

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ СЕДИМЕНТАЦИИ В МАКРОПРИЛИВНОМ ЭСТУАРИИ КУЛОЯ

Демиденко Н.А.

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

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 эстуария Кулоя, которые проведены авторами в 2007–2019 гг. и в июле 2022 г. показали, что высокая концентрация взвешенных наносов по сравнению с прилегающими районами реки и моря, наблюдается на участках реверсивных течений. Максимальная величина сизигийных приливов в эстуарии Кулоя достигает 10 м, в квадратуру – 4.8 м. Скорости приливных течений во время сизигии равны 2.5 м/с. Соленость воды изменяется от 3.5 до 24.0 епс. Максимум мутности в нижней части эстуария Кулоя достигает 8,7 кг/м<sup>3</sup> в малую воду за счет концентрации взвешенных наносов в придонном горизонте. Мутность воды в поверхностном горизонте сохраняется в пределах 0,05–0,10 кг/м<sup>3</sup>. Увеличению мутности способствует ветровое волнение на взморье и интенсивная абразия берегов в эстуариях. Условия хозяйственного использования устья реки Кулоя зависят от приливов. Судходство может осуществляться лишь в период полной воды, и требует учета динамики фарватера.

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

**Данные и методы исследований.** Для исследования гидрологического режима эстуария Кулоя использовались как стандартные приборы, принятые для наблюдений в Росгидромете, так и современные измерительные комплексы. Для измерения приливных колебаний уровня 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.

Измерение скоростей течения и приливных расходов воды в эстуариях Мезени и Кулоя производились с помощью 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 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 1кг/м<sup>3</sup>, 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 ±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.

**Объект исследования.** Мезенский залив и устьевые области рек Мезени и Кулоя расположены в Архангельской области, в юго-восточной части Белого моря. 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 устья р.Кулой располагается в районе д.Карьеполье, в 100 км от устьевоего створа. Вершина эстуария Кулой 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. Воронкообразный эстуарий Кулой имеет площадь 80 км<sup>2</sup>. Ширина эстуария Кулой в устьевом створе в полную воду составляет 4.5 км, в вершине эстуария выше с.Долгощелье – 0.5 км. Длина устьевоего участка Кулой выше эстуария составляет около 60 км [Демиденко, 2012].

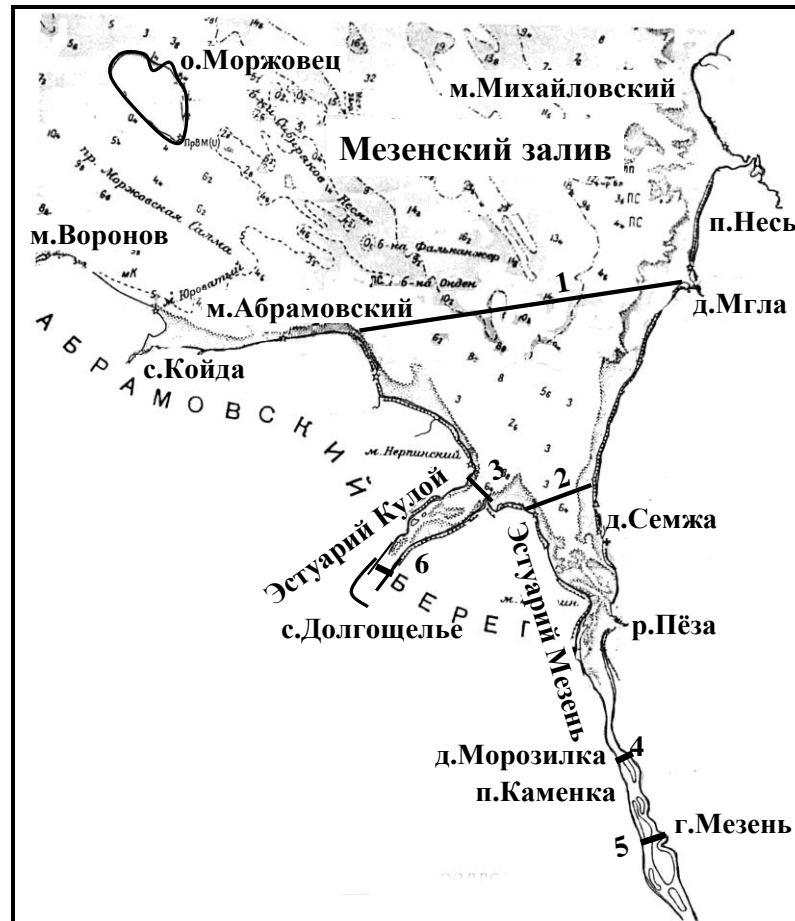


Рис. 1. Схема Мезенского залива и устьевой области рек Мезени и Кулой. 1 – граница устьевоего взморья: м.Абрамовский – р.Мгла; 2 – устьевое створ эстуария Мезени; 3 – устьевое створ эстуария Кулой; 4 – граница проникновеия морской воды в эстуарий Мезени; 5 – вершина эстуария Мезени у м.Белый Нос; 6 – граница проникновеия морской воды в эстуарий Кулой выше с.Долгощелье.

**Обсуждаемые результаты. Гидрологический режим эстуария Кулой.** Режим уровней воды в устьевой области р. Кулой зависит от водоносности, заторов и зажоров, сгонов и нагонов, приливо-отливных колебаний уровня и течений. Годовой ход уровня воды характеризуется хорошо выраженным подъемом весной и низкими уровнями воды в периоды летней и зимней межени [Демиденко и др., 2008]. Амплитуда стоковых колебаний уровня воды в низовьях Кулой – 3.5–4 м. Сток по устью Кулой получен расчетным путем и средний расход в вершине устьевой области р.Кулой у д.Карьеполье равен 180 м<sup>3</sup>/с, объем стока – 6.76 км<sup>3</sup>/год. Сток наносов в устье р.Кулой не исследован.

Наиболее ярко выражены в Мезенском заливе приливные полусуточные колебания уровня. Максимальная величина полусуточных приливов в Мезенском заливе с севера на юг возрастает в сторону эстуария Кулой от о.Моржовец до м.Карговский и равна 10.1 м.

По мере продвижения приливной волны к вершине мелководного залива она трансформируется. Время роста уровня быстро уменьшается по сравнению со временем падения уровней воды. Приливные колебания уровня воды в устьевой области р.Кулой распространяются на расстояние до 100 км от устьевого створа [Демиденко, 2012].

В эстуарии Кулоя среднесуточное значение сизигийных приливов у м.Харин Нос (устьевой створ) 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  $K_{ac}=0.34$ . Начиная от устьевого створа 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 устьевом створе у м.Харин Нос (в промежуток величина прилива равна 6.8 м).

Во время сизигийных приливов наибольшие скорости приливного течения на устьевом створе 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.

Максимальный приливной расход на устьевом створе эстуария Кулоя достигает 40000 м<sup>3</sup>/с. Максимальный расход воды в период промежуточных приливов в вершине эстуария Кулоя, измеренный в августе 2018 г., изменялись за приливный цикл более чем в 2 раза, составляя 1045 м<sup>3</sup>/с в отлив и 2256 м<sup>3</sup>/с в период прилива).

В эстуарии Кулоя формируется зона смешения речных и морских вод. Протяженность зоны смешения в эстуарии Кулоя составляет 34 км. Максимальные значения солености воды в устьевых створах эстуариев (26 епс) наблюдаются при сизигийных приливах и штормовых нагонах в маловодную летнюю межень. Средняя величина продольных градиентов солености составляет 1.5–2.0 епс на 1 км, достигая на отдельных участках значений 3.0–4.0 епс. Вертикальный градиент солености не превышает 0.1–0.4 епс на 1 м.

Наблюдения на суточных станциях в устьевом створе эстуария Кулоя (станция – траверз м.Лиственичный) в летнее время 2007 г. показали, что соленость воды на устьевом створе эстуария Кулоя при квадратурных приливах изменяется за приливный цикл в пределах 17.0–23.0 епс. В устьевом створе эстуария Кулоя соленость воды изменяется в пределах 6.0–24.0 епс в зависимости от фазы прилива [Демиденко, 2012].

**Динамика взвешенных наносов в эстуарии Кулоя.** Эрозионно-аккумулятивные процессы в прибрежной зоне моря и эстуарии Кулоя обусловлены приливными течениями, речными расходами воды и стоком наносов, ветровым волнением и вдольбереговым потоком наносов за счет абразии морских берегов. В балансе наносов, поступающих в эстуарий Кулоя, преобладают наносы морского происхождения. Наносы, перемещаемые вдольбереговыми течениями ветрового происхождения, составляют около 30% объема абразии [Невесский и др., 1977]. Остальная часть этого объема, преимущественно илистые частицы, переносятся приливными течениями (Рис. 2).

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: соленостная флокуляция, склеивание частиц органическим веществом, столкновение частиц в процессе их переноса, захват более крупными частицами более мелких при осаждении в спокойных условиях [Мак-Доуэлл и О'Конор, 1983; Eisma, 1986]. Очень часто трудно выделить главный механизм, ответственный за образование и разрушение хлопьев. В устье реки взвешенные наносы

существуют в виде отдельных частиц, микрохлопьев и макрохлопьев. В переносе и разрушении хлопьев велика роль турбулентности воды. Скорость осаждения взвешенных хлопьев сильно зависит от концентрации взвешенных частиц в воде и изменяется в эстуариях с различием физико-химических свойств наносов [Гордеев, 2012; Eisma, 1986].

Характерной особенностью динамики взвешенных наносов в зоне смешения речных и морских вод является формирование зоны максимальных значений мутности или «литоклина» [Мак-Дуэлл и О'Конор, 1983; Dyer, 1986]. Возникновение этой зоны обусловлено процессами флокуляции глинистых частиц и органического вещества, а также особенностями эстуарийной циркуляции воды [Dyer, 1986; Eisma, 1986]. В ее пределах мутность воды значительно превосходит мутность в речных и морских водах. Образование максимума мутности в эстуариях Мезени и Кулой 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 приливного участка реки. Период смены течения в полную воду имеет большую продолжительность по сравнению с малой водой. Поэтому существуют предпосылки для аккумуляции части взвешенных частиц и увеличения объема отложений. При понижении уровня в малую воду взвешенные частицы концентрируются в стоково-отливных ложбинах, создавая максимум мутности (т.н. «пробки мутности»).

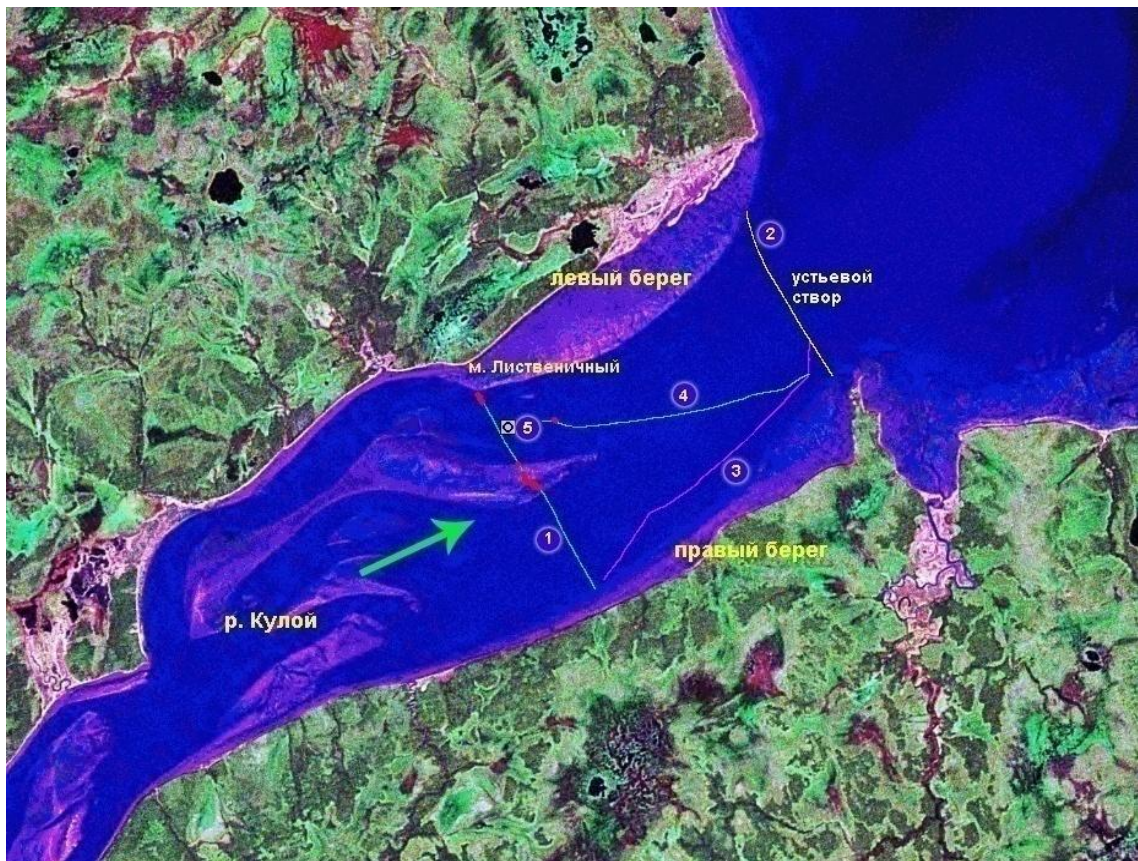


Рис. 2. Схема нижней части эстуария Кулой и направление результирующего потока наносов в эстуарии.

В период наблюдения на суточной станции в июле 2007 г. на фарватере эстуария Кулой по траверзу м.Лиственичный (5 км от УС) при квадратурных приливах мутность воды в поверхностном горизонте изменялась от 0.06 кг/м<sup>3</sup> в ПВ до 0.12 кг/м<sup>3</sup> в МВ. Максимальное значение мутности в поверхностном горизонте достигало 0.32 кг/м<sup>3</sup> и наблюдалось продолжительностью 1 ч при максимальных скоростях течения на фазе прилива. В период наблюдения в августе 2018 г. вблизи вершины эстуария Кулой (34 км

от УС) мутность воды в поверхностном горизонте в ПВ составляла  $0.6 \text{ кг/м}^3$ . В придонном горизонте, при подходе «пробки мутности», концентрация взвешенного вещества в воде изменялась от  $1.77 \text{ кг/м}^3$  в фазу прилива при максимальных скоростях течения  $1.25 \text{ м/с}$  и солёности 2.53 епс до  $5.75 \text{ кг/м}^3$  в ПВ при смене течений и солёности 3,98 епс.

**Эрозионно-аккумулятивные процессы в эстуарии Кулоя.** Высокая мутность воды и транспорт наносов во всем Мезенском заливе и эстуарии 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. Алевриты 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.

Процессы интенсивного заполнения эстуария Кулоя морскими наносами происходит в его средней части. Показателем этого служит, например, блокирование русла и образование излуины ниже по течению от с.Долгощелье 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) была сформирована о. Середовая Кошка, которая постепенно соединилась 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 оконечностью с.Долгощелье и м.Митинский сформировался огромный побочень, заросший травяной и кустарниковой растительностью, превратившийся в полого выпуклое урочище Чалковский Нос (27 км от УС) (рис. 3).

На устьевом взморье реки 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. 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 возвратно-поступательных движений во время следующих друг за другом приливов, и результирующий перенос будет векторной суммой всех таких движений за несколько приливов.

Приливные осушки нижней части эстуария Кулоя и Мезенского залива имеют полого выпуклую форму с уклоном в сторону моря  $2-3^\circ$ . Ширина 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 [Eisma, 1986].

Верхняя прибрежная часть приливной осушки сложена из песка с обильным включением валунов. Средний размер окатанных моренных валунов составляет около 20 см в диаметре, максимальный – более 1.0 м. Если верхняя часть осушки слабо подвержена эрозии даже при сизигийных приливах и в период штормовых нагонов, она закрепляется солонатоволлюбивой растительностью, формируя заболоченные «лайды» или марши.

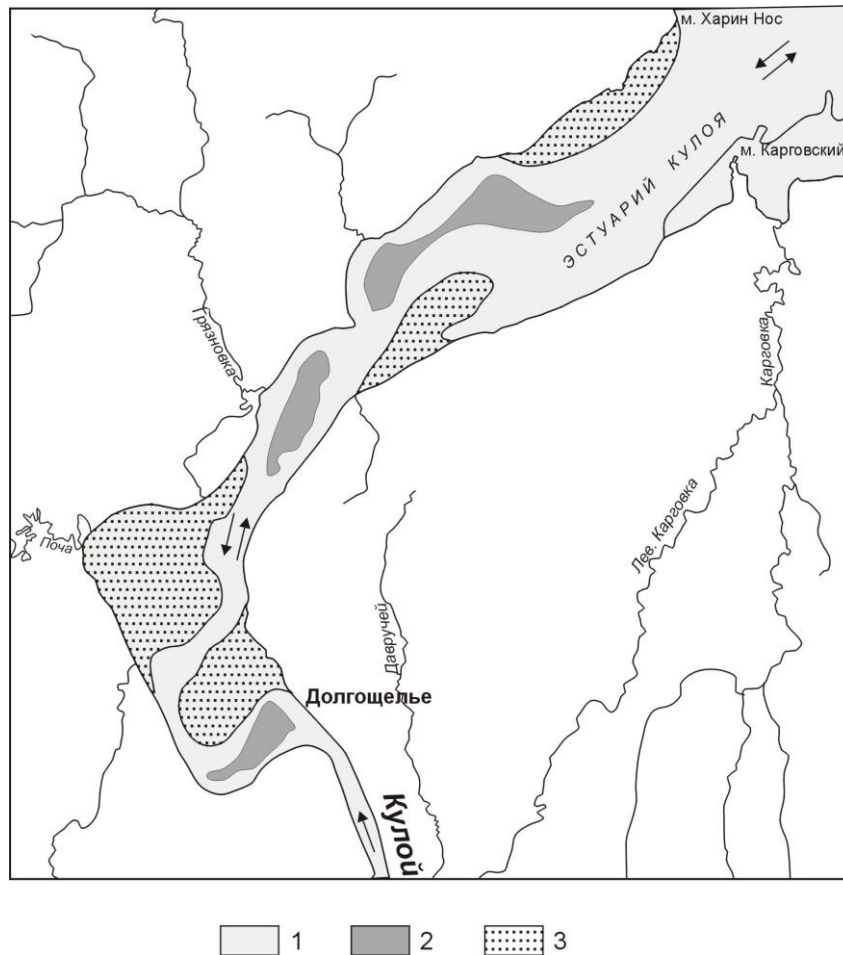


Рис. 3. Схема приливных осушек и осередков в малую воду в эстуарии Кулоя. 1 – водные объекты, 2 – осередки и острова, 3 – прибрежные отмели (осушки).

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 (т.н. «кошки») – серия гряд высотой 1–2 м. Шаг этих волн составляет 400–500 м, они образуются на отмелом дне при скоростях течения 0.3–0.8 м/с. Профиль песчаных волн асимметричный [Eisma, 1986].

Таким образом, с прогрессирующим заполнением наносами эстуария, взмучивание и перемещение взвешиваемого материала внутри эстуария является важным фактором, способствующим аккумуляции огромных объемов донных отложений на приливных осушках, освоением мелководий растительностью на соленостных маршах и дальнейшему отмиранию эстуария.

**Заключение.** Динамика воды, солей и взвешенных наносов в устьевой области реки Кулоя тесно связаны с приливными и сгонно-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 и морских вод с различной плотностью.

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 эрозивно-аккумулятивными процессами. Асимметрия приливных и отливных течений приводит к формированию характерных русловых подводных форм и необратимым русловым деформациям. Наиболее характерной формой донного рельефа являются пологовыпуклые приливные осушки (приливные ватты) и мощные радиальные гряды. На дне эстуария Кулоя сформировались подводные аккумулятивные образования, находящиеся ближе к вершине эстуария, и происходит формирование надводных приливных дельт.

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.

**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).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гордеев В.В. Геохимия системы река-море. М. И.П.Матушкина. 2012. 452 с.
- 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 // Труды ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 273–288.
- Демиденко Н.А. Гидрологический режим Мезенского залива и эстуариев Мезени и Кулоя // Система Белого моря. Т. 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 411–432.
- Мак-Доуэлл Д.М., О'Конор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
- Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море (Седиментогенез и история развития в голоцене). М.: Наука, 1977. 236 с.
- Римский-Корсаков Н.А., Кортаев В.Н., Иванов В.В., Пронин А.А., Демиденко Н.А. Гидрологический режим и литологические процессы в эстуарии Мезени // Океанология. 2018. Т. 58. № 4. С. 640-648. doi: 10.1134/S003015741804007X
- Dyer K.R. Coastal and estuarine sediment dynamics. Chichester, Wiley, 1986, p. 342.
- Eisma D. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in Estuaries // Netherlands Journal of Sea Research. 1986. Vol. 20. No. 2-3. P. 183–199. doi: 10.1016/0077-7579(86)90041-4

## **THE MODERN SEDIMENTATION PROCESSES IN THE MACROTIDAL KULOY ESTUARY**

*Demidenko N.A.*

Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, Moscow, Russia

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 Kuloy estuary, which were conducted by the author in 2005–2019s and the summer of 2022, 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 Kuloy 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 Kuloy estuary 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 Kuloy estuary reaches 8.7 kg/m<sup>3</sup> during the low water due to the concentration of suspended sediments in the bottom horizon. The turbidity of water in the surface horizon is stored in the range of 0.05–0.10 kg/m<sup>3</sup>. 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 Kuloy river 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.

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