

## ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЙ МУТНОСТИ ВОД В МАЛЫХ ПРИЛИВНЫХ ЭСТУАРИЯХ БЕЛОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

И.В. Мискевич<sup>1</sup>, А.М. Алабян<sup>2</sup>, Н.А. Демиденко<sup>3</sup>, В.Б. Коробов<sup>4</sup>, Е.Д. Панченко<sup>5</sup>

<sup>1,3,4</sup> Институт океанологии РАН им. П.П. Шишова

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши

<sup>5</sup> Институт водных проблем РАН, лаборатория гидродинамики

<sup>1</sup> Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: subarct@gmail.com

<sup>2</sup> Доцент, канд. геогр. наук; e-mail: andrei\_alabyan@mail.ru

<sup>3</sup> Науч. сотр.; e-mail: demidenko\_nikola@mail.ru

<sup>4</sup> Вед. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: szoioran@mail.ru

<sup>5</sup> Мл. науч. сотр.; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

Формирование областей повышенной мутности в приливных устьях является важным фактором, определяющим их гидрохимический, гидробиологический и гидроэкологический режим. Авторами решалась задача установления закономерностей протекания процессов в устьевых областях малых рек приливного моря и анализ особенностей, обусловленных морфологическими различиями и величиной прилива. Экспедиционные исследования устьевых областей рек Кянда, Тамиза, Семжа, Пыя и Чеша, выполненные в 2015–2019 гг., показали, что повышенная по сравнению с прилегающими участками реки и моря мутность вод (концентрация взвешенных наносов) в мезо- и макроприливных эстуариях наблюдается на участках реверсивных течений, вызванных приливными колебаниями уровня моря. Концентрация наносов определялась весовым методом посредством фильтрования проб, отобранных при одновременной регистрации гидравлических параметров водного потока. Отмечается широкий диапазон колебания мутности в зависимости от фазы приливного цикла, характера перемешивания речных и морских вод, геолого-геоморфологического строения взморья и речного русла, а также погодных условий. Наибольшие значения максимальной мутности формируются в период открытого русла в макроприливных эстуариях: в устье Чешы – 4,32 кг/м<sup>3</sup>, в устье Семжи – 2,66 кг/м<sup>3</sup>. В мезоприливных эстуариях Кянды и Тамизы максимальная мутность на порядок меньше. Прослеживается закономерное изменение мутности в течение приливного цикла, когда ее максимум наступает практически одновременно с максимумом скорости приливного течения. Увеличению мутности способствуют ветровое волнение на взморье, взмывающее донные отложения, и интенсивные ливневые осадки, выпадающие на поверхность обширных приливных осушек перед их затоплением. Влияние синоптических факторов при ледоставе уменьшается, но при приливном торошении льда и контакте его нижней поверхности с донными отложениями возможно эпизодическое локальное увеличение мутности. Минимальная мутность вод отмечается, как правило, непосредственно перед началом прилива при стекании пресных речных вод. Вертикальная стратификация мутности в малых эстуариях во время приливных и отливных течений практически отсутствует ввиду интенсивного турбулентного перемешивания, однако при полной воде в моменты времени, близкие к смене направления течения, в результате оседания взвешенных частиц она может быть заметной в плесовых ложинах речного русла.

**Ключевые слова:** устья малых рек, Кянда, Тамиза, Семжа, Пыя, Чеша, концентрация взвешенных наносов, приливный цикл

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из характерных особенностей побережий западного сектора Российской Арктики является существенное влияние приливных колебаний уровня моря на формирование гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режима устьевых областей рек, впадающих в Белое и Баренцево моря. В устьях рек бассейна Карского и более восточных морей Северного Ледовитого океана приливы проявляются слабее [Залогин, Косарев, 1999]. Вследствие этого, а также ввиду таких факторов, как разнообразие рельефа дна и типов берегов, ши-

рокий диапазон площадей водосбора впадающих рек и различная интенсивность весеннего таяния снега в устьевых областях рек западного сектора Российской Арктики наблюдается более широкий спектр природных явлений.

Здесь при впадении малых и средних рек в море, если ориентироваться на большинство принятых в настоящее время классификаций, формируются эстуарии [Михайлов, 2004; Михайлов, Горин, 2012; Pritchard, 1967; Savenije, 2012; Hoitink, Jay, 2016] с микроприливными (величина сизигийного прилива менее 2 м), мезоприливными (2–4 м) и макропри-

ливными (более 4 м) условиями. Иногда среди макроприливных эстуариев выделяют гиперприливные (величина прилива более 6 м) [Kirby, Parker, 1983; Officer, 1980]. Все эти типы эстуариев можно найти в бассейнах Белого и Баренцева морей. При типизации эстуариев по высоте прилива пограничные значения у представителей различных научных школ могут несколько отличаться, однако четкого общепринятого физического обоснования этих критериальных значений в настоящее время еще не принято.

Одним из возможных показателей при разработке критериев подразделения устьевых областей на типы в соответствии с их гидродинамическими характеристиками, определяемыми величиной прилива в устьевом створе, является возможность формирования областей повышенной мутности, а также параметры этих областей. Сам факт формирования в эстуариях особых зон, где концентрация взвеси в разы и даже на порядки превышает мутность речных и морских вод прилегающих акваторий, известен и активно изучается еще с прошлого века [Мак-Дуэлл, О'Конор, 1983; Postma, 1967; Gibbs, 1977; Allen et al., 1980; Dyer, 1986]. Однако, отсутствие количественных оценок соотношения мутности речных, морских и эстуарных вод приводит к появлению различных толкований некоторых терминов и определений в зависимости от контекста решаемой задачи или же фоновых гидродинамических и физико-географических условий, в которых находится та или иная устьевая область.

Применительно к области повышенной мутности в эстуарии в литературе часто используются термины «мутявая пробка», «илистая пробка», «пробка мутности», «илистый крем» (англоязычные аналоги – sediment plug, sediment trap; франкоязычные – le bouchon vaseux, la crème de vase). Изначально эти понятия применялись в случаях, когда высокие скорости течения, динамика соленых вод вдоль тальвега эстуария, активное ветровое волнение на устьевом взморье, процессы коагуляции и флокуляции в зоне смешения вод приводили к формированию чрезвычайно высокой мутности в эстуариях Северна [Kirby, Parker, 1983], Темзы [Uncles, Mitchell, 2011], Жиронды [Allen et al., 1977], Луары [Gallenne, 1974], Янцзы [Yang et al., 2014; Li et al., 2016], Меконга [Wolanski et al., 1996]. В отечественной литературе приводятся значения мутности для таких зон в диапазоне 10–13 кг/м<sup>3</sup> для эстуариев Мезени и Кулоя [Демиденко, 2009; Система Белого моря..., 2012]. Такая «пробка мутности» обычно формируется в придонном слое воды толщиной 1–2 м в зоне проникновения соленых вод и реверсивных течений при полной воде в верхней (речной) части эстуария и при малой воде в нижней

(морской) его части. В периоды нарастания скоростей течения и при максимальных скоростях в фазу прилива или отлива она размывается, и турбулентный поток поднимает значительную часть взвеси в верхние слои потока, вплоть до его поверхности. В это время соотношение мутности на поверхности и у дна составляет 1:2÷3. При малой и полной воде в условиях формирования «пробки мутности» эти соотношения могут составлять 1:10÷100 и более [Демиденко, 2009]. При этом для формирования «пробки мутности» в эстуарии в малую воду были необходимы глубины 2–3 м и более.

В то же время понятие «пробка мутности» стало широко использоваться применительно к концепции маргинального фильтра [Лисицын, 1994] многими отечественными учеными для обозначения зон повышенной мутности с существенно меньшими абсолютными значениями концентрации взвешенного вещества [Мискевич и др., 2021]. Дело в том, что исследование особенностей гидрохимического, гидробиологического и гидроэкологического режима приливных эстуариев невозможно без определения причин, механизмов и динамики зон повышенной мутности, которые в значительной степени определяют биоразнообразие и биопродуктивность эстуарных экосистем. «Пробки мутности» в этом случае могут трактоваться не только, и даже не столько как гидродинамический фактор, определяющий интенсивность водообмена и характер взаимодействия речных и морских вод, а как некоторые «препятствия» для нормальной жизнедеятельности речных и морских обитателей и их миграции между речными и морскими водами, что наиболее актуально для малых эстуариев. Кроме того, аккумулирующиеся в «пробках» наносы часто могут являться источником загрязнения вод при переходе загрязнителей из адсорбированной формы в растворимую при контактах с соленой водой [Мискевич и др., 2019].

В связи с этим одной из наиболее актуальных проблем для малых 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. Учитывая, что единого мнения о применимости термина «пробка мутности» к этим зонам нет даже среди авторов предлагаемого исследования, здесь и далее под такой «пробкой» мы будем подразумевать зону эстуарных вод, в которой концентрации взвеси в разы и более превышают их содержание в морских и речных водах прилегающих акваторий [Система Белого моря..., 2012].

В соответствии с классической моделью маргинального фильтра мутьевые пробки в устьях больших и средних рек, как правило, формируются у

верхней (со стороны реки) границы зоны смешения речных и морских вод. Такая ситуация в основном обусловлена более высоким (на 1–2 порядка) содержанием взвешенных веществ в водах рек средней полосы по сравнению с морскими водами [Лисицын и др., 2013]. При этом процессы формирования высокой мутности вод в эстуариях малых рек, дренирующих северные территории и имеющих значительно меньшую «фоновую» (до контакта с морской водой) мутность, остаются малоизученными. Немногочисленные публикации, содержащие сведения о распределении взвеси в небольших эстуариях исследуемой территории обычно отражают ситуацию, характерную для непродолжительного периода проведения отдельных экспедиций [Долотов и др., 2002, 2011], в то время как комплексные режимные наблюдения практически не ведутся.

В предлагаемой статье авторами выполнен синтез результатов полевых исследований мезо- и макроприливных устьев малых рек Белого и Баренцева морей, проведенных в 2015–2020 гг. Северо-западным отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СЗО ИО РАН) [Коробов, 2015; Мискевич и др., 2019; Мискевич и др., 2021] и географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) [Алабян и др., 2017, 2018], а также их совместных исследований [Мискевич и др., 2018].

Целью исследования было обобщение закономерностей протекания процессов формирования зон повышенной мутности в устьевых областях малых рек, впадающих в приливные моря на севере Европейской России, и выявление особенностей этих процессов, связанных с морфологическими различиями эстуариев и величиной прилива.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мезоприливные эстуарии получили наибольшее распространение в Белом море и в юго-восточной части Баренцева моря. Макроприливные эстуарии встречаются в Баренцевом море, на побережье Кольского полуострова и в Чешской губе, они характерны и для северной части Белого моря (Воронка и Мезенский залив), при этом некоторые эстуарии Мезенского залива можно отнести к гиперприливному.

В последние годы экспедиции СЗО ИО РАН выполняли исследования в устьевых областях малых рек – Кянда, Тамица, Пыя и Чеша, а экспедиции МГУ – также на Кянде и Тамице, а кроме того, на р. Семже. Реки Тамица и Кянда впадают в юго-восточную часть Онежского залива Белого моря, Пыя и Семжа – в Мезенский залив Белого моря (в эстуарий р. Мезени), р. Чеша – в Чешскую губу Баренцева моря (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения объектов экспедиционных исследований

Fig. 1. Scheme of field study objects

Таким образом, Кянда и Тамица стали своего рода общим полигоном, на котором помимо непосредственных измерений проводились работы по сравнению и дополнению данных, полученных в результате применения различных методик и средств измерения, которые изначально были ориентированы на несколько различающиеся задачи и пространственно-временные масштабы исследуемых явлений. Наибольший объем совместно выполненных работ пришелся на начало августа 2016 г. [Алабян и др., 2018].

Полевые исследования СЗО ИО РАН охватывали длительный период наблюдений (недели – месяцы) с целью сопоставить степень влияния приливных и суточных циклов, а также синоптических квазипериодических изменений на гидробиологические и гидроэкологические закономерности режима устьевых областей. При этом интервал наблюдений за мутностью (отбор проб) составлял 1–6 часов, с такой же периодичностью, по возможности, фиксировались и гидравлические характеристики потока. Кроме того, для изучения мутности вод устьевой области в отдельные промежутки времени использовался автоматический зонд-регистратор SeaGuard RCM SW фирмы Aanderaa (Норвегия).

Экспедиции МГУ были более краткосрочными, упор делался на изучении динамики вод эстуариев в течение приливного цикла. Длительность периода наблюдений не превышала 13 часов (полусуточный приливный цикл), при этом уровень регистрировался с частотой 1 мин. автоматическими самописцами уровня Keller (Швейцария) и Solinst

(Канада), скорость и расход воды измерялись каждые 10–30 мин профилографом RiverRay фирмы Teledyne RD-Instruments (США), пробы воды на мутность отбирались не реже 0,5–1,0 часа в зависимости от фазы приливного цикла.

В СЗО ИО РАН выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через ядерные фильтры диаметром 47 мм и диаметром пор 0,45 мкм, изготовленные в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна). Фильтрация каждой пробы воды проводилась через три параллельных ядерных фильтра с помощью вакуумного мембранного насоса НВМ 2×2-К производства ЗАО «Владисарт». Количество взвеси в профильтрованном объеме воды определялось как среднее значение разностей между конечным и начальным весом каждого из трех фильтров. Кроме этого, для изучения динамики мутности между моментами взятия проб использовались записи зонда-регистратора. В МГУ определение взвеси осуществлялось путем фильтрования отобранных проб объема 1,0–1,5 л через бумажные фильтры, их последующего высушивания и взвешивания в лабораторных условиях.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основным отличием устьев малых от более крупных рек является малая ширина русла водотока в отлив по сравнению с шириной приливных осушек. Разница между данными параметрами на устьевом взморье реки и у вершины эстуария может достигать 1–2 порядков. В подобных условиях процессы смешения речных и морских вод в течение приливного цикла проходят преимущественно в пределах периодически заливаемых устьевыми водами и периодически осушаемых зон, верхние участки которых обычно заняты маршами с галофитной растительностью. Донные отложения приливных осушек, как правило, формируются илистыми и илисто-глинистыми наносами, тогда как ложе водотока, не обсыхающее даже в малую воду, обычно покрыто отмосткой крупнозернистых отложений – песками, гравием и галькой с включениями валунов.

На скалистых побережьях приливные осушки развиты очень слабо, и зачастую могут практически отсутствовать, поэтому здесь и далее будут рассматриваться устья малых рек, находящиеся в пределах низменных территорий. Для этих устьевых областей характерны очень малые глубины на взморье, не превышающие в малую воду 1–2 м. Одной из характерных черт такого взморья является то, что при отступлении воды во время отлива на открывающейся части морского дна в течение 1–2 часов формируется дельтообразная сеть водотоков

шириной 1–3 м и глубиной не более 0,5–1,0 м, по которым речная вода стекает в море. Реже обсыхающую часть взморья прорезает узкая русловая бороздина шириной от нескольких метров до десятков метров и глубиной 1–3 м. При этом ширина устьевых взморья, заполненного водой в полную воду, может достигать от нескольких десятков метров до нескольких километров.

С возрастанием величины прилива, которое вызывает соответствующее возрастание скоростей приливных течений, обычно наблюдается увеличение мутности вод устьевой области. Тем не менее различия в размерах приливных осушек и физико-химическом составе их отложений при сопоставимых гидрологических и гидрометеорологических условиях могут вносить заметные отклонения в интервалы изменчивости концентраций взвеси. Сопоставление диапазонов изменения мутности исследованных рек (с учетом применения различных методик отбора и обработки проб) дает представление о степени пространственно-временной изменчивости данной характеристики в пределах рассматриваемой территории (таблица).

Более высокие концентрации взвеси в эстуарии Чешы, по сравнению с Пыей и даже Семжей, где величина прилива значительно больше, связаны с расположением ее бассейна в тундровой зоне, где в последние годы идет интенсивное разрушение многолетнемерзлых грунтов и усиление дренирования почвенного покрова. Водосборы же Семжи и Пыи располагаются в северной подзоне тайги с хорошо дренированными почвами, что обуславливает накопление в ее устье наносов с частицами более высокой гидравлической крупности.

Более высокие концентрации взвешенных веществ в эстуарии Кянды по сравнению с Тамицей можно объяснить относительно слабым развитием в последней приливных осушек, а также наличием в их гранулометрическом составе большей доли крупных фракций. Особенности геоморфологического строения русла в низовьях Тамицы, где каменистые перекаты препятствуют поступлению морских вод на устьевой участок реки, также определяют снижение концентрации взвеси, образующейся при контакте вод в зоне смешения.

Взмучивание донных отложений приливными течениями является основным фактором появления высоких концентраций взвешенных веществ во всех рассматриваемых водных объектах. В условиях полусуточных приливов, характерных для Белого и Баренцева морей, максимумы скорости наблюдаются четыре раза в сутки на фазах прилива и отлива. При этом в случае несимметричности приливной волны, подходящей к устьевому створу, скорости приливных течений и значения приливных расхо-

дов воды превосходят максимальные скорости течения и расходы воды на отливе (рис. 2). Скорости обратных течений в начале фазы прилива в мезо-приливных эстуариях могут достигать 0,5–0,6 м/с, а в макроприливных эстуариях – 1,1–1,3 м/с. Одна-

ко, если форма приливной волны близка к симметричной, скорости приливных и отливных течений могут быть сопоставимы, а их соотношение будет в значительной степени зависеть от величины речного стока.

Таблица

**Содержание взвеси в поверхностном горизонте мезо- и макроприливных рек бассейна Белого и Баренцева морей**

| Характеристика                        | Мезоприливные эстуарии |                       |                 |                  | Макроприливные эстуарии |                  |                  |                  |                   |                |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|
|                                       | Кянда                  |                       | Тамица          |                  | Пыя                     |                  | Чеша             |                  | Семжа             |                |
| Площадь водосбора, км <sup>2</sup>    | 510                    |                       | 465             |                  | 790                     |                  | 550              |                  | 490               |                |
| Экспедиция                            | СЗО<br>ИО<br>РАН       | МГУ,<br>СЗО<br>ИО РАН | МГУ             | СЗО<br>ИО<br>РАН | МГУ                     | СЗО<br>ИО<br>РАН | СЗО<br>ИО<br>РАН | СЗО<br>ИО<br>РАН | Н.А.<br>Демиденко | МГУ            |
| Время проведения                      | Июль<br>2016           | Август<br>2016        | Февраль<br>2017 | Август<br>2020   | Февраль<br>2017         | Апрель<br>2019   | Август<br>2019   | Июль<br>2017     | Апрель<br>2005    | Август<br>2018 |
| Величина прилива, м                   | 1,7                    | 1,9                   | 1,5             | 1,7              | 1,3                     | 1,1              | 5,1              | 4,2              | 6,1               | 7,8            |
| Количество проб                       | 7                      | 33                    | 8               | 7                | 6                       | 13               | 7                | 7                | 13                | 13             |
| Концентрация взвеси, г/м <sup>3</sup> |                        |                       |                 |                  |                         |                  |                  |                  |                   |                |
| Средняя                               | 15,2                   | 36,1                  | 18,0            | 9,6              | 5,3                     | 2,9              | 250              | 1452             | 170               | 911            |
| Максимальная                          | 36,2                   | 71,9                  | 36,1            | 12,0             | 11,6                    | 6,8              | 719              | 4316             | 317               | 2662           |
| Минимальная                           | 4,2                    | 10,8                  | 8,5             | 7,1              | 0,9                     | 1,0              | 141              | 334              | 89,8              | 198            |

Процесс взмучивания донных отложений получает максимальное развитие в начале фазы прилива, когда наблюдаются наибольший временной градиент изменения уровня воды и соответствующие ему максимальные темпы нарастания скорости течений при еще малых глубинах над приливной осушкой. Это четко проявляется при анализе короткопериодной изменчивости мутности вод эстуария р. Кянды в летнюю межень на участке в 3 км выше ее устьевое створа (рис. 3). Примерно в это же время в русле наблюдается максимум скорости приливного течения, однако при дискретности отбора проб на мутность 1 час делать выводы о точном (в пределах нескольких минут) соотношении времени наступления максимумов мутности и скорости течения представляется преждевременным.

Второй, менее четко выраженный за время приливного цикла максимум мутности приходится на фазу отлива и на 1,5–2,0 часа запаздывает относительно максимума скорости отливного течения, который выражен не столь отчетливо по сравнению с максимумом скорости при приливе. Наименьшие значения мутности наблюдаются при полной воде во временной промежуток 2,0–2,5 часа при максимальном уровне, смене направления течения и постепенном увеличении скорости отливного течения.

Таким образом, поступившие с взморья на устьевой участок реки тонкодисперсные частицы осаждаются на дно или же концентрируются в придонной части водной толщи, чтобы при отливе вновь быть вовлеченными в движение.

Для возникновения в эстуарии хорошо выраженной мутьевой пробки необходимо сочетание высоких скоростей приливных течений (0,5–1,0 м/с и более) и наличие обширных приливных осушек. Учитывая большое разнообразие геоморфологических характеристик устьев малых рек арктической зоны, локализация мутьевой пробки может наблюдаться на любом участке устьевой области реки в пределах области реверсивных течений.

Ветровое волнение способно вызвать большое замутнение вод на открытом устьевом взморье малой реки, но в зонах действия приливов возникает специфический эффект, заметно усиливающий данный процесс. Это связано с трансформацией ветровых волн при встрече с сильными приливными течениями противоположного направления. В подобной ситуации происходит существенное изменение их параметров, в первую очередь крутизны волн, что влечет за собой возрастание вертикальной скорости течения воды, вовлеченной в движение по волновой орбите. Усиление такой скорости, в свою

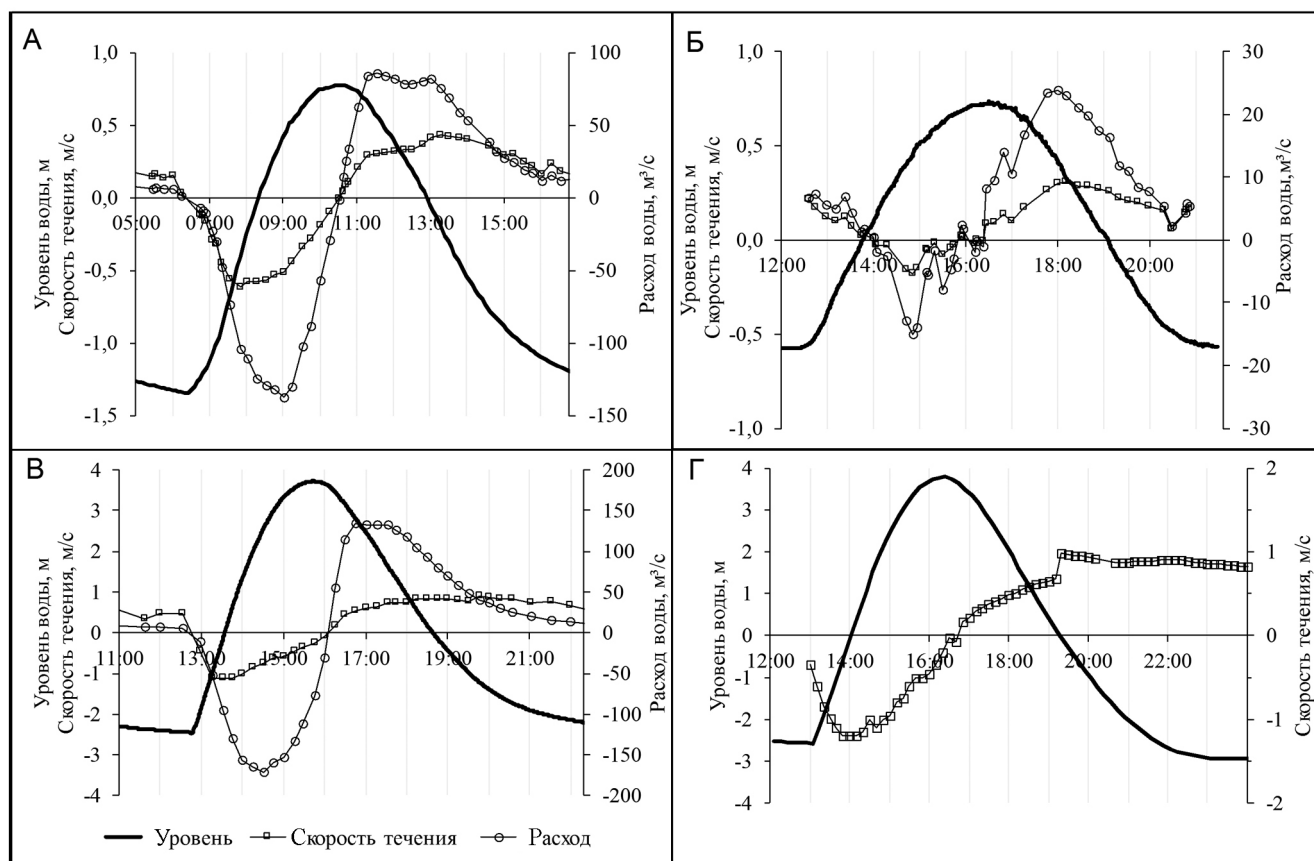


Рис. 2. Изменение гидравлических характеристик в течение приливного цикла:

А – р. Кянда, устьевой створ, 04.08.2016; Б – р. Тамица, устьевой створ, 12.08.2016; В – р. Семжа, 3,6 км выше устьевое створа, 14.08.2018; Г – р. Семжа, 0,5 км выше устьевое створа, 04.08.2015. Отрицательные значения скорости течения и расхода воды соответствуют течению из моря в реку

Fig. 2. Changes of flow parameters during the tidal cycle: А – the Kyanda River mouth, 04.08.2016; Б – the Tamitsa River mouth, 12.08.2016; В – the Syomzha River at 3.6 km upstream the mouth, 14.08.2018; Г – the Syomzha River at 0.5 km upstream the mouth, 04.08.2015. Negative values of flow velocity and water discharge correspond to flow direction from the sea to the river

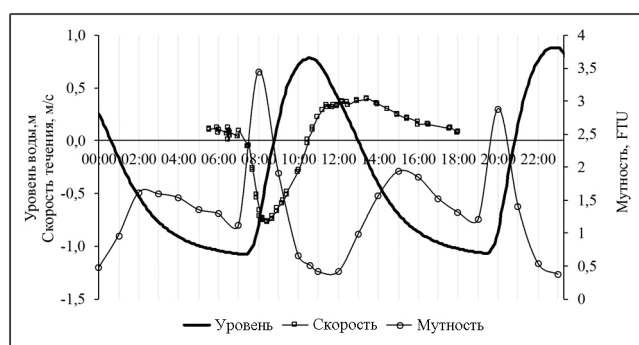


Рис. 3. Изменение мутности вод эстуария р. Кянды в течение приливного цикла 04.08.2016 г. в 3 км выше устьевое створа

Fig. 3. Changes in water turbidity of the Kyanda River estuary during the tidal cycle of 04.08.2016 at 3 km above the mouth section

очередь, вызывает интенсификацию разрушения верхнего слоя донных отложений. Кроме этого, при обрушении волн на мелководных участках возника-

ют так называемые «разрывные течения», скорости которых достигают 1 м/с. Данные эффекты заметно усиливают размывающую способность потока эстуарных вод на взморье даже при умеренных и слабых ветрах. Так, 12.08.2016 г. на устьевом взморье р. Тамицы (рис. 4) при умеренном северо-западном ветре и волнении всего 1–2 балла по мере затопления осушки наблюдалось трехкратное увеличение мутности при движении водной массы по затопленной русловой бороздине к устьевому створу реки (с 21,5 до 63,7 г/м³). При этом необходимо иметь в виду, что на морской границе взморья в начале измерений находилась сильно опресненная вода с соленостью 3,73‰, а к устьевому створу реки подошла уже набравшая мутность морская вода с соленостью около 14‰, характерной для Онежского залива Белого моря. По мере выхода водной массы с устьевое участка реки мутность в устьевом створе и на взморье уменьшалась вместе с соленостью (рис. 4; точки, соответствующие 17:55, 18:07 и

18:15 часам) как в результате оседания взвеси, так и за счет разбавления осветленными речными водами в конце фазы отлива.

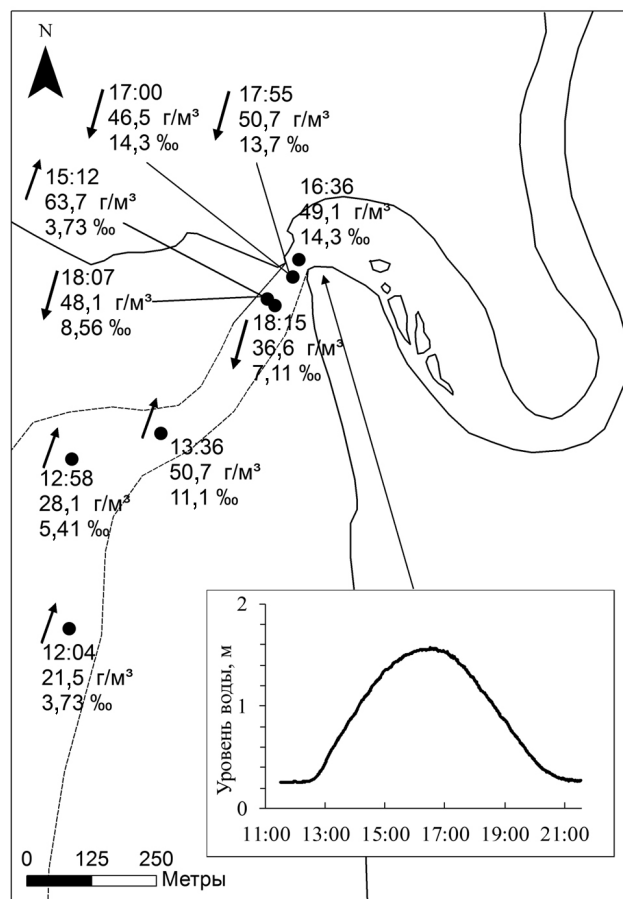


Рис. 4. Распределение мутности и солености воды на взморье в устье р. Тамицы во время приливного цикла 12.08.2016 г. Пунктирной линией отмечена граница осушки

Fig. 4. Distribution of turbidity and salinity at the seaside of the Tamitsa River estuary during the tidal cycle 12.08.2016. The dashed line marks the drying area boundary

Аналогичное развитие процесса в эстуарии р. Кянды может быть проиллюстрировано сопоставлением соотношения содержания взвесей и солености (рис. 5) в поверхностном слое воды (до 0,5 м) при штиле и в ветреную погоду на рейдовой вертикали в 3 км выше устьевом створа. При штилевой погоде 28.05.2015 г. на полной воде наблюдалась обычная картина уменьшения мутности по мере осолонения вод устьевой области за счет прихода в эстуарий чистой морской воды. При ветре со скоростью 6–8 м/с против направления движения воды 11.08.2016 г. наблюдалась уже обратная ситуация: с ростом поступления в русло реки взмученных морских вод с взморья мутность имела тенденцию к увеличению, при этом максимум содержания

взвесей с устьевом участка реки сместился на ее устьевое взморье.

Заметное замутнение эстуарных вод может иногда наблюдаться и при выпадении ливневых дождей. Их влияние во всех исследованных устьевых областях хорошо прослеживалось визуально по изменению прозрачности и цвета вод на участках расположения обширных приливных осушек. Кроме этого, данный эффект нашел отражение в выявлении синоптического цикла в короткопериодной изменчивости содержания взвешенных веществ, а также ряда гидрохимических показателей в эстуарии р. Кянды по данным 14-суточной серии наблюдений в июле–августе 2016 г. [Мискевич и др., 2018].

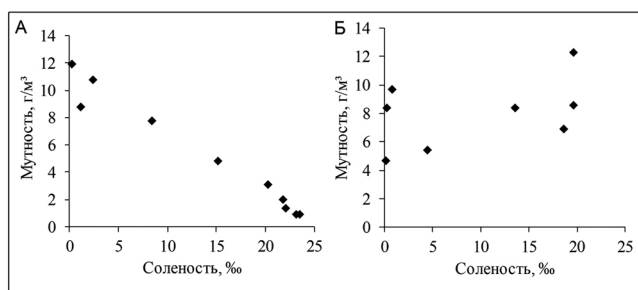


Рис. 5. Соотношение концентрации взвеси и солености в поверхностном слое воды эстуария р. Кянды: А – в штиль 28.07.2015 г.; Б – в ветреную погоду 11.08.2016 г.

Fig. 5. The ratio of suspended load and water salinity in surface water layer in the Kyanda River estuary: А – calm weather 28.07.2015; Б – windy weather 11.08.2016

Зимой при появлении ледяного покрова процессы замутнения эстуарных вод заметно меняются. В первую очередь, это обусловлено снижением величины прилива и скоростей приливных течений. Величина прилива зимой может уменьшаться на 30–50% и более в зависимости от наличия припая на прилегающей акватории моря и возможности формирования ледяной «дамбы» на мелководном устьевом взморье реки. Последняя состоит из нагромождения ледяных обломков различной конфигурации и может формироваться, если глубины водотока на взморье, величина прилива и толщина льда становятся соизмеримыми.

Ледяная «дамба» начинает ограничивать водообмен между устьем малой реки и морем, иногда она способна его прекращать полностью или же только в квадратуру, когда приливные движения минимальны. При ее наличии приливные колебания уровня воды в устьевой области еще более теряют свою правильную синусоидальную форму в полусуточных циклах. На фазах отлива в изменениях уровня могут появляться различные «возмущения», связанные со сбросом накопившихся в эстуарии подо

льдом речных вод (как бы «маниха» наоборот). Такой характер изменения уровня было предложено называть «ледовым мелководным типом прилива» [Мискевич и др., 2019]. При наличии ледяной «дамбы» максимальная мутность эстуарных вод начинает формироваться на участке ее расположения или на участках приливной осушки, где наблюдаются значительные вертикальные и отчасти горизонтальные подвижки льда. Последнее более типично для макроприливных эстуариев.

При ледоставе, также как и в период открытой воды, ход мутности в течение приливного цикла может иметь два максимума, которые гораздо более четко выражены в макроприливных эстуариях, где абсолютные значения мутности более чем на порядок превышают соответствующие значения для мезоприливных эстуариев (рис. 6). При этом явного превышения приливного максимума над отливным не наблюдается, что также может быть связано с меньшими скоростями приливных течений при ледоставе. В мезоприливных эстуариях прилив может вообще не проникать за устьевой участок реки, в отлив же на взморье сбрасывается накопившаяся в русле реки масса пресной воды, вызывая взмучивание донных отложений и их вынос за пределы

устьевого створа. Однако, концентрация взвеси при этом значительно меньше, чем при отсутствии ледовых явлений. О таком характере динамического взаимодействия речных и морских вод в приливных эстуариях могут свидетельствовать многочисленные торосы и ропаки, концентрирующиеся в непосредственной близости от устьевого створа.

При этом вопреки весьма распространенному мнению, что при ледоставе транспорт наносов и русловые процессы в устьевых областях малых рек затормаживаются, следует отметить, что при выполнении измерений 10.04.2005 г. в эстуарии Семжи были зафиксированы максимальные значения концентрации взвешенных наносов, превышающие  $300 \text{ г/м}^3$ . Этому способствовали заметные подвижки ледяного покрова.

В условиях, когда ледостав на реках западного сектора Российской Арктики длится 5–7 месяцев, проведение аналогичных исследований в других устьях и при иных (промежуточных) гидрологических и синоптических условиях представляется весьма важным для понимания закономерностей зимнего режима малых эстуариев в зависимости от высоты приливной волны и величины речного стока.

## ВЫВОДЫ

Анализ имеющихся экспедиционных данных, состоящих как из результатов измерений, так и непосредственных визуальных наблюдений позволяет предположить, что в приливных устьях малых рек основную роль в формировании зоны повышенной мутности, а иногда и мутьевой пробки наиболее важны следующие процессы:

- взмучивание донных отложений приливными течениями, интенсивность которых зависит от величины прилива и степени трансформации синусоидальной приливной волны по мере ее продвижения вверх по эстуарию;
- взмучивание донных отложений на мелководном взморье ветровыми волнами, взаимодействующими с приливными течениями;
- эрозия поверхности приливных осушек мощными ливневыми дождями, вызывающими формирование на их поверхности сети микроводотоков, и размыв ими связанных наносов;
- деформация и разрыхление донных отложений подвижками ледяного покрова, характер которых под воздействием приливных колебаний уровня определяется как величиной прилива, так и геоморфологическим строением устьевого взморья реки.

При научных и прикладных исследованиях мезо- и макроприливных эстуариев, в том числе в целях водопользования, рекомендуется в обязательном порядке выявлять наличие зон повышенной мутности, их пространственно-временную локализацию

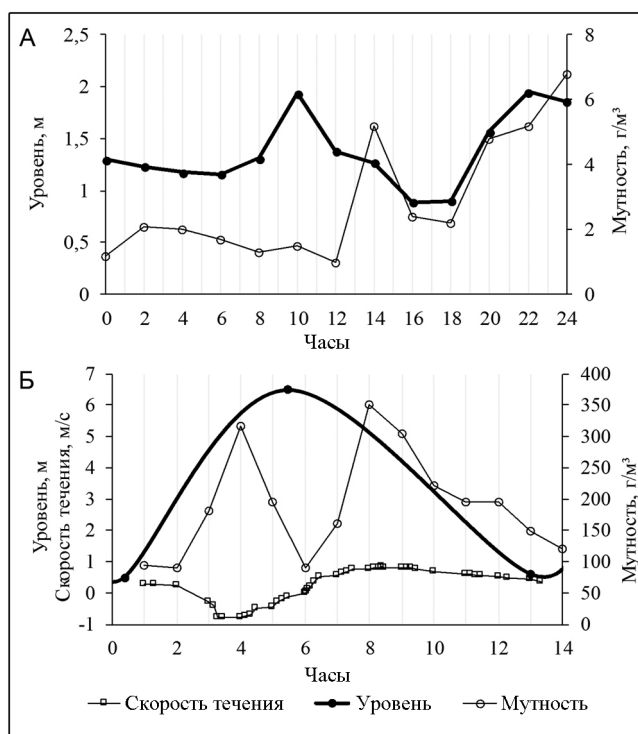


Рис. 6. Изменение мутности вод в течение приливного цикла при ледоставе: А – в устье р. Тамицы 05.04.2019 г.; Б – в устье р. Семжи 10.04.2005 г.

Fig. 6. Changes in water turbidity and flow in estuaries under the ice cover: А – the Tamitsa River mouth, 05.04.2019; Б – the Syomzha River mouth, 10.04.2005

и влияние на устьевую экосистему в целом. Изучение устьевых областей малых рек западного сектора Российской Арктики целесообразно проводить не только в летний, но и в зимний период, учитывая его большую продолжительность.

Пространственно-временные закономерности формирования мутьевых пробок могут быть исследованы посредством выполнения стационарных измерений в течение приливного цикла на различном удалении от устьевого створа реки как в сторону взморья, так и вверх по течению до границы зоны реверсивных течений, а также путем выполнения

гидрологических разрезов по оси эстуариев и площадной съемки мутности на взморье в различные фазы приливного цикла.

Полученные представления о диапазоне и динамике изменения мутности и гидравлических параметров водного потока в течение приливных циклов позволяют оптимизировать дискретность измерений в зависимости от их фазы. Для мезоприливных эстуариев, когда ситуация при сизигийных и квадратурных приливах может существенно различаться, на ключевых участках целесообразно выполнение повторных измерений в сизигию и квадратуру.

**Благодарности.** Исследования СЗО ИО РАН выполнялись в рамках темы № 0128-2021-0006 государственного задания «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек». Исследования МГУ – при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 18-05-60021 «Сток рек и изменение водного и ледотермического режима устьевых областей и морских побережий Российской Арктики в XXI веке» и № 19-35-90032 «Особенности динамики реверсивных водных потоков в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алабян А.М., Алексеева А.А., Демиденко Н.А. и др. Полевые гидрологические исследования устьев рек Онежского залива в зимнюю и летнюю межень 2016–2017 гг. // Геология морей и океанов: материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 20–24 ноября 2017 г.). М.: ИО РАН, 2017. Т. 3. С. 146–150.
- Алабян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 4. С. 39–48.
- Демиденко Н.А. Формирование максимума мутности воды в сильноприливных эстуариях Мезени и Кулоя // Геология морей и океанов: материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 16–20 ноября 2009 г.). М.: ГЕОС, 2009. Т. 4. С. 65–69.
- Долотов Ю.С., Коваленко В.Н., Лифшиц В.Х. и др. О динамике вод и взвеси в эстуарии р. Кереть (карельское побережье Белого моря) // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 765–774.
- Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Римский-Корсаков Н.А. и др. О проявлении морского и речного факторов в фазы прилива и отлива на береговых участках разной конфигурации Белого моря // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 110–122.
- Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.
- Коробов В.Б. Исследования режима устьевых областей рек Белого моря // Геология морей и океанов: материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 16–20 ноября 2015 г.). М.: ГЕОС, 2015. Т. 3. С. 199–202.
- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лисицын А.П., Кравчишина М.Д., Копелевич О.В. и др. Пространственно-временная изменчивость концентрации взвеси в деятельном слое Белого моря // ДАН. 2013. Т. 453. № 4. С. 440–445.
- Мак-Доуэлл Д.М., О'Конор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
- Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 5–14.
- Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 243–257.
- Мискевич И.В., Алабян А.М., Коробов В.Б. и др. Исследования короткопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря (28 июля – 15 августа 2016 г.) // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 369–373.
- Мискевич И.В., Лецев А.В., Мосеев Д.С. и др. Гидролого-гидрохимические исследования устьев малых рек Белого моря в зимнюю межень 2019 года // Океанология. 2019. Т. 59. № 8. С. 1089–1092.
- 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.
- Система Белого моря. Т. II: Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / А.П. Лисицын и др. М.: Научный мир, 2012. 782 с.
- Allen G.P., Salomon J.C., Bassoulet P. et al. Effect of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries, *Sedimentary Geology*, 1980, vol. 26, p. 69–90.

- Allen G.P., Sauzay G., Castaing P. et al. Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France, *Estuarine Processes*, 1977, vol. II, New York, Wiley, p. 63–81.
- Dyer K.R. *Coastal and estuarine sediment dynamics*, Chichester, Wiley, 1986, 342 p.
- Gallenne B. Study of fine material in suspension in the estuary of the Loire and its dynamic grading, *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 1974, vol. 2, p. 261–272.
- Gibbs R.J. Suspended sediment transport and the turbidity maximum, *Estuaries, Geophysics and the Environment*, National Academy of Science, Washington, 1977, p. 104–109.
- Hoitink A.J.F., Jay D.A. Tidal river dynamics: Implication for deltas, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 240–272.
- Kirby R., Parker W.R. The distribution and behavior of fine sediment in the Severn Estuary and Inner Bristol Channel, *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 1983, vol. 40, p. 83–95.
- Li X., Zhu J., Yuan R. et al. Sediment trapping in the Changjiang estuary: Observations in the north passage over a spring-neap tidal cycle, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2016, vol. 177, p. 8–19.
- Officer C.B. Discussion of the turbidity maximum in partially mixed estuaries, *Estuar. Coastal Mar. Sci.*, 1980, vol. 10, p. 239–246.
- Savenije H.H.G. *Salinity and tides in alluvial estuaries*, Delft, Delft University of Technologies, 2012, 163 p.
- Postma H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment, *Estuaries*, G.H. Lauff (ed.), Washington, American Association for the Advancement of Science, 1967, vol. 83, p. 158–179.
- Pritchard D.W. What is an estuary: physical viewpoint, *Estuaries*, G.H. Lauff (ed.), Washington, American Association for the Advancement of Science, 1967, vol. 83, p. 3–5.
- Uncles R.J., Mitchell S.B. Turbidity in the Thames Estuary: How turbid do we expect it to be? *Hydrobiologia*, 2011, vol. 672, p. 91–103, DOI: 10.1007/s10750-011-0757-6.
- Wolanski E., Huan N.N., Dao L.T. et al. Fine-sediment dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, vol. 43, p. 565–582.
- Yang Y., Li Y., Sun Z. et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River estuary: The trends and causes, *J. Geogr. Sci.*, 2014, vol. 24, p. 129–142.

Поступила в редакцию 27.02.2021

После доработки 03.11.2021

Принята к публикации 27.12.2021

## FORMATION OF HIGH WATER TURBIDITY IN SMALL TIDAL ESTUARIES OF THE WHITE AND BARENTS SEAS

I.V. Miskevich<sup>1</sup>, A.M. Alabyan<sup>2</sup>, N.A. Demidenko<sup>3</sup>, V.B. Korobov<sup>4</sup>, E.D. Panchenko<sup>5</sup>

<sup>1,3,4</sup> Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

<sup>5</sup> Water Problems Institute of RAS, Laboratory of Hydrodynamics

<sup>1</sup> Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: subarct@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: andrei\_alabyan@mail.ru

<sup>3</sup> Scientific Researcher; e-mail: demidenko\_nikola@mail.ru

<sup>4</sup> Leading Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: szoioran@mail.ru

<sup>5</sup> Junior Scientific Researcher; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

The formation of increased turbidity zones in tidal estuaries is an important factor influencing their hydrochemical, hydrobiological and hydroecological regimes. The authors solved the problem of identifying regularities for processes in the estuarine areas of small rivers flowing into the tidal sea and analyzed the features caused by morphological patterns and the tide magnitude. Expeditionary studies of 2015–2019 in the estuarine areas of the Kyanda, Tamitsa, Syomzha, Pyia and Chyosha rivers exposed that higher turbidity, or concentration of suspended sediments, comparing with adjacent riverine and marine water masses, is characteristic of the areas of reversing tidal currents. The sediment concentration was determined using the gravimetric method by filtering samples taken synchronously with recording the flow parameters. A wide range of turbidity fluctuations occurs depending on the tidal cycle phase, the fresh and salt water mixing, the geological and geomorphologic structure of the seashore and river channel pattern, as well as the weather conditions. The highest maximum turbidity is during the open channel season in macro-tidal estuaries, for example, 4,32 kg/m<sup>3</sup> in the Chyosha River estuary and 2,66 kg/m<sup>3</sup> in the Syomzha River estuary. The maximum turbidity in the Kyandy and Tamitsa rivers meso-tidal estuaries is lower by an order. Regular changes in turbidity have been traced during the tidal cycle, when the maximums of flood flow velocity and turbidity occur almost simultaneously. Increased turbidity could be facilitated by wind waves on the seashore, which entrains bottom sediments into motion, as well as by intense rainfall over the extensive tidal floodplains before their inundation. During the ice cover season synoptic factors become less important, although the tidal ice hummocking and ice contact with the bottom sediments could result in episodically higher local turbidity. As a rule, the minimum turbidity has

been noted just before the beginning of the flood when fresh river water runs off. Vertical turbidity stratification in small estuaries during flood and ebb currents is practically non-existent due to intense turbulent mixing; however, under high slack water during the periods of current direction change it could appear in river pools where suspended particles settle.

**Keywords:** estuarine areas of small rivers, Kyanda, Tamitsa, Syomzha, Pyia, Chyosha, sediment load, tidal cycle

**Acknowledgements.** Investigations of the North-West Branch of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences were carried out within the state theme 0128-2021-0006 “Modern and ancient bottom sediments and suspended matter of the World Ocean as a geological chronicle of climate and environment change: scattered and bottom sediments of the Russian seas and Atlantic, Pacific and Arctic oceans – lithological, geochemical and micropaleontological research; studying pollution, paleoenvironments and processes within marginal river filters”. The MSU studies were financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 18-05-60021 “River flow and changes of water and ice-thermal regime in the mouth areas and Arctic coasts of Russia during the 21<sup>st</sup> century” and 19-35-90032 Hydrodynamic features of reverse water flows in tidal estuaries of small rivers of the White Sea basin”).

## REFERENCES

- Alabyan A.M., Alekseeva A.A., Demidenko N.A. et al. [Field hydrological studies of river mouths of the Onega Bay during winter and summer low-water periods 2016–2017], *Geologiya morei i okeanov: materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii* [Geology of seas and oceans: proc. of the XXII International Scientific conference (School) on marine geology (Moscow, P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, 20–24 November 2017)], Moscow, IO RAS Publ., 2017, vol. 3, p. 146–150. (In Russian)
- Alabyan A.M., Panchenko E.D., Alekseeva A.A. Osobennosti dinamiki vod v prilivnykh ust'yakh mal'nykh rek basseina Belogo morya [Hydrodynamic features of small tidal estuaries of the White Sea basin], *Vestn. Mosk. unta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 4, p. 39–48. (In Russian)
- Allen G.P., Salomon J.C., Bassoulet P. et al. Effect of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries, *Sedimentary Geology*, 1980, vol. 26, p. 69–90.
- Allen G.P., Sauzay G., Castaing P. et al. Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France, *Estuarine Processes*, 1977, vol. II, New York, Wiley, p. 63–81.
- Demidenko N.A. [Formation of the maximum water turbidity in the macrotidal estuaries of the Mezen' and Kuloi rivers], *Geologiya morei i okeanov: materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii* [Geology of seas and oceans: proc. of the XXII International Scientific conference (School) on marine geology (Moscow, P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, 16–20 November 2009)], Moscow, GEOS Publ., 2009, vol. 4, p. 65–69. (In Russian)
- Dolotov Y.S., Filatov N.N., Rimsky-Korsakov N.A. et al. Manifestation of marine and riverine factors in the tide and ebb phases along the White Sea coasts of different configuration, *Oceanology*, 2011, vol. 51, p. 105–117, DOI: 10.1134/S0001437011010036.
- Dolotov Yu.S., Kovalenko V.N., Lifshits V.Kh. et al. On the dynamics of water and suspension in the Keret River estuary (Karelian coast of the White Sea), *Oceanology*, 2002, vol. 42, no. 5, p. 731–740.
- Dyer K.R. *Coastal and estuarine sediment dynamics*, Chichester, Wiley, 1986, 342 p.
- Gallenne B. Study of fine material in suspension in the estuary of the Loire and its dynamic grading, *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 1974, vol. 2, p. 261–272.
- Gibbs R.J. Suspended sediment transport and the turbidity maximum, *Estuaries, Geophysics and the Environment*, National Academy of Science, Washington, 1977, p. 104–109.
- Hoitink A.J.F., Jay D.A. Tidal river dynamics: Implication for deltas, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 240–272.
- Kirby R., Parker W.R. The distribution and behavior of fine sediment in the Severn Estuary and Inner Bristol Channel, *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 1983, vol. 40, p. 83–95.
- Korobov V.B. [Study of the regime of estuarine areas of the White Sea rivers], *Geologiya morei i okeanov: materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii* [Geology of seas and oceans: proc. of the XXII International Scientific conference (School) on marine geology (Moscow, P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, 16–20 November 2015)], Moscow, GEOS Publ., 2015, vol. 3, p. 199–202. (In Russian)
- Li X., Zhu J., Yuan R. et al. Sediment trapping in the Changjiang estuary: Observations in the north passage over a spring-neap tidal cycle, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2016, vol. 177, p. 8–19.
- Lisitsyn A.P. Marginal'nyi fil'tr okeanov [A marginal filter of the oceans], *Okeanologiya*, 1994, vol. 34, no. 5, p. 735–747. (In Russian)
- Lisitsyn A.P., Kravchishina M.D., Kopelevich O.V. et al. Spatial and temporal variability in suspended particulate matter concentration within the active layer of the White Sea, *Dokl. Earth Sc.*, 2013, vol. 453, no. 4, p. 1228–1233, DOI: 10.1134/S1028334X13120052.
- McDowell D.M., O'Connor B.A. *Hydraulic behaviour of estuaries*, 1977, New York, Wiley, 177 p.
- Mikhailov V.N. Principles of typification and zoning of river mouth areas (analytical review), *Water Resources*, 2004, vol. 31, p. 1–11, DOI: 10.1023/B:WARE.0000013566.36892.f0.
- Mikhailov V.N., Gorin S.L. New definitions, regionalization, and typification of river mouth areas and estuaries as their parts, *Water Resources*, 2012, vol. 39, no. 3, p. 247–260.
- Miskevich I.V., Alabyan A.M., Korobov V.B. et al. Short-term variability of hydrological and hydrochemical charac-

- ristics of the Kyanda estuary in Onega Bay, the White Sea (July 28 – August 15, 2016), *Oceanology*, 2018, vol. 58, p. 350–353, DOI: 10.1134/S000143701803013X.
- Miskevich I.V., Korobov V.B., Moseev D.S. Specificity of marginal filters formation in the tidal mouths of small rivers of the Arctic seas, *Oceanology*, 2021, vol. 61, p. 141–146, DOI: 10.31857/S0030157421010135.
- Miskevich I.V., Leschev A.V., Moseev D.S. et al. Hydrological and hydrochemical research of the mouths of the small rivers flowing to the White Sea in the winter low-water season of 2019, *Oceanology*, 2019, vol. 59, p. 992–994, DOI: 10.1134/S0001437019060122.
- Officer C.B. Discussion of the turbidity maximum in partially mixed estuaries, *Estuar. Coastal Mar. Sci.*, 1980, vol. 10, p. 239–246.
- Postma H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment, *Estuaries*, G.H. Lauff (ed.), Washington, American Association for the Advancement of Science, 1967, vol. 83, p. 158–179.
- Pritchard D.W. What is an estuary: physical viewpoint, *Estuaries*, G.H. Lauff (ed.), Washington, American Association for the Advancement of Science, 1967, vol. 83, p. 3–5.
- Savenije H.H.G. *Salinity and tides in alluvial estuaries*, Delft, Delft University of Technologies, 2012, 163 p.
- Sistema Belogo moray*, t. II, Vodnaya tolshcha i vzaimodeistvuyushchie s nei atmosfera, kriosfera, rechnoi stok i biosfera [System of the White Sea, vol. II, Water column and interacting atmosphere, cryosphere, river runoff and biosphere], A.P. Lisitsyn et al., Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2012, 782 p. (In Russian)
- Uncles R.J., Mitchell S.B. Turbidity in the Thames Estuary: How turbid do we expect it to be? *Hydrobiologia*, 2011, vol. 672, p. 91–103, DOI: 10.1007/s10750-011-0757-6.
- Wolanski E., Huan N.N., Dao L.T. et al. Fine-sediment dynamics in the Mekong River Estuary, Vietnam, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, vol. 43, p. 565–582.
- Yang Y., Li Y., Sun Z. et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River estuary: The trends and causes, *J. Geogr. Sci.*, 2014, vol. 24, p. 129–142.
- Zalagin B.S., Kosarev A.N. *Morya* [Seas], Moscow, Mysl' Publ., 1999, 400 p. (In Russian)

Received 27.02.2021

Revised 03.11.2021

Accepted 27.12.2021