

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.54:528.8

СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ДЕЛЬТЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ¹

© 2023 г. В. И. Кравцова^а, *, О. В. Вахнина^а, С. В. Лебедева^б,
Е. Г. Харьковец^а, Е. Р. Чалова^а

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119992 Россия

^бСеверное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
Архангельск, 163001 Россия

*e-mail: valentinamsu@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.12.2021 г.

После доработки 27.05.2022 г.

Принята к публикации 09.06.2022 г.

Многолетняя динамика дельты Северной Двины изучена при сравнении космических снимков 1977 и 2020 гг. Составленная по ним карта динамики дельты показывает, что продолжается отмечавшееся и ранее нарастание островов морского края дельты и их присоединение к дельте, увеличение русловых островов в основных рукавах, сужение и исчезновение мелких водотоков на островах дельты. Но к этой долговременной тенденции продолжающегося нарастания площади дельты добавились процессы размыва берегов островов морского края дельты со стороны Двинского залива.

Ключевые слова: дельта, аккумуляция, размыв, космические снимки, карта динамики.

DOI: 10.31857/S0321059623010108, **EDN:** EDDNXI

Потепление климата, особенно сильно проявляющееся в Арктике, сокращение площади морских льдов и в связи с этим возобновление Северного морского пути усилили интерес к дельтам северных рек, представляющим замыкающие звенья выхода водного транспорта к океану. Исследования изменений этих дельт основаны на материалах космической съемки, накапливающихся с 1970-х гг. Работы лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, выполненные по арктическому проекту для устьев крупнейших рек азиатской части России – дельт Лены и Енисея, показали, что для этих дельт характерен переход от преобладавших в предыдущий период процессов аккумуляции отложений и постепенного нарастания дельт к процессам размыва морского края и берегов рукавов дельт [10, 11].

В настоящей работе исследуется динамика дельты Северной Двины – одной из наиболее хозяйственно освоенных и урбанизированных дельт, представлявшей собой морские ворота России с допетровских времен. Здесь находится

крупный порт Архангельск. В связи с активным транспортным использованием Северной Двины рукава дельты многократно картографировались. Исторические картографические материалы за последние 350 лет, начиная от английских и голландских карт устья Северной Двины (1651 г.) и включая российские планы и карты дельты начала XX в., детально проанализированы в монографии [3]. Однако пока не было создано единой карты, характеризующей многолетнюю динамику дельты. Задача настоящей работы – составление такой карты, фиксирующей изменения береговой линии островов и рукавов дельты, что позволило бы выявить современные тенденции развития дельты. Эта задача решается на основе получаемых с 1970-х гг. материалов космической съемки, имеющих достаточное пространственное разрешение. Решение этой задачи осложнено сильной межгодовой и сезонной изменчивостью уровня воды, сгонно-нагонными и приливно-отливными явлениями.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований находится в подзоне северной тайги таежной зоны. Климатические

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-05-60221 и 19-35-60032).

условия бассейна характеризуются продолжительной и холодной зимой, коротким прохладным летом и значительным количеством осадков – 500 мм/год, 70% которых приходится на теплую половину года.

Северная Двина – одна из крупных рек европейской части России с объемом водного стока в замыкающем створе Усть-Пинега 104 км³/год (1882–2013 гг.), увеличивающимся к морю до 107 км³/год [12]. Сток взвешенных наносов – 4.5 млн т/год. Образованная слиянием рек Сухоны и Юг в северной части Восточно-европейской равнины река впадает в Двинский залив Белого моря, формируя много рукавную приливную дельту выдвигая площадью 893 км² [13]. Юго-восточная узкая часть Двинского залива представляет собой открытое приглубое устьевое взморье – вслед за мелководным (2–5 м) устьевым баром шириной 5–8 км идет свал глубин 8–10 м. Устьевая область относится к дельтово-эстуарному типу [14]. В ее состав входит участок реки, на котором заметны приливные и сгонно-нагонные колебания уровня, простирающийся вверх по течению на 135 км до устья р. Пинеги, и много рукавная дельта, имеющая форму, близкую к равностороннему треугольнику, ее ширина вдоль морского края 45 км, а длина главного рукава 42 км. Вершина дельты находится вблизи центра г. Архангельска, откуда веерообразно расходятся основные рукава Никольский, Мурманский, Корабельный, Маймакса, которые перед выходом к взморью образуют три устьевых расширения эстуарного типа – Пудожемское, Мурманское и Корабельное. Основной судовой ход проходит в настоящее время по восточному рук. Маймакса, а в Корабельном устьевом расширении он продолжается по искусственному морскому каналу, в котором для поддержания навигационных глубин регулярно проводится ремонтное углубление дна на занесенных участках акватории с опорой на цифровые модели рельефа дна, получаемые в ходе ежегодных (с 2004 по 2017 г.) гидрографических съемок [7]. Через Корабельное устье поступает в Двинский залив основная часть (45.3%) стока реки, через Пудожемское устье – 31.2, через Мурманское – 23.5% [2]. Сток взвешенных наносов по водотокам дельты находится в соответствии с объемом стока воды по ним.

По гидрологическому режиму Северная Двина относится к рекам с весенним половодьем, преобладающее питание – снеговое; тип водного режима – восточноевропейский, ~50% стока приходится на период с мая по июнь.

Устье Северной Двины – приливное. Период приливных колебаний составляет ~12.5 ч. На морском крае дельты величина сизигийного прилива ~1.3 м, квадратурного – до 0.8 м. Приливы классифицируются как полусуточные, асиммет-

ричные и осложнены специфическим явлением, называемым “маниха”, – приостановка или замедление подъема уровня во время прилива [15]. При сильных северо-западных ветрах, обычно в октябре–ноябре, в устье Северной Двины формируются нагоны высотой ~1 м, распространяющиеся примерно до с. Усть-Пинега – вершины устьевой области [4].

Окаймляющие дельту со стороны моря острова морского края – Голец, Кумбыш, Гремиха – образовались как серии причлененных к берегу береговых валов, превратившихся в песчаные гряды, зарастающие редколесьем, чередующиеся с обводненными ложбинами. Крупные острова средней части дельты – Угломин, Лясомин, Никольский – в прошлом также образовались причленением к берегу береговых валов, но впоследствии были преобразованы процессами торфообразования и заняты грядово-мочажинными озерковыми болотами, с лесами по прирусловым валам многочисленных водотоков. Острова в привершинной части дельты, образованные аккумуляцией речных наносов, покрыты ровными низменными заболоченными лугами с пойменной разнотравно-крупнозлаковой растительностью. Окружающие дельту ледниковые моренные равнины с многочисленными озерами заняты хвойными еловыми и сосновыми лесами с примесью мелколиственных пород и болотами.

В вершине дельты Северной Двины находится один из крупных воднотранспортных узлов Европейского севера России – Архангельск. На морском крае дельты – в Северодвинске действуют крупные судостроительный и судоремонтный заводы. Берега дельтовых рукавов и проток в значительной степени освоены, на них размещены лесозаготовительные и лесоперерабатывающие предприятия. Заболоченные земли островов мелиорируются и используются как луга и пастбища, а также под лесопосадки.

Велико историко-культурное значение региона, на протяжении нескольких веков игравшего роль морских ворот России.

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДИНАМИКЕ ДЕЛЬТЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ

Дельта Северной Двины довольно хорошо изучена. Давнее заселение территории и ее активное хозяйственное использование, систематические гидрологические наблюдения, проводимые с 1881 г. [4], палеогеографические исследования [6] и составленная В.Н. Коротаевым с их учетом геоморфологическая карта [1], выполненные на местности локальные измерения разрушения берегов [3] – способствовали тому, что у специали-

стов сложились определенные представления о динамике дельты.

Формирование дельты Северной Двины, начавшееся 5–7 тыс. лет назад, при заполнении наносами ингрессионного залива, образовавшегося в ходе последней послеледниковой трансгрессии [8], детально охарактеризовано геоморфологами [9] на основе материалов палеогеографических исследований [6]. Выделены три стадии развития дельты в голоцене: эстуарий (позднеледниковье–ранний голоцен); лагуна (средний голоцен); дельта выдвигания, начавшаяся в среднем голоцене и продолжающаяся в настоящее время.

Главные факторы современной динамики дельты – гидрологические, речные (сток воды и наносов); на них накладываются морские факторы (волнение, вдольбереговые течения, нагонные и приливные колебания уровня), максимальное воздействие которых – на внешней границе подводного устьевого конуса выноса (бара) [8].

Вдоль морского края дельты, где сильно действие морских факторов, дельту обрамляют острова волноприбойного происхождения [2]. Материал для их формирования, кроме осаждающегося на устьевом बारे речного аллювия, дает поток песчаных наносов с СВ. Правый берег Двинского залива (Зимний берег), приподнятый, сложенный осадочными породами и перекрывающимися их ледниковыми отложениями, обрывается к морю 30-метровым клифом. Его выступы – мысы Куйский и Толстоменский – размываются и дают начало потоку наносов, следующему на Ю, а затем поворачивающему вслед за изгибом берега на ЮЗ и участвующему в переформировании островов вдоль морского края дельты [16]. Молодые береговые валы на периферии этих островов, по мнению геоморфологов, прирастают и до настоящего времени [9]. Морской край дельты в 1932–1960 гг. интенсивно выдвигался в районе Поганого и Пудожемского устьев, а морской канал заносился речными наносами в период весеннего половодья и морскими в осенне-зимний период, слой отложений достигал 75 см [2], и это – проблема, обусловившая необходимость оценки заносимости судоходных каналов и в настоящее время [7].

Особенность вековой динамики дельты – устойчивая тенденция к смещению трех основных рукавов дельты к В за счет боковой эрозии правых берегов; за 5000 лет это смещение достигло 5–7 км [5], что отражает геоморфологическая карта дельты [1]. В противоположность этому низменные левые берега рукавов и острова южной части дельты, примыкающие к вершине, – районы современной речной аккумуляции за счет отложения речных наносов в половодье [9].

Таким образом, по материалам проведенных исследований сложилось представление о выдвигании дельты Северной Двины в залив, происшедшем в течение тысячелетий, и о продолжении нарастания в настоящее время – причленении береговых валов к островам морского края. Цель настоящей работы – проверка правильности сложившихся представлений на основе объективной картины произошедших за последние десятилетия изменений при сопоставлении разновременных материалов космической съемки. Для этого необходимо по разновременным космическим снимкам составить карту динамики дельты, что в условиях приливной дельты представляет не простую задачу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выбор и подготовка снимков

Для исследования современного состояния дельты использованы снимки со спутника Sentinel 2В с атмосферной и геометрической коррекцией, полученные через архивы Европейского космического агентства ESA. Съемка с этого спутника ведется в 12 спектральных каналах видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазона с разрешением 10 м в основных из них. В качестве основного выбран безоблачный снимок за 18.07.2020, сделанный в период межени при отсутствии нагонов, до достижения среднего уровня прилива.

Для характеристики по возможности наиболее раннего состояния дельты по снимкам относительно высокого разрешения использованы безоблачные снимки с американского разведывательного спутника KeyHole-9, полученные через архивы USGS на 7.07.1977 г. – также в межженный период при отсутствии нагонов и в близкой по времени съемки в 2020 г. фазе прилива. Фазы приливо-отливных колебаний и уровня воды в момент получения снимков установлены по данным Морских гидрометеорологических станций “Северодвинск” и “Мудьюг” и Морского гидрометеорологического поста “Соломбала” (табл. 1).

Панорамные снимки KeyHole на панхроматическую фотопленку, покрывающие территорию дельты в виде восьми кадров – полос шириной 17 км, соединены в фотоплан с коррекцией панорамных искажений исходных снимков по методике [17], применением блочной фототриангуляции, ортотрансформирования с использованием цифровой модели рельефа AsterDEM и составлением мозаики из обработанных снимков. Для геометрического согласования разновременных материалов трансформирование фотоплана в проекцию UTM/WGS84 проводилось с использованием координат свыше 100 опорных точек, опознанных на более детальном снимке Sentinel

Таблица 1. Характеристика снимков и уровней воды в момент съемки (для материалов съемки KeyHole-9 приведено разрешение использованных в работе цифровых снимков, полученных сканированием фотопленочных оригиналов)

Спутник/ съёмочная система	Разрешение снимков, м	Дата и время съёмки	Уровень воды в момент съёмки по данным		
			морских гидрометеорологических станций		морского гидрологического поста “Соломбала”
			“Северодвинск”	“Мудьюг”	
KeyHole-9/ панорамная фотокамера	15	07.07.1977. 11:35 ± 15 мск	–0.18 м БС	–0.32 м БС	–0.27 м БС
Sentinel-2В (MSI)	10	18.07.2020. 11:45 мск	–0.35 м БС	–0.41 м БС	–0.63 м БС

2В (18.07.2020). Точность фотоплана оценивается исполнителями в 10–30 м на различных его участках в зависимости от их обеспеченности опорными точками.

Для учета приливно-отливных колебаний положения береговой линии были отобраны восемь снимков Sentinel 2В, полученных в разные фазы прилива–отлива в период межени 2020 г.

Кроме основных сравниваемых снимков KeyHole/9 07.07.1977 и Sentinel-2В 18.07.2020 для контроля промежуточных изменений использованы снимки со спутника Landsat/ETM 2000, 2001 гг., а также снимки высокого разрешения, включенные в “историческую линейку” снимков информационной системы GoogleEarth.

Для увеличения временного интервала анализа использовались обзорно-топографические карты масштаба 1 : 500000 1966 г. и масштаба 1 : 200000 1980 г.

Определение береговых линий (границы вода–суша) на разновременных снимках, их совмещение (создание “предкарты”) и составление карты динамики дельты

Положение береговой линии на начальную дату 1977 г. определено визуальным дешифрированием снимков KeyHole с точностью 20–50 м, зависящей от степени выраженности береговой линии на панхроматических снимках и точности фотоплана. Береговая линия 2020 г. определена по контролируемой классификации “воды” и “суши” по снимку Sentinel-2В методом минимального расстояния с точностью, сопоставимой с разрешением исходного снимка 10 м. При совмещении береговых линий 1977 и 2020 гг. получена “предкарта”, отображающая появление воды на месте суши (размыв берегов, затопление) и образование суши на месте воды (выдвижение берега в результате аккумуляции наносов, образование островов). Для оценки достоверности выяв-

ленных многолетних изменений использовалась рабочая карта, составленная путем сложения восьми предварительно преобразованных снимков Sentinel 2В, показывающих положение береговой линии в разные фазы прилива–отлива. “Предкарта” содержит информацию об изменениях береговой линии и площадей участков суши и акватории и играет роль источника для создания карты динамики дельты, при составлении которой выполняется отбор контуров в соответствии с определенной ранее точностью обработки снимков и масштабом создаваемой карты, и при необходимости осуществляется переход к внemasштабным обозначениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ДЕЛЬТЫ

Составленная карта отражает динамику дельты с 1977 г. – с того времени, когда появились космические снимки, достаточно детальные для анализа изменений береговой линии. На более ранние сроки береговая линия зафиксирована топографическими и обзорно-топографическими картами, созданными по материалам аэрофото-съемки 1960-х гг. Поэтому чтобы увеличить временной интервал анализа, в дополнение к составленной карте динамики дельты использована близкая к ней по детальности обзорно-топографическая карта масштаба 1 : 500000 1966 г. Для контроля изменений в пределах длительного 43-летнего периода (1977–2020 гг.) использованы снимки со спутника Landsat/ETM 2000 и 2001 гг.

Последовательный анализ выявленных изменений осуществлялся по морфологически различающимся районам дельты. На рис. 1 воспроизведена уменьшенная копия составленной карты динамики дельты и представлена нарезка фрагментов карты для анализа.

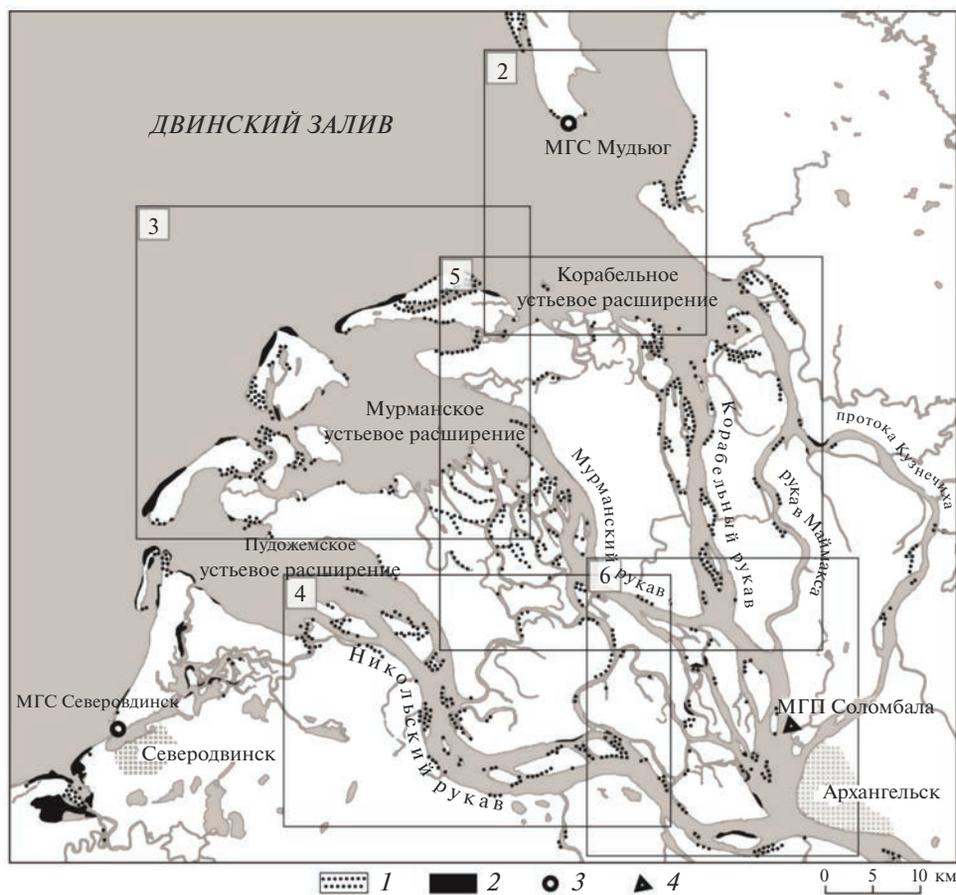


Рис. 1. Уменьшенная копия карты динамики дельты Северной Двины 1977–2020 гг.: 1 – аккумуляция отложений, выдвигание берега, исчезновение водотоков; 2 – размыв, затопление, отступление берега; 3 – морские гидрометеорологические станции; 4 – морской гидрометеорологический пост. Отмечены рамки участков, показанных на рис. 2–6; номер в верхнем левом углу соответствует номеру рисунка.

Острова вдоль морского края дельты

С СЗ дельту окаймляет баровая отмель, отделяющая дельту от Двинского залива. На баровой отмели между выходами в залив основных рукавов сформировались под влиянием речных и морских аккумулятивных процессов острова морского края дельты. Крайний северо-восточный из них – небольшой о. Кошка-Скандия, представляющий собой песчаную отмель у левого борта морского судоходного канала, проложенного через Березовый бар от устья судоходного рукав. Маймакса. Размеры и конфигурация о. Кошка-Скандия меняются в зависимости от фазы приливного цикла. На снимках 1977 и 2020 гг. отобразилась лишь юго-западная часть гребня отмели в виде вала длиной 350 м и шириной 50 м. Сравнение снимков показывает, что в 1977 и 2020 гг. остров имел разные положения; за 43 года отмель переместилась на ЮВ на 700 м со среднегодовой скоростью 16 м/год. Дополнительное совмещение со снимком 2000 г. позволяет увидеть промежуточное положение острова (рис. 2). Такое существен-

ное перемещение гребня отмели не соответствует большой стабильности рисунка отмелей в Корабельном устьевом расширении, наблюдаемой при просмотре “исторической линейки” снимков этого участка в системе GoogleEarth, и, скорее всего, связано с регулярно выполняемыми работами по расчистке морского судоходного канала от наносов.

Между устьевыми расширениями Корабельного и Мурманского рукавов, судя по карте 1966 г., существовала группа островов Голец (рис. 3) и Разбойник (рис. 3), которые показаны как отдельные острова и на всех предыдущих картах. К 1977 г. эти острова сблизились, были разделены лишь двумя небольшими протоками шириной 20–50 м, а снимки 2000 и 2020 г. зафиксировали полное соединение этих островов (рис. 3).

Со стороны Двинского залива объединенный о. Голец-Разбойник окаймлен серией песчаных береговых валов, как подводных, так и причлененных к берегу. Валы были видны и на снимке 1977 г. В северо-восточной части острова к 2020 г.

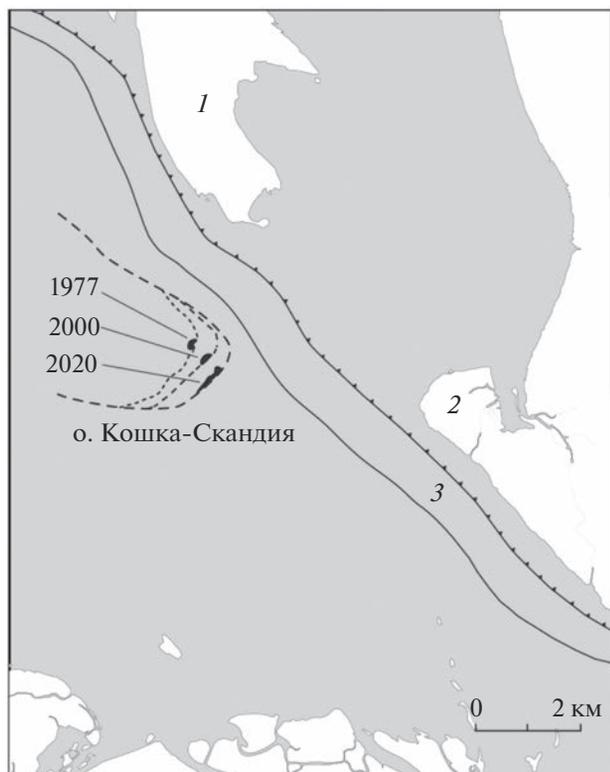


Рис. 2. Изменение положения гребня отмели и острова Кошка-Скандия в 1977–2020 гг. 1 – о. Мудьюг, 2 – п-ов Лебедин, 3 – морской судоходный канал.

валы причленились к берегу, но к 2021 г. в средней части произошел размыв ранее причлененных валов и береговая линия отступила на 100 м, а в крайней юго-западной части острова – до 250 м. Однако здесь размыв со стороны моря сопровождался нарастанием берега со стороны Мурманского устьевое расширения. Нарастание суши происходило и на других участках южного берега этого острова. Большая часть территории объединенного о. Голец-Разбойник к 2020 г. покрыта травяно-кустарниковой растительностью, на песчаных грядах бывших береговых валов растут сосновые леса.

Пролив между островами Голец и Лайда – Сафроновская Губа – в 1966 г. был свободным, в 1977 г. ширина его составляла 1 км. К 2020 г. мелководный пролив почти полностью зарос, и лишь извилистая протока шириной 150–300 м разделяет острова Голец и Лайда (рис. 3), который в свою очередь почти полностью присоединился к крупному о. Никольскому дельты.

Существенные изменения морского края произошли между Мурманским и Пудожемским устьями, где расположены острова Кумбыш и Гремиха (рис. 3).

В 1966 г. о. Кумбыш по площади был вдвое меньше, чем сейчас. Со стороны моря его окайм-

ляли узкие левые устьевые косы Мурманского рукава. К 1977 г. косы расширились и причленились к острову, лагуны между ними заросли и площадь острова увеличилась. К 2020 г. продолжилась аккумуляция материала внешней косы, которая расширилась и удлинилась на 1 км, остров приобрел квадратную форму. На морском берегу о. Кумбыш продолжается формирование серий береговых валов, 3–4 вала видны под водой на снимках 2000 и 2020 гг. В то же время на северо-западном берегу острова, со стороны залива, и на северо-восточном, со стороны Мурманского устья, произошел размыв с смещением береговой линии на 200 м. Территория вновь образовавшейся западной части о. Кумбыш, как видно по снимкам высокого разрешения в системе GoogleEarth, представляет собой серию песчаных гряд с развивающимся в их повышенной части дюнным рельефом. В старой восточной части острова песчаные гряды заняты сосновым лесом, в ложбинах между грядами сохранились озера.

В западной части Мурманского устьевое расширения, в районе Поганого устья, также наблюдается расширение площади островов и консолидация групп островов в единые массивы. К 1977 г. о. Гремиха удлинился на 1 км по сравнению с 1966 г. в юго-западном направлении. Удлинение южного конца острова продолжалось и в 1977–2020 гг., он выдвинулся еще на 200 м. Серия бывших береговых валов – песчаных гряд – протягивается на острове вдоль берега залива, на повышенных участках гряд развивается дюнный рельеф. Однако сравнение снимков 1977 и 2020 гг. показывает, что береговая линия о. Гремиха со стороны залива отступила к суше на 50–100 м в северной и до 400 м в южной части; в этой полосе затопленного берега на современных снимках просматривается до шести подводных валов. В противоположность этому в восточной части о. Гремиха в это время расширялся, зарастали вдающиеся в него заливы, процессы аккумуляции охватили его вместе с группой расположенных восточнее островов Варгай, Тайнокурья, Подостров (рис. 3), которые расширились, а проливы между ними, имевшие ширину 500–700 м, сузились до 100–200 м. Группа объединившихся островов Варгай почти полностью присоединилась к северо-западному окончанию крупного дельтового о. Лясомин (рис. 3), их разделяет лишь протока шириной ~50 м.

Самый крайний западный остров морского края дельты – Ягры (на котором теперь расположен микрорайон Северодвинска) уже к 1966 г. практически присоединился к дельтовому о. Угломин, был отделен от него лишь узкой (100 м) мелководной протокой. От северной оконечности острова в прошлом отходила левая приустьевая коса устья рук. Никольского. К 1966 г. она была размыва у основания, отчленилась от берега и образовался о. Ягорский Рог. В 1977–2020 гг. его

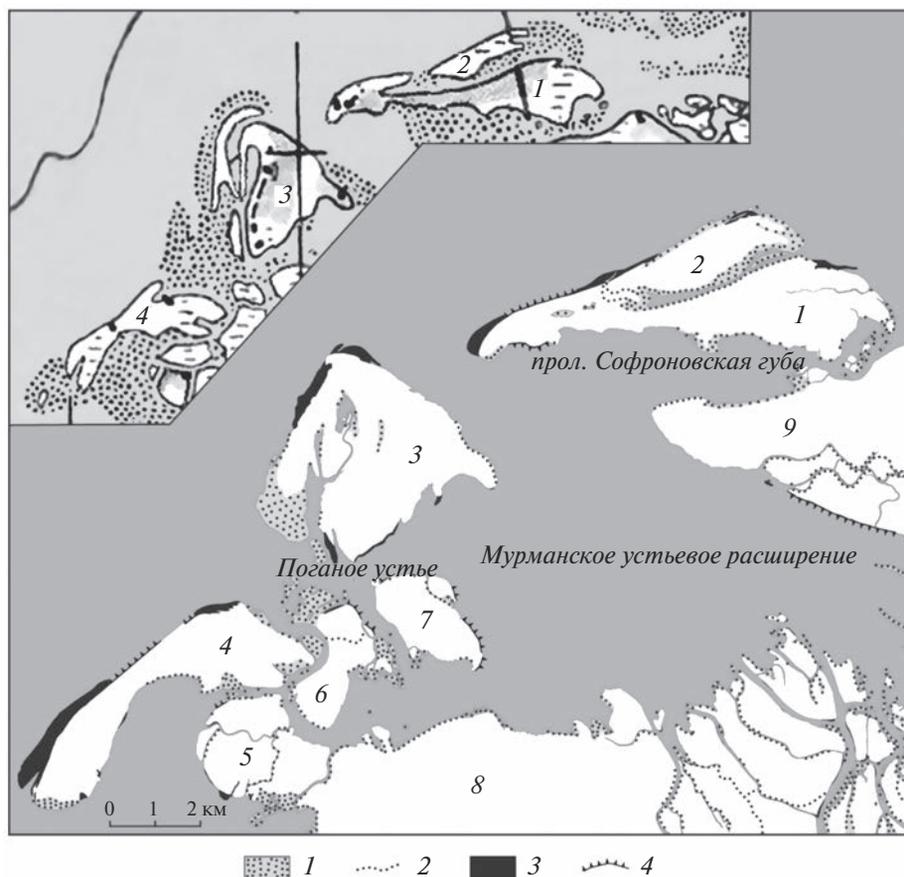


Рис. 3. Острова вдоль морского края дельты (фрагмент карты динамики дельты Северной Двины). На врезке – фрагмент обзорно-топографической карты 1966 г. Здесь и на рис. 5, 6: 1 – участки аккумуляции отложений, нарастания суши; 2 – смещение береговой линии в сторону моря, не выраженное в масштабе, сужение и исчезновение водотоков и проливов; 3 – участки размыва берега, затопления суши; 4 – смещение береговой линии в сторону суши, не выраженное в масштабе. Острова: 1 – Голец, 2 – Разбойник, 3 – Кумбыш, 4 – Гремиха, 5 – Варгай, 6 – Тайнокурья, 7 – Подостров, 8 – Лясомин, 9 – Лайда.

северо-западный берег подвергался размыву с отступанием береговой линии до 200 м.

В целом для всей группы островов морского края дельты характерны начавшиеся при потеплении климата процессы размыва или затопления их берегов со стороны Двинского залива при продолжающихся со стороны дельты процессах аккумуляции отложений, нарастания площади островов, сужения проливов, отделявших их от островов внутренней дельты.

Устьевые расширения основных рукавов

Для мелководных расширенных участков рукавов панхроматические снимки KeyHole, достаточно хорошо выявляющие береговую линию, но не отражающие рельеф дна, мало информативны. Поэтому для анализа динамики мелководной зоны устьевых расширений привлекаются разновременные снимки Landsat и Sentinel, а карта динамики отражает изменения лишь берегов.

На правом берегу Корабельного устьевое расширения (как и Мурманского) проявляется слабо выраженное отступление берега со среднегодовой скоростью 1–2 м/год. Для левых низменных берегов характерно небольшое аккумулятивное выдвигание берега до 100 м, зарастание отмелей со среднегодовой скоростью ~2 м/год.

Снимок Landsat 19.06.2001 хорошо передает картину рельефа дна мелководной зоны. В Корабельном устьевом расширении среди обширных отмелей четко выделяются подводное продолжение русла рук. Корабельного с его крутыми поворотами и прямолинейный искусственный морской судоходный канал. Валу, обрамляющие подводные русла и канал, а также повышенные участки отмелей между ними создают выразительный рисунок рельефа дна. Этот рисунок полностью повторяется и на снимках 2020 г., а просмотр “исторической линейки” снимков в информационной системе GoogleEarth, где представлены почти ежегодные снимки со спутника



Рис. 4. Никольский рукав (фрагмент карты динамики дельты Северной Двины). Условные обозначения – на рис. 3. Русловые острова: 1 – Виченка, 2 – Свинец, 3 – Свинецкая Кошка, 4 – Вагинские Кошки, 5 – Нестеровский, 6 – Чиракин, 7 – Шакилов, 8 – Чайчий.

Landsat начиная с 1984 г., убеждает в чрезвычайной стабильности форм рельефа дна этой мелководной устьевой зоны, вполне соответствующих изобатам на топографической карте масштаба 1 : 200000.

В Мурманском и Пудожемском устьевых расширениях, в большей степени закрытых баровыми островами, чем Корабельное устье, формы рельефа дна мелководной зоны выражены менее четко, и здесь при сравнении снимков 2000 г. и 2020 гг. изменений не заметно.

Основные рукава дельты

Во внутренней части дельты, где ее преобразование связаны преимущественно с речными факторами, во всех основных ее рукавах прослеживаются изменения в первую очередь русловых островов, и в меньшей мере – берегов рукавов и протоков.

В рук. Никольском (рис. 4) на его широтном участке между поселками Глинник–Рикасиха на карте 1966 г. была показана цепочка небольших островков. К 1977 г., как видно на снимке Кеу-Ноле, они сгруппировались в три массива – о. Виченка, группа островов Свинец и Свинецкая Кошка и острова Вагинские Кошки (рис. 4). Острова в этих группах были разделены широкими (500 м) протоками. К 2000 г. протоки сузились до 100–200 м, а к 2020 г. частично были занесены песком, а сами острова, особенно Вагинские Кошки, расширились и приблизились к правому берегу. Как указано в [3], вблизи о. Виченка и выше о. Вагинские Кошки находились пункты складирования грунта после расчистки фарватера. Дополнительное поступление материала от этих

свалок способствовало нарастанию островов и отмелей в рук. Никольском.

На излучине русла в районе поселков Шихириха–Бармино в 1977 г. зафиксированы два острова, отсутствующие на карте 1966 г. На снимке 2000 г. к ним добавилась третий, и на них появилась растительность. В 2020 г. все три острова окружены отмелями, направленными вниз по течению, что указывает на продолжение аккумуляции отложений.

В нижней части рук. Никольского при переходе из него в Пудожемское расширение, судя по карте 1966 г., существовали две группы небольших островов. Снимок 1977 г. показывает, что площади их расширились, протоки между ними сузились. Процесс сближения островов продолжался, к 2020 г. они объединились в два больших острова Шакилов-Чайчий и Нестеровский-Чиракин (рис. 4), полностью заросших травяно-кустарниковой растительностью. Вниз по течению от островов в их ухвостьях на несколько километров тянутся полосы отмелей, на которых поселяется водная растительность, а ниже о. Нестеровского к 2020 г. образовался длинный (>1 км) песчаный осередок.

Мурманский рукав (рис. 5) более свободен от островных русловых образований по сравнению с Никольским. На его верхнем широтном участке в 2.5 км ниже его истока при отделении от рук. Корабельного, у правого берега, судя по снимку Кеу-Ноле, в 1977 г. образовался узкий остров длиной 800 м. К 2000 г. он стал вдвое длиннее и почти присоединился к правому берегу. Ниже по течению на участке рук. Мурманского, вытянутом в меридиональном направлении, произошла кон-

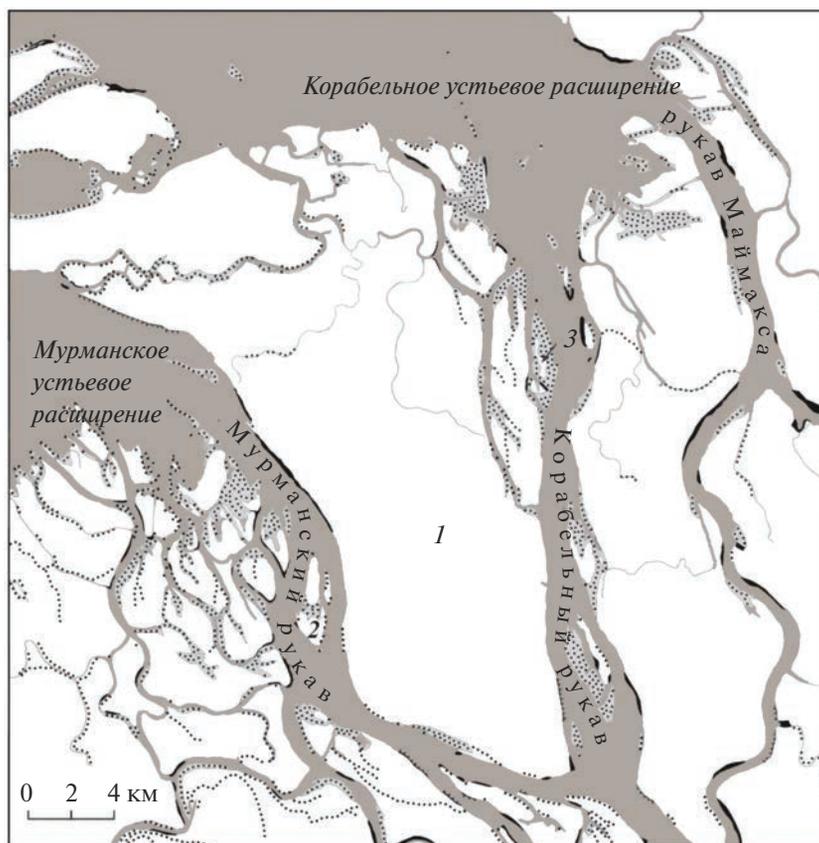


Рис. 5. Рукава Мурманский, Корабельный (северная часть), Маймакса (фрагмент карты динамики дельты Северной Двины). Обозначения – на рис. 3. Острова: 1 – Никольский, 2 – Тяжелая Кошка, 3 – Линский.

солидация небольших островков, показанных на карте 1966 г. В 1977 г. они объединились в два острова, в 2000 г. почти соединились в один о. Тяжелая Кошка (рис. 5), разделенный лишь узкой протокой, которая к 2020 г. полностью заросла, а остров увеличился по площади. При изменении направления рукава с меридионального на северо-западное на участке перехода к Мурманскому устьевому расширению, на левом берегу на снимках 2000 и 2020 гг. видны песчаные косы, образовавшиеся при изменении направления течения. Для правого возвышенного берега о. Никольского (рис. 5) для этого участка рук. Мурманского характерны процессы размыва, отмеченные многими исследователями [3, 4, 13]. Совмещение снимков 1977 и 2020 гг. показывает, что берег отступил здесь до 70–80 м со среднегодовой скоростью ~2 м/год. Наряду с размывом, ниже по течению образуются шлейфы аккумуляции – видна двойная песчаная коса, сформировавшаяся ниже размываемого выступа правого берега.

В рук. Корабельном разделяются участки широкой южной (верхний, до истока Маймаксы), используемый для судоходства (рис. 6), и северный (нижний), не используемый по условиям рельефа дна (рис. 5). Широкая, но мелководная

(до 5 м) южная часть верхнего участка, вблизи г. Архангельска, еще в 1966 г. была свободна от островов, а в северной части находился крупный о. Хабарка (рис. 6). На снимке 1977 г. южнее о. Хабарка видна выступившая над водой и превратившаяся в остров большая отмель напротив Соломбалы. На снимке 2020 г. южнее нее четко выделяется частично обнажающаяся отмель с хорошо выраженным грядовым рельефом, протягивающаяся на Ю до створа Архангельского яхт-клуба. На нижнем участке рук. Корабельного (рис. 5) с недостаточными для судоходства глубинами на карте 1966 г. показано и на снимке 1977 г. видно несколько русловых островов. На снимке 2001 г. эти острова обрамлены обширными отмелями и заметно перемещение южных островов к правому берегу, а северных к левому. В 2020 г. это уже покрытые растительностью острова, присоединение среднего острова к правому берегу закончилось. Острова в северной части рукава – Линский (рис. 5) и другие – расширились, удлинились вниз по течению до 700 м и сильнее приблизились к левому берегу. Вдоль правого берега в нижней части рукава цепочка небольших островов ограничивает активную часть руслового потока. На выходе рукава в Корабельное устьевое расшире-

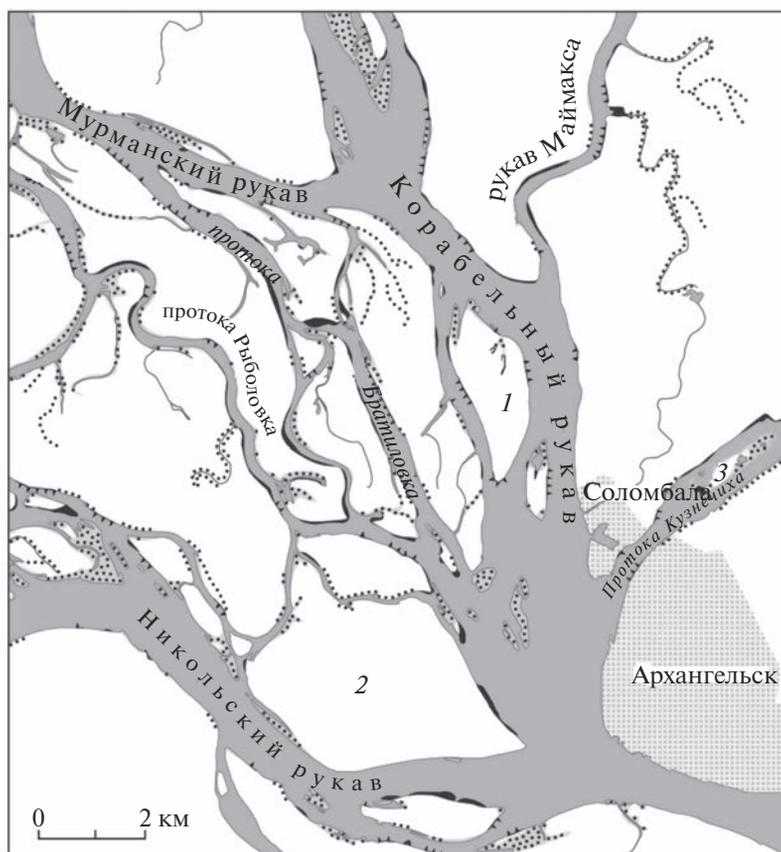


Рис. 6. Вершина дельты с истоками основных рукавов (фрагмент карты динамики дельты Северной Двины). Обозначения – на рис. 3. Острова: 1 – Хабарка, 2 – Кегостров, 3 – Шилов.

ние песчаные валы по обе стороны от фарватера видны как песчаные отмели, обнажающиеся при низких уровнях воды (во время отлива, ветрового стога и т. д.).

*Вершина дельты с истоками основных рукавов.
Водотоки внутренней зоны дельты*

В вершине дельты вблизи г. Архангельска единый поток Северной Двины разделяется на рукава (рис. 6). Карта динамики дельты показывает, что этот район вполне соответствует высказываемым гидрологами положениям о том, что русловые деформации дельтовых водотоков наиболее активны на участках резкого изменения стока воды вследствие разделения или слияния водотоков [2, 4]. Такие деформации русел проявляются у проток Братиловка, Рыболовка, Онишевка между рукавами Никольским, Корабельным и Мурманским. Для этих проток характерно меандрирование, и на изгибах меандр проявились процессы аккумуляции отложений на выпуклых участках берега и размыва на вогнутых; крутизна меандр увеличилась, а положение русел изменилось. Такие изменения характерны для относительно ши-

роких водотоков (шириной 200–500 м), но они сочетаются с заметным уменьшением ширины малых водотоков вплоть до их полного исчезновения.

Сеть малых водотоков между основными рукавами дельты наиболее густа в западной части дельты между Никольским и Мурманским рукавами и значительно менее развита в восточной части дельты. Для левобережья рук. Мурманского (рис. 5, 6) характерно повсеместное уменьшение ширины водотоков вплоть до полного их исчезновения за счет зарастания берегов водотоков кустарниковой растительностью, активно развивающейся при потеплении климата. На островах восточной части дельты (рис. 5) между рукавами Мурманским, Корабельным, Маймаксой и протокой Кузнечихой ширина мелких водотоков, образующих здесь разреженную сеть, также уменьшилась, а некоторые из них исчезли, в том числе, как сообщается в [3], они были засыпаны отходами широко развитого по берегам Маймаксы лесопильного производства. По излучинам берегов рук. Маймакса и протоки Кузнечиха на карте динамики дельты выявлены чередующиеся участки размыва и нарастания берега, обычно шириной

до 50 м, т. е. со скоростью изменений ~ 1 м/год. В то же время в русле Кузнечихи появилось несколько русловых островов, удлинился почти на 600 м о. Шилов напротив Соломбалы, произошло приращение крупных островов к левому берегу (рис. 6).

В целом на островах внутренней части дельты преобладают процессы аккумуляции речных наносов, обмеления и зарастания мелких водотоков, а в привершинной части дельты происходят русловые переформирования сети проток между рукавами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы выполнена поставленная задача – по разновременным космическим снимкам составлена карта динамики дельты Северной Двины за период 1977–2020 гг. Анализ составленной карты, проведенный с учетом более ранних картографических материалов, показывает, что продолжается отмечавшееся с 1920-х гг. нарастание и консолидация островов вдоль морского края дельты. Однако к этой долговременной тенденции добавились четко выраженные процессы отступления мористых берегов этих островов, впервые зафиксированные на составленной авторами работы карте динамики дельты 1977–2020 гг. Ширина полос размыва и затопления на островах Голец, Кумбыш, Гремиха составляет в среднем от 50 до 250 м со среднегодовой скоростью отступления береговой линии 1–5 м/год. Проявление процессов размыва на морском крае дельты Северной Двины отражает изменение в ее развитии в период потепления климата и подъема уровня моря.

Одновременно с активизацией размыва на мористых берегах островов вдоль морского края продолжалось их нарастание со стороны, обращенной к внутренней части дельты. За счет аккумуляции речных наносов уменьшалась ширина проливов между ними, продолжалось присоединение островов морского края к основным островам дельты. В том же юго-восточном направлении, в сторону дельты отмечено зафиксированное на карте динамики дельты за 1977–2020 гг. перемещение на 700 м о. Кошка-Скандия, что связано также с регулярными расчистками морского судоходного канала.

В основных рукавах дельты продолжались процессы нарастания русловых островов, объединения групп небольших разрозненных островков в руслах в более крупные острова. Особенно характерно это для широкого рук. Никольского, где этому способствует также складирование грунта после расчистки фарватера.

На правых берегах основных рукавов дельты – Мурманского, Маймаксы, Корабельного устье-

вого расширения – продолжались процессы постепенного размыва, отмечавшиеся многими исследователями, темп которых за период 1977–2020 гг., однако, не превышал 1–2 м в год. При этом на левых низменных берегах основных рукавов, как это отмечалось и ранее, происходило приращение расширяющихся русловых островов к берегу. Для верхней части дельты характерно переформирование русловой сети извилистых проток между основными рукавами, увеличение крутизны меандр.

Претерпели изменение небольшие водотоки на дельтовых островах в западной части дельты. Густая сеть водотоков между Никольским и Мурманским рукавами поредела, ширина водотоков уменьшилась, на их берегах повсеместно появились полосы кустарниковой растительности, некоторые водотоки заросли полностью. Такие изменения, возможно, связаны с развитием растительности при потеплении. В этом случае климатические изменения содействовали процессам аккумуляции и увеличения площадей суши в дельте. В восточной части дельты, где сосредоточены лесопильные заводы, к этому добавилось антропогенное исчезновение малых водотоков в результате их засыпания отходами лесопиления [3].

Таким образом, исследование динамики дельты за 1977–2020 гг. показало, что в период потепления климата на фоне продолжающегося преобладания процессов аккумуляции и нарастания площади островов внутренней дельты стали проявляться процессы размыва мористых берегов на островах вдоль морского края дельты.

В многочисленных публикациях последних лет показан и обсуждается активизировавшийся при потеплении размыв абразионных берегов северных морей. В данном случае зафиксировано отступление аккумулятивных берегов, в этом новизна результатов исследования. Выявленные изменения зафиксированы на карте и в подробной текстовой характеристике динамики. Авторы рассчитывают, что эти изменения привлекут внимание гидрологов, которые дадут им оценку на основе анализа морских и речных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Морфодинамика устьевых систем крупных рек Арктического побережья России / Под. ред. В.Н. Коротаева, Г.И. Рычагова. М., 2017. 148 с.
2. Бабич Д.Б., Коротаев В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Трансформация речного стока в устьях арктических рек // Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 188–230.
3. Брызгалов В.В., Скобинский А.Э., Богунов А.Ю. Исследование устьевой области Северной Двины хронокартографическим методом. Архангельск: Лодия, 2008. 143 с.

4. Гидрология устьевой области Северной Двины. М.: Гидрометиздат, 1965. 375 с.
5. Демиденко Н.А., Лупачев Ю.В., Репкина Т.Ю. Региональные особенности формирования эстуарно-дельтовых систем севера Европейской части России // Эстуарно-дельтовые системы России и Китая. М.: ГЕОС, 2007. С.62–112.
6. Зарецкая Н.Е. История развития дельты р. Северной Двины в голоцене // Система Белого моря. Т. 4. М.: Науч. мир, 2017. С. 268–292.
7. Иглин С.М., Лецев А.В., Коробов В.Б. Оценка масштабов заносимости судоходного канала в порту Архангельск // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 1. С. 46–55.
8. Кортаев В.Н., Алексеевский Н.И. Эрозионно-аккумулятивные процессы в устьях рек // Эрозионно-русловые системы / Под ред. Р.С. Чалова. М.: ИнфраМ, 2017. С. 436–464.
9. Кортаев В.Н., Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А. Геоморфология и история формирования устьевых систем арктического побережья России // Морфодинамика устьевых систем крупных рек Арктического побережья России. М., 2017. С. 33–40.
10. Кравцова В.И., Вахнина О.В. Исследование динамики дельты Енисея по космическим снимкам // Геодезия и картография. 2020. № 1. С. 34–47.
11. Кравцова В.И., Инюшин А.Н. Исследование динамики дельты Лены по космическим снимкам // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 6. С. 817–824.
12. Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 2016. № 6. С. 59–70.
13. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
14. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
15. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометиздат, 1992. 383 с.
16. Щербаков Ф.А. Белое море // Геоэкология шельфа и берегов морей России / Под ред. Н.А. Айбулатова. М.: Ноосфера, 2001. С. 58–69.
17. Sohn H.G., Kim G., Yom J. Mathematical modelling of historical reconnaissance CORONA KH-4B imagery // The Photogrammetric Record. 2004. V. 19 (105). P. 51–66.