

УДК 551.556

МОРФОЛОГИЯ ДНА И ЛИТОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА УСТЬЕВОМ ВЗМОРЬЕ И В ДЕЛЬТЕ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

© 2017 г. Н. А. Римский-Корсаков¹, В. Н. Коротаев², В. В. Иванов²,
А. А. Пронин¹, Н. А. Демиденко³

¹Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Россия

³Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

e-mail: nrk@ocean.ru, vlaskor@mail.ru, nikola@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2015 г.

После доработки 20.04.2015 г.

В статье приводятся новые данные по морфолитодинамическому режиму аванделты и дельтовых рукавов Северной Двины. На основании материалов полевого гидролокационного обследования дается описание строения дна и литологии донных грунтов. По результатам анализа гидрографических, топографических карт и космических снимков прослежена динамика русла дельтовых рукавов и дна устьевого взморья Северной Двины за период 1832–2013 гг.

DOI: 10.7868/S0030157416060125

ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область Северной Двины относится к типу приливного устья с многорукавной дельтой и с приглубым устьевым взморьем, занимающим вершину Двинского залива Белого моря. Она включает устьевой участок реки длиной 150 км и устьевое взморье — часть Двинского залива южнее условной линии — м. Куйский (зимний берег Белого моря) — м. Толстик (летний берег Белого моря). Многорукавная дельта имеет форму равнобедренного треугольника с основанием, равным 45 км. Общая площадь дельты — 900 км², площадь устьевого взморья (до изобаты 10 м) — 350 км². За пределами устьевого взморья находится глубоководная часть Двинского залива.

На устьевом участке Северной Двины располагается крупнейший на севере России г. Архангельск с морским и речным портами, основанный в XVI в. Непосредственно в устье Северной Двины расположен другой крупный город — Северодвинск, а также центр бумажной промышленности — Новодвинск. Таким образом, устье Северной Двины можно отнести к числу наиболее урбанизированных, промышленно и транспортно освоенных объектов на севере России, испытывающих значительную антропогенную нагрузку в связи с транспортным освоением устья Северной Двины и развитием тяготеющего к нему территориально-производственного комплекса.

Авторам статьи в 2013 и 2014 гг. представилась возможность провести полевые гидрографиче-

ские и геофизические изыскания в дельте Северной Двины и получить новые данные по морфологии дна и составу донных отложений дельтовых рукавов (рис. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения подводного рельефа и донных наносов авторы использовали комплекс гидролокационной аппаратуры, разработанный в Лаборатории гидролокации дна (ЛГД) Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН). Для геодезической привязки гидролокационной информации и мест отбора проб донного грунта применялся дифференциальный GPS-приемник Sigma-G3T фирмы Javad, использующий данные как спутниковой группировки GPS, так и ГЛОНАСС. Комплекс гидролокационной аппаратуры включает трехчастотный гидролокатор бокового обзора (ГБО) “YellowFin” фирмы Imagenex с рабочими частотами 260, 330 и 800 кГц, акустический профилограф “АП-5-ИО РАН” с рабочей частотой 4,5 кГц и гидрографический промерный эхолот “Скат-50М” фирмы “ФортХХI”. Сбор и отображение получаемой информации в реальном времени ведется на экране монитора ПЭВМ. Работой АП управляет программа “Эхо-Граф” оригинальной разработки ЛГД. Предварительная обработка данных и приведение их к виду, удобному для обработки стандартными пакетами программ, ведется с использованием также оригинальной программы WinRSTR.

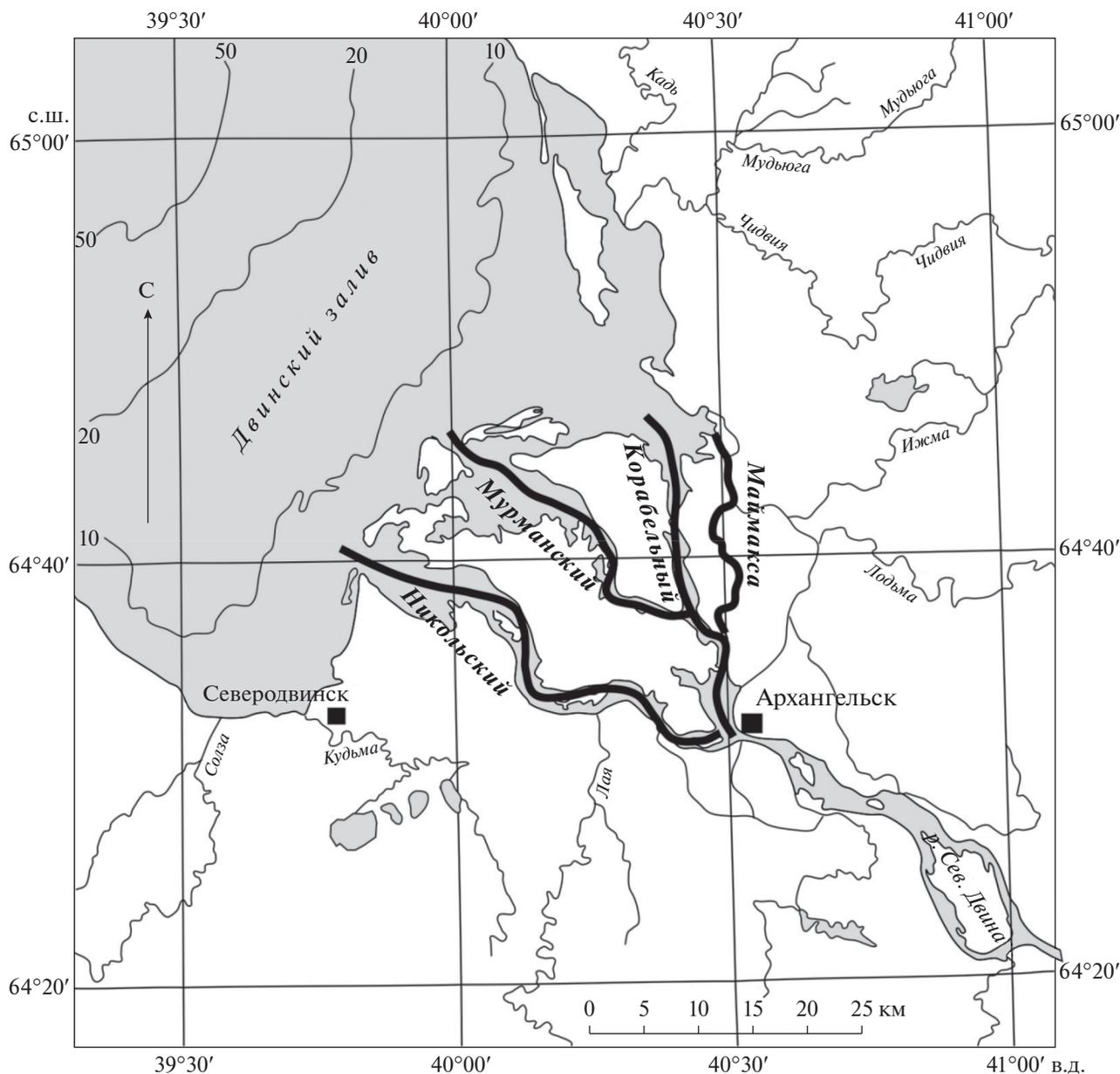


Рис. 1. Схема гидрографической сети дельты Северной Двины и положение сейсмоакустических профилей (жирные линии).

Проводка судна по маршруту и сбор данных эхолотного промера осуществлялись с помощью управляющей ПЭВМ и специализированного программного обеспечения ScatSonarControl. При этом использовались навигационные данные, получаемые с помощью рассмотренного выше комплекса на базе GPS-приемника Sigma-G3T.

Геофизические методы исследования речных водотоков заключались в гидролокационной съемке поверхности дна и сейсмоакустическом профилировании толщи рыхлых отложений. Методика опознавания природных и искусственных объектов по результатам гидролокационного кар-

тирования и дешифрирование данных сейсмоакустического профилирования проводилось на основе использования полигонных исследований на ключевых участках. Технология картирования морфологии дна и оценки количественных параметров форм рельефа русел рек с помощью гидролокатора бокового обзора (ГБО) была разработана и внедрена в практику русловых работ Институтом океанологии РАН и Географическим факультетом МГУ [15].

Грунтовые съемки с отбором поверхностного слоя наносов (5–10 см) производились синхронно с промером и автономно во время остановки

судна (шлюпки) при помощи донных щупов ГР-69 и ДЩБ-2, а также дночерпателями различных конструкций. Частота промерных галсов и мест отбора донных проб соответствовала масштабу съемки (1 : 25000). Механический анализ проб донных наносов заключался в разделении песчаных фракций размерностью до 0.1 мм на стандартном наборе сит и на фракциометре для фракций менее 0.1 мм.

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕЛЬТЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

По сохранившимся документам известно, что устье Северной Двины стало использоваться в качестве транспортного пути в XII в., причем главным перевалочным пунктом был г. Холмогоры. Однако уже в XVI–XVII вв. вся внешняя торговля России велась через город-порт Архангельск, где в 1693 г. Петром I была основана Соломбальская корабельная верфь, функционирующая и в настоящее время [3].

Увеличение грузоподъемности и осадки судов в XIX в. привело к значительным затруднениям в судоходстве при прохождении мелководных устьевых баров, что заставило начать в 1887 г. дноуглубительные работы по созданию судоходного канала и приступить к выполнению регулярных топографических и промерно-описных работ. Первая карта дельты Северной Двины в масштабе 1 : 124 236 была составлена Адрианом Шхонбеком под названием “Чертеж реки Двины или Архангельска” в 1701 г. по указанию Петра I. В 1823 и 1833 гг. появляются первые карты лоцкапитана Мехренгина и капитана-лейтенанта Рейнеке с глубинами в рукавах Никольском, Мурманском и Корабельном, которыми пользовались до 1924 г. В это же время составляются первые описания ледового режима, течений и деформаций русел ледовых рукавов, однако начало систематическим научным изысканиям в дельте Северной Двины было положено работами В.Е. Ляхницкого в 1915–1916 гг. и созданной в 1912 г. в Архангельске Центральной станции гидрометеорологической службы Северного Ледовитого океана и Белого моря (Гимецентр). В 1934 г. по инициативе Т.П. Марютина в Архангельске была организована Северо-Двинская устьевая станция, работающая с перерывами до настоящего времени [10].

В исследовании гидрологического режима устья Северной Двины принимали участие крупнейшие океанографы, гидрологи и гидротехники России: В.Е. Ляхницкий, В.А. Березкин, Т.П. Марютин, Н.Н. Зубов. После 50-х годов XX в. научно-исследовательские работы в дельте Северной Двины и капитальные обобщения проводятся в основном усилиями сотрудников Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова

(М.И. Зотов, В.Н. Михайлов, Ю.В. Лупачев, В.Ф. Полонский, Т.А. Макарова, Н.А. Демиденко и др.), а также Института океанологии им. П.П. Ширшова и Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [2, 11, 16].

В конце 80-х и 90-е годы XX в. основные исследования гидрологического режима устья Северной Двины проводило Северное управление Гидрометеослужбы России совместно с Северо-Двинской устьевой станцией (СДУС) и Институтом экологических проблем Севера Архангельского НЦ УрО РАН. С 2000-х годов исследования устьевой области Северной Двины проводит Лаборатория физико-геологических исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова и Северо-Западное отделение ИО РАН им. П.П. Ширшова [5, 6].

СТРУКТУРА ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЕЛЬТЫ

Дельта Северной Двины начинается в 45 км от устьевого створа (условной границы между дельтой и взморьем) вблизи центральной части г. Архангельска. Ширина русла в вершине дельты — около 1 км, глубина — 15–20 м. Генеральное направление дельты — северо-западное, совпадающее с центральным Мурманским рукавом дельты. С запада дельта ограничена самым многоводным рукавом — Никольским и примыкающей к нему системой мелких протоков. Восточная граница дельты совпадает с верхней частью Корабельного рукава, а затем протоком Кузнечиха, а после его впадения в проток Маймаксу — нижней частью Маймаксы и Корабельным устьем дельты. Морской край дельты проходит по морскому побережью внешней цепи островов: Ягры, Гремиха, Кумбыш, Голец, Скандия, Мудьюг.

Основу гидрографической сети дельты составляют три рукава: Никольский, Мурманский и Корабельный, отходящие от вершины дельты и непосредственно впадающие в море. При впадении в море рукава имеют типичное эстуаровидное расширение русла, именуемое “устьем”.

Длина Никольского рукава дельты около 40 км, средняя ширина — 1.5–2 км. В нижней части рукав имеет ширину до 5 км, а непосредственно на устьевом створе — 2 км. Глубина рукава — 3–15 м.

Мурманский рукав имеет длину около 30 км, ширину 1–2 км, вблизи моря до 5–7 км, на устьевом створе — 1.5 км; глубина рукава — 5–18 м. Рукав используется для судоходства на всем протяжении.

Корабельный рукав начинается у г. Архангельска и имеет протяженность около 35 км. В 2 км от его истока ответвляется один из двух основных протоков дельты — Кузнечиха. Второй основной проток дельты — Маймакса отделяется от Корабельного рукава в 8 км от истока и впадает снова

в него на 23 км, приняв справа проток Кузнечиху. Средняя ширина Корабельного рукава 1–1.5 км, характерная глубина 5–10 м. Проток Маймакса имеет ширину русла 200–300 м, ниже впадения Кузнечихи – 500–600 м. Русло протока на всем протяжении глубоководное (8–10 м). По этому протоку проходит главный судовой ход Архангельского морского порта. Проток Кузнечиха имеет длину 25 км, ширину русла 300–500 м. Верхний участок протока мелководен и используется только для речного судоходства. Нижний отрезок протока имеет глубины 5–10 м и используется для подхода морских судов к причалам лесозавода и нефтебазы. В месте слияния протока Кузнечиха с Маймаксой находится район Архангельского морского порта – аванпорт Экономика.

Устьевое взморье включает в себя обширную мелководную зону, сформированную барами трех основных рукавов дельты. Естественные глубины на устьевых барах – 2.5–3 м. Через Березовый бар Корабельного устья проложен морской подходной канал для плавания морских судов в Архангельский порт. Длина барового канала – 6 км. Сохранился судоходный канал на बारे Мурманского устья. В западной части взморья, в баровой зоне Никольского устья проложен подходной канал Северодвинского порта. Баровая зона устьевого взморья занимает около 50% площади устьевого взморья. За пределами этой зоны конуса выноса речных наносов поверхность дна постепенно понижается, переходит в зону свала глубин и сопрягается с глубоководной котловиной Двинского залива.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ УСТЬЕВОГО ВЗМОРЬЯ И ДВИНСКОГО ЗАЛИВА

Устьевое взморье Северной Двины, занимающее вершину Двинского залива, относится к типу открытого приглубого взморья. Определяющими факторами в режиме устьевого взморья Северной Двины являются приливные колебания уровня, течения и сток речных вод. На устьевом взморье величина сизигийного прилива достигает 125–150 см, квадратурного – 70 см. Средняя величина приливных колебаний уровня – 100–110 см. На морском крае дельты Северной Двины у о. Гремиха параметры приливной волны следующие: средняя сизигийная величина прилива 120 см, средняя величина прилива 100 см, средняя квадратурная величина прилива 80 см.

Особенностью приливной волны в устье Северной Двины является образование “манихи” – временной приостановки подъема уровня или, на некоторых участках, его временного спада, наступающего через 2–3 ч после момента малой воды и длящегося около 1–2 ч. В наибольшей степени “маниха” выражена в западной части взморья.

Явление “манихи” связано с механизмом индуцирования приливов в Белом море и привносится на устьевое взморье проникающей приливной волной.

Приливные и ветровые течения в заливе за свалом глубин изучены еще недостаточно. Движущаяся вдоль устьевого взморья приливная волна создает результирующий перенос вод на восток, поэтому струи речных вод на устьевом взморье отклоняются к востоку и формируют стоковые течения Двинского залива. Стоковая составляющая течений быстро затухает в сторону Белого моря. Приливные течения в Двинском заливе имеют вращательный характер; их скорости колеблются в диапазоне 0.3–0.6 м/с.

В период половодья в русловых ложбинах барового участка взморья преобладают стоково-приливные течения. Стоковая составляющая течения достигает скорости 0.8 м/с. При отливе суммарные скорости течения возрастают до 1.3–1.4 м/с. Приливные течения достигают 0.85 м/с. В межень стоковая составляющая течения невелика, а приливо-отливные течения могут достигать 1 м/с в квадратуру и 1.5 м/с в сизигию. Ветровые течения в этом районе заметны лишь в период смены приливных течений.

На устьевом взморье Северной Двины взаимодействуют две водные массы – пресные речные воды и соленые воды Белого моря. Основной зоной распространения речных вод служит двинское стоковое течение вдоль Зимнего берега моря. В месте контакта пресных речных и соленых морских вод находится фронтальная зона с большим градиентом солёности. Эта зона подвержена сезонным (стоковым) и кратковременным (приливным) колебаниям.

Беломорские воды имеют солёность 25–27‰ летом и осенью (VII–IX) и 27.5–29‰ зимой (XII–IV). Лишь весной солёность воды в поверхностном слое снижается до 22–24‰. Солёность воды во внешней части устьевого взморья в большей мере подвержена опресняющему влиянию речного стока и колеблется от 5–15‰ весной до 18–22‰ зимой [4].

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ДЕЛЬТЫ

Уровенный режим. Режим уровней воды устьевой области Северной Двины формируется под воздействием стока воды, приливных и сгонно-нагонных волн, проникающих на устьевой участок реки из моря. Основным фактором, влияющим на уровенный режим устьевой участка реки, является сток речной воды. Средний многолетний уровень воды в вершине устьевой области (г/п Усть-Пинега) равен 318 см над “0” 1881 г., наибольший из средних годовых – 423 см, наименьший – 230 см. [3, 11, 14].

Средний многолетний уровень воды в вершине дельты составляет 100 см над "0" 1881 г. Средний перепад уровня воды между вершиной дельты и устьевым взморьем составляет около 0.3 м [10]. Средний уровень приемного водоема — Двинского залива 68 см над "0" 1881 г. (–0.30 м БС). Средние годовые значения уровня на взморье изменяются в диапазоне от 61 до 84 см над "0" 1881 г.

Максимальные стоквые подъемы уровня воды уменьшаются в направлении от вершины устьевой области реки к устьевым створам в соответствии с расплыванием волны половодья или паводка. В вершине устьевой области максимальный подъем уровня в половодье достигает 9–10 м и 3 м в осенний паводок. В вершине дельты максимальный подъем уровня воды уменьшается до 3.5–3.8 м, а осенний максимум — до 1.5 м. В устьях рукавов стоквые подъемы уровня воды незначительны, но вместо них здесь заметно проявляются нагонные повышения уровня воды. Подъем уровня воды вследствие штормовых нагонов больше стоквого заторного подъема уровня в узкой приморской зоне рукавов дельты протяженностью 10–20 км от морского края дельты. Величина нагонных подъемов уровня здесь достигает 2 м, т.е. превышает подъемы уровня воды в половодье.

Приливо-отливный режим. Дальность проникновения приливной волны в рукава дельты, сформированной на устьевом взморье, зависит от фазы водности реки, уклонов водной поверхности и наличия ледяного покрова. В период половодья дальность распространения приливной волны сокращается до 45 км, во время летней и зимней межени дальность проникновения приливной волны увеличивается до 120–150 км. При речных расходах воды около 1000 м³/с приливы проникают до вершины устьевой области реки. Подпорное влияние льда в период весеннего вскрытия резко ограничивает дальность проникновения приливной волны [7–9].

Сток воды и наносов. Речной сток, поступающий в устьевую область Северной Двины, оценивается по гидроствору Усть-Пинега, расположенному в 135 км от морского края дельты (ниже впадения р. Пинеги в Сев. Двину) и имеющему ряд наблюдений с 1881 г. [3, 11, 13]. Средний годовой расход воды по этому гидроствору составляет 3320 м³/с, что соответствует годовому объему стока речных вод 105 км³/год. Средние годовые расходы воды изменяются от 1870 м³/с (56.2 км³/год, 1937 г.) до 5250 м³/с (165 км³/год, 1923 г.).

В дельте сток воды распределяется следующим образом: 35.9–39.3% стока проходит через Никольский рукав, 23.5–16.6% — через Корабельный рукав, 13.5–16.6% — через Маймаксу и 7.6–3.4% — через Кузнечиху. Речной сток, поступающий в дельту, сбрасывается в море через три главных

устья дельты в следующей пропорции: Пудожемское устье (с Никольским) — 34 км³/год (31%), Мурманское (с Поганым) — 25 км³/год (24%), Корабельное — 49 км³/год (45%).

Данные наблюдений над стоком *взвешенных наносов* в устьевой области реки весьма ограничены. Средний многолетний расход взвешенных наносов, поступающих в устьевую область, составляет 138 кг/с при мутности воды 40 г/м³. Этим величинам соответствует годовой объем взвешенных наносов, равный 3.7 млн тонн. Модуль стока наносов составляет 12 т/км² в год. В гранулометрическом составе взвешенных наносов доминирует песчаная фракция (58%), имеющая преобладающий диаметр частиц 0.1–0.5 мм.

Режим течений. Основными факторами, определяющими режим течений в устьевой области Северной Двины, является сток речных вод, приливо-отливные и сгонно-нагонные явления, ветер и наличие льда. Главным фактором является режим водного стока. Этот фактор определяет положение границы зоны обратных (реверсивных) течений в устье реки. В зимний период при малых расходах воды порядка 600–700 м³/с (г/с Усть-Пинега) верхняя граница этой зоны находится в 60 км от морского края дельты [3, 4]. Весеннее половодье отодвигает границу зоны обратных течений в сторону моря. При расходах воды более 10000 м³/с устанавливается режим одностороннего, пульсирующего в приливном ритме течения с типичной параболической эпюрой и максимумом скорости в поверхностном слое. При прохождении пика половодья скорости течения могут достигать значений 1.5–2.5 м/с.

При переходе от половодья к летней межени граница зоны обратных течений постепенно распространяется на рукава дельты. При речном расходе 50000 м³/с эта граница смещается вверх по течению на 30 км от морского края дельты, а при расходах 2500 м³/с вся дельта полностью находится в зоне обратных течений.

В период летней межени при речных расходах 1000–1500 м³/с обратные течения наблюдаются в 90–100 км от морского края дельты. При сильных сгонах для дельты характерны только прямые, стоквые течения, протяженность участка с обратными течениями резко сужается. При нагонах, наоборот, зона обратных течений имеет максимальную длину, достигающую 120 км от морского края дельты. В период летней межени течения также имеют ярко выраженный реверсивный характер. Максимальная величина приливной составляющей равна 0.7 м/с. Значение стоквой составляющей колеблется в диапазоне от 0.1 до 0.4 м/с. Максимальные скорости суммарных течений достигают 1.1–1.3 м/с. Осенний период характерен увеличением стоквой состав-

ляющей до 0.6 м/с, что способствует резкому сужению зоны обратных течений в устье реки.

В зимний период течения вблизи вершины дельты имеют явно выраженный реверсивный характер, причем продолжительность отливных течений находится в пределах от 6 до 9 ч, а приливных — от 2 до 6 ч. Максимальные отливные скорости имеют величину 0.5 м/с, отливные — 0.2 м/с. Зимой в рукавах дельты вследствие влияния ледяного покрова скорости течений меньше, чем летом. Характерная величина приливо-отливного течения в этот период — 0.2–0.5 м/с. При этом величина стоковой составляющей течения находится в пределах 0.05–0.15 м/с.

На устьевом взморье скорости течений уменьшаются по мере удаления от устьевого створа к свалу глубин. Наибольшие величины скорости течения до 3 м/с в половодье и до 1.5–1.8 м/с в межень наблюдаются в сужениях русла на устьевых створах главных дельтовых рукавов. Векторы течения здесь ориентированы вдоль осей баровых ложбин и каналов. В баровой зоне приливные течения имеют четко выраженный реверсивный характер. За гребнем бара реверсивные течения постепенно переходят во вращательные, при этом скорости приливных течений уменьшаются до 0.2–0.3 м/с. В половодье в баровой зоне проявляется хорошо выраженный эффект клина соленых вод. Вода в поверхностном слое течет в море со скоростью до 2.5 м/с, в то время как в придонном слое наблюдается обратный поток соленых вод со скоростью 0.4–0.6 м/с. При этом реверсирования потока в течение приливо-отливного цикла не происходит.

Стоковые течения прослеживаются до свала глубин. Транспортируемые ими воды за свалом глубин подхватываются результирующим потоком вод, направленным на взморье с запада на восток. Этот хорошо выраженный перенос вод в вершине Двинского залива питает постоянное течение вдоль восточного (Зимнего) берега Белого моря. Оно выносит из устьевой зоны смешения смешанные воды и транспортирует их в южную часть Горла Белого моря.

РУСЛОВАЯ МОРФОЛИТОДИНАМИКА ДЕЛЬТОВЫХ РУКАВОВ

Морфология дна. Продольное эхолотирование дельтовых рукавов Сев. Двины в меженный период позволило выявить основные закономерности строения рельефа дна. Для магистральных дельтовых рукавов (Маймакса, Корабельный, Мурманский, Никольский) по данным эхолотирования определялась иерархическая структура грядового рельефа с использованием методики, разработанной Алексеевским [1]. Согласно этой методике, в иерархической структуре выделяются гряды различного порядка (гряды А, Б, В, Г, Д).

Кроме перечисленных типов гряд, в дельте Северной Двины были выявлены так называемые *песчаные волны* (перекатные участки) и самые малые грядовые формы — *рифели* (таблица). Протяженность песчаных волн изменяется в значительном диапазоне — от 2.8 до 12.6 км (средняя длина — около 5.5 км). Перепад отметок дна между гребнями песчаных волн и плесами достигает 4.1–10 м. Эти волны формируют перекатные участки, состоящие из единичных или группы перекатов. Группы перекатов обычно приурочены к участкам разветвления русла на рукава или к участкам меандрирования дельтовых рукавов.

В пределах гребней песчаных волн выделяются грядовые мезоформы, соответствующие перекатам. Длина таких аллювиальных скоплений (гряды типа А) изменяется от 0.9 до 3.9 км, а перепад высоты между гребнями и разделяющими их плесами — от 1.6 до 8 м.

Рельеф поверхности дна в пределах перекатов осложняется менее крупными грядами, соответствующими размерам побочной (гряды типа Б). В пределах переката обычно прослеживается от 2 до 4 таких гряд. Протяженность гряд типа Б составляет в среднем 1000–1300 м, а высота (превышение отметок дна между гребнями и отметками дна в плесовых лощинах) изменяется от 1 до 3.1 м. В отдельных случаях протяженность таких гряд может увеличиваться до 2.1 км, например, в рукаве Корабельном (таблица).

Рельеф дна на поверхности гряд по типу Б осложнен более мелкими грядовыми образованиями — грядами типа В, Г и Д (так называемые дюны). Высота гряд типа В может изменяться от 0.5 до 2 м, при их длине от 100 до 400 м. Высота гряд типа Г составляет 0.2–1 м, при протяженности от 20 до 150 м. Длина гряд типа Д составляет от 10 до 60 м. Высота их варьирует от 0.1 до 0.6 м. На поверхности дюн прослеживаются отдельные скопления аллювия, соответствующие самым мелким формам грядового рельефа, — рифелям. Рифели имеют протяженность не более 10 м, а их высота в среднем составляет менее 0.1 м (см. таблицу).

Анализ данных эхолотирования позволил установить основные различия в иерархической структуре рельефа дна для магистральных дельтовых рукавов. В частности, судоходный рукав Маймакса имеет наименьшие значения длины гряд типа А (перекатов), по сравнению с другими рукавами. По-видимому, это связано с относительно малой водностью рукава, меньшим количеством наносов, поступающих в рукав, и проведением дноуглубительных работ в пределах судоходного рукава. Небольшая длина перекатов характерна для Мурманского рукава, что также связано с особенностями распределения расходов воды между рукавами. Согласно некоторым данным [13], через Мурманский рукав проходит

Река, рукав		Типы грядового рельефа												Рифели	
		песчаные волны		А		Б		В		Г		Д			
L, км	H, м	L, км	H, м	L, км	H, м	L, км	H, м	L, км	H, м	L, км	H, м	L, км	H, м	L, км	H, м
5.6–9.8	6.2–7	0.9–2.7	2–4.5	0.5–1.1	1–2.1	0.1–0.5	0.5–1	20–50	0.2–0.5	10–20	0.1–0.2	3–7	0.05–0.07		
2.8–9.1	6–8	2.8–3.3	2.5–3.6	0.9–2.1	1.9–3.1	0.2–0.45	1–2	90–150	0.5–1	10–60	0.1–0.5	5–7	0.05–0.10		
6.2–8.1	4.1–4.9	1.1–2.4	2–4	1–1.3	1.3–2	0.11–0.4	1.5–2	50–120	0.6–1	20–50	0.2–0.6	<10	0.03–0.06		
5.1–12.6	5.5–10	1.4–4	2–8	0.6–1	1–1.8	0.11–0.5	0.5–1	30–90	0.3–1	20–40	0.1–0.4	<10	0.03–0.05		
5.4–8.1	6–8.2	2.9–3.9	1.6–3.4	0.3–0.9	1–1.5	0.15–0.3	0.6–1.1	60–100	0.3–0.6	10–40	0.1–0.4	<10	0.03–0.07		

Примечание. Иерархическая структура гряд А, Б, В, Г, Д и рифелей выделена по методике Алексеевского [1].

наименьший объем стока воды и незначительный сток наносов.

Согласно Алексеевскому [1], рифели и гряды типа Г и Д наиболее активно участвуют в транспорте речных наносов в меженный период и их параметры определяются закономерностями гидравлики меженного потока. Однако анализ грядового рельефа в дельте Северной Двины показал отклонение от такой закономерности для активно перемещающихся гряд. В дельтовых рукавах Сев. Двины наблюдается закономерное чередование рифелей и гряд низкого порядка по длине водотока. Характерно, что наименьшая распространенность рифелей отмечалась на участке от вершины дельты до узла разделения на дельтовые рукава Маймакса и Корабельный. Полное отсутствие рифелей наблюдалось на участке русла до устья Никольского рукава, а ниже по течению они вновь появляются. По-видимому, это может быть связано с воздействием приливных волн, проникающих в дельту со стороны Двинского залива (рис. 2–3).

Русловые отложения. По данным грунтовой съемки ГОИНа в 1963 г. донные отложения рукавов дельты представлены в основном среднезернистыми песками (0.50–0.25 мм). Устьевые участки рукавов сложены преимущественно мелким песком (0.25–0.10 мм). Исключение составляет рукав Маймакса, в котором вследствие размыва по фарватеру русла обнажились моренные суглинки, которые имеют в своем составе до 20–30% включений песка, гравия, щебня и гальки [3]. По данным натурных наблюдений авторов 2014 г. в магистральных дельтовых рукавах Северной Двины среднезернистые пески (0.50–0.25 мм) преобладают в истоках и среднем течении рукавов. Исключение представляет только рукав Маймакса, где наблюдается постепенное снижение крупности от среднезернистых к мелкозернистым пескам и значительное количество илистых отложений. Кроме того, в этом рукаве на дне отмечается большое количество остатков древесины, скопившейся в результате отстоя плотов. Выходы моренных суглинков в зону контакта с потоком и накопление остатков древесины на дне существенно затрудняют развитие глубинной эрозии в рукаве.

Наиболее крупные донные отложения отмечены на участке русла Северной Двины до узла разветвления на магистральные дельтовые рукава. Местами крупность наносов повышается до 0.8 мм за счет примеси гравия.

В дельтовых рукавах наиболее крупные донные отложения характерны для Корабельного и Мурманского рукавов, где большая часть дна сложена среднезернистыми песками (0.30–0.45 мм). В Никольском рукаве состав донных отложений существенно меняется: в верхней трети русла от истока рукава и до траверза с. Рикосиха происхо-

дит постепенное уменьшение крупности донных отложений от среднезернистых песков к мелкозернистым. Ниже по течению, вплоть до ответвления Мурманского рукава, на дне преобладают мелкоалевритовые и песчанистые илы. К устью рукава крупность донных отложений вновь повышается до 0.25–0.44 мм.

На акватории устьевого взморья Северной Двины ареалы донных грунтов располагаются вдоль морского края дельты. Поскольку основная сортировка наносов происходит при воздействии ветрового волнения, отмечается тесная связь между крупностью грунтов и глубинами взморья. Основная масса речных наносов в виде мелкого песка отлагается в устьях рукавов, в межукавных пространствах побережья отлагаются тонкие пески и крупные алевриты. На морской границе устьевого взморья Северной Двины наибольшее распространение имеют мелко-алевритовые и песчанистые илы. Днище морского канала на всем протяжении сложено илами, которые слоем 7–10 см покрывают мелкие и средние пески [12].

Особенности формирования и структура грядового рельефа. Формирование грядового рельефа в дельте Северной Двины подчинено общим закономерностям, присущим речным руслам, но одновременно имеет ряд особенностей, связанных с воздействием морских факторов (приливы и отливы, штормовые нагоны). Кроме того, на формирование рельефа дна оказывает влияние антропогенный фактор – проведение дноуглубительных работ и выемки грунта, создающих искусственный дефицит наносов в морских подходных каналах и в судоходных рукавах.

Основные закономерности строения рельефа дна в пределах дельты Северной Двины были установлены в результате обработки данных продольных эхолотных профилей, выполненных в 2014 г. в меженный период для каждого из дельтовых рукавов.

К наиболее крупным скоплениям аллювия были отнесены *песчаные волны*, представляющие собой перекатные участки, состоящие из единичных или групп перекатов. Высокая точность эхолота (± 1 см) позволила выявить и наиболее мелкие грядовые образования (*рифели*), представляющие собой упорядоченное скопление аллювия в виде гряд, расположенных на поверхности более крупных грядовых форм. Эти формы являются наиболее подвижными и активно участвующими в формировании стока влекомых наносов в меженный период (при относительно малых скоростях течения). Длина рифелей изменяется от 3 до 10 м, а высота – от 3 до 10 см.

Помимо самых крупных и самых мелких грядовых образований в иерархической структуре выделялись и другие грядовые формы, отвечающие в ряде случаев отдельным элементам русловых форм. Так, гряды типа А, соответствующие в

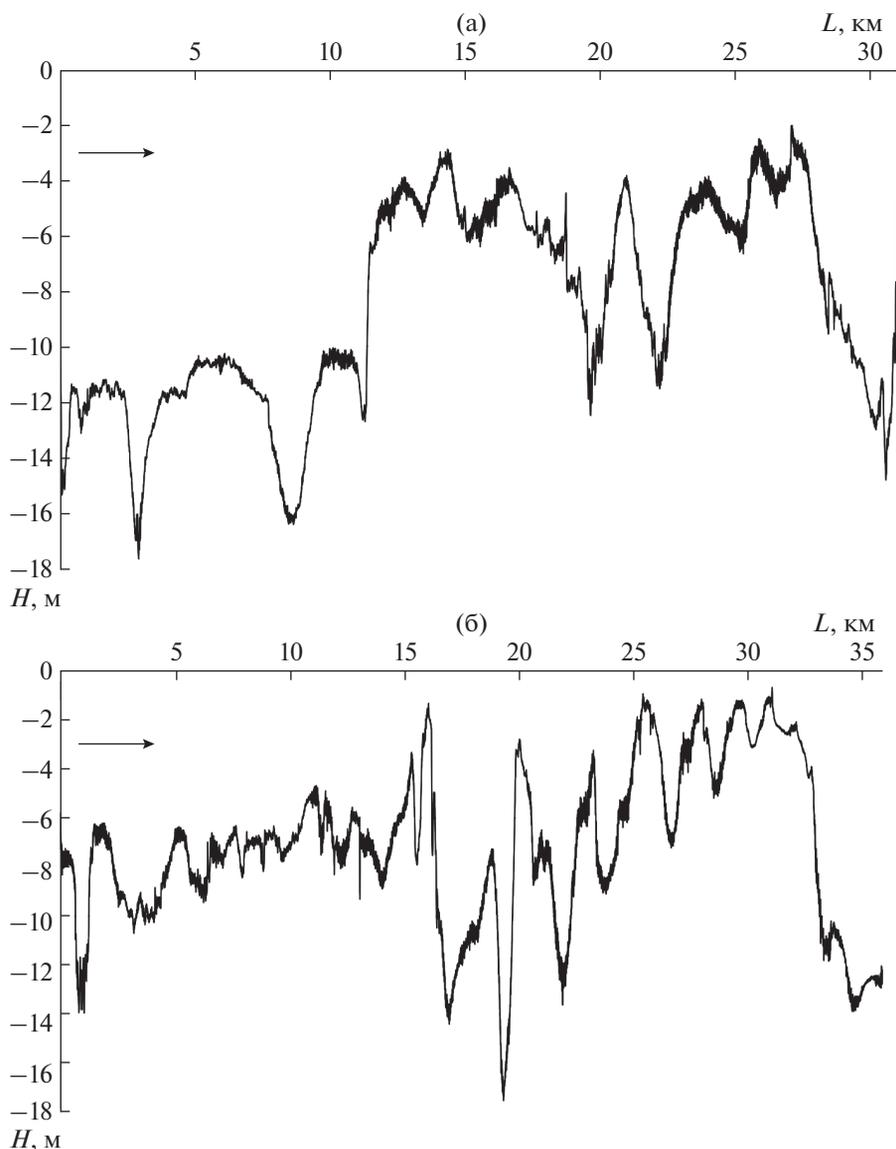


Рис. 2. Морфология дна рукавов Корабельный (а) и Никольский (б).

классификации Алексеевского [1] перекатам, для дельтовых рукавов существенно дифференцируются по длине и высоте. Наименьшая длина и наибольшая высота перекатов характерна для рукава Маймаксы; наибольшая длина и относительно небольшая высота отмечается для участка русла собственно Северной Двины до узла разветвления на магистральные дельтовые рукава (таблица). Такое распределение отвечает условиям рассредоточения стока воды и наносов по дельтовым рукавам. В период открытого русла в Маймаксу поступает 13–16% от общего стока воды Северной Двины в вершине дельты [13], т.е. наименьший объем стока для всех дельтовых рукавов. Аналогом сопоставления водности, а следовательно, и параметров крупных гряд типа А

(перекатов), может служить закономерность изменения параметров грядовых форм, наблюдаемых при наличии разветвления в руслах рек. Эта закономерность заключается в том, что при разделении потока (снижении водности) гряды становятся более крутыми – сокращается их длина и возрастает высота по сравнению с грядами, наблюдаемыми выше узла разветвления. Нарушение этой закономерности изменения параметров гряд А отмечается в Никольском рукаве, где на участке русла ниже по течению от с. Рикосиха на поверхности грядовых скоплений, отвечающих перекатам, выделяются более мелкие грядовые образования (тип Б). Они соответствуют русловым формам – побочным, распространенным в пределах всех морфодинамических типов русел

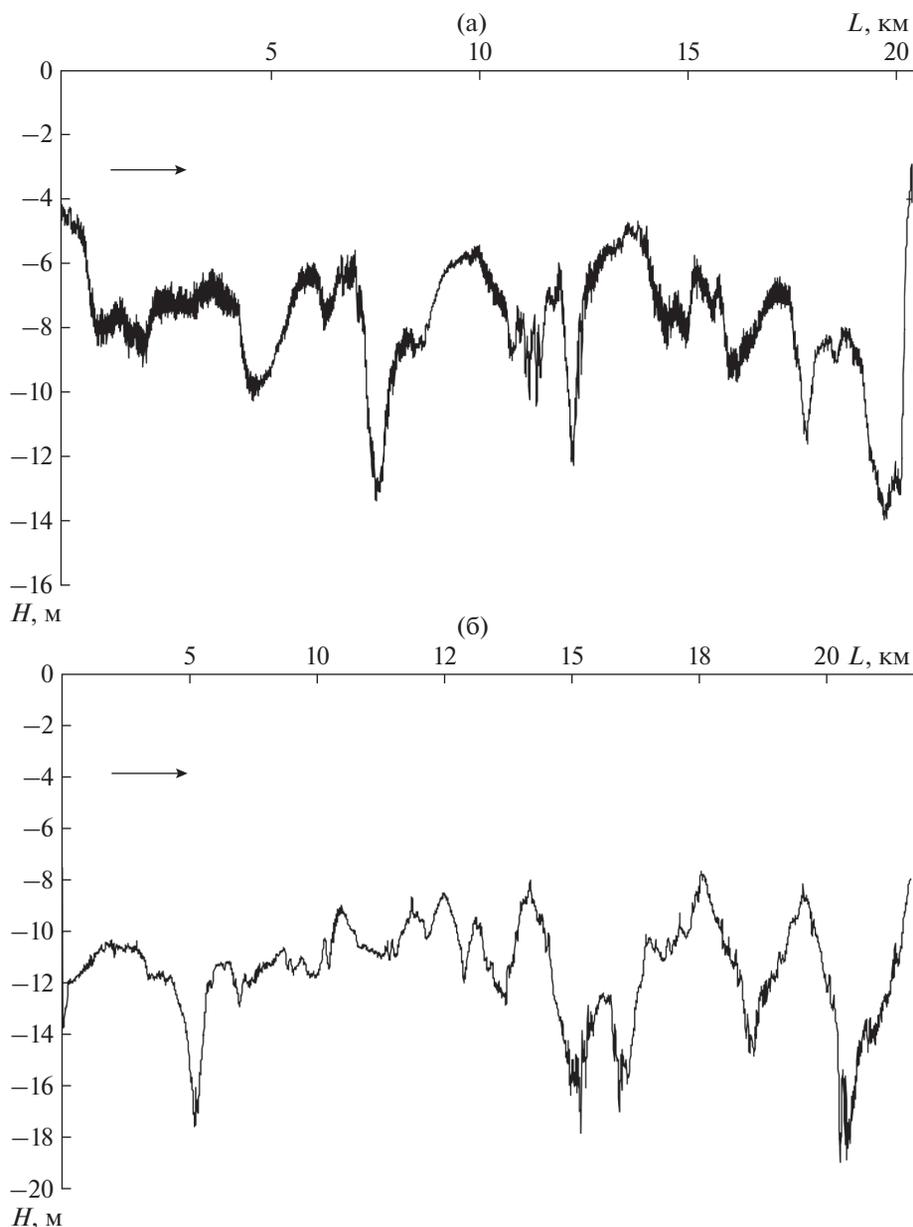


Рис. 3. Морфология дна рукавов Мурманский (а) и Маймакса (б).

(относительно прямолинейных, меандрирующих и разветвленных).

Однако, эти гряды существенно дифференцируются для дельтовых рукавов. В первую очередь по их количеству. Наибольшее количество гряд Б (побочней) характерно для меандрирующего русла, где наблюдается последовательное расположение побочней в пределах излучин. Типичным примером может служить рукав Маймакса, представляющий собой чередование серий излучин с относительно прямолинейным руслом. Количество побочней в нижней части рукава (после впадения рукава Кузнечиха) существенно сокраща-

ется в результате перехода от меандрирующего к относительно прямолинейному руслу.

Наиболее крупные побочни характерны для Корабельного рукава, где наблюдается чередование местных расширений и сужений русла, обусловленных отдельными разветвлениями. Небольшие побочни характерны для русла Северной Двины на участке от вершины дельты до узла разветвления на рукава Корабельный и Маймакса. По-видимому, на данном участке происходит не только рассредоточение стока по дельтовым рукавам (Никольский, Кузнечиха), но и отвлечение в них значительной доли наносов. При этом только непосредственно выше разделения Север-

ной Двины на Корабельный рукав и Маймаксу параметры побочной начинают увеличиваться. Однако в том, и другом случае, размеры побочной по длине русла могут существенно изменяться, уменьшаясь к устьевому створу. Наиболее стабильные размеры побочной отмечаются в пределах Мурманского рукава, где их длина изменяется только на 30%, а высота не более чем в 1.5 раза.

На поверхности гряд, соответствующих размерам побочной, формируются последовательно более мелкие грядовые образования – гряды типа В, Г и Д. В целом, параметры этих гряд имеют меньшую изменчивость по сравнению с более крупными грядами. Так, гряды типа В имеют протяженность от 100 до 500 м, а их высота меняется от 0.5 до 2 м. При этом наибольшая высота гряд данного типа характерна для Корабельного и Мурманского рукава, наименьшая – для рукава Маймакса и русла Северной Двины. Гряды типа Г имеют еще меньшие размеры. Их высота изменяется от 0.3 до 1 м, длина от 20 до 150 м. При этом наиболее пологие гряды характерны для русла Северной Двины, тогда как наиболее крутые при одинаковой высоте – для рукава Маймакса. Более мелкие грядовые формы (гряды типа Д), расположенные на поверхности гряд Г, имеют протяженность от 10 до 60 м при высотах от 0.1 до 0.6 м. Среднее соотношение их высоты к длине (крутизна гряд) для всех дельтовых рукавов составляет 1 к 100. Такое относительное постоянство размеров гряд для всех дельтовых рукавов позволяет предположить, что их формирование происходит в межливный период, при относительно невысоких расходах воды (менее 5000 м³/с в вершине дельты). Поверхность гряд типа Д может быть осложнена рифелями.

Применение гидролокатора бокового обзора при проведении исследований позволило провести уточнение изменения параметров гряд по длине дельтовых рукавов и выявить их некоторые особенности. Так, для Никольского и Мурманского рукавов отмечается четкая тенденция изменения параметров гряд от истоков рукавов к устьевому створу (рис. 4). В истоках рукавов поверхность дна представлена более крупными грядовыми образованиями (типа В и Г), тогда как на устьевых участках преобладают более мелкие гряды (тип Г и Д). Аналогичная ситуация наблюдалась и для русла Северной Двины. Однако, наличие островных разветвлений, чередования сужений и расширений русла, на фоне продольного изменения стока воды создало более пеструю картину продольного изменения грядового рельефа дна.

Наибольшее отличие грядового рельефа дна от остальных дельтовых рукавов отмечается в Маймаксе. В настоящее время в данном рукаве расположен судовой ход, что предопределило повышенное антропогенное воздействие на рукав –

проведение в нем дноуглубительных работ. Кроме того, рукав активно используется для отстоя плотов, что приводит к выстиланию дна древесными остатками и обуславливает неравномерное продольное распределение грядовых форм. Определенное влияние на распределение и изменение грядового рельефа оказывают как морфодинамический облик русла (меандрирующее русло в верхней и средней части рукава), так и продольное изменение водности – впадение рукава Кузнечиха в нижней части Маймаксы.

Русловая морфодинамика. Анализ морфологии продольных профилей дна дельтовых рукавов показал, что на участках резкого изменения стока вследствие разделения или слияния водотоков наблюдаются большие изменения глубин вдоль потока. Так, в Корабельном рукаве, сток которого значительно уменьшается вследствие оттока в протоки Кузнечиха и Маймакса, дно постепенно повышается по направлению к морю. В Никольском и Мурманском рукавах, наоборот, дно постепенно понижается к устью. Устьевые бары в этих рукавах интенсивно перемещаются в сторону моря; в Корабельном рукаве устьевая отмель стабильна.

Из анализа многолетней динамики продольных профилей дна (1832–1960–2013 гг.) видно, что русла Никольского и Корабельного рукавов и Кузнечихи имеют тенденцию к аккумуляции, а Мурманского рукава и Маймаксы – к размыву. Скорости накопления наносов в Никольском рукаве варьируют от 0.7 до 2.4 см/год, в Корабельном рукаве – от 0.7 до 1.9 см/год. В основном судходном протоке Маймакса почти на всем его протяжении наблюдается размыв дна со скоростью 1.8 см/год; в устье протока происходит аккумуляция по 1.3 см/год. Русло Кузнечихи обладает относительной устойчивостью по всему фарватеру, за исключением приустьевой части, где отмечается аккумуляция со средней скоростью 2.3 см/год.

В целом по дельте Северной Двины, обратимые русловые деформации относительно замедлены и за многолетний период не превышают 1–2 см/год. На замедленность руслового процесса указывают также малая извилистость дельтовых рукавов и относительная неизменность распределения водного стока за период 1932–1960 гг. [2].

МОРФОЛИТОДИНАМИКА УСТЬЕВОГО ВЗМОРЬЯ

Морфология дна. По данным гидрографических карт авандельта Северной Двины отделена от устьевоего взморья свалом глубин от 5 до 10 м шириной от 0.6 до 1 км. В вершине Двинского залива наблюдается постепенное увеличение глубин до 20 м на расстоянии 6 км. Дно залива ровное, лишённое приливных гряд и подводных валов. Для прибрежной зоны Двинского залива

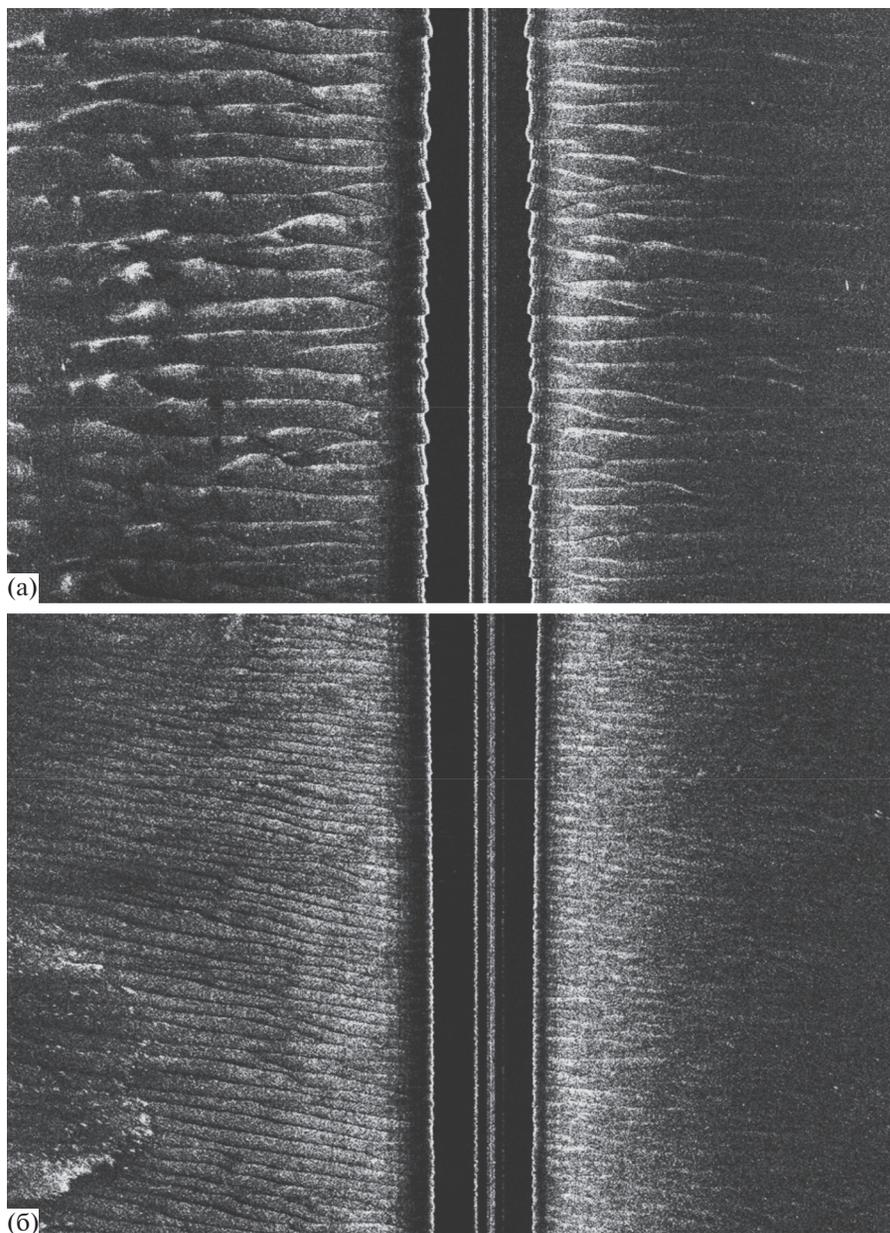


Рис. 4. Гидролокационное изображение дна рукавов Никольского в истоке (а) и Мурманского в устье (б).

характерно образование широких песчаных осушек.

Донные отложения. В пределах авандельты толщина дельтовых отложений может быть разделена на 2 части – верхнюю и нижнюю. Верхняя часть обладает сложным строением, с четко выраженной слоистостью. Здесь чаще всего отмечается переслаивание алевритового песка с алевритовым илом. Нижняя часть представлена монотонными слоями однородных песчаных осадков – в основном мелкозернистыми песками.

Динамика дна устьевое взморья, ограниченная изобатой 13 м, по результатам сравнения про-

филей дна за многолетний период (1832–1960–2013 гг.) характерна интенсивным выдвиганием морского края дельты в районе Поганого и Пудожемского устьев, где происходит аккумуляция вдольбереговых наносов, идущих с северо-востока. Скорости стоковых и приливо-отливных течений на устьевом взморье составляют не более 0.10–0.15 м/с, т.е. они практически не участвуют в транспорте донных наносов. Заносимость морского канала происходит в период весеннего паводка речными наносами и в осенне-зимний период морскими наносами, когда слой отложений достигает 75 см [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современную дельту Сев. Двины по особенностям литодинамических процессов можно классифицировать как *многорукавную дельту выполнения устьевой лагуны*. Районы современной речной аккумуляции занимают акватории крупных дельтовых рукавов. Здесь формируются молодые острова с высотными отметками около 1 м, сложенные речным аллювием и затопляемые ежегодно в период половодья.

2. Горизонтальные русловые деформации в дельтовых рукавах протекают медленно, только на отдельных участках скорость размыва берегов может достигать 1.5–2 м/год. Обычно такие размывы наблюдаются в пределах вогнутых берегов в вершинах излучин. На остальных участках темпы размыва берегов не превышают 0.5–1.0 м/год. Вертикальные русловые деформации имеют сезонную и многолетнюю составляющие. В многолетнем плане наблюдается постепенное понижение отметок дна от истока к устью в Никольском и Мурманском рукавах (размыв) или повышение дна в Корабельном рукаве (аккумуляция). Сезонные переформирования связаны с формированием грядового рельефа и его деформациями, обусловленные прохождением половодья.

3. Влияние приливо-отливных явлений, проникающих в русла дельтовых рукавов приводят к уменьшению крупности донных отложений вследствие оседания части взвешенных наносов при формировании так называемой “манихи” — длительного стояния неизменного уровня воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-РГО (проект № 13-05-41001) и РНФ (грант № 14-37-00038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с.
2. *Брызгалов В.В., Скобинский Л.Э., Богунов А.Ю.* Исследование устьевой области реки Северной Двины хронокартографическим способом. Архангельск: Лодия, 2008. 143 с.
3. Гидрология устьевой области Северной Двины / Под ред. Зотина М.И. и Михайлова В.Н. М.: Гидрометеиздат, 1965. 376 с.
4. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 5. Белое море. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 235 с.
5. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море. М.: Изд-во И.П. Матушкина, 2012. 452 с.
6. *Лещев А.В., Хоменко Г.Д., Коробов В.Б. и др.* Экспедиционные работы в устьевой области реки Северной Двины в марте 2014 г. // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 2. С. 348–350.
7. *Луначев Ю.В.* Особенности проникновения соленой воды в приливное устье реки (на примере Северной Двины) // *Тр. ГОИН*. 1976. Вып. 129. С. 37–52.
8. *Луначев Ю.В.* Анализ условий формирования и оценка наивысших уровней воды на устьевом участке Северной Двины // *Тр. ГОИН*. М.: Гидрометеиздат, 1991. Вып. 198. С. 63–73.
9. *Луначев Ю.В., Макарова Т.А.* Проникновение морских и речных вод в рукава дельты Северной Двины и его возможные изменения // *Тр. ГОИН*. 1984. Вып. 172. С. 117–125.
10. *Ляхницкий В.Е.* Изыскания в устьях р. Северной Двины, произведенные в 1915–1916 гг. для составления проекта аванпорта г. Архангельска // *Тр. Отдела торговых портов*. 1916. Вып. 49.
11. *Макарова Т.А.* Сток и уровни воды в устьевой области Северной Двины и их возможные изменения // *Тр. ГОИН*. 1984. Вып. 172. С. 110–117.
12. *Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В.* Белое море (Седиментогенез и история развития в голоцене). М.: Наука, 1977. 236 с.
13. *Полонский В.Ф., Кузьмина В.И.* О распределении стока в дельте Северной Двины // *Тр. ГОИН*. 1986. Вып. 179. С. 49–56.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 662 с.
15. *Римский-Корсаков Н.А., Долотов Ю.С., Пронин А.А.* Технические средства исследования рельефа дна и эстуарных зон Белого моря // *Океанология*. 2009. Т. 49. № 3. С. 468–473.
16. *Zaretskaya N.E., Shevchenko N.V., Simakov A.N. Sulzerzhitsky L.D.* The North Dvina development over the Holocene: geochronology and palaeoenvironment // *J. Geochronometria*. 2011. V. 38 (2). P. 116–127.

Lithodynamic, Morphological Hydrological Processes in the Estuary Region and Region and in the Delta of the Northern Dvina

N. A. Rimskii-Korsakov, V. N. Korotaev, V. V. Ivanov, A. A. Pronin, N. A. Demidenko

We present the new data on the morpholithodynamical regime in the avandelta and deltaic channels of the Northern Dvina. A description of the seabed structure and lithology of the bottom sediments is given on the basis of the field sonar survey. The dynamics of deltaic channels and estuarial seashore bottom of the Northern Dvina is analyzed over a period of 1832–2014 on the basis of the hydrographic and topographic maps and satellite images.