

СОВРЕМЕННЫЕ ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В БЕЛОМ МОРЕ И ЭСТУАРИЯХ КРУПНЫХ РЕК ЕГО БАССЕЙНА

УДК 556.5

ДИНАМИКА ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И ПРОЦЕССЫ СЕДИМЕНТАЦИИ В МАКРОПРИЛИВНЫХ ЭСТУАРИЯХ МЕЗЕНИ И КУЛОЯ

© 2022 г. Н. А. Демиденко*

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: demidenko_nikola@mail.ru

Поступила в редакцию 26.04.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2022 г.

Гидрологические и геоморфологические процессы, происходящие в макроприливных эстуариях Мезени и Кулоя, полностью подчиняются воздействию приливной волны. Основная цель изучения динамики взвешенного вещества и процессов седиментации состоит в определении речных и морских факторов, влияющих на транспорт наносов и особенностей литодинамических процессов. Экспедиционные исследования эстуариев Мезени и Кулоя, которые проведены автором в 2005–2019 гг. показали, что высокая концентрация взвешенных наносов, по сравнению с прилегающими районами реки и моря, наблюдается на участках реверсивных течений. Концентрация наносов определялась весовым методом посредством фильтрования проб, отобранных в течение приливного цикла, при одновременной регистрации гидравлических параметров водного потока. Максимальная величина сизигийных приливов в эстуарии Мезени достигает 9.8 м, в квадратуру — 5.0; в эстуарии Кулоя 10 и 4.8 м соответственно. Скорости приливных течений во время сизигии равны 2.5 м/с. Соленость воды в эстуариях Мезени и Кулоя изменяется от 3.5 до 24.0 единиц практической солености. Максимум мутности в нижней части эстуария Мезени достигает 56.3 кг/м³ в малую воду за счет концентрации взвешенных наносов в придонном горизонте. В поверхностном горизонте, даже при смене направления течения и в период стоячей воды, мелкие глинистые частицы не осаждаются на дно, а находятся во взвешенном состоянии. Мутность воды в поверхностном горизонте сохраняется в пределах 0.05–0.10 кг/м³. Увеличению мутности способствует ветровое волнение на взморье и интенсивная абразия берегов в эстуариях. Условия хозяйственного использования устьев Мезени и Кулоя зависят от приливов. Судходство может осуществляться лишь в период полной воды и требует учета динамики фарватера. При проектировании Мезенской приливной электростанции важно знать области наибольшей седиментации в открытой и отделенной частях приливного бассейна.

Ключевые слова: эстуарии, гидрологический режим, зона смешения вод, взвешенные наносы, максимум мутности, эрозионно-аккумулятивные процессы, приливные осушки

DOI: 10.31857/S2587556622060048

ВВЕДЕНИЕ

Морские устья рек, включающие дельты и эстуарии, представляют собой географические объекты, расположенные между речными бассейнами и приемным водоемом. В устьях рек встречаются потоки вещества и энергии с водосборной площади рек и со стороны моря — нагоны, приливы, ветровое волнение и вдольбереговые течения.

Основные задачи исследований заключались в изучении современного гидрологического режима устьевых областей рр. Мезени и Кулоя на основе сетевых наблюдений Гидрометеослужбы и экспедиционных исследований, которые проведены автором в 2005–2019 гг., и в которых получены характеристики приливных колебаний уров-

ней и их трансформации вдоль эстуариев Мезени и Кулоя, изменчивости скоростей течения и расходов воды за приливный цикл на устьевых участках, динамики зоны смешения на устьевом взморье и проникновении соленых вод в эстуарии, пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенного вещества, абразии и динамики берегов, эрозионно-аккумулятивных процессов для оптимизации судходных условий в устьях рек, проектировании Мезенской приливной электростанции.

Приливные устья рек классифицированы на три типа: *эстуарии* (величина прилива от 2 до 9 м), *приливные дельты* (величина прилива 1–2 м), *эстуаровидные долинныя заливы*. Первый тип представ-

лен воронкообразными расширениями устьев рек, где динамика вод и эрозионно-аккумулятивные процессы определяются величиной приливов и энергией приливных волн. Максимальные приливные расходы здесь значительно больше максимальных речных расходов в период весеннего половодья и осенних паводков. Особенно сильно взаимодействие приливного потока и русла является усиление признаков эрозионного расширения устьевых участков рек при усилении воздействия приливных волн и полузакрытый характер прибрежной зоны моря (Римский-Корсаков и др., 2018; Эстуарно-дельтовые ..., 2007).

Все типы эстуариев могут быть классифицированы по величине прилива на их морском крае: слабоприливные с величиной прилива менее 2 м; среднеприливные с величиной прилива 2–4 м; сильноприливные с величиной прилива более 4 м. В последние годы выделяется еще один тип эстуариев – гиперприливные эстуарии со средней величиной прилива более 6 м (эстуарии Фанди, Северн, Мерсей, Пенжина, Мезень, Кулой) (Система ..., 2012; Эстуарно-дельтовые ..., 2007; Dyer, 1986).

В типичных эстуариях, имеющих эрозионное воронкообразное расширение в сторону моря и испытывающих сильное воздействие реверсивных приливных течений (устья рр. Мезени, Кулая, Онеги, Хатанги, Пенжины, Гижиги), основными гидрологическими факторами являются сток речных вод, приливо-отливные колебания уровня, сгонно-нагонные явления, смешение пресных речных и соленых морских вод. Динамика зоны смешения пресных и соленых вод на устьевом взморье и проникновение соленых вод в эстуарии за приливный цикл и сизигийно-квадрантурный период формирует определенный тип плотностной стратификации и структуру зоны смешения. Тип смешения вод определяется соотношением расхода речных вод и величиной прилива на устьевом участке. Каждому типу структуры зоны смешения соответствуют аналогичные характеристики движения воды и, как индикатор, интенсивность процесса смешения. Выделяются эстуарии с клином соленых вод, частично и хорошо перемешанные водные массы в эстуарии (Михайлов, 1997; Эстуарно-дельтовые ..., 2007; Dyer, 1986; Savenije, 2012). В условиях сильных приливных воздействий, характерных для устьев рр. Мезени и Кулая, формируется третий тип структуры зоны смешения вод (Михайлов, 1997; Система ..., 2012).

Структура зоны смешения вод и тип смешения пресной и соленой воды в устьях рек влияют на характер переноса и отложения взвешенных и взвешенных наносов. Зона смешения речных и морских вод функционирует как своеобразный гидродинамический и геохимический барьер, разделяющий эстуарий на области с резко отличающи-

мися условиями осадконакопления (Гордеев, 1983, 2012).

Характерной особенностью динамики взвешенных наносов в зоне смешения речных и морских вод является формирование зоны максимальных значений мутности или “литоклина” (Демиденко, 2009; Dyer, 1986; Kirby and Parker, 1983; Officer, 1980). Возникновение этой зоны обусловлено процессами флокуляции глинистых частиц и органического вещества, а также особенностями эстуарийной циркуляции воды (Демиденко, 1991, 2009; Dyer, 1986; Postma, 1967). В ее пределах мутность воды значительно превосходит мутность в речных и морских водах. В макроприливных эстуариях при понижении уровня в малую воду взвешенные частицы концентрируются в стоково-отливных ложбинах, создавая максимум мутности (так называемые “пробки мутности”).

В то же время понятие “пробка мутности” стало широко использоваться применительно к концепции маргинального фильтра (Лисицын, 1994) для обозначения зон повышенной мутности с существенно меньшими абсолютными значениями концентрации взвешенного вещества (Мискевич и др., 2021, 2022). Исследование особенностей гидрохимического и гидробиологического режимов макроприливных эстуариев невозможно без определения причин, механизмов и динамики зон повышенной мутности, которые в значительной степени определяют биоразнообразие и биопродуктивность эстуарных экосистем. Аккумулирующиеся в “пробках” наносы часто могут являться источником загрязнения вод при переходе загрязнителей из адсорбированной формы в растворимую при контактах с соленой водой (Гордеев, 1983, 2012; Мискевич и др., 2021). В связи с этим одной из наиболее актуальных проблем для макроприливных эстуариев является достоверная оценка пространственно-временной изменчивости содержания взвешенных веществ в зоне смешения речных и морских вод и специфики формирования в них зон повышенной мутности. При этом процессы формирования высокой мутности вод в эстуариях малых рек остаются малоизученными.

Эрозионно-аккумулятивные процессы в эстуариях Мезени и Кулая обусловлены речным стоком воды и наносов, приливными течениями, ветровым волнением и вдольбереговым потоком наносов за счет абразии морских берегов. В балансе стока наносов, поступающих в эстуарии Мезени и Кулая, преобладают наносы морского происхождения (Медведев, 1971; Невесский и др., 1977; Система ..., 2012).

Высокая мутность воды и транспорт наносов во всем Мезенском заливе и эстуариях Мезени и Кулая активно влияют на переформирование донных форм рельефа и морфологии всей устье-

вой области и береговой зоны залива. В целом в эстуариях формируется так называемая “система удержания” наносов внутри эстуария, границы которых определяются с речной стороны пределом проникновения верхней части галоклина, а со стороны моря — зоной резкого снижения транспортирующей способности потока вследствие уменьшения стоково-отливных скоростей течения.

Седиментационный цикл в эстуариях включает в себя начальный взмыв тонких осадков со дна после их соленостной флокуляции и агрегирования на контакте пресных и соленых вод. Укрупнение частиц вызывает их осаждение на дно, накопление, уплотнение и сохранение до следующего эрозионного цикла. В фазу прилива, при росте скоростей выше критических (более 0.3 м/с), мелкие осадки взмучиваются и вовлекаются в водную толщу с последующим удалением из зоны аккумуляции.

На устьевом взморье рр. Мезени и Кулоя перенос взвешенных наносов и прогрессирующая эрозия усиливаются при совместном воздействии волн и суммарных течений (как приливных, так и дрейфовых), которые трудно разделить на приливном устьевом взморье (Римский-Корсаков и др., 2018; Dyer, 1986).

Первые исследования гидрологического режима устья р. Мезень были выполнены в 1914–1915 гг. при производстве портовых изысканий (Вихман, 1925). При советской власти портовые изыскания в устье Мезени были продолжены в 1928–1931 гг. Севпортисом (Протопопов, 1932). В связи с проектированием в устьях Мезени и Кулоя и в Мезенском заливе приливной электростанции (ПЭС) в 1958–1961 гг. значительные инженерные изыскания выполнило Ленинградское отделение Гидроэнергопроекта. Эти работы периодически производились Ленгидропроектом в 1977–1978 гг. и 1988 г. (Горелков и др., 1981).

В 1960-е годы Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР провел исследования геологического и геоморфологического строения дна и берегов Мезенского залива и эстуариев Мезени и Кулоя, а также мощности, состава и происхождения рыхлых отложений в створах расположения будущей Мезенской ПЭС (Медведев, 1971; Невесский и др., 1977).

Регулярные наблюдения за гидрологическим и ледовым режимом эстуария Мезени проводились усилиями гидрометеорологического поста в д. Семжа с 1931 по 1944 г. и в 1962–77-х годах. В дальнейшем до начала 1990-х годов в устьях рр. Мезени и Кулоя работали экспедиции Северного УГМС, Государственного океанографического института (ГОИНа) и Института водных проблем АН СССР (Демиденко, 1991; Полонский и др., 1992; Седелков, 1970).

В связи с возрождением интереса к проектированию Мезенской ПЭС в 2005–2009 гг. сотрудниками ГОИНа и МГУ были проведены инженерно-гидрологические изыскания в устьях рек Мезенского залива (Демиденко и др., 2008). В зимний период 2005 и 2008 гг. проводились обследования берегов и акватории Мезенского залива для оценки состояния берегового припая, дрейфа льда и физических характеристик ледовых образований (Система ..., 2012; Усачев и др., 2008). В 2015–20-х годах изучались трансформация приливных уровней и расходов воды, пространственно-временной изменчивости концентрации взвешенного вещества, исследования подводного рельефа и донных наносов (Римский-Корсаков и др., 2018). В этих исследованиях принимал участие автор статьи.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мезенский залив и устьевые области рр. Мезени и Кулоя расположены в Архангельской области, в юго-восточной части Белого моря, на северо-востоке Европейской территории России. Устьевая область Мезени и Кулоя относится к эстуарному типу. Она имеет сложную структуру, которая включает два речных устьевых участка, два расширяющихся вниз по течению приливных эстуария и общее устьевое взморье — южную часть Мезенского залива (рис. 1). Вершина устьевой области р. Мезень располагается в 82 км от устьевого створа эстуария, в районе впадения крупного правого притока — р. Пеза (Михайлов, 1997). За устьевой створ (УС) Мезени принимается створ в направлении м. Масляный—м. Рябинов. Вершина эстуария Мезени находится в 42 км от УС, в районе г. Мезень у м. Белый Нос. Вершина устья р. Кулой располагается в районе д. Карьеполье, в 100 км от УС. Вершина эстуария Кулоя расположена в 40 км от УС, в 8 км выше по течению от с. Долгощелье, у м. Заячий Нос. За устьевой створ этой реки принимается линия по траверсу м. Карговский—м. Харин Нос.

Общая площадь водной поверхности р. Мезень в пределах УС, с учетом эстуария, составляет 195 км². Площадь поверхности в полную воду в эстуарии Мезени составляет около 162 км². Ширина эстуария Мезени в УС составляет 9.0 км. Выше по течению ширина эстуария постепенно уменьшается и в вершине эстуария у м. Белый Нос составляет 1.35 км. Воронкообразный эстуарий Кулоя имеет площадь 80 км². Ширина эстуария Кулоя в устьевом створе в полную воду составляет 4.5 км, в вершине эстуария выше с. Долгощелье — 0.5 км. Длина устьевого участка Кулоя выше эстуария составляет около 60 км (Полонский и др., 1992).

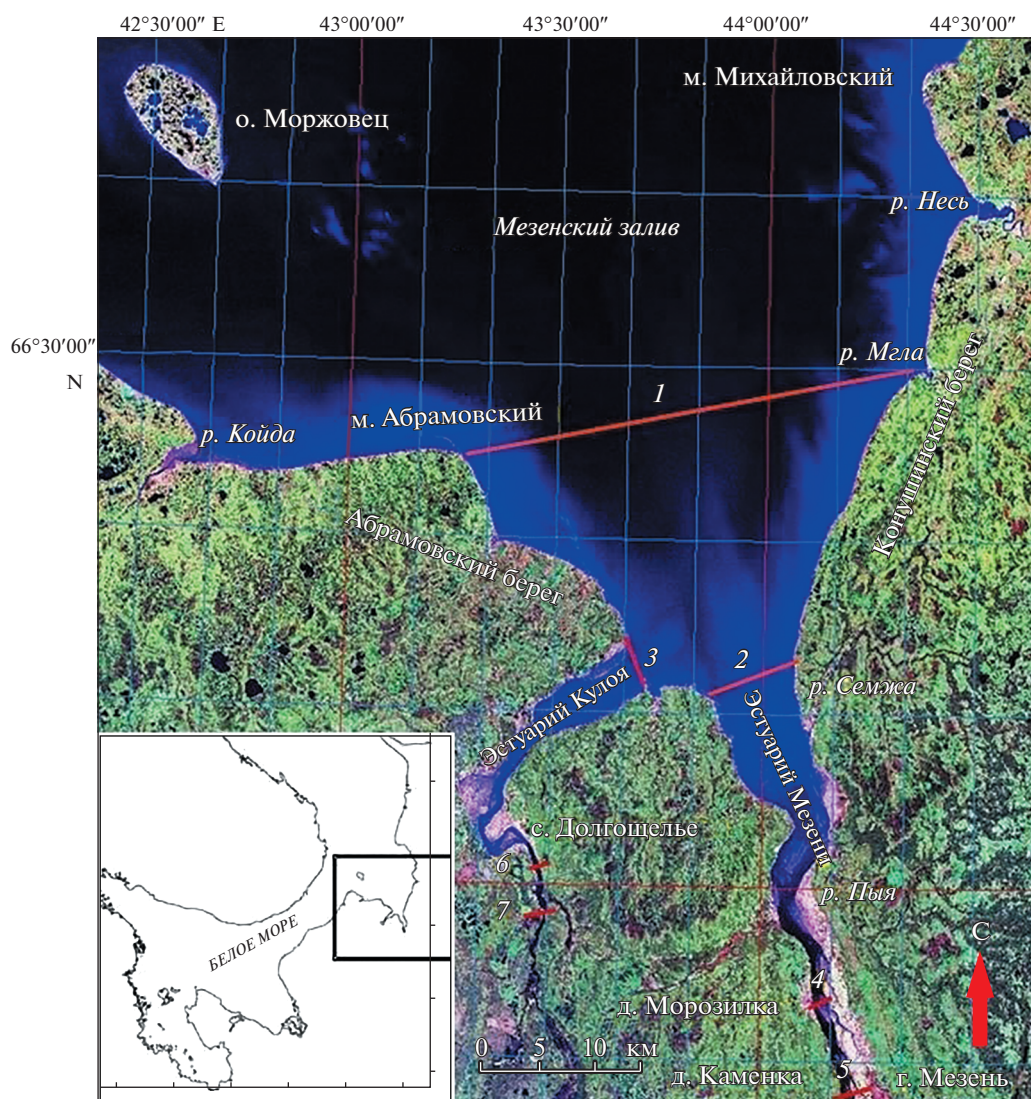


Рис. 1. Схема Мезенского залива и устьевой области Мезени и Кулоя (основа: Google Earth, GeoCover™, 2005). 1 – граница устьевоего взморья: м. Абрамовский–р. Мгла; 2 – устьевой створ эстуария Мезени; 3 – устьевой створ эстуария Кулоя; 4 – граница проникновения морской воды в эстуарий Мезени; 5 – вершина эстуария Мезени у м. Белый Нос; 6 – граница проникновения морской воды в эстуарий Кулоя выше с. Долгощелье; 7 – вершина эстуария Кулоя у м. Заячий Нос.

Устья Мезени и Кулоя имеют общее устьевое взморье, ограниченное с севера линией, следующей по направлению м. Абрамовский–устье р. Мгла. Она совпадает с положением изобаты 10 м. По характеру гидрологических и геоморфологических процессов устьевое взморье относится к полужакрытому и отмелому типу (Михайлов, 1997). Ширина устьевоего взморья равна 48 км, средняя глубина устьевоего взморья составляет 7 м.

Устье рр. Мезень и Кулой используется для морского и речного судоходства, а также рыбного промысла местного значения. В устье реки находятся г. Мезень и п. Каменка, в котором находится Мезенский морской порт и лесозавод. Морское судоходство осуществляется лишь до п. Ка-

менка (36 км от УС). Участок р. Мезень выше п. Каменка доступен только для речных судов и лодок. В устье р. Кулой находится с. Долгощелье, до которого в полную воду осуществляется морское судоходство. Участок р. Кулой выше с. Долгощелье до д. Кулой доступен только для мелких речных судов и лодок (Демиденко, 2008; Полонский и др., 1992).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования гидрологического режима эстуариев Мезени и Кулоя использовались как стандартные приборы, принятые для наблюдений в Росгидромете, так и современные измери-

тельные комплексы. Для измерения приливных колебаний уровня в 2003–2005 гг. использовались самописцы уровня моря ГМ-28 (мареографы береговые), в последующие годы использовались автономные записывающие устройства — логгеры двух типов: Levelogger Solinst модель 3001 LT F15/M5, Levelogger Edge модель 3001, записывающие показания уровня и температуры воды при длительном мониторинге подземных и поверхностных вод и датчики модели DST-senti-TD для измерения уровня моря, температуры и солености. Высотная и плановая привязка мгновенных уровней над средним уровнем моря и места отбора проб воды проводилась с помощью приемников DGPS Trimble 5700, являющейся базовой станцией на реперах, принадлежавших ГМС Семжа и порту Каменка, и переносным приемникам JavadTriumph-VS и JavadTriumph-1.

Измерение скоростей течения и приливных расходов воды в эстуариях Мезени и Кулоя производились с помощью измерителей скорости течения ИСП-1 в зоне пресных речных вод, акустических доплеровских измерителей расхода воды ADCP 1200 Rio Grande в зоне смешения пресных и соленых вод и измерителя ADCP серия RiverRay в морской части эстуариев. Для этого разбивались расходные створы перпендикулярно стрежневой части потока, и с интервалом не менее 1 ч делалась проводка прибора на катере от урезов двух берегов туда-обратно. Точность измерений расходов не превышала 5%. Синхронно в расходном створе с помощью логгера измерялись приливоотливные колебания уровня.

Для измерения температуры и солености воды на суточных станциях и при производстве продольных разрезов вдоль эстуариев применялся многопараметровый зонд YSI серии 6600. Отбор проб воды для определения концентрации взвешенного вещества в различных зонах эстуариев производился с помощью пластиковой емкости с поверхностного горизонта и батометром Нискина объемом 3 л с глубинных горизонтов. Для определения весовой концентрации вещества при мутности воды свыше 1 кг/м^3 пробы фильтровались через плотные бумажные фильтры на вакуумном приборе Куприна, при более низких концентрациях взвеси — через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм на фильтровальной установке. Погрешность измерений не превышала $\pm 3\%$. Грунтовые съемки с отбором поверхностного слоя наносов (5–10 см) производились синхронно с промером и во время остановки судна при помощи дночерпателей различных конструкций. Гранулометрический состав донных осадков определялся ситовым методом, взвешенного вещества в речной и морской воде после отбора проб — в лабораторных условиях с помощью лазерного прибора Malvern Instruments MasterSizer M7.08.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гидрологический режим устьев рек Мезени и Кулоя

Режим уровней воды в устьевой области рр. Мезени и Кулоя зависит от водоносности, заторов и зажоров, стонов и нагонов, приливоотливных колебаний уровня и течений. Годовой ход уровня воды характеризуется хорошо выраженным подъемом весной и низкими уровнями воды в периоды летней и зимней межени (Ресурсы ..., 1972). Амплитуда стоковых колебаний уровня воды в низовьях Мезени составляет около 5–7 м, а в низовьях Кулоя — 3.5–4.0 м (Полонский и др., 1992).

Общая площадь бассейна р. Мезень составляет 78000 км^2 . В вершине устьевой области р. Мезени расходы воды не измеряются. Сток воды в устье Мезени (условно отнесен к створу у д. Дорогорское) получен суммированием стока Мезени у д. Малонисогорской и Пезы у д. Игумново. За период наблюдений с 1921 по 2016 г. средний годовой расход воды в вершине устьевой области р. Мезень составил $850 \text{ м}^3/\text{с}$, годовой объем стока воды в замыкающем створе с. Дорогорское составил $27.4 \text{ км}^3/\text{год}$ (Римский-Корсаков и др., 2018).

Сток по устью Кулоя получен расчетным путем и средний расход в вершине устьевой области р. Кулой у д. Карьеполье равен $180 \text{ м}^3/\text{с}$, объем стока — $6.76 \text{ км}^3/\text{год}$ (Геоэкологическое ..., 2007). Коэффициент вариации годового стока равен 0.19.

Небольшая среднемноголетняя мутность р. Мезень связана с низкой интенсивностью эрозионных процессов в регионе. Средняя мутность воды в вершине устьевого участка Мезени составляет 30 г/м^3 , а в половодье мутность увеличивается до 100 г/м^3 . Средний годовой расход взвешенных наносов р. Мезень в створе д. Малонисогорская равен 15.3 кг/с , наибольший — 34.0 кг/с (1949 г.), наименьший — 3.6 кг/с (1992 г.). Объем стока взвешенных наносов равен 0.48 млн т/год . В вершине устьевой области р. Мезень он возрастает до $0.7–0.9 \text{ млн т/год}$ (Демиденко, 2008). Величина стока влекомых наносов равна 0.36 млн т (Алексеевский, 1998). Сток наносов в устье р. Кулой не исследован.

Гидрологический режим устьевого взморья и эстуариев Мезени и Кулоя

Наиболее ярко выражены в Мезенском заливе приливные полусуточные колебания уровня. Максимальная величина полусуточных приливов возрастает в Мезенском заливе с севера на юг в сторону эстуариев Мезени и Кулоя от о. Моржовец до р. Семжи с 6.8 до 9.8 м, а в эстуарии Кулоя у м. Карговский до 10.1 м. По мере продвижения приливной волны к вершине мелководного зали-

ва она трансформируется. Время роста уровня быстро уменьшается по сравнению со временем падения уровней воды. В районе устья р. Семжи это различие составляет уже почти 2 ч.

По расчетам, максимальные годовые уровни воды 1%-ой обеспеченности достигают 10.35 м над наименьшим теоретическим уровнем в устьевом створе эстуария Мезени. Расчетная величина нагона 1%-ой обеспеченности в районе м. Абрамовский не превышает 1.86 м, а стога — 1.46 м (Гидрометеорологические ..., 1989).

Мезенский залив Белого моря обладает значительной приливной энергией. По расчетам (Гидрометеорологические ..., 1989) в заливе диссипирует 55% приливной энергии. По количеству диссипирующей приливной энергии на единицу площади (около 0.3×10^7 Вт/км²) Мезенский залив близок к аналогичному показателю для “приливного рекордсмена” — залива Фанди (Канада) (Седелков, 1970; Система ..., 2012).

Приливные течения в заливе направлены по часовой стрелке (Гидрометеорологические ..., 1989). Оси эллипсов приливных течений в северной части Мезенского залива направлены на юго-восток (приливные течения) и на северо-запад (отливные течения). Скорости приливных течений в Мезенском заливе достигают 1.50–1.75 м/с. По данным (Гидрометеорология ..., 1991) в северо-восточной части Мезенского залива они максимальные и могут достигать 2.5 м/с. Минимальные скорости приливных течений наблюдаются в момент смены течений и равны 0–0.05 м/с. Смена течения в средней части эстуария может происходить мгновенно.

Предельная дальность распространения приливных колебаний уровней воды в р. Мезень в зависимости от сезона года и водности реки составляет от 60 до 90 км от УС (Михайлов, 1997; Седелков, 1970). Приливные колебания уровня воды в устьевой области р. Кулой распространяются на расстояние до 100 км от УС.

Средний уровень воды, зафиксированный на ГМС Семжа, составил 350 см над местным нулем. Многолетний размах колебаний уровня воды — 1003 см, максимальный зафиксирован в июле 1956 г. и составил 920 см над нулем поста (или 544 см над нулем Балтийской системы (БС)). Минимальный уровень воды был зафиксирован в июне 1964 г. и составил —83 см над нулем поста (или —459 см БС) (Демиденко, 2008).

Сизигийный прилив в районе УС у д. Семжи достигает 8.5 и 5.0 м в квадратуру. Продолжительность подъема уровня воды равна 5.0 ч, падения уровня воды — 7.4 ч, коэффициент асимметрии приливной волны $K_{ac} = 0.39$.

Характер трансформации приливной волны в эстуариях Мезени и Кулой может быть охарактеризован двумя параметрами:

1) коэффициентом прилива $K_{пр}$ — отношением величины прилива $\Delta H_{пр,x}$ (или амплитуды A_x) в данном пункте измерения вдоль эстуариев к величине прилива ΔH_0 (амплитуде A_0) в УС эстуария Мезени у м. Масляный или эстуария Кулой у м. Карговский, описываемый формулами:

$$K_{пр} = \frac{\Delta H_{пр,x}}{\Delta H_0} \quad \text{или} \quad K_{пр} = \frac{A_x}{A_0};$$

Таблица 1. Характеристики трансформации приливной волны в устьевой области р. Мезени

Пункт	Расстояние от устьевого створа, км	Ширина русла, км	Величина прилива, м		Коэффициент прилива		Время в сизигию, ч—мин	
			Сиз	Кв	Сиз	Кв	Рост	Падение
<i>Мезенский залив</i>								
м. Луханов	−16.0	31.0	7.28	4.70	0.93	0.96	5—09	7—15
м. Еловый	−7.5	19.0	7.65	4.78	0.98	0.98	4—53	7—31
<i>Эстуарий Мезени</i>								
м. Рябинов	0.0	9.0	7.80	5.00	1.00	1.00	4—43	7—41
д. Семжа	6.0	7.5	7.82	5.13	1.02	1.04	4—31	7—53
м. Васильевич	9.0	6.0	7.46	5.10	0.96	1.04	4—10	8—14
д. Окулово	19.0	4.5	5.84	4.11	0.75	0.84	3—26	8—58
п. Морозилка	31.0	1.8	4.38	3.17	0.56	0.63	2—36	9—50
п. Каменка	36.0	1.8	4.21	3.11	0.54	0.62	2—30	9—55
м. Белый Нос	42.0	1.3	3.61	2.40	0.46	0.48	2—14	10—12
<i>Устьевой участок</i>								
д. Затон	63.0	1.0	0.72	0.02	0.09	0.04	1—25	10—59

Примечание: Сиз — сизигия; Кв — квадратура.

Составлено по: (Седелков, 1970; Система ..., 2012).

2) коэффициентом асимметрии приливной волны (K_{ac}):

$$K_{ac} = \frac{2(\tau_{\text{пад}} - \tau_{\text{рост}})}{\tau_{\text{пр}}},$$

где $\tau_{\text{пад}}$ — время падения уровня во время отливной фазы, $\tau_{\text{рост}}$ — время роста уровня во время приливной фазы, $\tau_{\text{пр}}$ — полный период прилива, в среднем берем 12 ч 25 мин (12.42 ч) (табл. 1).

Начиная от створа д. Семжи, вверх по эстуарию Мезени, приливы быстро уменьшают свою величину. В вершине эстуария (м. Белый Нос) прилив уменьшается на 60%. Время добегания гребня приливной волны в эстуарии Мезени от д. Семжа до п. Каменка (36 км) составляет в среднем 80 мин, а время добегания подошвы приливной волны — 220 мин. Фазовая скорость приливной волны в эстуарии Мезени составляет в среднем 25 км/ч. Коэффициент асимметрии прилива на всем протяжении эстуария Мезени увеличивается, а коэффициент прилива к вершине эстуария уменьшается более чем в 2 раза, вблизи вершины устьевой области становится в сизигию менее 0.09 (см. табл. 1).

Трансформация приливной волны в разных пунктах устьевой области Мезени в период сизигийных приливов представлена на рис. 2.

Во время сизигийных приливов наибольшие обратные (приливные) скорости течения в устье-

вом створе Мезени отмечаются через 3 ч после малой воды (МВ) и за 2–3 ч до полной воды (ПВ) и достигают 1.6–1.8 м/с, а наибольшие скорости прямого (отливного) течения наблюдаются через 3 ч после ПВ и достигают 1.2 м/с. Наибольшие скорости прямого течения в квадратуру отмечаются через 3 ч после ПВ и достигают 1.4 м/с. При смене течений на ПВ и МВ скорости падают почти до нуля. Но смена течений с прямого на обратное и с обратного на прямое происходит почти мгновенно. В приливную фазу смена течений начинается у берегов и дна, а потом распространяется на все поперечное сечение русла. В отливную фазу смена течений с обратного на прямое (в сторону моря) происходит в начале в стрежневой части потока, а потом довольно быстро распространяется на весь поток.

В других частях эстуария (Демиденко, 2008), скорости приливных и отливных течений может быть заметно больше, чем в нижней части эстуария. На участке м. Толстик–устье р. Пыя скорость течения во время прилива достигает наибольших для эстуария Мезени значений — 2.9–3.0 м/с. Далее в сторону вершины эстуария скорости приливных течений уменьшаются. В районе д. Окулово скорости приливного течения достигают 1.8 м/с, а отливного — 1.6 м/с. Смена течений в этом месте происходит через 30–40 мин после МВ. Продолжительность приливного течения здесь 3.5 ч, отливного — 9 ч. В районе п. Каменка максималь-

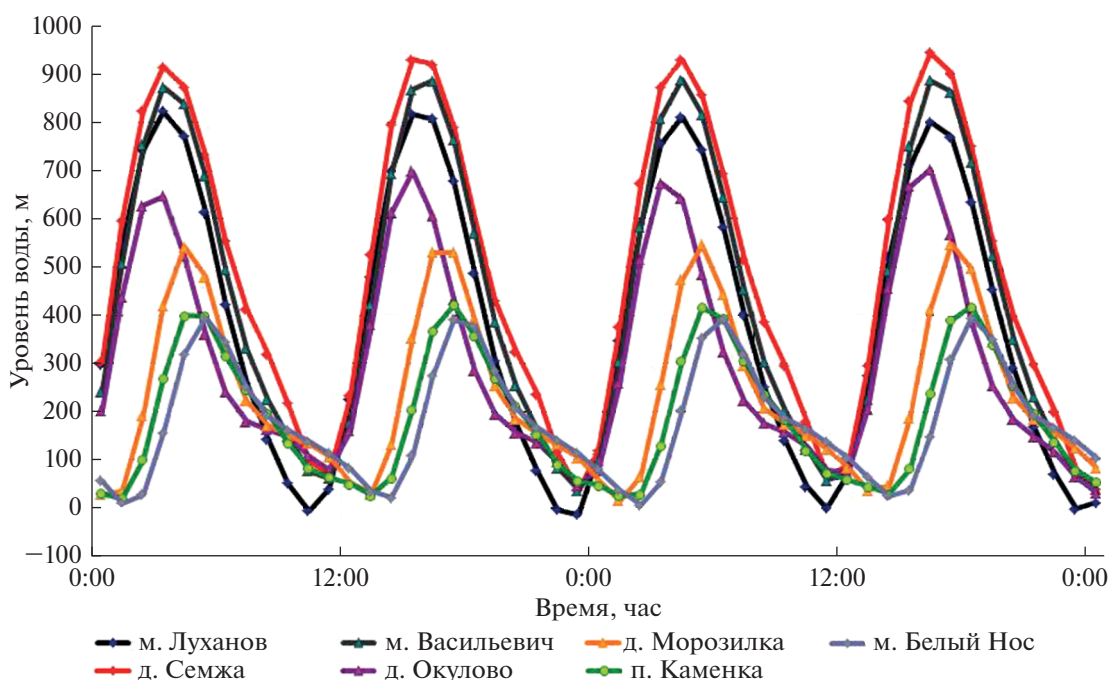


Рис. 2. Трансформация приливной волны в разных пунктах Мезенского залива и эстуария Мезени в период сизигийных приливов 2–4 августа 2015 г.

Пункты: 1 — м. Луханов (16 км от устьевового створа); 2 — д. Семжа (6 км); 3 — м. Васильевич (9 км); 4 — д. Окулово (19 км); 5 — д. Морозилка (31 км); 6 — п. Каменка (36 км); 7 — м. Белый Нос (42 км).

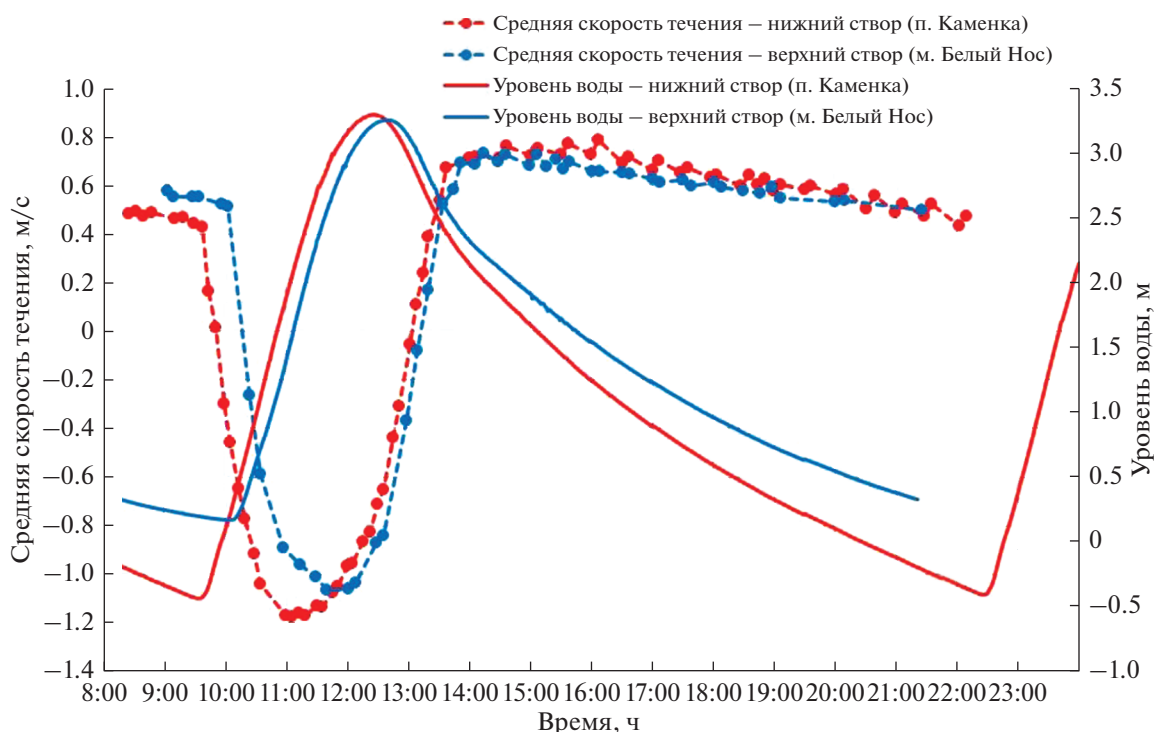


Рис. 3. Синхронные графики хода приливных уровней и средних скоростей течения в расходных створах п. Каменки и в вершине эстуария Мезени у м. Белый Нос в период квадратурных приливов 9 августа 2018 г.

ные приливные течения достигают 1.6 м/с, а в вершине эстуария Мезени у м. Белый Нос в период сизигии максимальные скорости течения достигают 1.4 м/с (рис. 3).

В нижней части эстуария Мезени пока прибрежные осушки и отмели (так называемые “кошки”) в русле еще не покрыты водой, приливное течение идет вверх по фарватеру. При более высоких уровнях воды приливное течение устремляется через отмели к фарватеру, создавая сильную косоструйность. После затопления разделяющих каналы отмелей и кошек приливной поток действует вдоль генеральной оси эстуария. При этом образуются течения через затопленные отмели, многочисленные сулои на стыках отдельных струй потока. Отливное течение начинается поверх отмелей и потом распространяется на стрежневую зону (Полонский и др., 1992). Величина перемещения водной массы реверсивным потоком во время приливного цикла вверх и вниз по эстуарию Мезени составляет в среднем 10 км.

В эстуарии Кулоя среднемноголетнее значение сизигийных приливов у м. Харин Нос (УС) составляет 7.9 м и квадратурных — 5.8 м. В период равноденственных приливов в сизигию величина прилива достигает 9.5 м и в квадратуру — 4.8 м. Продолжительность подъема уровня воды равна 5.1 ч, падения уровня воды — 7.3 ч, коэффициент асимметрии приливной волны $K_{ас} = 0.34$. Начи-

ная от УС м. Харин Нос—м. Карговский, вверх по эстуарию Кулоя, приливы уменьшают свою величину незначительно и в районе м. Бараний (13 км от УС) прилив уменьшается на 10%, достигая величины 7.1 м в сизигию и 4.1 м в квадратуру. Значительная трансформация приливной волны происходит в средней части эстуария на осыхающих отливных отмелях и осередках в районе м. Митинского и с. Долгощелье. В вершине эстуария Кулоя в районе м. Заячий Нос, в 8 км выше по течению от с. Долгощелье, величина прилива в промежуток достигает значения 3.1 м, что составляет 45% от величины прилива на УС у м. Харин Нос (в промежуток величина прилива равна 6.8 м).

Во время сизигийных приливов наибольшие скорости приливного течения на УС Кулоя отмечаются через 3 ч после МВ и за 1.5 ч до ПВ и достигают 1.4 м/с. Наибольшие скорости отливного течения наблюдаются через 2.5 ч после ПВ и достигают 1.2 м/с. При смене течений в ПВ и МВ скорости падают до нуля. Главной особенностью режима приливных течений в эстуариях Мезени и Кулоя является то, что наибольшие скорости на приливе превышают максимум отливных скоростей, что объясняется большой интенсивностью приливного подъема и образованием больших обратных уклонов водной поверхности за сравнительно короткое время после смены течения.

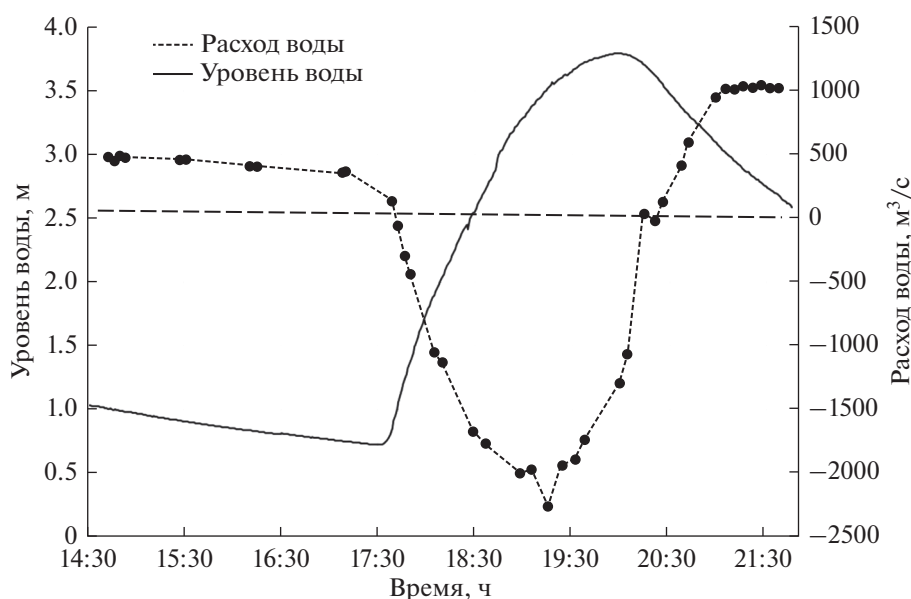


Рис. 4. Синхронные графики хода приливных уровней и расходов воды в вершине эстуария Кулоя у м. Заячий Нос в период промежуточных приливов 18 августа 2018 г.

В других частях эстуария скорости приливных и отливных течений больше, чем в нижней части эстуария Кулоя. На участке с. Долгощелье скорость течения во время прилива достигает наибольших для эстуария Кулоя значений до 2.5 м/с. Далее в сторону вершины эстуария скорости приливных течений уменьшаются до 1.25 м/с, отливного — 1.1 м/с. Смена течений в этом месте происходит через 10 мин после МВ. Продолжительность приливного течения здесь 2.6 ч, отливного — 9.8 ч.

В период сизигии объем приливной призмы в устье р. Мезени составляет около 1 км³. В эстуарии Мезени 96% этого объема — морская вода, входящая из Мезенского залива; остальные 3–4% приходятся на речные воды, которые участвуют в формировании приливной призмы (Седелков, 1970). Средняя мощность приливной волны на входе в устье р. Мезени составляет около 2 млн кВт. Максимальный приливной расход на устьевом створе эстуария Мезени достигает 100000 м³/с, эстуария Кулоя — 40000 м³/с. Расход воды в период сизигийных приливов на устьевом створе эстуария Мезени, измеренный в августе 2015 г., составил 89000 м³/с. Максимальный расход воды в период промежуточных приливов вблизи вершины эстуария Кулоя, измеренный в августе 2018 г., изменялись за приливный цикл более чем в 2 раза, составляя 1045 м³/с в отлив и 2256 м³/с в период прилива (рис. 4).

Зона смешения и соленость воды в эстуариях

Воды Мезенского залива круглогодично являются хлоридно-натриевыми. Диапазон изменения

солёности в Мезенском заливе — 20.0–33.6 единиц практической солёности (епс). Весной наблюдается максимальное распреснение, и практически весь залив занимает зона смешения речных и морских вод. Основной поток распресненных вод идет вдоль восточного (Конушинского) берега, поэтому величина солёности в восточной части устьевого взморья на 5–6 епс меньше, чем в западной. Весной солёность воды поверхностного слоя Мезенского залива уменьшается с северо-запада на юго-восток с 27.5 до 24.0 епс. Летом зона смешения речных и морских вод заметно смещается к югу, солёность в Мезенском заливе изменяется от 20 до 28 епс. В сентябре–октябре среднемноголетняя солёность вод устьевого взморья составляет около 26 епс. Водные массы в Мезенском заливе хорошо перемешаны. Вертикальные градиенты солёности воды малы, горизонтальные составляли в поверхностном слое 1.2 епс, у дна 1.0 епс на 1 км (Гидрометеорологические ..., 1989).

В эстуариях Мезени и Кулоя формируется зона смешения речных и морских вод. Протяженность зоны смешения в эстуарии Мезени составляет около 31 км, в эстуарии Кулоя — 34 км. Максимальные значения солёности воды в устьевых створах эстуариев (26 епс) наблюдаются при сизигийных приливах и штормовых нагонах в маловодную летнюю межень. В этом случае морские воды с солёностью 1 епс могут достигать створа д. Морозилки (31 км от УС). В эстуарии Кулоя дальность проникновения солёных вод с солёностью 1 епс составляет 34 км от УС. Средняя величина продольных градиентов солёности составляет 1.5–2.0 епс на 1 км, достигая на отдельных участ-

ках значений 3.0–4.0 епс. Вертикальный градиент солености не превышает 0.1–0.4 епс на 1 м.

Наблюдения на суточных станциях в устьевых створах эстуариев Мезени (станция Лопбуй) и Кулоя (станция—траверз м. Лиственичный) в летнее время 2015 г. показали, что соленость воды на УС эстуария Мезени при квадратурных приливах изменяется за приливный цикл в пределах 17.0–23.0 епс, на траверзе д. Семжа — в пределах 3.5–21.5 епс. В УС эстуария Кулоя соленость воды изменяется в пределах 6.0–24.0 епс в зависимости от фазы прилива (Система ..., 2012).

Динамика взвешенных наносов в эстуариях Мезени и Кулоя

Эрозионно-аккумулятивные процессы в прибрежной зоне моря и эстуариях Мезени и Кулоя обусловлены приливными течениями, речными расходами воды и стоком наносов, ветровым волнением и вдольбереговым потоком наносов за счет абразии морских берегов. В приливных морях и эстуариях главной причиной изменения потока наносов является абразия морских берегов. В Мезенском заливе ее темпы могут достигать 10 м/год (Зенкович, 1962). По данным (Медведев, 1971; Невесский и др., 1977) на участке устье р. Семжа—м. Рябинов за 5 лет берег эстуария Мезени отступил на 15 м. В среднем скорость отступления высоких и обрывистых берегов, сложенных рыхлыми позднечетвертичными отложениями, в нижней части эстуариев Мезени и Кулоя в последний годы составляет около 1.5–1.8 м/год. Интенсивная абразия восточного берега эстуария Мезени вблизи устья р. Семжа привела к разрушению жилой застройки.

В балансе наносов, поступающих в эстуарии Мезени и Кулоя, преобладают наносы морского происхождения. Количество обломочного материала, поступающего в водную толщу от абразии берегов Мезенского залива, достигает 30 млн т/год (Медведев, 1971; Невесский и др., 1977). В эстуарий Мезени за год в среднем поступает 6–8 млн т в зависимости от штормовой активности в Мезенском заливе. В сравнении с этим объемом сток речных наносов, равный 0.7–0.9 млн т/год, оказывается относительно малым (Демиденко, 2008). Наносы, перемещаемые вдольбереговыми течениями ветрового происхождения, составляют около 30% объема абразии. Остальная часть этого объема, преимущественно илистые частицы, переносятся приливными течениями.

Под воздействием преобладающих в летнее время ветров северных румбов крупнообломочный материал движется к югу, в сторону эстуариев Мезени и Кулоя. Крупный обломочный материал перемещается в самой верхней части профиля береговой зоны, почти у уреза полной воды.

Этот поток имеет небольшой объем. На участках расположения устьев рр. Чижа, Яжма, Несь, Семжа объем транспортируемого материала периодически уменьшается до нуля.

Различные типы эстуариев имеют и различные режимы переноса и осаждения наносов. Существенная роль процесса смешения вод на характер переноса и осаждения наносов проявляется в устьях рек с клином соленых вод. Клин соленых вод наблюдается в устьях рек с малой величиной прилива и большой величиной речного расхода. Это соотношение проявляется в верхней границе проникновения осолоненных вод с величиной солености 1–5 епс вблизи вершины эстуария в период полной воды.

В приливных устьях рек с клином соленых вод взвешенные наносы переносятся в речную зону за счет результирующей циркуляции вод (часто употребляемый термин “эстуарийной циркуляции”). В речной части зоны смешения, характерной для верхней части эстуариев Мезени и Кулоя, взвешенные наносы перемещаются из более соленых придонных слоев в поверхностные слои, где результирующий поток выносит наносы в направлении моря. В средней части эстуария взвешенные наносы осаждаются в придонные слои, присоединяясь к наносам морского происхождения. Затем эти наносы поступают вместе с клином соленых вод обратно в речную часть эстуария, где они осаждаются на дно в зоне нулевого придонного результирующего течения (в нодальной точке) (Мак-Дональд, О’Конор, 1983; Nichols, 1986).

Максимальные скорости в слоях пресной воды наблюдаются у поверхности в речной части эстуария, в то время как максимальные скорости в слоях соленой воды имеют место у дна и около верхней (удаленной от моря) границы соленостного клина. Скорости течения пресной воды уменьшаются с расстоянием от поверхности, а в соленой воде они уменьшаются с расстоянием от дна, в результате чего переходная граница нулевой скорости находится около поверхности раздела двух водных масс с разной плотностью.

Таким образом, более крупные и тяжелые частицы наносов, влекомые и сальтирующие по дну реки под воздействием течения пресной воды, останавливаются, достигнув острия клина проникновения соленой воды. Более легкие частицы, которые перемещаются в пресной воде во взвешенном состоянии, постепенно опускаются сквозь поверхность раздела по длине клина проникновения, переносятся вверх по течению соленой водой. Следовательно, участок дна эстуария, занимаемый верхней границей клина проникновения соленой воды, является местом интенсивной аккумуляции наносов по сравнению с участками, расположенными выше и ниже по течению. Более тяжелые частицы откладываются непосредственно

выше по течению от границы проникновения, а более легкие — непосредственно ниже по течению от этой границы. Обычно на этом участке происходит быстрое обмеление фарватеров (Демиденко, 1994; Римский-Корсаков и др., 2018).

В зоне смешения речных и морских вод из-за различной плотности и солевого состава наблюдаются различные механизмы, которые способствуют образованию крупных хлопьев из мелких взвешенных частиц: солоностная флокуляция, склеивание частиц органическим веществом, столкновение частиц в процессе их переноса, захват более крупными частицами более мелких при осаждении в спокойных условиях. Очень часто трудно выделить главный механизм, ответственный за образование и разрушение хлопьев. Поэтому этот дискуссионный вопрос стимулирует исследования в других эстуариях и с применением новых методов (Гордеев, 2012; Демиденко, 2009; Мискевич и др., 2021; Eisma, 1986).

В устье реки взвешенные наносы существуют в виде отдельных частиц, микрохлопьев и макрохлопьев. В переносе и разрушении хлопьев велика роль турбулентности воды. Размер самых малых турбулентных вихрей определяет максимальный размер макрохлопьев. Кроме размеров взвешенных флокулированных наносов важно знать их пористость и плотность. Это сильно влияет на скорость осаждения хлопьев в воде с различной солоностью. Скорость осаждения взвешенных хлопьев сильно зависит от концентрации взвешенных частиц в воде и изменяется в эстуариях с различием физико-химических свойств наносов (Гордеев, 1983, 2012; Eisma, 1986; Sakamoto, 1972).

Седиментационный цикл в эстуариях включает в себя начальный взмыв тонких осадков со дна до момента их флокуляции и агрегирования на контакте пресных и соленых вод. Укрупнение частиц вызывает их осаждение на дно, накопление, уплотнение и сохранение до следующего эрозионного цикла. Периодическое возникновение застойных условий в период полной воды при сизигийных приливах (в течение 0.5–1.0 ч) приводит к осадконакоплению в средней части эстуариев с высокими скоростями за приливный цикл — до 0.10 м. Однако в последующие фазы приливного цикла при максимальных скоростях течения аккумулялированные осадки вновь взмучиваются и вовлекаются в водную толщу с последующим удалением из застойной зоны. Крупные фракции отложений в квадратуру могут оставаться на дне. Если они остаются в составе отложений больше 3–5 дней, то постепенно консолидируются, что препятствует их размыву в период следующего сизигийного прилива (Демиденко, 1994).

Отбор проб воды с разных горизонтов на стрежне потока в эстуариях Мезени и Кулоя в пе-

риоды ПВ и МВ и анализ гранулометрического состава взвешенных наносов показал, что средний объемный размер частиц у поверхности и у дна в период ПВ составлял 12.0 мкм, а в период МВ — 8.4 мкм. В период ПВ в эстуарии Мезени в районе впадения р. Семжи присутствуют соленые воды 20 епс. А в период МВ соленые воды замещаются распресненными водами менее 3 епс. Размер взвешенных частиц соответствует микрохлопьям. Присутствие макрохлопьев размером более 100 мкм не обнаружено, что связано с их разрушением при отборе батометром и в процессе анализа.

Формирование максимума мутности воды в макроприливных эстуариях

Характерной особенностью динамики взвешенных наносов в зоне смешения речных и морских вод является формирование зоны максимальных значений мутности или “литоклина” (Dyer, 1986; Kirby, 1983; Officer, 1980). Возникновение этой зоны обусловлено процессами флокуляции глинистых частиц и органического вещества, а также особенностями эстуарийной циркуляции воды (Демиденко, 1991, 2009; Dyer, 1986; Postma, 1967). В ее пределах мутность воды значительно превосходит мутность в речных и морских водах. Образование максимума мутности в эстуариях Мезени и Кулоя зависит от трансформации и асимметрии приливной волны при ее проникновении к вершине эстуариев. Волна в прилив распространяется здесь с большей скоростью, чем во время отлива. В результате наносы в основном перемещаются в сторону приливно участка реки. Период смены течения в ПВ имеет большую продолжительность по сравнению с МВ. Поэтому существуют предпосылки для аккумуляции части взвешенных частиц и увеличения объема отложений. При понижении уровня в МВ взвешенные частицы концентрируются в стокво-отливных ложбинах, создавая максимум мутности (“пробки мутности”).

В эстуарии Мезени миграция зоны максимума мутности за приливный цикл составляет 20–25 км. Приливные течения перемещают наносы различной крупности и создают “пробку мутности” с максимальной концентрацией взмученных в прилив наносов до 10–13 кг/м³, ядро которой располагается в 15–20 км от УС эстуария Мезени. Так, например, уд. Пыля величина мутности в придонном горизонте колеблется от 0.5 до 8.5 кг/м³ (средняя 3.5 кг/м³), а уд. Семжа от 0.35 до 13 кг/м³ (Демиденко, 1994, 2009; Протопопов, 1932).

В период наблюдения на суточной станции в августе 2015 г. на фарватере эстуария Мезени по траверзу д. Семжа (6.0 км от УС) при квадратурных приливах мутность воды в поверхностном го-

ризонте изменялась от 0.13 кг/м³ в ПВ до 1.3 кг/м³ в МВ. В придонном горизонте мутность воды изменялась в значительном диапазоне от 0.15 кг/м³ в ПВ до 56 кг/м³ в МВ при подходе “пробки мутности”. Такие максимальные значения мутности в пределах 40–56 кг/м³ и солёности 3.2–5.0 епс наблюдались продолжительностью 2 ч приливного цикла на фазе отлива, стоянии малой воды, смене течений и начале прилива. Максимальная мутность воды наблюдалась в придонном горизонте в начальной фазе прилива при обратных скоростях течения 0.3 м/с и достигала величины 56.3 кг/м³.

В поверхностном горизонте, даже при смене направления течения и в период стоячей воды, мелкие глинистые частицы не осаждаются на дно, а находятся во взвешенном состоянии. Они перемещаются реверсивным течением в реку или море, участвуя в общей эстуарийной циркуляции, практически не удаляясь за пределы эстуариев Мезени и Кулоя. Мутность воды в поверхностном горизонте в этот период сохраняется на уровне 0.05–0.10 кг/м³ (Демиденко, 2008).

На рис. 5 показано распределение взвешенных наносов по глубине за приливный цикл в квадратуру и сизигию на 2-х станциях в верхней и нижней части эстуария Мезени. На этих станциях в период сизигии величина прилива и максимальные скорости течения возрастают в 1.5 раза по сравнению с квадратурой, а концентрация наносов в придонном горизонте увеличивается до максимальных значений более 13 кг/м³ (Система ..., 2012).

В период наблюдения на суточной станции в июле 2007 г. на фарватере эстуария Кулоя по траверзу м. Лиственничный (5.0 км от УС) при квадратурных приливах мутность воды в поверхностном горизонте изменялась от 0.06 кг/м³ в ПВ до 0.12 кг/м³ в МВ. Максимальное значение мутности в поверхностном горизонте достигало 0.32 кг/м³ и наблюдалось продолжительностью 1 ч при максимальных скоростях течения на фазе прилива. В период наблюдения в августе 2018 г. вблизи вершины эстуария Кулоя (34 км от УС) мутность воды в поверхностном горизонте в ПВ составляла 0.6 кг/м³. В придонном горизонте, при подходе “пробки мутности”, концентрация взвешенного вещества в воде изменялась от 1.77 кг/м³ в фазу прилива при максимальных скоростях течения 1.25 м/с и солёности 2.53 епс до 5.75 кг/м³ в ПВ при смене течений и солёности 3.98 епс.

Эрозионно-аккумулятивные процессы в эстуариях Мезени и Кулоя

Высокая мутность воды и транспорт наносов во всем Мезенском заливе и эстуариях Мезени и Кулоя активно влияют на переформирование

донных форм рельефа и морфологии всей устьевой области и береговой зоны залива. Песчаные отложения образуют вытянутые узкие приливные гряды в центральных частях эстуариев. Алевроиты и илы отлагаются на береговых отмелях и на приливных осушках (приливных ваттах). В целом в эстуариях формируется так называемая “система удержания” осадков внутри эстуария, границы которых определяются с речной стороны пределом проникновения верхней части галоклина, а со стороны моря — зоной резкого снижения транспортирующей способности потока вследствие уменьшения скоростей течения.

В эстуариях отлагается более 2/3 стока речных наносов. Наиболее благоприятные условия для этого имеются в зоне выклинивания галоклина, где образуется зона с повышенной мутностью вод, а также участки пойм и маршей. Русловые бороздины в эстуариях при высоких нагонах и приливах интенсивно промываются, формируя на дне зону “отмостки” из крупнозернистого песка и гравия.

Сильные приливные течения обуславливают высокую динамичность рельефа дна эстуария. Основной приливо-отливный канал на участке р. Семжа—р. Пыя сместился от восточного края эстуария Мезени (1893 г.) к его центральной части (1927 г.), а затем, начиная с 1960 г., к западному берегу эстуария (Демиденко, 2008; Протопопов, 1932). До 30-х годов XX в. на месте современных приливных осушек существовал судоходный фарватер, ориентированный в сторону устья р. Семжи. В настоящее время для судоходства используется только западный фарватер эстуария Мезени. В целом для эстуария характерна тенденция к его заполнению наносами и обмелению. Со времени первого инструментального обследования залива в 1914–1915 гг. глубины в районе УС эстуария Мезени уменьшились на 2–3 м.

Морфология долины на устьевом участке р. Мезени отражает однонаправленные тенденции русловых процессов. Русло реки характеризуется чередованием плесов и перекатов с многочисленными подвижными отмелями, которые быстро изменяют свое плановое положение. Глубина потока на перекатах в МВ не превышает 1.0 м.

В районе вершины эстуария Мезени сформировалась зона наибольших глубин в стоково-отливной ложбине и подводное аккумулятивное образование. Здесь ярко выражен процесс наращивания надводной приливной дельты реки, причлененной к правому берегу. В этом районе существует система больших, не затопляемых в прилив, островов Заречье, Балуиха и Середовая Кошка. Они имеют относительно молодой возраст. Цепь правобережных островов ниже г. Мезень продолжают молодые острова Ванюшина, Максимова, Шестакова Кошки, Островок и Ми-

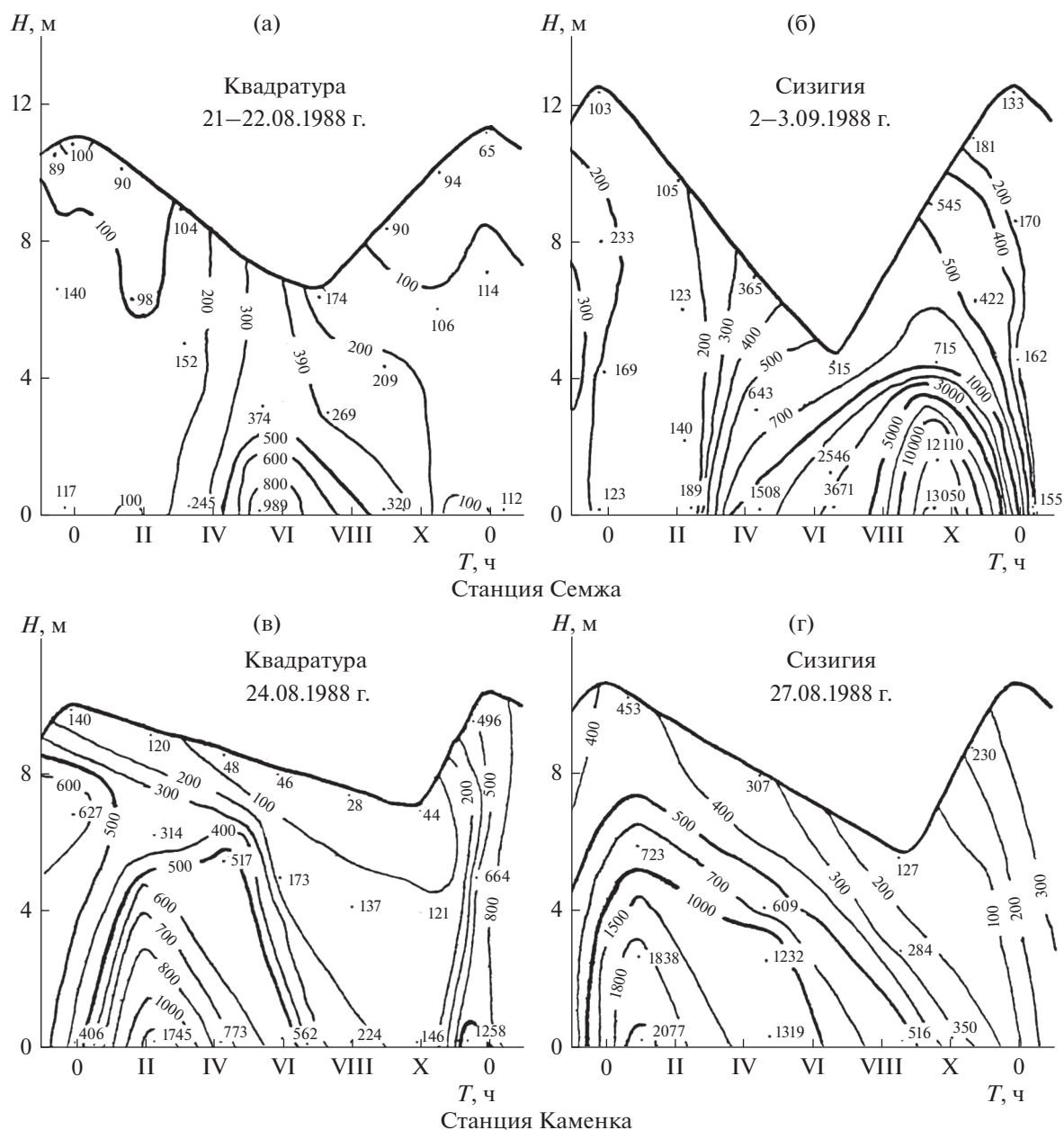


Рис. 5. Изменение мутности воды по глубине эстуария Мезени в районе д. Семжа и п. Каменка за приливной цикл в квадратуру (а, в) и сизигию (б, г) в августе–сентябре 1988 г. О, X – часы водного времени, 114 – мутность воды, г/м^3 , 500 – изолиния мутности, г/м^3 .

шина Кошка. Причиной односторонней группировки дельтовых островов является преобладающая ориентация приливного потока, прижимающегося к левому берегу реки (Римский-Корсаков и др., 2018; Эстуарно-дельтовые ..., 2007).

Вследствие этого г. Мезень, находившийся в XVI в. на берегу р. Мезень, сейчас отделен от реки дельтовой равниной шириной 2.5 км. Непрерывно заполняются наносами плесы (местное название – “ямы”) в русле эстуария, используемые для

отстоя судов во время отлива. Это приводит к осложнению работы Мезенского порта и морского судоходства в устье Мезени.

Ниже о. Мишина Кошка (25 км от УС) располагается зона затопляемых в прилив песчано-илистых осушек (приливных ваттов). Зона больших гряд и осушек простирается до участка крутого изгиба эстуария в створе м. Толстик–устье р. Пыя. Размеры гряд постепенно увеличиваются, превращаясь в сплошной массив илисто-пес-



Рис. 6. Песчано-илистые осушки в эстуарии Мезени по створу м. Василич—м. Толстик в малую воду (фото Н.А. Демиденко).

чанных осушек. Вследствие мощного перемещения наносов происходят интенсивные деформации ваттовых отмелей и переформирования ложа эстуария Мезени (рис. 6).

Процессы интенсивного заполнения эстуария Кулоя морскими наносами происходит в его средней части. Показателем этого служит, например, блокирование русла и образование излучины ниже по течению от с. Долгошелье в районе о. Осередок—о. Старая Кошка (29—31 км от УС). В средней части эстуария Кулоя приливные и отливные течения избирают себе разные “каналы”. Приливный поток создает результирующий перенос вод и наносов в правых боковых “каналах”. На участке впадения в эстуарий Кулоя левых притоков р. Оленица—р. Поча (20—25 км от УС) был сформирован о. Середовая Кошка, который постепенно соединился с коренным берегом за счет заполнения илистыми наносами и превращением приливных осушек в обширные заболоченные лайды, затапливаемые в периоды сизигийных приливов и штормовых нагонов со стороны моря. У правого берега эстуария между северной око-

нечностью с. Долгошелье и м. Митинский сформировался огромный побочень, заросший травяной и кустарниковой растительностью, превратившийся в полого выпуклое урочище Чалковский Нос (27 км от УС) (рис. 7).

На устьевом взморье Мезени и Кулоя перенос взвешенных наносов и прогрессирующая эрозия усиливаются при совместном воздействии волн и суммарных течений (как приливных, так и дрейфовых), которые трудно разделить.

Поэтому, при исследовании переноса наносов на устьевом взморье необходимо рассматривать комбинацию двух процессов. Одна из главных особенностей взаимодействия волн и течения есть то, что направление волн может иметь большие углы по отношению к направлению течения, и, как следствие, направление транспорта наносов не будет тем, которое вызывается приливным течением. Сильные приливные течения и ветровые волны на мелкой воде взаимодействуют нелинейно. Кроме того, сам поток наносов не совпадает с направлением приливных течений. Наносы, особенно песок, перемещаются сериями

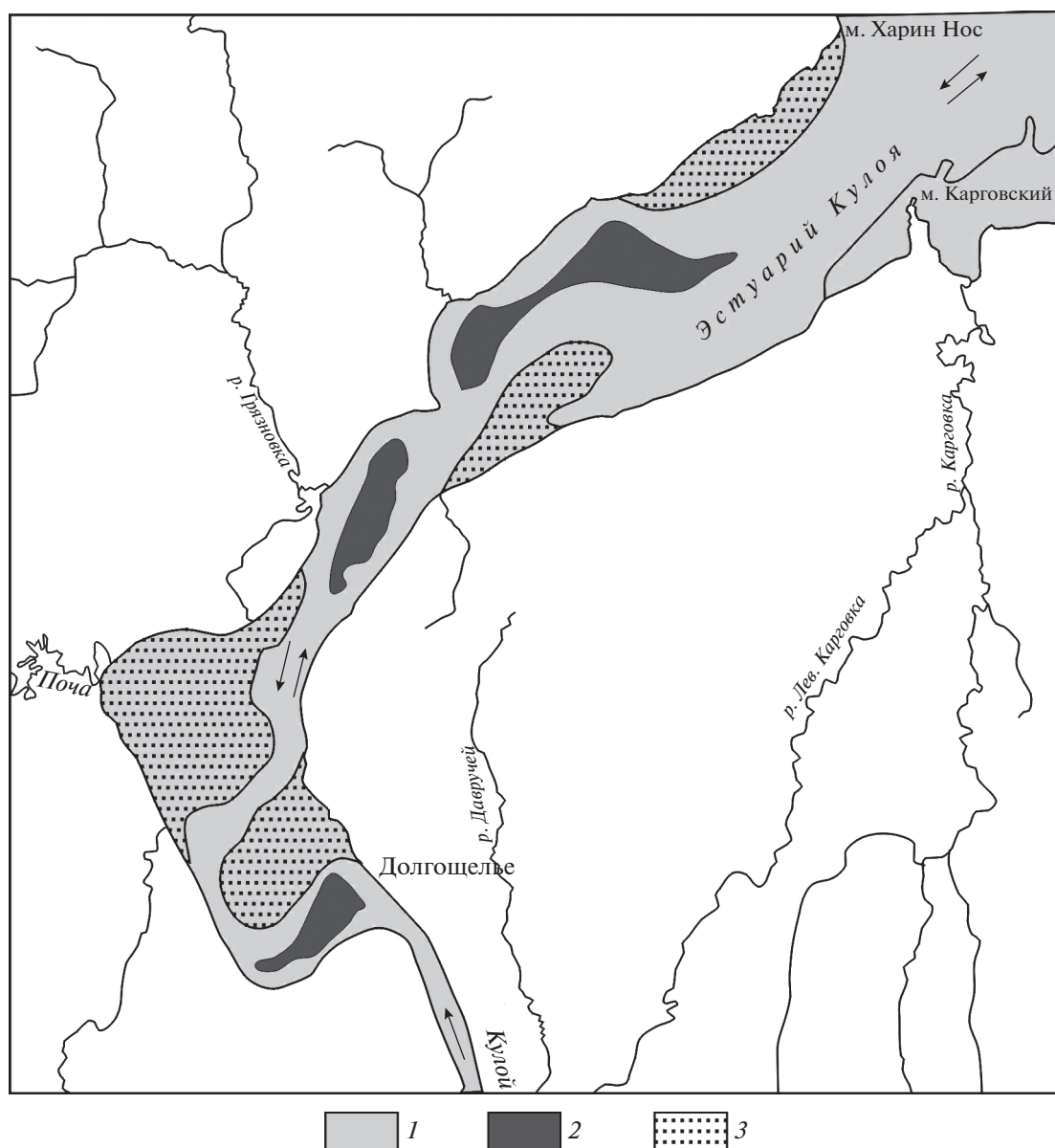


Рис. 7. Схема приливных осушек и осередков в малую воду в эстуарии Кулоя.
1 – водные объекты, 2 – осередки и острова, 3 – прибрежные отмели (осушки).

возвратно-поступательных движений во время следующих друг за другом приливов, и результирующий перенос будет векторной суммой всех таких движений за несколько приливов. Следовательно, несмотря на значительную важность взаимодействия двух факторов и большие усилия в исследованиях, к настоящему времени достигнут малый прогресс в понимании этого процесса. Лабораторные исследования, к сожалению, ограничиваются рассмотрением в лотках одно- и разнонаправленных потоков.

Приливные осушки нижней части эстуария Мезени и Мезенского залива имеют полого выпуклую форму с уклоном в сторону моря 2° – 3° . Шири-

на приливной осушки составляет 700–800 м и более. Средняя часть осушки занята окатанными валунами и щебнем, образующими небольшие гряды. Ближе к морскому краю осушки формируются илистыми отложениями, разделенными стоково-отливными бороздинами. По этим бороздинам перемещается осолоненная в зоне смешения вода в период отлива. Вязкие консолидированные илистые отложения покрывают поверхность морского края осушки толщиной до 1 м.

Верхняя прибрежная часть приливной осушки сложена из песка с обильным включением валунов. Средний размер окатанных моренных валунов составляет около 20 см в диаметре, максимальный –



Рис. 8. Донные формы рельефа на устьевом взморье в районе впадения р. Мгла в Мезенский залив (фото Н.А. Демиденко).

более 1.0 м. Если верхняя часть осушки слабо подвержена эрозии даже при сизигийных приливах и в период штормовых нагонов, она закрепляется солонатоволнолюбивой растительностью, формируя заболоченные “лайды” или марши (Зенкович, 1962; Эстуарно-дельтовые ..., 2007).

На устьевом взморье при наличии приливных течений и ветровых волн разных направлений создаются сложные донные аккумулятивные формы. На отмелях приливных осушках формируются донные формы рельефа — рифели и гряды. Рифели — мелкие формы дна русла с пологими склонами, ориентированными против течения, и крутыми склонами — по течению. Длина их от гребня одного рифеля до гребня другого обычно составляет 0.3 м и не превышает 0.6 м. В начальной фазе образования рифелей их гребни параллельны друг другу и имеют относительно малую высоту. С возрастанием скорости потока образуются более крупные рифели неправильной формы. Наименьшая скорость, необходимая для образования рифелей в тонкозернистом песке (средний диаметр 0.09 мм), составляет около 0.2 м/с.

Гряды — средние формы дна русла, имеющие длину от 0.6 м до нескольких метров. Гряды формируются при возрастании скоростей потока свыше 0.2 м/с. Гряды могут расти и увеличиваться в высоту с увеличением глубины потока. Обычно в приливных эстуариях наблюдаются гряды высотой до 0.5 м. В отличие от рифелей, длина и форма гряд является функцией размера зерен донных отложений. Они имеют трехмерную форму и пологую вершину (рис. 8).

В средней части Мезенского залива песчано-илистые осушки (ватты) переходят в подводные гряды и песчаные волны, фронт которых располагается почти нормально к генеральному направлению приливных течений. Наиболее распространенными являются песчаные волны или гигантская рябь (“кошки”) — серия гряд высотой 1–2 м. Шаг этих волн составляет 400–500 м, они образуются на отмеле дне при скоростях течения 0.3–0.8 м/с. Профиль песчаных волн асимметричный.

Подобные гряды, называемые “гигантскими песчаными волнами”, являются типичными фор-

мами аккумуляции песчаного материала в условиях сильных приливных течений на шельфе морей. Гигантские песчаные гряды формируются на выходе из Мезенского залива (Северные Кошки). Их существование впервые открыл М.Ф. Рейнеке в период гидрографических описаний Белого моря, выполненных в 1830 г. (Рейнеке, 1883). Результаты сравнения карт Рейнеке с современными показывает стабильное положение “волн” в течение продолжительного периода времени. Некоторые из них обсыхают в МВ при сизигийных приливах, но большинство остается под водой. Крутой склон чаще обращен в сторону берега Канинского полуострова (по направлению распространения подходящей приливной волны). Чем ближе песчаные волны расположены к берегу, тем четче проявляется их асимметрия (Рейнеке, 1883; Эстуарно-дельтовые ..., 2007). Основная область аккумуляции песка и формирования гигантских песчаных гряд находится в южной части Воронки Белого моря: на выходе из Мезенского залива образовались Большая Орловская Кошка, Большая Средняя Кошка, Конушинская и Кийские мели (Лочия ..., 2006; Невесский и др., 1977).

Таким образом, северо-восточная часть Белого моря, где расположен Мезенский залив и эстуарии Мезени и Кулоя, по геологическому строению и гидродинамическим условиям исключительно благоприятна для развития абразионных процессов в северных и средних частях и аккумуляции наносов морского происхождения в южной части залива и эстуариях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамика воды, солей и взвешенных наносов в устьевой области Мезени и Кулоя тесно связаны с приливными и стогонно-нагонными явлениями в эстуариях, с величиной речного стока на устьевом участке реки и волновыми процессами на устьевом взморье. Изменчивость речных расходов воды, стоковых и приливных колебаний уровней и течений, ветрового волнения являются причиной изменения мутности и расхода наносов в эстуариях. Важную роль в пространственно-временном распределении наносов играют процессы смешения речных гидрокарбонатно-кальциевых и морских хлоридно-натриевых вод и наличие в эстуариях вод с различной плотностью.

В зависимости от величины и дальности распространения приливных волн, проникновения морских вод в эстуарии и влияния ветрового волнения на динамику вод и взмучивание донных отложений, существуют различные типы зоны смешения пресных и соленых вод и движения наносов. В условиях сильных приливных воздействий, характерных для эстуариев Мезени и Кулоя, формируется третий тип структуры зоны смешения вод. Этот тип движения наносов с хорошо пере-

мешенными водными массами является преобладающим в средней и нижней частях исследуемых эстуариев.

На приливном участке реки, в период весеннего половодья, от вершины устьевой области до вершины эстуариев, где влияние приливов на уровни воды и скорости стоковых течений незначительны даже в летнюю межень, сохраняется *речной* тип движения наносов. В районе знакопеременных приливных течений тип движения наносов — *реверсивный*: приливный поток в случае хорошего перемешивания вод транспортирует наносы во всей толще воды в сторону реки в фазу прилива, а стоково-отливный поток — в сторону моря в фазу отлива. Реверсивный тип движения наносов преобладает в верхней части эстуариев в зоне пресных вод. В средней части эстуария формируется эстуарийная циркуляция вод и можно выделить *эстуарийный* тип движения наносов. На устьевом взморье, где влияние стоковой составляющей очень мало, действует *морской* тип перемещения наносов под действием приливных течений и ветрового волнения.

На границе раздела вод с различной плотностью происходит интенсивное осаждение глинистых частиц в результате процессов коагуляции и флокуляции, приводящих к образованию глинистых хлопьев. Движение более крупных песчаных наносов прекращается, достигнув вершины клина соленой воды. Миграция клина соленых вод вдоль эстуария приводит к появлению зоны аккумуляции наносов и зоны максимальной мутности (“пробки мутности”).

Макроприливные эстуарии имеют воронкообразную форму устья и отличаются интенсивными эрозионно-аккумулятивными процессами. Асимметрия приливных и отливных течений приводит к формированию характерных русловых подводных форм и необратимым русловым деформациям. Наиболее характерной формой донного рельефа являются пологовыуклые приливные осушки (приливные ватты) и мощные радиальные гряды. На дне эстуариев Мезени и Кулоя сформировались подводные аккумулятивные образования, находящиеся ближе к вершине эстуария, и происходит формирование надводных приливных дельт.

Морфолитодинамические процессы в эстуариях Мезени и Кулоя обусловлены приливными течениями, речным стоком воды и наносов, ветровым волнением и вдольбереговыми потоками наносов. Из районов абразии берегов Мезенского залива и собственных выносов взвешенного материала рек, отливной поток перемещает тонко-взвешенный песок и илы на север, где в районе уменьшения скоростей течения происходит аккумуляция песка и формирование песчаных волн. Тонкие взвешенные илы выносятся за пределы устьевоего взморья далее в Мезенский залив.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в ИО РАН в рамках темы Госзадания № FMWE-2021-0006. Аналитическая часть работы была выполнена при поддержке РФФИ (грант 20-05-00613), экспедиционная — при поддержке РНФ (грант 18-05-60021).

FUNDING

The study of the hydrological regime was carried out within the framework of the State Assignment to the Shirshov Institute of Oceanology no. FMWE-2021-0006. Analysis of the geomorphological data was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00613), expedition was carried out with the support of the Russian Science Foundation (grant no. 18-05-60021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: МГУ, 1998. 202 с.
- Вихман А.М.* Несколько данных о скорости течения и количестве влекомых наносов в устье р. Мезени // Изв. ЦГМБ. Вып. 5. 1925.
- Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
- Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 5. Белое море. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 235 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / отв. ред. Ф.С. Терзиев. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
- Гордеев В.В.* Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 159 с.
- Гордеев В.В.* Геохимия системы река—море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
- Горелков В.М., Григорьева Л.Н., Моносов М.Л.* Трансформация полусуточного прилива в северной части Белого моря при условии строительства Мезенской ПЭС // Тр. Ленгидропроекта. 1981. № 77. С. 74—80.
- Демиденко Н.А.* Типы движения наносов в приливных устьях рек // Тр. ГОИН. Л.: Гидрометеиздат, 1991. Вып. 198. С. 130—140.
- Демиденко Н.А.* Пространственно-временные масштабы изменения концентрации взвешенного вещества в приливных устьях рек севера России // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей (Тр. IV конференции). М.: Изд. ИВП РАН, 1994. Т. 2. С. 93—94.
- Демиденко Н.А., Землянов И.В., Горелиц О.В., Михайлов В.Н.* Исследование гидролого-морфологических процессов в устьевой области реки Мезень для целей проектирования Мезенской приливной электростанции. М.: Тр. ГОИН, 2008. Вып. 211. С. 273—288.
- Демиденко Н.А.* Формирование максимума мутности воды в сильноприливных эстуариях Мезени и Кулоя // Геология морей и океанов: Материалы XVIII Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М.: ГЕОС, 2009. Т. 4. С. 65—69.
- Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд. АН СССР, 1962. 710 с.
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735—747.
- Лоция Белого моря. СПб.: ГУНиО МО, 1996. 318 с.
- Мак-Доуэлл Д.М., О'Конор Б.А.* Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
- Медведев В.С.* Вопросы динамики прибрежной зоны Мезенского залива Белого моря в связи с проектированием приливных электростанций // Геоморфология и литология береговой зоны. М.: Наука, 1971. С. 23—29.
- Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
- Мискевич И.В., Алабян А.М., Демиденко Н.А., Коробов В.Б., Панченко Е.Д.* Гидродинамические аспекты формирования высокой мутности вод в малых приливных устьях Белого и Баренцева морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. М.: Изд. МГУ, 2022. № 1. (В печати).
- Мискевич И.В., Коробов В.Б., Мосеев Д.С.* Специфика формирования маргинальных фильтров в приливных устьях малых рек арктических морей // Океанология. 2021. Т. 61. № 1. С. 141—146.
- Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В.* Белое море (Седиментогенез и история развития в голоцене). М.: Наука, 1977. 236 с.
- Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А.* Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.
- Протопопов И.Д.* Несколько данных о гидрологическом режиме р. Мезени // Исследования морей СССР. Л.: ГГИ, 1932. Вып. 16. С. 87—102.
- Рейнеке М.Ф.* Гидрографическое описание северных берегов России. Гидрографический департамент. СПб., 1883. Ч. 1. Белое море. Изд. 1—2.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 662 с.
- Римский-Корсаков Н.А., Коротаев В.Н., Иванов В.В., Пронин А.А., Демиденко Н.А.* Гидрологический режим и литологические процессы в эстуарии Мезени // Океанология. Т. 58. № 4. 2018. С. 1—9.
- Седелков В.А.* К вопросу об уровнях и приливах в устьевой области р. Мезени // Сб. работ Архангельской ГМО. 1970. Вып. 7. С. 72—81.
- Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействия с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир, 2012. 784 с.
- Усачев И.Н., Демиденко Н.А., Моносов Л.М., Моносов М.Л., Лихоманов В.А., Данилов А.И., Ильчук А.Н., Карлин Л.Н.* Ледовые исследования по обоснованию проектов приливных электростанций России. М.: ОАО НИИЭС. Малая энергетика. 40 лет Кисло-

- губской ПЭС им. Л.Б. Бернштейна, 2008. № 4. С. 43–52.
- Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / отв. ред. В.Н. Коротаев. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
- Dyer K.R. Coastal and estuarine sediment dynamics. Chichester: Wiley, 1986. 342 p.
- Eisma D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. Netherlands // J. of Sea Res. Vol. 20. Iss. 2–3. 1986. P. 183–199.
- Kirby R., Parker W.R. The distribution and behaviour of fine sediment in the Severn Estuary and Inner Bristol Channel // Can. J. Fish Aquat. Sci. 1983. Iss. 40. P. 83–95.
- Nichols M.M. Effect of fine sediment resuspension in Estuaries. In: Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies / Metha (Ed.). 1986. Vol. 14. P. 5–42.
- Officer C.B. Discussion of the turbidity maximum in partially mixed estuaries. Estuar // Coastal Mar. Sci. 1980. Iss. 10. P. 239–246.
- Postma H. Sediment transport and sedimentation in the Estuarine environment. In: Estuaries / H. Lauff (Ed.). Washington: Am. Ass. Adv. Sci., 1967. Iss. 83. P. 158–179.
- Sakamoto W. Study on the Process of river suspension from flocculation to accumulation in Estuary // Bul. of the Ocean Res. Institute Univ. of Tokyo. October 1972, Iss. 5. Tokyo, Nakano. P. 1–50.
- Savenije H.H.G. Salinity and tides in alluvial estuaries. Delft Univ. of Technologies / 2nd completely revised edition. 2012. 163 p.

Suspended Sediment Dynamics and Sedimentation Processes in Macrotidal Estuaries of Mezen and Kuloy

N. A. Demidenko*

Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

**e-mail: demidenko_nikola@mail.ru*

The hydrological and geomorphological processes occurring in the macrotidal Mezen and Kuloy estuaries are completely subject to the effects of the tidal wave. The main purpose of studying the dynamics of suspended matter and sedimentation processes is to determine the river and marine factors affecting sediment transport and the features of lithodynamic processes. Expeditionary studies of the Mezen and Kuloy estuaries, which were conducted by the author in 2005–2019s, showed that a high concentration of suspended sediments compared to the adjacent areas of the river and sea is observed in areas of reversible currents. The concentration of sediments was determined by weighting of the filtered samples taken during the tidal cycle, while simultaneously recording the hydraulic parameters of the water flow. The maximum value of spring tides in the of Mezen estuary reaches 9.8 m, in the neap tides—5.0 m; in the Kuloy estuary during of the spring tides is 10 m, in the neap tides—4.8 m. Tidal velocities during of the spring tides reach 2.5 m/s. The salinity of water in the estuaries of Mezen and Kuloy varies from 3.5 to 24.0 ups. The greatest values of turbidity are noted in the lower part of the estuaries during the low water and in the top of the studied estuaries in the high water. The maximum turbidity in the Mezen estuary reaches 56.3 kg/m³ during the low water due to the concentration of suspended sediments in the bottom horizon. In the surface horizon, even with a change in the direction of the flow and during the period of slack water, fine clay particles are not deposited to the bottom, but are in suspension. The turbidity of water in the surface horizon is stored in the range of 0.05–0.10 kg/m³. The increase in turbidity is facilitated by wind wave on the offshore and intense abrasion of the banks in the estuaries. The conditions for the economic use of the mouths of the Mezen and Kuloy rivers depend on the tides. Navigation can be carried out only during the period of high water, and requires taking into account the dynamics of the fairway. When designing the Mezen tidal power plant, it is important to know the areas of greatest sedimentation in the open and separate parts of the tidal basin.

Keywords: estuaries, hydrological regime, water mixing zone, suspended sediments, maximum turbidity, erosion-accumulation processes, tidal flat

REFERENCES

- Alekseevskii N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and Movement of River Sediments]. Moscow: Mos. Gos. Univ., 1998. 202 p.
- Demidenko N.A. Formation of the maximum water turbidity in the strongly tidal Mezen and Kuloy estuaries. In *Geologiya morei i okeanov: Mater. XVIII Mezhdunar. nauch. konf. (shkoly) po morskoi geologii* [Geology of the Seas and Oceans: Proc. XVIII Int. Sci. Conf. (School on Marine Geology)]. Moscow: GEOS Publ., 2009, vol. 4, pp. 65–69. (In Russ.).
- Demidenko N.A. Spatio-temporal scales of changes in the concentration of suspended matter in the tidal mouths of the rivers of the North of Russia. In *Dinamika i termika rek, vodokhranilishch i pribrezhnoi zony morei* [Dynamics and Thermals of Rivers, Reservoirs and the Coastal Zone of the Seas]. Moscow: Publ. RAN, 1994, vol. 2, pp. 93–94. (In Russ.).

- Demidenko N.A. Types of sediment dynamics in the tidal mouths of the rivers. *Tr. GOIN*, 1991, vol. 198, pp. 130–140. (In Russ.).
- Demidenko N.A., Zemlyanov I.V., Gorelits O.V., Mikhailov V.N. Study of hydrological and morphological processes in the estuary of the Mezen River for the design of the Mezen tidal power plant. *Tr. GOIN*, 2008, vol. 211, pp. 273–288. (In Russ.).
- Dyer K.R. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Chichester: Wiley, 1986. 342 p.
- Eisma D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. Netherlands. *J. Sea Res.*, 1986, vol. 20, nos. 2–3, pp. 183–199.
- Estuarno-del'tovye sistemy Rossii i Kitaya: gidrologo-morfologicheskie protsessy, geomorfologiya i prognoz razvitiya* [Estuarine-delta Systems of Russia and China: Hydrology-Morphological Processes, Geomorphology and Development Forecast]. Korotaev V.N., Ed. Moscow: GEOS Publ., 2007. 445 p.
- Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya* [Geoecological State of the Arctic Coast of Russia and Safety of Nature Management]. Alekseevskii N.I., Ed. Moscow: GEOS Publ., 2007. 585 p.
- Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoi zony morei SSSR* [Hydrometeorological Conditions of the Shelf Zone of the Seas of the USSR]. Vol. 5: *Beloe more* [White Sea]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989. 235 p.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR* [Hydrometeorology and Hydrochemistry of the seas of the USSR]. Vol. 2: *Beloe more* [The White Sea]. Part 1: *Gidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorological Conditions]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991. 240 p.
- Gordeev V.V. *Geokhimiya sistemy reka—more* [Geochemistry of the River-Sea System]. Moscow: Matushkina Publ., 2012. 452 p.
- Gordeev V.V. *Rechnoi stok v okean i cherty ego geokhimii* [River Flow into the Ocean and Features of its Geochemistry]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 159 p.
- Gorelkov V.M., Grigoreva L.N., Monosov M.L. Transformation of the semi-daily tide in the northern part of the White Sea under the condition of construction of the Mezenskaya PE. *Tr. Lengidroproekta*, 1981, vol. 77, pp. 74–80. (In Russ.).
- Kirby R., Parker W.R. The distribution and behaviour of fine sediment in the Severn Estuary and Inner Bristol Channel. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 1983, vol. 40, pp. 83–95.
- Lisitzin A.P. The marginal filter of the ocean. *Oceanology*, 1995, vol. 34, no. 5, pp. 671–682.
- Lotsiya Belogo morya* [Locies of the White Sea]. St. Petersburg: GUNiO MO. 2006. 412 p.
- McDowell D.M., O'Connor B.A. *Gidravlika prilivnykh ust'ev rek* [Hydraulics of Tidal Estuaries]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983. 312 p.
- Medvedev V.S. Issues of dynamics of the coastal zone of the Mezen Bay of the White Sea in connection with the design of tidal power plants. In *Geomorfologiya i litologiya beregovoï zony* [Geomorphology and Lithology of the Coastal Zone]. Moscow: Nauka Publ., 1971, pp. 23–29. (In Russ.).
- Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [Mouths of the Rivers of Russia and Neighboring Countries: Past, Present and Future]. Moscow: GEOS Publ., 1997. 413 p.
- Miskevich I.V., Alabyan A.M., Demidenko N.A., Korobov V.B., Panchenko E.D. Hydrodynamic aspects of the formation of high turbidity of waters in small tidal mouths of the White and Barents Seas. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2022, no. 4. (In print). (In Russ.).
- Miskevich I.V., Korobov V.B., Moseev D.S. Specificity of the formation of marginal filters in the tidal mouths of small rivers of the Arctic seas. *Okeanologiya*, 2021, vol. 61, no. 1, pp. 141–146. (In Russ.).
- Nevesskii E.N., Medvedev V.S., Kalinenko V.V. *Beloe more (Sedimentogenez i istoriya razvitiya v golotsene)* [White Sea (Sedimentogenesis and History of Development in the Holocene)]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 236 p.
- Nichols M.M. Effect of fine sediment resuspension in estuaries. In *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. New York: Springer, 1986, pp. 5–42.
- Officer C.B. Discussion of the turbidity maximum in partially mixed estuaries. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 1980, no. 10, pp. 239–246.
- Polonskii V.F., Lupachev Y.V., Scriptunov N.A. *Gidrologo-morfologicheskie protsessy v ust'yakh rek i metody ikh rascheta* [Hydrologo-morphological Processes in the Mouths of Rivers and Methods of their Forecast]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1992. 383 p.
- Postma H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In *Estuaries*. Lauff H., Ed. Washington: Am. Ass. Adv. Sci., 1967, vol. 83, pp. 158–179.
- Protopopov I.D. Several data on the hydrological regime of the Mezen river. In *Issledovanie morei SSSR* [Studies of the Seas of the USSR]. Leningrad, 1932, vol. 16, pp. 87–102. (In Russ.).
- Reineke M.F. *Gidrograficheskoe opisaniye severnykh beregov Rossii* [Hydrographic Description of the Northern Shores of Russia]. Vol. 1: *Beloe more* [The White Sea]. St. Petersburg, 1883, vols. 1–2.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface Water Resources of the USSR]. Vol. 3: *Severnyi kraj* [Northern Regions]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972. 662 p.
- Rimskiy-Korsakov N.A., Korotaev V.N., Ivanov V.V., Pronin A.A., Demidenko N.A. Hydrological regime and lithologic processes in the Mezen River Estuary. *Oceanology*, 2018, vol. 58, no. 4, pp. 593–600. <https://doi.org/10.1134/S0001437018040070>
- Sakamoto W. Study on the process of river suspension from flocculation to accumulation in estuary. *Bull. Ocean Res. Inst. Univ. Tokyo*, 1972, no. 5, pp. 1–50.
- Savenije H.H.G. *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Delft Univ. of Technologies, 2012. 2nd ed. 163 p.
- Sedelkov V.A. To the question of levels and tides in the mouth of the Mezen river. *Sb. Rabot Arkhangel'sk. GMO*, 1970, vol. 7, pp. 72–81. (In Russ.).
- Sistema Belogo morya* [The White Sea System]. Vol. 2: *Vodnaya tolshcha i vzaimodeistviyushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera* [Water Column and Interacting with it Atmosphere, Cryosphere, the River Runoff and the Biosphere]. Lisitsyn A.P., Ed. Moscow: Nauchn. Mir Publ., 2012. 784 p.
- Usachev I.N., Demidenko N.A., Monosov L.M., Monosov M.L., Likhomanov V.A., Danilov A.I., Il'chuk A.N., Karlin L.N. Ice research on the justifica-

tion of projects of tidal power plants in Russia. In *Malaya energetika. 40 let Kislogubskoi PES im. L.B. Bernshhteina* [Small Energy. 40 years of Kislogubskaya PES named after L.B. Bernstein]. Moscow: OAO "NIIES", 2008, vol. 4, pp. 43–52. (In Russ.).

Vikhman A.M. Several data on the speed of the flow and the amount of attracted sediments at the mouth of the Mezen river. *Izv. TsGMB*, 1925, vol. 5. (In Russ.).

Zenkovich V.P. *Osnovy ucheniya o razvitii morskikh beregov* [Processes of the Coastal Development]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1962. 710 p.