

СОДЕРЖАНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В МАКРОПРИЛИВНЫХ ЭСТУАРИЯХ РЕК БЕЛОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

Мискевич И.В., Лещев А.В.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: szoioras@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 02.02.2021, одобрена к печати 29.03.2021.

Рассмотрены статистические характеристики содержания в воде взвешенных веществ в макроприливных эстуариях реки Кулой с боковым притоком реки Поча, реки Пыя (Белое море) и реки Чёша в Баренцевом море. Их максимальные величины на поверхностном горизонте устьевых вод за счёт взмучивания донных отложений приливными течениями могут достигать уровня 500–4000 мг/л и даже более. Характерный диапазон колебаний содержания взвеси в таких устьях составил для таёжных рек – 90–720 мг/л, для тундровых рек – 200–1830 мг/л. Более высокая мутность эстуарных вод тундровой зоны связана с деградацией её многолетнемерзлых грунтов на фоне наблюдаемого потепления климата. Связь содержания в воде взвешенных веществ с распределением солёности в устьях малых рек может заметно отличаться от условий, наблюдаемых в устьях средних и больших рек.

Ключевые слова: взвесь, эстуарий, макроприливные условия, Белое море, Баренцево море, межень, статистика, донные наносы, взмучивание, солёность

Введение

К макроприливному эстуариям относятся реки, на устьевых взморьях которых средняя сизигийная величина прилива превышает 2.8 м (Михайлов, 2004). Такие устья рек характерны для северной части Белого моря (Мезенского залива и Воронки), для побережья Кольского полуострова и Чёшской губы в Баренцевом море. Они до настоящего времени остаются малоизученными водными объектами, особенно на низменных территориях с наличием малых глубин для прохода морских судов в фазу отлива и обширных приливных осушек, покрытых вязкой няшей. Последняя, как правило, сильно ограничивает возможность организации прибрежных наблюдений. Кроме этого, очень сильные приливные течения, как показывает опыт Северо-Западного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СЗО ИО РАН), крайне затрудняют установку гидрологических самописцев в устьевом водотоке.

В научном и прикладном отношении наиболее актуальной проблемой для рассматриваемых устьев рек является достоверная оценка пространственно-временной изменчивости содержания взвешенных веществ в зоне смеше-

ния речных и морских вод. Согласно исследованиям ряда авторов (Демиденко, 2012; Демиденко и др., 2015) в устьях рек Кулоя и Мезени, впадающих в Мезенский залив Белого моря, значения содержания в воде взвеси могут достигать уровня 10000–13000 мг/л. В то же время в работах (Кравчишина и др., 2013; Гордеев и др., 2012) утверждается, что для прибрежной зоны Мезенского залива, включая его распресненные участки, если ориентироваться на спутниковые наблюдения, характерны значения содержания взвеси порядка 2–2.4 мг/л.

При такой аномально большой разнице в представленных цифрах и с учётом малоизученности геохимических процессов в макроприливных эстуариях, важной задачей становится оценка характерного диапазона изменчивости содержания в их водах взвешенных веществ.

Материалы и методы исследования

Для решения рассматриваемой проблемы привлекались результаты исследований СЗО ИО РАН, проведённых в эстуариях рек Чёша в Баренцевом море (Мискевич, Коробов, 2017; Мискевич и др., 2017), Пыя (Мискевич и др., 2019) и Кулой с притоком Поча (Мискевич и др., 2020) в Мезенском заливе Белого моря. Река Кулой с площадью водосбора 19000 км² относится к так называемым средним рекам, остальные исследованные водотоки – к малым рекам с площадью водосбора менее 2000 км².

Наблюдения проводились в летнюю межень по следующей схеме: разрез вдоль устьевого водотока в зоне действия приливов + суточная серия наблюдений на створе в центральной части эстуария. В устье реки Поча (левобережный приток в эстуарии Кулоя) выполнялся только разрез в полную воду приливного цикла на 5 станциях.

Пробы воды для определения содержания взвешенных веществ отбирались в чистые пластиковые бутылки ёмкостью 1.5 л для дальнейшей фильтрации. Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые (обработанные 4%-ной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой) ядерные фильтры. Предварительное взвешивание ядерных фильтров осуществлялось на электронных лабораторных весах «*Adventurer Pro*» model RV214 (производства фирмы «*OHAUS Europe*», Швейцария, свидетельство о поверке № АК-329, со специальным классом точности и ценой деления 0.1 мг). Ядерные фильтры (диаметр – 47 мм; диаметр пор – 0,45 мкм; изготовлены в Объединённом институте ядерных исследований, г. Дубна) помещались в прибор вакуумного фильтрования (ТУ 9471-002-00212038-00) с поликарбонатными фильтродержателями (фирмы «*Sartorius AG*», Германия). Фильтрация каждой пробы воды проводилась через 3 параллельных ядерных фильтра при помощи вакуумного мембранного насо-

са НВМ 2×2-К производства ЗАО «ВЛАДИСАРТ» г. Владимира, с предельным остаточным давлением 50 мм рт. ст. После окончания фильтрации пробы воды фильтры переключались в чистые пластиковые чашки Петри, диаметром 60 мм, высушивались при температуре 55–60°C и повторно взвешивались. Количество содержания взвеси в профильтрованном объёме воды определялось как среднее значение разностей между конечным и начальным весом каждого из трёх фильтров.

Помимо наблюдений за содержанием взвеси в воде вышеуказанных устьев рек также осуществлялись исследования других гидрологических и гидрохимических параметров. Для этой цели использовался многопараметрический анализатор жидкости *Multi 3420* фирмы *WTW* (Германия) и зонд-регистратор *SeaGuard RCM SW* фирмы *AANDERAA* (Норвегия).

Для статистической обработки результатов наблюдений использовались как стандартные параметры – среднее (среднеарифметическое) значение, среднеквадратичное (стандартное) отклонение и экстремальные величины, так и робастные (помехоустойчивые) статистики – медиана, трёхсреднее значение, квартили и интерквартильный размах. Трёхсреднее значение находится по выражению:

$$C_T = 0.25(C_{0.25} + 2C_M + C_{0.75}), \quad (1)$$

где $C_{0.25}$ и $C_{0.75}$ – квартили или, другими словами, медианы для половинок выборки. Интерквартильный размах определяется по формуле: $H = C_{0.75} - C_{0.25}$.

Для нормального распределения среднее значение, медиана и трёхсреднее значение совпадают друг с другом. Среднее значение имеет максимальную эффективность для нормального и гамма-распределения (Хампель и др., 1989; Микулинская и др., 1989). Но данный параметр, а также стандартное отклонение, быстро теряют свою эффективность для асимметричных распределений с «утяжелёнными хвостами» и для малых выборок с наличием даже одного выделяющегося значения. Для многих гидрологических и гидрохимических показателей законы статистического распределения могут быть сильно трансформированы, но наиболее характерной чертой для них является асимметричность и наличие «выбросных» точек. Специальные исследования показали, что для таких показателей при $n \leq 5$ лучше использовать медиану, а при $n \geq 5$ – трёхсреднее значение (Микулинская, Рожков, 1989). Результаты соответствующих расчётов представлены в таблице 1, сопутствующие им гидрологические параметры отражены в таблице 2.

Если ориентироваться на квартили как на границы ядра статистического распределения концентраций взвеси в исследуемой выборке данных, то интервал значений, заключённый между верхним квартилем (75% точкой) и нижним квартилем (25% точкой), в первом приближении, можно считать характерным диапазоном их изменчивости.

Обсуждение результатов

Как показывают данные в таблице 1, если не учитывать эстуарий р. Почы с очень малым числом наблюдений, статистические распределения содержания взвешенных веществ в макроприливных эстуариях не подчиняются нормальному (Гауссовому) закону. Они имеют «удлинённый хвост» в сторону максимальных («выбросных») значений. В подобной ситуации в качестве оценки центра распределения исследуемых данных рекомендуется использовать непараметрические показатели, в частности, трёхсреднее значение, т.к. среднеарифметическая величина начинает сильно зависеть от объёма используемых наблюдений. Эта статистика начинает сильно флуктуировать, и в отдельных случаях разница в средних значениях для разнообъёмных выборок наблюдений может достигать целого порядка.

Таблица 1. Статистическая характеристика содержания взвешенных веществ (мг/дм³) в поверхностных водах макроприливных эстуариев Белого и Баренцева морей

Статистики	Устья рек			
	Кулой	Поча	Пыя	Чёша
Среднее значение	494	257	174	1423
Стандартное отклонение	377	160	154	1501
Медиана	522	220	143	786
Трёхсреднее значение	484	230	141	902
Нижний квартиль (25 %)	171	194	90	203
Верхний квартиль (75 %)	724	287	186	1831
Интерквартильный размах	554	93	96	1629
Максимальное значение	1601	508	719	4472
Минимальное значение	17	74	44	59
Количество наблюдений	31	5	17	22

Таблица 2. Характеристика гидрологических условий в эстуариях, когда проводились наблюдения за содержанием взвешенных веществ

Параметры	Устья рек			
	Кулой	Поча	Пыя	Чёша
Величина прилива на морской границе эстуария, м	6.8	6.4	5.1	4.2
Диапазон изменчивости солёности, PSU	0.9–22.6	0.2–10.2	0.05–0.26	0.2–28.4

Примечание: в 2019 г. на водосборе р. Пыи наблюдался аномально высокий летний дождевой паводок.

Мутьевую пробку с максимальным содержанием взвеси в воде в макроприливной эстуарии формируют процессы взмучивания донных отложений, в первую очередь, сформированных на приливных осушках, покрытых илистыми и или-

сто-глинистыми отложениями. Здесь и далее речь пойдёт об устьях рек, расположенных на низменных территориях, т.к. на скалистых морских побережьях осушки в эстуариях могут не наблюдаться или получать очень слабое развитие.

Влияние скоростей устьевых приливных течений на размыв донных отложений и их взмучивание сравнительно хорошо изучено. Наиболее подробно этот процесс, в частности, рассмотрен в монографии (Мак-Доуэлл, О'Конор, 1983). Он, с учётом неоднородности дисперсности донных отложений, носит сложный нелинейный характер, при соблюдении общей тенденции к увеличению интенсивности взмучивания наносов при возрастании скорости течения (Yu и др., 2014; Etcheber и др., 2011; Vi, Toorman, 2015). Это, в частности, приводит к появлению приливной обергармоники с периодом 3–4 часа в короткопериодной изменчивости содержания взвеси, связанной с наличием локальных максимумов скоростей течений в фазы отлива и прилива (Мискевич и др., 2018). Кроме этого, при наличии малых глубин на устьевом взморье реки (менее 1–2 м), взмучивание донных отложений также вызывают ветровые волны даже небольшой высоты, из-за их трансформации при встрече с сильными приливными течениями противоположного направления (Коробов, Лавренов, 1989). В подобной ситуации происходит существенное изменение их параметров, в первую очередь, крутизны, что влечёт за собой возрастание вертикальной скорости воды, вовлечённой в движение по волновой орбите. При обрушении волн возникают сильные разрывные течения, скорости которых заметно усиливают «размывочный» гидродинамический эффект движения эстуарных вод.

При возрастании величины прилива, обычно влекущее за собой увеличение скоростей течений, наблюдается усиление мутности устьевых вод. В микроприливных устьях рек связь этих параметров носит квазилинейный характер. Тенденция к увеличению содержания в воде взвешенных веществ, при возрастании величины прилива в устьях рек, в целом имеет нелинейный характер. При этом резкое возрастание мутности вод наблюдается при смене микроприливных условий на мезоприливные, т.е. при сизигийной величине прилива более 1.6 м (Мискевич, 2019).

Тем не менее, вышеупомянутая закономерность, если проанализировать статистику из таблицы 1, может не соблюдаться. В эстуарии реки Чёши в Баренцевом море при более низкой величине прилива содержание взвешенных веществ на порядок превышает их содержание в устьях рек южной части Мезенского залива. Это можно связать с наблюдаемой за последнее время деградацией многолетнемерзлых грунтов тундровой зоны на фоне наблюдаемого в последние десятилетия потепления климата в западном секторе российской Арктики (Алексеев, 2015; Панин и др., 2017; Малинин, Вайновский, 2019). Данный процесс в летний сезон обеспечивает большое поступление с дождевыми и талыми водами в реки и эстуарии полуострова Канин частиц разрушаемого грунта. Это, в частности, привело к практически полному заполнению иловыми отложениями осолоняемого озера Мелкое в гидрографической сети реки Чёша, и его наибольшие глубины уменьшились до 0.3–0.5 м, хотя ещё 100 лет назад они могли достигать нескольких метров (Мискевич и др., 2017).

Реки южной части Мезенского залива располагаются в иной ландшафтной зоне, чем река Чёша. Водосбор реки Кулой преимущественно охвачен таёжной зоной, водосборы рек Поча и Пыя находятся на границе тайги и лесотундры. Здесь многолетнемёрзлые грунты отсутствуют и разрушение почвенно-растительного покрова не наблюдается, что влечёт за собой иной, чем в эстуарии р. Чёши, физико-химический состав отложений на приливных осушках, возможно, с преобладанием частиц с более высокой гидравлической крупностью.

В данной ситуации целесообразно дифференцировать статистические оценки устьев тундровых и таёжных рек. Таким образом, опираясь на данные таблицы 1, следует предположить, что характерный диапазон колебаний содержания взвеси в макроприливных эстуариях таёжных рек составляет 90–720 мг/л при трёхсредних величинах в 141–484 мг/л. Для тундровых рек соответствующие величины составят 200–1830 мг/л и 902 мг/л. Здесь необходимо напомнить, что при увеличении количества наблюдений среднее значение будет постепенно приближаться к трёхсреднему значению.

Вышеприведённые цифры носят ориентировочный характер, но в условиях, когда в макроприливной зоне смешения речных и морских вод содержания взвеси могут отличаться на 2–3 порядка и даже более, они, несомненно, имеют определённую научную и прикладную значимость. Также следует добавить, что аналогичный диапазон изменчивости мутности устьевых вод в микроприливной дельте р. Северной Двины составляет всего 7.1–22.4 мг/л (Мискевич, Лещев, 2018; Лещев, 2018).

Таблица 3. Содержание взвешенных веществ (мг/дм³) в эстуарии р. Кулой на створе 30 км выше его морской границы по данным серии полусуточных наблюдений с дискретностью 2 часа в зимнюю и летнюю межень

Номер серии	Горизонт	Даты наблюдений	
		19.03.2020 г.	22.08.2020 г.
I	0	447.6	521.7
	дно	38.6	498.1
II	0	219.7	563.5
	дно	54.8	625.3
III	0	107.2	453.6
	дно	8.0	696.4
IV	0	39.2	282.8
	дно	6.9	117.0
V	0	57.8	231.3
	дно	5.2	724.0
VI	0	92.4	858.9
	дно	6.5	807.7
VII	0	174.3	523.2
	дно	5.1	772.1

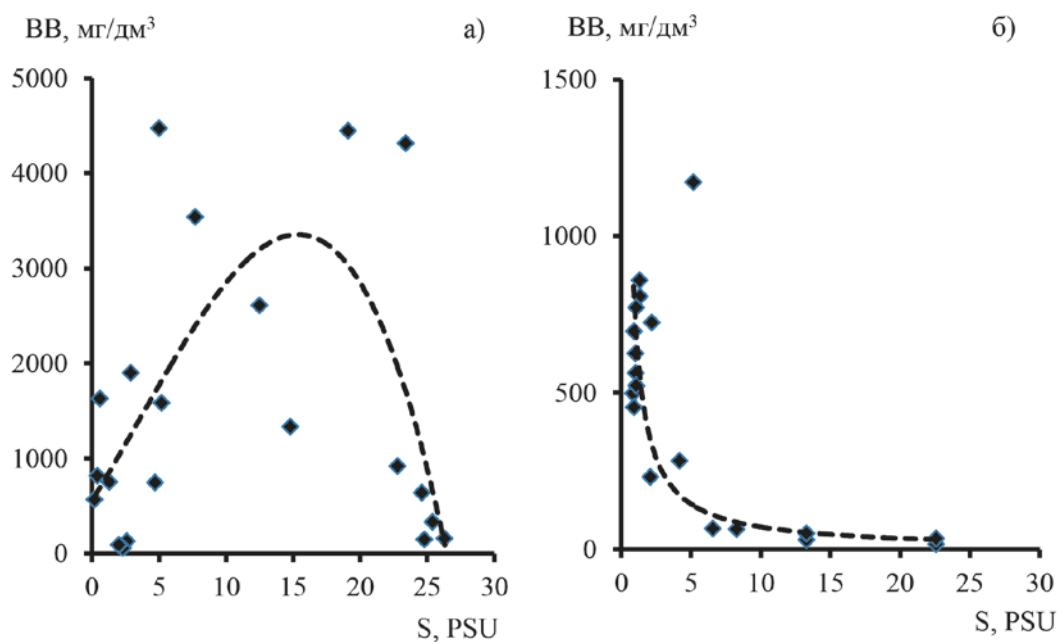


Рис. 1. Графики связи солёности с содержанием взвеси в эстуарии малой реки Чёша в июле 2017 г. (а) и эстуарии средней реки Кулой в августе 2020 г. (б)

Представленные результаты отражают только ситуацию, наблюдаемую в летне-осеннюю межень. Зимой в макроприливных эстуариях на участках с ледовым покровом мутность вод заметно уменьшается (табл. 3). Оценка пространственно-временной изменчивости содержания взвеси в данный сезон года требует дальнейших исследований. Кроме этого необходимо учитывать специфику функционирования маргинального фильтра в устьях рек различного размера. В эстуариях средних и больших рек его пространственное положение подчиняется классической модели академика Лисицына А.П. (Лисицын, 1982, 1994; Lisitzin, 1996; Иванов, 2005), в эстуариях малых рек мутьевая пробка может заполнять всю зону смешения речных и морских вод (рис. 1).

Имеющиеся результаты позволяют предположить, что содержание взвеси в воде менее 3 мг/л. Результаты получены расчётным путём с привлечением космоснимков для прибрежных районов Мезенского залива (Кравчишина и др., 2013; Гордеев и др., 2012), они справедливы для зон с глубинами более 10–15 м с наличием трудноразмываемых донных отложений и удалённых от морских границ устьев рек на дистанции, превышающие подвижки морских вод за 1 фазу отлива в сизигию (примерно 10 км).

Для ориентировочной оценки возможности появления anomalно высоких значений содержания взвеси (10000 мг/л и более) в поверхностных слоях устьевых вод можно воспользоваться следующим уравнением:

$$C = 50,056(D/V)^{-1,838} \quad (2)$$

в котором C – содержание взвеси в мг/дм³ на поверхностном горизонте на станции (вертикали), D – глубина станции в метрах, V – скорость придонного те-

чения на этой станции (Мискевич, 2018). Здесь параметр D/V может быть условно охарактеризован как период заполнения всей водной толщи на вертикали взвесью с количеством содержания C . Используя это выражение, получаем, что для появления значений содержания взвеси 10000 мг/дм^3 параметр D/V должен быть равен 0.059 секунды. Данное условие, в частности, может иметь место при глубине 0.12 м и скорости течения в 2 м/с. Это позволяет предположить, что аномально высокое содержание взвешенных веществ в воде ($10000\text{--}13000 \text{ мг/л}$), быстрее всего, отражают специфику их вертикального распределения в придонных (граничных) слоях макроприливных эстуариев на пике скоростей приливных течений. По крайней мере, графики по распределению взвеси в эстуарии р. Мезени, приведённые в работе (Демиденко, 2012) не противоречат данному предположению. Возникновение подобных ситуаций, например, не исключается в начале фазы сизигийного прилива при низких уровнях воды в зонах приливных осушек с мощными иловыми отложениями.

Выводы

Результаты проведённых исследований указывают на необходимость дальнейшего изучения пространственно-временной изменчивости содержания взвешенных веществ в зонах смешения речных и морских вод с наличием макроприливных условий в западном секторе российской Арктики. При этом следует дифференцированно подходить к изучению условий, наблюдаемых в эстуариях больших, средних и малых рек в различных ландшафтных зонах. В первую очередь необходимо изучить условия, при которых высокая мутность эстуарных вод меняется на высокую прозрачность морских прибрежных вод в различные сезоны года, что позволит более чётко понять механизм функционирования маргинального фильтра на подобных водных объектах.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы № 0149-2019-0007 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».

Литература

- Алексеев Г.В.* Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11–26.
- Гордеев В.В., Филиппов А.С., Шевченко В.П.* Микроэлементы в воде и взвеси открытой части Белого моря // *Система Белого моря. Том II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера*. Гл. 6.5. М.: Научный мир, 2012. С. 579–604.
- Демиденко Н.А.* Гидрологический режим Мезенского залива и эстуариев Мезени и Кулоя // *Система Белого моря. Том II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера*. Гл. 5.4. М.: Научный мир, 2012. С. 411–432.
- Демиденко Н.А., Зиновьев А.Т., Алабян А.М., Льюменс М.Х., Панченко Е.Н., Фингерт Е.А.* Исследование и моделирование параметров гидрологического режима и динамики взвешенных наносов в Мезенском заливе и эстуариях Мезени и Кулоя // *Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. III. М.: ГЕОС, 2015. С. 175–179.
- Иванов Г.И.* Маргинальный фильтр Приноземельского шельфа // *Теория и практика комплексных морских исследований в интересах экономики и безопасности российского Севера*. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 53–55.
- Коробов В.Б., Лавренев И.В.* Оценка влияния приливных течений на функции распределения высот ветровых волн // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 11. С. 73–80.
- Кравчишина М.Д., Лисицын А.П., Клювиткин А.А., Филиппов А.С., Новигатский А.Н., Политова Н.В., Дара О.М., Шевченко В.П.* Концентрация и вещественно-генетический состав взвеси Белого моря // *Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории*. Материалы VII Всероссийского литологического совещания (Новосибирск, 28–31 октября 2013 г.). Том II. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. Т. II. С. 97–101.
- Лецев А.В.* Влияние судоходного канала порта Архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смешения «река–море» устья реки Северной Двины // *Проблемы региональной экологии*. 2018. № 2. С. 17–21.
- Лисицын А.П.* Лавинная седиментация // *Лавинная седиментация в океане*. Ростов: Изд-во Ростовского университета, 1982. С. 3–59.
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Мак-Джуэлл Д.М., О'Конор Б.А.* Гидравлика приливных устьев рек. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
- Малинин В.Н., Вайновский П.А.* О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 53. С. 34–55.
- Микулинская С.М., Михайлов Н.Н., Рожков В.А., Шнаер И.С.* Метод анализа сезонной изменчивости неэквидистантных временных рядов гидролого-гидрохимических данных // *Режимообразующие факторы, информационная база и методы её анализа*. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 109–132.
- Микулинская С.М., Рожков В.А.* Обработка малых выборок // *Режимообразующие факторы, информационная база и методы её анализа*. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 167–176.
- Мискевич И.В.* Характеристика влияния приливов на мутность вод устьев рек Белого моря // *Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. III. Москва. 2019. С. 193–196.
- Мискевич И.В.* Экологические аспекты наличия аномально высоких концентраций взвешенных веществ в макроприливных устьях рек арктической зоны // *Арктика: экология и экономика*. 2018. № 3 (31). С. 23–30.

- Мискевич И.В., Алабян А.М., Коробов В.Б., Демиденко Н.А., Попрядухин А.А.* 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., Белоруков С.К., Мосеев Д.С., Яковлев А.Е., Лещев А.В.* Характеристика природных условий озера Мелкое в устьевой области реки Чёша в Баренцовом море (по следам экспедиции РГО 1902 года) // *Труды Архангельского центра Русского географического общества*. Вып. 5. Архангельск. 2017. С. 354–360.
- Мискевич И.В., Лещев А.В.* Статистическая характеристика содержания взвешенных веществ в водах дельты реки Северная Двина // *Естественные и технические науки*. № 8 (122). 2018. С. 102–108.
- Мискевич И.В., Лещев А.В., Яковлев А.Е., Белоруков С.К.* Гидролого-гидрохимическая характеристика устья реки Пыя в Мезенском заливе Белого моря в летний период // *Труды Архангельского центра Русского географического общества*. Вып. 7. Архангельск. 2019. С. 286–292.
- Мискевич И.В., Лещев А.В., Мосеев Д.С., Яковлев А.Е., Белоруков С.К.* Характеристика природных условий устья реки Кулой в Мезенском заливе Белого моря в меженные периоды // *Труды Архангельского центра Русского географического общества*. Вып. 8. Архангельск. 2020. С. 154–158.
- Мискевич И.В., Коробов В.Б.* Гидродинамические аспекты формирования высоких концентраций взвешенных веществ в мезоприливных и макроприливных устьях рек Белого и Баренцева морей // *Труды Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития»*. К 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Льва Николаевича Карлина. СПб.: Аграф, 2017. С. 344–347.
- Михайлов В.Н.* Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // *Водные ресурсы*. 2004. Т. 31. № 1. С. 5–14.
- Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю.* Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // *Арктика: экология и экономика*. № 2 (26). 2017. С. 35–52.
- Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В.* Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. М.: Мир, 1989. 512 с.
- Bi Q., Toorman E.A.* Mixed-sediment transport modelling in Scheldt estuary with a physics-based bottom friction law. *Ocean Dynamics*. 2015. Vol. 65. P. 555–587.
- Etcheber H., Schmidt S., Sottolichio A., Maneux E., Chabaux G., Escalier J.-M., Wennekes H., Derriennic H., Schmeltz M., Quemener L., Repecaud M., Woerther P., Castaing P.* Monitoring water quality in estuarine environments: lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15. P. 831–840.
- Lisitzin A.P.* Oceanic sedimentation: lithology and geochemistry. Washington. American Geophysical Union. 1996. 390 p.
- Yu Q., Wang Y., Gao J., Gao S., Flemming B.* Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidal estuary: The role of tidal pumping // *Journal of Geophysical Research: Ocean*. 2014. Vol. 119. No. 11. P. 7705–7724.

CONTENT OF SUSPENDED SUBSTANCES IN MACROPRIENT ESTUARIES OF THE WHITE AND BARENTS SEA RIVERS

Miskevich I.V., Leshchev A.V.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: szoioras@yandex.ru*

Submitted 02.02.2021, accepted 29.03.2021.

The statistical characteristics of the content of suspended matter in the macrotidal estuaries of the Kuloi River with a lateral tributary of the Pocha, the Pyya River (White Sea) and the Chesha River in the Barents Sea. Their maximum values in the surface layers of estuarine waters due to the roiling of bottom sediments by tidal currents can reach a level of 500–4000 mg/l and even more. The typical range of fluctuations in the concentration of suspended matter in such river mouths will be 90–720 mg/l for taiga rivers and 200–1830 mg/l for tundra rivers. The higher turbidity of the estuarine waters of the tundra zone is associated with the degradation of its permafrost soils against the background of the observed climate warming. The relationship between suspended solids and salinity distribution at the mouths of small rivers may differ markedly from the conditions observed at the mouths of medium and large rivers.

Keywords: Suspended matter, estuary, macrotidal conditions, White Sea, Barents Sea, low water, statistics, bottom sediments, roiling, salinity

Acknowledgment: The work was carried out within the framework of the topic No. 0149-2019-0007 of the state task "Modern and ancient bottom sediments and suspended matter of the World Ocean – a geological record of environmental and climate changes: scattered sediment and bottom sediments of the seas of Russia, the Atlantic, Pacific and Arctic oceans-lithological, geochemical and micropaleontological studies; study of pollution, paleoobstanings and processes in marginal filters of rivers".

References

- Alekseev, G.V., 2015: Development and amplification of global warming in the Arctic. *Fundamental and Applied Climatology*, **1**, 11–26.
- Bi, Q. and E.A. Toorman, 2015: Mixed-sediment transport modelling in Scheldt estuary with a physics-based bottom friction law. *Ocean Dynamics*, **65**, 555–587.
- Demidenko, N.A., 2012: Hydrological regime of the Mezen Bay and the Mezen and Kuloi estuaries. *System of the White Sea. The water column and the atmosphere interacting with it, the cryosphere, river runoff and the biosphere*, Moscow, Scientific world, **II**(5.4), 411–432.
- Demidenko, N.A., A.T. Zinoviev, A.M. Alabyan, M.H. Lumens, E.N. Panchenko, and E.A. Fingert, 2015: Research and modeling of parameters of hydrological regime and dynamics of suspended sediments in the Mezen Bay and estuaries of Mezen and Kuloi. *Geology of seas and oceans: Materials of the XXI International Scientific Conference (School) on Marine Geology*, Moscow, GEOS, **III**, 175–179.

- Etcheber, H., S. Schmidt, A. Sottolichio, E. Maneux, G. Chabaux, J.-M. Escalier, H. Wennekes, H. Derriennic, M. Schmeltz, L. Quemener, M. Repecaud, P. Woerther, and P. Castaing, 2011: Monitoring water quality in estuarine environments: lessons from the MAGEST monitoring program in the Gironde fluvial-estuarine system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 831–840.
- Gordeev, V.V., A.S. Filippov, and V.P. Shevchenko, 2012: Trace elements in water and suspended matter in the open part of the White Sea. *System of the White Sea. The water column and the atmosphere interacting with it, the cryosphere, river runoff and the biosphere*, Moscow, Scientific world, II(6.5), 579–604.
- Hampel, F., E. Ronchetti, P. Rousseeuw, and W. Stahel, 1986: *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions*, Wiley, New York.
- Ivanov, G.I., 2005: Marginal filter of the Prinovozemelskiy shelf. *Theory and Practice of integrated marine research in the Interests of the Economy and security of the Russian North*, Apatity, KNC RAN, 53–55.
- Korobov, V.B. and I.V. Lavrenov, 1989: Assessment of the influence of tidal currents on the distribution functions of the heights of wind waves. *Meteorology and Hydrology*, 11, 73–80.
- Kravchishina, M.D., A.P. Lisitsyn, A.A. Klyuvitkin, A.S. Filippov, A.N. Novigatsky, N.V. Politova, O.M. Dara, and V.P. Shevchenko, 2013: Concentration and material-genetic composition of suspended matter in the White Sea. *Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history. Materials of the VII All-Russian Lithological Meeting (Novosibirsk, October 28–31, 2013)*, Novosibirsk, INGG SO RAN, II, 97–101.
- Leshchev, A.V., 2018: The impact of the ship canal of the port of Arkhangelsk on the suspended matter transfer in the mixing zone "river-sea" of the estuary of the Northern Dvina river. *Regional Environmental Issues*, 2, 17–21.
- Lisitsyn, A.P., 1982: Avalanche sedimentation. *Avalanche sedimentation in ocean*, Rostov, Rostov University, 3–59.
- Lisitsyn, A.P., 1994: Oceans marginal filter. *Oceanology*, 34(5), 735–747.
- Lisitzin, A.P., 1996: *Oceanic sedimentation: lithology and geochemistry*. Washington, American Geophysical Union, 390 p.
- McDowell, D.M. and B.A. O'Connor, 1983: *Hydraulics of tidal estuaries*. Moscow, Energoatomizdat, 312 p.
- Malinin, V.N. and P.A. Vainovsky, 2019: On the Causes of the first Warming of the Arctic in the 20th Century. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 53, 34–55.
- Mikulinskaya, S.M., N.N. Mikhailov, V.A. Rozhkov, and I.S. Shpaier, 1989: Method of analysis of seasonal variability of non-equidistant time series of hydrological and hydrochemical data. *Regime-forming factors, information base and methods of its analysis*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 109–132.
- Mikulinskaya, S.M. and V.A. Rozhkov, 1989: Small sample processing. *Regime-forming factors, information base and methods of its analysis*, Leningrad, Gidrometeoizdat, 167–176.
- Miskevich, I.V., 2019: Characteristics of the influence of tides on the turbidity of the waters of the mouths of the rivers of the White Sea. *Materials of the XXIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology*, Moscow, III, 193–196.
- Miskevich, I.V., 2018: Environmental aspects of the presence of abnormally high concentrations of suspended solids in macrotidal river mouths in the Arctic zone. *Arctic: ecology and economics*, 3(31), 23–30.
- Miskevich, I.V., A.M. Alabyan, and V.B. Korobov et al., 2018: Studies of the short-term variability of the hydrological and hydrochemical characteristics of the mouth of the

- Kyanda River in the Onega Bay of the White Sea (July 28–August 15, 2016), *Oceanology*, **58**(3), 369–373.
- Miskevich, I.V., S.K. Belorukov, D.S. Moseev, A.E. Yakovlev, and A.V. Leshchev, 2017: Characteristics of the natural conditions of Lake Melkoe in the mouth area of the Cheesha River in the Barents Sea (following the expedition of the Russian Geographical Society in 1902). *Proceedings of the Arkhangelsk Center of the Russian Geographical Society*, Arkhangelsk, 5, 354–360.
- Miskevich, I.V. and A.V. Leshchev, 2018: Statistical characteristics of the content of suspended solids in the waters of the Northern Dvina river delta. *Natural and technical sciences*, **8**(122), 102–108.
- Miskevich, I.V., A.V. Leshchev, A.E. Yakovlev, and S.K. Belorukov, 2019: Hydrological and hydrochemical characteristics of the mouth of the Pyya river in the Mezen Bay of the White Sea in the summer. *Proceedings of the Arkhangelsk Center of the Russian Geographical Society*, Arkhangelsk, 7, 286–292.
- Miskevich, I.V., A.V. Leshchev, D.S. Moseev, A.E. Yakovlev, and S.K. Belorukov, 2020: Characteristics of natural conditions of the mouth of the Kuloi river in the Mezena bay of the White sea during low-water river periods. *Proceedings of the Arkhangelsk Center of the Russian Geographical Society*, Arkhangelsk, 8, 154–158.
- Miskevich, I.V. and V.B. Korobov, 2017: Hydrodynamic aspects of the formation of high concentrations of suspended solids in the meso-tidal and macro-tidal estuaries of the rivers of the White and Barents seas. *Proceedings of the All-Russian conference "Hydrometeorology and ecology: scientific and educational achievements and development prospects". On the occasion of the 70th birthday of the Honored Scientist, Doctor of Physics and Mathematics, Professor Lev Nikolaevich Karlin*, St. Petersburg, Agraf, 344–347.
- Mikhailov, V.N., 2004: Principles of typification and zoning of river estuarine regions (analytical review). *Water Resources*, 31(1), 5–14.
- Panin, G.N., N.A. Diansky, I.V. Solomonova, A.V. Gusev, and T.Y. Vyruchalkina, 2017: Assessment of Climatic Changes in the Arctic in the 21st Century based on the combined Forecast. *Arctic: Ecology and Economy*, **2**(26), 35–52.
- Yu, Q., Y. Wang, J. Gao, S. Gao, and B. Flemming, 2014: Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidel estuary: The role of tidal pumping. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, **119**(11), 7705–7724.