УДК 629.783:581.9(470.620)

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-169-180

МОНИТОРИНГ БЕРЕГА ВЕРБЯНОЙ КОСЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Вячеслав Владимирович Крыленко

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., 36, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, тел. (861)412-80-89, e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Марина Владимировна Крыленко

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., 36, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (861)412-80-89, e-mail: krylenko@mail.ru

Вербяной косой называют сформировавшуюся в течение последних 200 лет юго-западную часть морского края дельты р. Кубани. Для оценки тенденций современного развития этой аккумулятивной формы, динамики берега, интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов и эффективности существующих берегозащитных сооружений выполнены комплексные мониторинговые исследования, которые включали анализ данных дистанционного зондирования и картографического материала. Динамика берега Вербяной косы определяется совместным действием природных и антропогенных факторов. Береговая линия западной части косы за последние полвека выдвинулась на 200–400 м, восточнее берег отступил на 30–200 м. Хозяйственное освоение прилегающей к косе территории (разведка и добыча природного газа) вызвало необходимость стабилизации берега, для чего в 2007 г. была сооружена берегозащитная дамба. Мониторинг показал, что после создания дамбы наблюдается стабилизация берега Вербяной косы, но продолжают изменяться рельефа подводного берегового склона, связанные с адаптацией береговой системы к новым условиям. В настоящее время Вербяная коса развивается как природно-техногенная система.

Ключевые слова: Азовское море, аккумулятивная форма, дистанционные методы, морской край дельты, рельеф, динамика берега, мониторинг.

Введение

Глобальная направленность береговых процессов в настоящее время характеризуется повсеместным отступанием берегов, связанным с подъемом уровня Мирового океана и дефицитом твердого материала в береговой зоне. Интенсификация эрозии берегов и отступление береговой линии аккумулятивных береговых форм вызывает разрушение прибрежных ландшафтов и гражданских, промышленных и транспортных объектов, нанося значительный экономический ущерб. Для создания планов комплексного управления прибрежной зоной, которые позволяют минимизировать возможные негативные последствия для природы и экономический ущерб, необходимы постоянные мониторинговые исследования динамики берега [1]. Наиболее точные результаты могут дать натурные геодезические изыскания, проводимые непосредственно на морском берегу. Однако стоимость и трудоемкость таких изыска-

ний высока, поэтому при исследовании крупных береговых аккумулятивных форм рельефа, наряду с традиционными геодезическими методами, целесообразно использовать современные дистанционные методы.

Вербяная коса – это исторически сложившееся название аккумулятивной береговой формы барьерного типа, расположенной на юго-восточном побережье Азовского моря. Она является частью морского края дельты р. Кубани (рис. 1) и как единое аккумулятивное тело сформировалась в течение последних 200 лет (рис. 2) под влиянием одновременного действия природных и антропогенных процессов.

Исследования динамики морского края дельты р. Кубани начались еще с середины XIX в. [2]. В 1958 г. ученые ЧЭНИС ИО АН СССР выполнили комплексные исследования устьевой зоны р. Кубани [3]. С 1971 г. А. А. Иванов развернул наблюдения за перестройками пляжа и подводного склона Темрюкского залива [4].

Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка

Рис. 2. Берег в районе Вербяной косы: карты 1871 г. (слева) и 1902 г. (справа)

С середины XX в. на развитие берега Вербяной косы оказывается прямое или косвенное антропогенное воздействие. Создание в 1973–1976 гг. Краснодарского водохранилища и ряда гидротехнических сооружений значительно сократили объем твердого стока р. Кубани. В результате колебаний солености Азовского моря сократилась продуктивность популяций раковинных моллюсков,

створки которых (ракуша) являются важным пляжеобразующим материалом. Практически по всей длине морского края дельты р. Кубани сформировался режим дефицита пляжеобразующих наносов. В 1970-х гг. почти 48-километровый участок берега морского края дельты от Соловьевского гирла до Сладковского гирла (гирло – местное название пролива, соединяющего акваторию ла-

гуны с морем), подвергался размыву или находился в неустойчивом равновесии. Некоторое увеличение аккумуляции в конце 1980-х – начале 1990-х гг. было вызвано возрастанием твердого стока р. Кубани [5].

Для стабилизации размываемого берега и защиты хозяйственных (скважины по добыче природного газа) и природных (Рамсарские водно-болотные угодья) объектов в пределах Вербяной косы в 2007 г. был создан комплекс берегозащитных сооружений протяженностью 8,6 км [6]. В ходе строительства берегозащитного сооружения и в последующий период осуществлялся мониторинг Вербяной косы, включающий ежегодные топографо-батиметрические измерения надводной части и подводного склона аккумулятивной формы [5]. К сожалению, высокая изменчивость пляжа, подводных валов затрудняет получение достоверных сведений об их реальной динамике между съемками, проводимыми раз в год.

В представленной работе на основе данных, полученных со спутниковых снимков разных лет, проанализированы особенности динамики береговой линии и прибрежного рельефа Вербяной косы в период со второй половины XX в. до настоящего времени. Для выявления общих тенденций развития берега за еще более продолжительный период полученные данные были сопоставлены с архивными географическими картами (см. рис. 2).

Материалы и методы

Для мониторинга высокодинамичных природных процессов в береговой зоне Вербяной косы было выбрано использование данных спутникового зондирования. Спутниковые снимки применялись для определения положения береговой линии и его изменений, с целью выделения областей размыва и аккумуляции. Кроме того, современные спутниковые данные позволяют включать в число исследуемых объектов не только берег, но и прилегающую акваторию [7, 8].

Для дешифрирования объектов прибрежной зоны (в контактной области «суша – вода») применялись как визуальные [9], так и численные методы, основанные на спектральных свойствах водной поверхности.

Для исследования береговой зоны наиболее пригодны данные спутников сверхвысокого (около 1 м) разрешения: IKONOS, QuickBird, World View-1, World View-2, GeoEye-1, способных выполнять съемку в различных диапазонах спектра. Однако, архив выполненных съемок на исследуемую территорию мал. Природным процессам в районе Вербяной косы присуща высокая внутригодовая и межгодовая динамика, что вызывает необходимость использовать спутниковые данные, получаемые на регулярной основе. Ранее, в работах [7, 10] использовались снимки спутников серии LANDSAT и ASTER, удовлетворяющие требованиям временного охвата, периодичности съемки. Однако данные этих спутников имеют невысокое пространственное разрешение, что снижает их пригодность для детального картографирования береговой зоны.

По сочетанию характеристик оптимальными оказались данные с некоммерческих спутников Sentinel-2, оснащенных оптико-электронным мультиспектральным сенсором (MultiSpectral Instrument – MSI), выполняющим съемку в 13 спектральных каналах [11, 12]. Спутник Sentinel-2A был запущен в 2015 г., Sentinel-2B – в 2017 г. В пользу выбора данных Sentinel-2 [13] послужила высокая частота съемки; пространственный охват; наличие необходимых для определения границы «суша – море» спектральных каналов. Детальности снимков Sentinel-2 (10 м в пикселе) достаточно для точного определения положения береговой линии. Критериями отбора снимков служили: дата съемки, необходимый пространственный охват, минимальная облачность, качество изображения, мутность воды и состояние поверхности моря [14]. Поскольку штормовое волнение приводит к взмучиванию воды и искажает контур береговой линии, затрудняя определение положения линии уреза, выбирались снимки в период штиля. Для обработки снимков применялось программное обеспечение ScanEx Image Processor. Маска водной поверхности рассчитывалась с использованием формулы «normalized difference water index» (NDWI): $NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$, где Green

и NIR – соответственно зеленый и ближний инфракрасный спектральные каналы [15].

Для определения величин долгопериодной динамики исследуемого участка были использованы архивные космические снимки 1960–70-х гг., выполненные Геологической службой США [16]. Поскольку географическая «привязка» снимков отсутствовала, была проведена геометрическая коррекция снимков. Кроме того, была проведена коррекция привязки топографической карты РККА масштаба 1 : 50 000, составленной в 1943 г. на этот район. Привязка и оценка ее точности производились по контрольным точкам, представленным сохранившимися до настоящего времени точечными (здания) и линейными (дороги) объектами, имеющимися как на корректируемой карте, так и на современных снимках сверхвысокого разрешения с известными параметрами съемочных камер. Привязка по формам рельефа не производилась, так как за прошедшее время они могли существенно трансформироваться. Обработка растров и векторных данных производилась с использованием пакета Scanex Image Processor. Трансформация растра или вектора проводилась по полиномиальной модели второй или третьей степени. Оцениваемая точность плановой привязки архивных карт и космических снимков лежит в пределах 5–10 м, что достаточно для выявления и оценки величин долгопериодной динамики. Материалы собраны в ГИС с использованием технологии Scanex WEB GeoMixer.

Вербяная коса как часть морского края дельты р. Кубани

Морфологически Вербяная коса является участком берегового бара – аккумулятивной формы рельефа, образовавшейся в результате преобладающего поперечного перемещения и отложения наносов, которая примыкает с востока к устью Петрушиного рукава в дельте р. Кубани (рис. 3). Морской край дельты р. Кубани представляет собой аккумулятивный контур «дельты выполнения» протяженностью около 115 км от устья Петрушина рукава (г. Темрюк) до оконечности Ачуевской косы (г. Приморско-Ахтарск). Большая часть ее площади представлена плавнями,

ограниченными аккумулятивными формами – грядами. Гряды представляют собой древние песчано-ракушечные морские береговые или песчаные речные приустьевые валы, маркирующие отдельные этапы развития дельты. В формировании этих валов на разных этапах эволюции дельты и в разных ее частях определяющим было влияние речного аллювия или морских наносов [17–19].

С морской стороны дельта прикрыта современным береговым валом. На приустьевых участках основным источником наносов для формирования этого аккумулятивного тела является речной аллювий, преимущественно песок. Материал под действием волн вовлекается во вдольбереговую перенос и перемещается на смежные участки берега. С удалением от устий повышается роль биогенного материала, поступающего со дна Азовского моря. В вогнутых участках берега и на входах в заливы происходит аккумуляция материала, формируются бары и пересыпи. В итоге, морской край дельты р. Кубани, с геоморфологической точки зрения, является сложной аккумулятивной формой окаймляющего типа. Фактически, это единая береговая аккумулятивная форма, с чередующимися участками аккумуляции, транспорта и размыва.

В пределах Вербяной косы имеется несколько естественных или искусственных водотоков, через которые происходит сброс воды из лиманов, лагун и каналов. На западе коса примыкает к Петрушиному рукаву р. Кубани (см. рис. 3). Далее, к востоку, расположены гирла Соловьевское, Новокуликовское, Куликовское, Зозулиевское. В пределах тыльной части аккумулятивного тела имеется множество искусственных каналов.

Для р. Кубани характерна высокая изменчивость объемов жидкого и твердого стока из-за природных и антропогенных факторов [17, 19]. В периоды поступления большого объема твердого стока в Азовское море происходит выдвигание дельты на приустьевых участках. В периоды дефицита наносов происходит выравнивание дельтовых выступов и образование выраженной аккумулятивно-абразионной дуги, опирающейся концами на выступы коренного берега или приустьевые участки.

Рис. 3. Вербяная коса и динамика ее берега

Строение и литодинамика Вербяной косы

Анализ топографических карт и космических снимков показал, что разные участки Вербяной косы в разные временные периоды развивались по-разному. Наибольшие скорости роста дельты (до 60 м/год) наблюдались в период 1940–1970 гг. (рис. 4, а). Общее выдвижение дельты в акваторию Азовского моря составило около 2 км. По мере роста дельты существенно менялся волновой ре-

жим приустьевое участка. Западный участок косы, примыкающий к Соловьевскому гирлу, в 1964–1971 гг. находился в квазистационарном состоянии. С 1971 по 2019 г. берег на этом участке, защищаемый от волнения растущей дельтой Петрушина рукава, выдвинулся на 200–400 м (рис. 4, а, в). Восточнее Соловьевского гирла, где экранирующее действие дельты Петрушина рукава ослабевало, преобладал размыв, скорость которого существенно различалась на разных участках. На западной части, до Ново-

Куликовского гирла, значительное отступление (30–40 м) наблюдалось в период 1964–1971 гг. Позднее, скорость отступления на этом участке существенно снизилась. Восточнее Ново-Куликовского гирла в период 1964–1971 гг. берег был стабилен, позднее начался размыв, его величина уменьшалась с ЮЗ к СВ. В целом, на размываемых участках Вербяной косы между Куликовским и Соловьевским гирлами за период с 1973 по 2006 г. береговая линия отступила на 80–200 м. В 2003–2006 гг. была размыта грунтовая дорога в тыльной части Вербяной косы [20].

На ЮЗ краю аккумулятивной дуги в условиях сильных северо-восточных штормов, обеспечивающих подход волн под острым углом к береговой линии, возникают вдоль-береговые течения [5]. Наносы при этом смещаются в сторону взморья Соловьевского гирла. Дельта Петрушиного рукава Кубани на этом участке блокирует волнение западных румбов и способствует устойчивой аккумуляции наносов. На рис. 4, а, в видно, что на этом участке берег выдвинулся на 400–500 м.

Участок между гирлами Соловьевское и Куликовское относится к центральной части аккумулятивной дуги, где эта дуга еще не выработалась до равновесного состояния. Именно на этом участке наблюдалось наибольшее отступление берега (рис. 4, а), а впоследствии была сооружена защитная дамба (рис. 5). Мониторинговые наблюдения за перестройками пляжа и подводного склона после строительства волногасящей дамбы [5] показали, что прогрессирующее ранее отступление берега прекратилось. Несмотря на прохождение нескольких штормов экстремальной силы (в 2007, 2014, 2017 гг.), линия уреза в течение всего периода почти не отступала от положения 2007 г. Наблюдались лишь локальные изменения рельефа пляжа во время штормов, носящие знакопеременный характер. Дамба прекратила поперечный уход наносов из приустьевой зоны на лиманно-лагунную сторону аккумулятивной формы. Таким образом, построенное волногасящее сооружение на данном участке обеспечивает стабильность берега.

Рис. 4. Динамика берега Вербяной косы

Севернее Куликовского гирла, вплоть до устья Морского Сбросного канала, конфигурация берега способствует формированию подводного бара. Бар формируется вдоль линии аккумулятивной дуги с равновесным морфо-литодинамическим режимом [19] (см. рис. 3). Этого участка не достигают наносы, движущиеся с севера (со стороны устья Протоки), и с юга (со стороны устья Петрушина рукава). Вероятно, при сохранении объемов речного твердого стока, наблюдавшихся в первой половине XX в., эти два встречных потока наносов могли встретиться. В результате тут могла бы сформироваться полноценная пересыпь. Однако, в современных условиях, объем и гранулометрический состав имеющихся наносов пляжеобразующей крупности достаточен лишь для формирования цепи отмелей вдоль гребня подводного бара. Анализ космических снимков показывает, что с 1964 по 1971 г. морской край этого бара незначительно выдвинулся в сторону моря. Впоследствии, с 1971 по 2016 г., морской край сместился к берегу, величина этого смещения составила около 50 м. Тыльный край бара одновременно надвинулся на лагуну. Поскольку разрушение наиболее крупных волн происходит на морской стороне бара, в лагуне сформировались условия для аккумуляции наносов. Мелководная зона быстро осваивается тростниково-рогозовыми зарослями, играющими роль волногасителя. На рис. 6 видно, что с 2003 по 2019 г. граница растительности в лагуне выдвинулась на 50–100 м.

На большей части исследуемого участка вдоль берега протягивается система подводных валов. Для участков с относительно крутым подводным склоном характерны три типа валов: относительно однородный и параллельный берегу двумерный вдольбереговой вал; изменчивый по конфигурации и профилю трехмерный вал и примыкающий вал, который на определенных участках примыкает к пляжу. Такие типы валов формируются на открытом берегу при высоких значениях волновой энергии. Двумерные валы соответствуют наиболее высокому уровню энергии в условиях развитого обрушения и диссипации волн [19]. Когда энергия уменьшается, валы могут мигрировать к берегу и изменяться от двумерных к трехмерным и к примыкающим, при этом высота их уменьшается. Величина и знак изменений структуры подводных валов существенно зависит от силы и направления волнения и уровня моря. При юго-восточных и восточных ветрах (с берега), сопровождающихся сгоном, наблюдается выполаживание подводного склона и уменьшение числа валов [5]. Одновременно прогрессирует размыв подводного склона. Вероятно, подобный феномен объясняется влиянием сильных вдольбереговых течений. При штормах от северо-запада и запада (близких к нормали относительно линии берега) происходит некоторое «сжатие» подводного склона с возрастанием числа подводных валов. При сильных западных штормах 2011–2012 гг. на всех профилях зафиксирована значительная аккумуляция [6].

Рис. 5. Волногасящая дамба (фото Н. А. Пикаловой, 2019 г.)

Рис. 6. Освоение растительностью отмелей в лагуне

На участках с низкими значениями волновой энергии – с выраженным подводным баром и широкой прибрежной отмелью – отмечены структуры множественных параллельных валов. Эти структуры формируются вдоль гребня бара и в лагуне, валы отстоят друг от друга на примерно одинаковые расстояния 20–30 м (рис. 7). На рис. 7 показаны изменения структуры таких подводных валов в северо-восточной части Вербяной косы. Как видно, изменения конфигурации валов происходят достаточно быстро, а при резком падении уровня валы размываются, превращаясь в пологую отмель.

Заключение

Использование только наземных геодезических наблюдений за динамикой берега не отвечает современным требованиям к пространственному охвату и частоте монито-

ринговых измерений. Применение данных спутниковой съемки высокого разрешения и геоинформационных технологий позволяет осуществлять мониторинг текущих изменений состояния береговой зоны на новом уровне. Исследования, проведенные с применением современных дистанционных методов, позволили существенно дополнить материалы наземного геодезического мониторинга крупной береговой аккумулятивной формы – Вербяной косы. Новые технологии компьютерной обработки пространственных данных позволили использовать архивные карты и космические снимки для получения достоверной информации по долгопериодной динамике исследуемого берега и отдельных компонентов геосистемы.

Анализ топографических карт и космических снимков за 80-летний период показал, что разные участки Вербяной косы в разные временные периоды развивались по-разному.

Рис. 7. Динамика и структура системы береговых валов

Формирование Вербяной косы как единого аккумулятивного тела началось лишь после начала поступления аллювия Петрушина рукава р. Кубани непосредственно на берег Азовского моря. В этот период преобладало вдольбереговое перемещение наносов, по-

ступающими наносами были перекрыты гирла морских заливов, ставших лагунами. Впоследствии выдвижение дельты Петрушина рукава, которое наблюдалось в середине XX в., изменило волновой режим приустьевое участка Вербяной косы. В резуль-

тате, береговая линия западной части косы, примыкающей к новой дельте, за последние полвека выдвинулась на 200–400 м. Восточнее, где экранирующее действие дельты Петрушина рукава проявлялось слабее, берег косы отступил на 30–200 м. В настоящее время построенное берегозащитное сооружение обеспечивает стабильность берега, и линия уреза сохраняет положение 2007 г.

Изучение особенностей строения и современной динамики аккумулятивной формы Вербяная коса показало преобладание поперечного движения наносов на данном участке морского края дельты р. Кубани. Характерной чертой современной береговой зоны Вербяной косы является наличие динамичной системы подводных валов. Кроме того, вдоль линии аккумулятивной дуги с равновесным литодинамическим режимом наблюдается формирование подводного бара. Следовательно, данная аккумулятивная форма в настоящее время развивается как бар или пересыпь, а не как коса.

Таким образом, на основе анализа архивных карт и космических снимков, современ-

ных данных наземных геодезических изысканий и материалов дистанционного зондирования, установлено, что динамика берега Вербяной косы длительный период определялась выдвиганием морского края дельты р. Кубани и изменениями ветро-волнового режима. С середины XX в. важным фактором развития аккумулятивной формы стало антропогенное влияние. В настоящее время Вербяная коса развивается как природно-техногенная система.

Благодарности

Полевая часть работ выполнена при поддержке РФФИ (проекты 19-45-230004 и 18-05-00333). Систематизация материалов дистанционного зондирования реализована при поддержке РНФ (проект 20-17-00060). Использованы сведения о развитии берега дельты р. Кубани, гидрологических и гидролитодинамических особенностях, полученные при выполнении темы Госзадания № 0149-2019-0014.

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. Данилевский Р. Я. Исследования о Кубанской дельте // *Записки Русского Географического Общества*. – 1869. – Т. 2. – С. 1–124.
3. Артюхин Ю. В., Федорова С. И. Пространственно-временные черты эволюции морского края дельты Кубани и природные аспекты некоторой ее гидротехнической корректировки. // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2007. – № 10. – С. 60–69.
4. Иванов А. А. Динамика наносов на взморье Кубани // *Труды ГОИН*. – 1984. – Вып. 172. – С. 42–50.
5. Артюхин Ю. В., Федорова С. И. Оценка устойчивости волногасящего сооружения и косы Вербяной по данным геоморфологического мониторинга // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2014. – № 11. – С. 56–64.
6. Погорелов А. В. Исследование динамики береговой зоны Азовского моря по данным космических снимков // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. – 2011. – № 12. – С. 19–27.
7. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Исследование подводного рельефа Бакальской банки по данным космических снимков Sentinel-2 // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2019. – № 2. – С. 30–39.
8. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А. В. Полуянова, В. А. Мелкий // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 65–81.
9. Погорелов А. В., Антоненко М. В. Применение космических снимков в исследовании динамики береговой зоны Азовского моря: возможности и результаты анализа // *Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета*. – 2011. – № 2. – С. 95–98.
10. The operational Copernicus optical high resolution land mission [Electronic resource]. – Mode of access: http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (дата обращения: 15.02.2020).

11. MultiSpectral Instrument (MSI) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (дата обращения: 15.01.2020).
12. Sentinel Online technical website [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (дата обращения: 10.12.2019).
13. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Уточнение длины береговой линии Азовского моря с использованием данных спутников Sentinel-2 // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 78–92.
14. 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.
15. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://earthexplorer.usgs.gov>.
16. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани / В. Н. Михайлов, Д. В. Магрицкий, А. А. Иванов и др. – М. : ГЕОС, 2010. – 728 с.
17. Krylenko M., Kosyan R., Krylenko V. Lagoons of the smallest Russian sea / Part of the series «Estuaries of the World», Chapter: The diversity of Russian estuaries and lagoons exposed to human influence / R. Kosyan (Ed.). – Springer International Publishing, 2017. – P. 111–148.
18. Федорова С. И., Артюхин Ю. В., Кушу Э. Х. Развитие кос на южном фланге дельты Кубани под действием гидрометеорологических и геодинамических факторов // Тридцать третье пленарное межвузовское совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. – Нижневартоск : НВГУ, 2018. Т. 2. – С. 159–161.
19. Инженерные решения стабилизации Вербяной косы Темрюкского района / Ю. В. Артюхин, С. И. Федорова, Э. Х. Кушу, В. В. Пинигина, С. К. Герасименко // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2007. – № 9. – С. 78–82.
20. Леонтьев И. О. Подводные валы на песчаных берегах // Океанология. – 2011. – Т. 51, №. 1. – С. 146–152.

Получено 14.04.2020

© В. В. Крыленко, М. В. Крыленко, 2020

COASTAL MONITORING OF THE VERBYANAYA SPIT BY SATELLITE DATA

Viacheslav V. Krylenko

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Southern Branch, 36, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117997, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (86141)2-80-89, e-mail: krylenko.slava@gmail.com

Marina V. Krylenko

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Southern Branch, 36, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117997, Russia, Ph. D., Leading Researcher, phone: (86141)2-80-89, e-mail: krylenko@mail.ru

The Verbyanaya spit is the south-western part of the sea edge of the Kuban river Delta, which was formed during the last 200 years. Complex monitoring studies including analysis of remote sensing data and cartographic material were performed for estimation of modern development trends of this accumulative form, coastal dynamics, the intensity of erosion-accumulative processes and the effectiveness of coast protection structures. The coastal dynamics of the Verbyanaya spit during last 150 years was determined by combined action of natural and anthropogenic factors. For last half a century the coastline of spit western part came forward to 200-400 m and the east spit coast retreated to 30-200 m. Economic development of adjacent area (natural gas exploration and production) has caused the need to stabilize the coast, and coastal protected dam was built in 2007. Monitoring showed that spit coast stabilized after creation of the dam, but changes of the underwater slope relief continued. Currently Verbyanaya spit develops as natural-anthropogenic system.

Key words: Sea of Azov, accumulative form, remote sensing, delta, relief, coastal dynamics, monitoring.

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. Danilevsky, R. Ya. (1869). Research on the Kuban Delta. *Zapiski RGO [Note of RGS]*, 2, 1–124 [in Russian].
3. Artyukhin, Yu. V., & Fedorova, S. I. (2007). Spatial and temporal features of the sea edge evolution of the Kuban Delta and natural aspects of some of its hydrotechnical adjustments. *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse [Environmental Protection in the Oil and Gas Industry]*, 10, 60–69 [in Russian].
4. Ivanov, A. A. (1984). Dynamics of sediment on the Kuban coast. *Trudy GOIN [Proceedings of GOIN]*, 172, 42–50 [in Russian].
5. Artyukhin, Yu. V., & Fedorova, S. I. (2014). Assessment of the stability of the wave damping structure and the Verbyanaya spit according to geomorphological monitoring data. *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse [Environmental Protection in the Oil and Gas Industry]*, 11, 56–64 [in Russian].
6. Pogorelov, A. V. (2011). Study of the coastal zone dynamics of the Sea of Azov based on satellite images. *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse [Environmental Protection in the Oil and Gas Industry]*, 12, 19–27 [in Russian].
7. Krylenko, V. V., Krylenko, M. V., & Aleynikov, A. A. (2019). Investigation of the underwater relief of the Bakalskaya Bank based on Sentinel-2 satellite images. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morya [Environmental Safety of Coastal and Offshore Zones of the Sea]*, 2, 30–39 [in Russian].
8. Dolgoplov, D. V., Nikonov, D. V., Poluyanov, A. V., & Melky, V. A. (2019). Visual interpretation of main pipelines and infrastructure objects using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(3), 65–81 [in Russian].
9. Pogorelov, A. V., & Antonenko, M. V. (2011). Application of satellite images in the study of the coastal zone dynamics of the Sea of Azov: opportunities and results of analysis. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the North Caucasus State Technical University]*, 2, 95–98 [in Russian].
10. The operational Copernicus optical high resolution land mission. (n. d.). Retrieved from http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf (accessed 15.02.2020).
11. MultiSpectral Instrument (MSI). (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload> (accessed 15.01.2020).
12. Sentinel Online technical website. (n. d.). Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/product-formatting> (accessed 10.12.2019).
13. Krylenko, V. V., Krylenko, M. V., & Aleynikov, A. A. (2019). Specifying the length of the Azov sea coastline using satellite data Sentinel-2. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 78–92 [in Russian].
14. 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.
15. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS). (n. d.). Retrieved from <http://earthexplorer.usgs.gov>.
16. Mikhailov, V. N., Magritsky, D. V., & Ivanov A. A. (2010). *Gidrologiya del'ty i ust'evogo vzmor'ya Kubani [Hydrology of the Delta and Estuarine Coast of Kuban]*. Moscow: GEOS Publ., 728 p. [in Russian].
17. Krylenko, M., Kosyan, R., & Krylenko, V. (2017). *Lagoons of the smallest Russian sea / Part of the series "Estuaries of the World", Chapter: The diversity of Russian estuaries and lagoons exposed to human influence* (pp. 111–148 p.). Springer International Publishing.
18. Fedorova, S. I., Artyukhin, Yu. V., & Kushu, E. H. (2018). Development of spits on the southern flank of the Kuban Delta under the influence of hydrometeorological and geodynamic factors. In *Sbornik materialov XXXIII mezhevuzovskogo soveshchaniya po probleme erozionnyh, ruslovyh i ust'evykh processov: T. 2 [Proceedings of XXXIII Interuniversity Meeting on the Problem of Erosion, Riverbed and Estuarine Processes: Vol. 2]* (pp. 159–161) Nizhnevartovsk: NVGU Publ. [in Russian].
19. Artyukhin, Yu. V., Fedorova, S. I., Kushu, E. H., Pinigina, V. V., & Gerasimenko, S. K. (2007). Engineering solutions to stabilize the Verbyanaya spit Temryuk district. *Zashchita okruzhayushchej sredy v neftegazovom komplekse [Environmental Protection in the Oil and Gas Industry]*, 9, 78–82 [in Russian].
20. Leontiev, I. O. (2011). Underwater bars on sandy shores. *Okeanologiya [Oceanology]*, 51(1), 146–152 [in Russian].

Received 14.04.2020

© V. V. Krylenko, M. V. Krylenko, 2020