбы. Но, следует отметить, что строительство мостового перехода привело к уменьшению площади поперечного сечения пролива, вследствие этого течения здесь будут более интенсивными. Численное моделирование скорости течений показало, что в Павловской узости и Тузлинской промоине происходит увеличение скорости течений [20]. В Павловской узости расчетные скорости течений достигают 120 см/с, а в Тузлинской промоине – до 200 см/с. Это может привести к размыву дна у опор. В то же время, размыв берегов о. Тузла течениями маловероятен, так как они укреплены почти по всему периметру каменной наброской.

Реальную опасность устойчивости мостов представляют ледовые явления. На космическом снимке Sentinel-2 от 13.02.2017 (рис. 6) хорошо видно, что опоры еще не достроенного на тот момент моста остановили поля льда, дрейфовавшие со стороны Азовского моря. На потенциальную опасность этого явления указывает тот факт, что построенный в конце 1944 г. первый мост через Керченский пролив был разрушен льдами уже в феврале 1945 г.



Рис. 6. Опоры мостового перехода через Керченский пролив и дамба на косе Тузла остановили движение полей льда со стороны Азовского моря (космический снимок Sentinel-2 от 13.02.2017 [15])

Заключение

Проведенный анализ старинных карт, архивных и современных космических снимков показал, что часть надводного аккумулятивного тела всегда сохранялась от полного размыва в виде острова. Естественная динамика аккумулятивной формы коса Тузла определялась сочетанием двух основных факторов: объема поступающих наносов и интенсивностью гидродинамических процессов в проливе. Несмотря на высокую динамичность и изменчивость, геосистема косы Тузла в целом являлась чрезвычайно устойчивой, так как функционировал природный механизм, ограничивающий как рост, так и полный размыв аккумулятивного тела.

Активизация хозяйственной деятельности на акватории и побережье Керченского пролива в конце XX – начале XXI в. определила тот факт, что антропогенное воздействие приобрело в этом районе значение мощного геологического фактора. Значительная часть процессов переформирования берегов аккумулятивных тел в этот период прямо или косвенно инициирована техногенным воздействием как в их пределах, так и в зоне их питания наносами. Современная динамика косы Тузла является результатом

природных процессов, протекающих в условиях общего усиления антропогенного пресса и прямого техногенного преобразования.

Информация о выявленных и возможных изменениях косы Тузла позволит разработать мероприятия, повышающие ее устойчивость к неблагоприятным изменениям внешних условий, и при этом – сохраняющие природоохранную, эстетическую и хозяйственную ценность уникального природного объекта. Выявленные закономерности могут быть использованы при комплексном управлении береговой зоной моря для подобных аккумулятивных береговых форм Азово-Черноморского региона.

Благодарности

Систематизация и анализ материалов дистанционного зондирования реализована при поддержке РФФ (проект 20-17-00060). Использованы сведения о развитии берегов Керченского пролива, полученные при выполнении проекта РФФИ (19-45-230004). Использованы сведения о гидрологических и гидро-литодинамических особенностях района, полученные при выполнении темы Госзадания № FMWE-2021-0013.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kosyan R. D., Krylenko M. V. Modern state and dynamics of the Sea of Azov coasts // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2019. – Vol. 224. – P. 314–323.
2. Krylenko M. V., Krylenko V. V., Volkova T. A. Development prospects of natural-territorial complex of the Dolgaya spit // *Ocean and Coastal Management*. – 2018. – Vol. 166. – P. 98–102.
3. Маев Е. Г., Мысливец В. И., Зверев А. С. Строение верхнего слоя осадков и рельеф дна Таганрогского залива Азовского моря // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2009. – № 5. – С. 78–82.
4. Матишов Г. Г. Концепция о морских экзогенных процессах в ледниковый и современный периоды // *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода*. – 2008. – № 68. – С. 26–39.
5. Пешков В. М., Поротов А. В., Гусаков И. Н. К вопросу о восстановлении косы Тузла // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 127–135.
6. Визе В. Ю. Историческое прошлое наносных образований в Керченском проливе, в особенности косы Тузла // *Известия Центрального Гидрометеорологического бюро*. – 1927. – № 7. – С. 129–161.
7. Болдырев В. Л. Процессы отмирания аккумулятивных береговых форм на примере Керченского пролива // *Труды ИО АН*. – 1958. – № 28. – С. 85–92.
8. Зенкович В. П. Берега Черного и Азовского морей. – М., 1958. – 302 с.
9. Иванов В. А., Игнатов Е. И., Чистов С. В. Происхождение, история развития и динамика косы Тузла // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – 2004. – № 10. – С. 198–206.
10. Невеский Е. Н. Процессы осадкообразования в прибрежной зоне моря. – М., 1967. – 127 с.
11. Бямба О., Касьянова Е. Л. Использование ДЗЗ и ГИС при создании географических основ для тематических карт // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 119–125.

12. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Возможности изучения рельефа и динамики береговой линии крупных морских аккумулятивных форм по данным дистанционного зондирования на примере косы Долгая // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 58–70.
13. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://earthexplorer.usgs.gov> (accessed 01.02.2022).
14. MultiSpectral Instrument (MSI) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (accessed 12.12.2021)
15. Sentinel Online technical website [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (accessed 12.12.2021)
16. The operational Copernicus optical high resolution land mission [Electronic resource]. – Mode of access: http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (accessed 10.02.2022)
17. Gao B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257–266.
18. Krylenko V., Krylenko M., Aleynikov A. Revision of the coastline length of the Azov Sea according to remote sensing data // Proceedings SPIE. – 2019. – Vol. 11174. – P. 111741B.
19. Будищев И. М. Лоция и морской путеводитель по Азовскому морю. – СПб., 1808. – 78 с.
20. Дьяков Н. Н., Липченко А. Е., Фомин В. В., Цвечинский А. С. О возможных рисках при строительстве и эксплуатации мостового перехода через Керченский пролив // Труды Государственного океанографического института. – 2017. – № 8. – С. 211–235.
21. Удовик В. Ф., Харитонов Л. В. Особенности поступления наносов к юго-восточной оконечности о. Тузла в зависимости от направления штормового ветра // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2011. – Т. 1, № 25. – С. 96–103.
22. Папакома (Карты) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://papakoma.narod.ru/maps-index.htm> (дата обращения 13.11.2021).
23. Индийский спутник IRS-1C: 10 лет безупречной службы на орбите [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scanex.ru/company/news/ndiyskiy-sputnik-irs-1c-10-let-bezuprechnoy-sluzhby-na-orbite-199/> (дата обращения 17.10.2020).
24. Джиганшин Г. Ф., Мотыгин А. С., Морозов А. Н., Шутов С. А. Гидрофизическая характеристика Керченского пролива в декабре 2009 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2010. – № 23. – С. 153–158.
25. Иванов В. А., Матишов Г. Г., Кушнир В. М., Бердников С. В., Чепыженко А. И., Поважный В. В., Степанян О. В. Керченский пролив в осенний период 2011 года: результаты совместных комплексных исследований, выполненных в экспедиции МГИ НАН Украины и ЮНЦ РАН // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 1. – С. 44–57.
26. Морозов А. Н., Лемешко Е. М., Иванов В. А., Шутов С. А., Зима В. В. Течения в Керченском проливе по данным ADCP наблюдений 2008–2009 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2010. – № 22. – С. 253–267.
27. Fomin V. V., Ivanov V. A. Coupled modeling of currents and wind waves in the Kerch Strait // Journal of Physical Oceanography. – 2007. – Vol. 7. – P. 253–268.

Об авторах

Вячеслав Владимирович Крыленко – кандидат географических наук, старший научный сотрудник.

Марина Владимировна Крыленко – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник.

Получено 21.04.2022

© В. В. Крыленко, М. В. Крыленко, 2022

Development of the Tuzla spit geosystem in the XIX–XXI Century

V. V. Krylenko^{1*}, M. V. Krylenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Southern Branch, Moscow, Russian Federation

* e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Abstract. The Tuzla Spit is a large accumulative coastal form located in the south of the Kerch Strait connecting the Azov and Black Seas. Economic activity on the sea coasts of the Azov-Black Sea region has been actively developing in recent decades. The load on coastal geosystems is increasing, disturbing natural balance in coastal development processes. Simultaneously global and regional changes of natural conditions (first climatic and hydrological) are happening. Monitoring coastline dynamics is a necessary component for successful coastal zone management. The analysis of the Tuzla Spit coasts dynamics in this article is based on the study of modern and archival geographical maps and remote sensing data. It has been established that in the last century both growth and erosion of this accumulative form were observed. In general, its dynamics is determined by the ratio of the incoming sediment volume and the nature of hydrodynamic processes in the Kerch Strait. A significant part of the changes in the Tuzla Spit in the 21 century was initiated by anthropogenic impact. In 2003, part of the coastline of the Tuzla Spit was stabilized technologically. In 2016-2020 road and railway bridges across the Kerch Strait were built, which run along the dam of the Tuzla Spit and Tuzla Island. At present, the Tuzla Spit is developing as a natural and technological geosystem.

Keywords: Sea of Azov, accumulative form, remote sensing, delta, relief, coastal dynamics

REFERENCES

1. Kosyan, R. D., & Krylenko, M. V. (2019). Modern state and dynamics of the Sea of Azov coasts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 224, 314–323.
2. Krylenko, M. V., Krylenko, V. V., & Volkova, T. A. (2018). Development prospects of natural-territorial complex of the Dolgaya spit. *Ocean and Coastal Management*, 166, 98–102.
3. Maev, E. G., Myslivec, V. I., & Zverev, A. S. (2009). The structure of the upper layer of precipitation and bottom relief of the Taganrog Bay of the Sea of Azov. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]*, 5, 78–82 [in Russian].
4. Matishov, G. G. (2008). The concept of marine exogenous processes in the glacial and modern periods. *Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Bulletin of the Commission for Study of the Quaternary]*, 68, 26–39 [in Russian].
5. Peshkov, V. M., Porotov, L. V., & Gusakov, I. N. (2005). On the restoration of the Tuzla spit. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana [Geology and Minerals of the World Ocean]*, 2, 127–135 [in Russian].
6. Vize, V. J. (1927). The historical past of alluvial formations in the Kerch Strait, especially sand spit Tuzla. *Izvestiya Centralnogo gidrometeorologicheskogo bjuro [News of the Central Hydrometeorological Bureau]*, 7, 129–161 [in Russian].
7. Boldyrev, V. L. (1958). The processes of dying off of accumulative coastal forms on the example of the Kerch Strait. *Trudy IO AN [Proceedings of IO AS]*, 28, 85–92 [in Russian].
8. Zenkovich, V. P. (1958). *Berega Chernogo i Azovskogo morey [Shores of the Black and Azov Seas]*. Moscow: Geografizdat Publ., 302 p. [in Russian].
9. Ivanov, V. A., Ignatov, E. I., & Chistov, S. V. (2004). Origin, history of development and dynamics of the Tuzla Spit. *Ekologicheskaya bezopasost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 10, 198–206 [in Russian].
10. Nevesskiy, E. N. (1967). *Protsessy osadkoobrazovaniya v pribrezhnoy zone morya [Sedimentation processes in the coastal zone of the sea]*. Moscow: Nauka Publ., 127 p. [in Russian].
11. Byamba, O., & Kasyanova, E. L. (2021). The use of remote sensing and GIS in the creation of geographical bases for thematic maps. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(5), 119–125 [in Russian].
12. Krylenko, V. V., Krylenko, M. V., & Aleynikov, A. A. (2021). Possibilities of studying the relief and dynamics of the coastline of large marine accumulative forms according to remote sensing data on the example of the Dolgaya spit. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(3), 58–70 [in Russian].
13. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS). (n. d.). retrieved from <http://earthexplorer.usgs.gov> (accessed 01 February, 2022).
14. MultiSpectral Instrument (MSI). (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (accessed 12 December, 2021).

15. Sentinel Online technical website. (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (accessed 12 December, 2021).
16. The operational Copernicus optical high resolution land mission. (n. d.). Retrieved from http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (accessed 10 February, 2022).
17. Gao, B. C. (1996). NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
18. Krylenko, V., Krylenko, M., & Aleynikov, A. (2019). Revision of the coastline length of the Azov Sea according to remote sensing data. *Proceedings SPIE*, 11174, 111741B.
19. Budishev, I. M. (1808). *Lotsiya i morskoy putevoditel' po Azovskomu moryu [Sailing Directions and the sea guide to the Sea of Azov]*. Saint Petersburg, 78 p. [in Russian].
20. Diakov, N. N., Lipchenko, A. E., Fomin, V. V., & Cvecinskiy, A. S. (2017). About possible risks during construction and operation of the bridge across the Kerch Strait. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta [Proceedings of the State Oceanographic Institute]*, 218, 211–235 [in Russian].
21. Udovik, V. F., & Kharitonova, L. V. (2011). Features of sediment supply to the southeastern tip of the Tuzla Spit island depending on the direction of the gale. *Ekologicheskaya bezopasost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 1(25), 96–103 [in Russian].
22. Papakoma (Maps). (n. d.). Retrieved from <http://papakoma.narod.ru/maps-index.htm> (accessed 13 November, 2021).
23. Indian satellite IRS-1C: 10 years of impeccable service in orbit. (2006). Retrieved from <http://www.scanex.ru/company/news/ndiyskiy-sputnik-irs-1c-10-let-bezuprechnoy-sluzhby-na-orbite-199/> (accessed 15 February 2020).
24. Dzhiganshin, G. F., Motygin, A. C., Morozov, A. N., & Shutov, C. A. (2010). Hydrophysical characteristics of the Kerch Strait in December 2009. *Ekologicheskaya bezopasost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 23, 153–158 [in Russian].
25. Ivanov, V. A., Matishov, G. G., Kushnir, V. M., Berdnikov, S. V., Chepyzhenko, A. I., Povazhny, V. V., & Stepanyan, O. V. (2014). Strait of Kerch in the autumn of 2011: results of joint comprehensive research carried out in the expedition. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal [Physical Oceanography]*, 1, 44–57 [in Russian].
26. Morozov A. N., Lemeshko E. M., Ivanov V. A., Shutov S. A., & Zima, V. V. (2010). Currents in the Kerch Strait according to ADCP observations 2008-2009. *Ekologicheskaya bezopasost pribrezhnoy i shelfovoy zon morya [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea]*, 22, 253–267 [in Russian].
27. Fomin, V. V., & Ivanov, V. A. (2007). Coupled modeling of currents and wind waves in the Kerch Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 17, 253–268.

Author details

Viacheslav V. Krylenko – Ph. D., Senior Researcher.

Marina V. Krylenko – Ph. D., Leading Researcher.

Received 21.04.2022

© V. V. Krylenko, M. V. Krylenko, 2022