

ДК 551.46

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МАРГИНАЛЬНОГО ФИЛЬТРА В УСТЬЯХ РЕК С УСТОЙЧИВЫМ ГАЛОКЛИНОМ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД НА ПРИМЕРЕ ДЕЛЬТЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Мискевич И.В., Котова Е.И., Нецеветаева О.П.

*ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва,
e-mail: szoioras@yandex.ru*

В работе приведены результаты исследования особенностей формирования вертикальной структуры маргинального фильтра при наличии в устье реки галоклина. Исследование было проведено на примере дельты р. Северной Двины в Белом море, где наблюдаются микроприливные условия. Зимой при наличии ледового покрова и уменьшении величины прилива в дельтовых протоках в зоне смешения речных и морских вод появляется устойчивая вертикальная стратификация вод. Анализ связей содержания взвешенных веществ и значения различных гидрохимических показателей с распределением солености по глубине указывает на наличие на вертикали протяженностью около 8 м по крайней мере двух зон маргинального фильтра. Это гравитационная и коагуляционно-сорбционная ступени. В последней наблюдается нелинейность связей солености с величиной pH и содержанием минеральных солей азота и фосфора. Также зафиксировано возрастание содержания органического вещества, идентифицируемого по параметрам БПК и ХПК, по мере возрастания мутности устьевых вод. Сделан вывод о наличии в зимний период полосовой седиментации взвешенного вещества вдоль проток дельты р. Северной Двины на глубинах, приуроченных к слою скачка плотности устьевых вод.

Ключевые слова: маргинальный фильтр, галоклин, Северная Двина, дельта, соленость, взвесь, гидрохимия, седиментация

PECULIARITIES OF THE VERTICAL STRUCTURE OF A MARGINAL FILTER IN THE MOUTH OF RIVERS WITH A STABLE HALOCLINE IN WINTER ON THE EXAMPLE OF THE DELTA OF THE NORTHERN DVINA

Miskevich I.V., Kotova E.I., Netsvetaeva O.P.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow,
e-mail: szoioras@yandex.ru*

The paper presents the results of the study of the features of formation of the vertical structure of the marginal filter in the presence of a halocline at the mouth of the river. The study was carried out on the example of the delta of the Northern Dvina River in the White Sea, where microtidal conditions are observed. During winter conditions of ice cover and decrease of the tide value at the delta channels a steady vertical stratification of waters appears in the zone of river and sea water mixing. Analysis of relations of suspended matter concentration and values of various hydrochemical indicators with distribution of salinity by depth indicates the presence of at least two marginal filter zones in the vertical length of about 8 meters. These are the gravitational and coagulation-sorption stages. In the latter, there is a non-linear relationship of salinity with pH value and content of mineral salts of nitrogen and phosphorus. Increase in the content of organic matter identified by BOD and COD parameters with increasing turbidity of estuarine waters was also recorded. It is concluded that there is a strip sedimentation of suspended matter along the channels of the Northern Dvina River delta in winter at the depths confined to the density jump layer of estuarine waters.

Keywords: marginal filter, halocline, Northern Dvina, delta, salinity, suspension, hydrochemistry, sedimentation

Наблюдаемое в последние десятилетия климатическое потепление Арктики влечет за собой значительные изменения в процессах перераспределения вещества между морем и сушей. Эти процессы принято оценивать по модели устьевого маргинального фильтра, разработанной академиком А.П. Лисицыным [1]. Она предусматривает, что в зоне смешения речных и морских вод по мере увеличения солености образуются три последовательные зоны – мутьевая «пробка» (гравитационная ступень), геохимическая «пробка» (коагуляционно-сорбционная ступень) и биологическая «пробка». В первой из них отмечается

максимальная мутность устьевых вод и ее постепенное уменьшение, во второй зоне наиболее активно протекают геохимические процессы, и в третьей зоне наблюдается повышенная биопродуктивность морской среды. Например, в Белом море первой зоне соответствует интервал солености 0,5–5‰, второй зоне – 5–20‰ и третьей зоне – соленость более 20‰ [2].

В пространственном отношении традиционно принято считать маргинальный фильтр вытянутым по оси распространения речных вод на морскую акваторию в пределах смешения пресных и соленых вод.

Результаты полусуточной серии гидрологических наблюдений
на рейдовой станции в протоке Маймакса 24 марта 2021 г.

Номер серии	Время, часы	Глубина, м	Горизонт	Соленость, ‰
I	09:00	7,0	поверхность	2,0
			дно	12,4
II	11:00	7,2	поверхность	1,5
			дно	13,8
III	13:00	7,4	поверхность	1,3
			дно	16,0
IV	15:00	7,5	поверхность	1,3
			дно	16,1
V	17:00	7,3	поверхность	1,6
			дно	14,7
VI	19:00	7,1	поверхность	2,2
			дно	13,7
VII	21:00	6,9	поверхность	1,9
			дно	13,1

С этой точки зрения протяженность маргинального фильтра будет колебаться в интервале от нескольких километров до нескольких десятков километров, а в отдельных районах – до 100 и более километров, если принимать во внимание возможную дальность проникновения морских вод в устья рек [3].

В арктических районах при наличии продолжительной зимней межени (4–6 месяцев) в устьях рек может формироваться устойчивая стратификация вод, при которой разница между поверхностной и придонной соленостью может достигать 10–20% и даже более. Такой диапазон солености должен захватывать по крайней мере две последовательные зоны маргинального фильтра, но они размещаются на очень коротком пространственном отрезке – не более 10–15 м.

Подобная ситуация наблюдается даже в микроприливных устьях рек, если ледовый покров начинает заметно уменьшать величину прилива. Такой эффект, в частности, фиксируется и в дельте р. Северной Двины в Белом море. Например, в марте 2021 г. в протоке Маймакса около п. Ламоминки по данным полусуточной серии наблюдений на рейдовой станции [4] разница между поверхностным и придонным горизонтом (около 6,5 м) колебалась в диапазоне 10–15% (таблица).

Цель данной работы заключалась в исследовании вертикальной структуры маргинального фильтра в дельте р. Северной Двины.

Материалы и методы исследования

Для исследований вертикальной структуры маргинального фильтра в дельте р. Северной Двины в марте 2022 г. был проведен отбор проб воды в протоке Маймакса около п. Ламоминки на той же вертикали, на которой были проведены исследования в марте 2021 г.

В период работы проводились разовые измерения температуры воды, солености, кислорода и величины pH на горизонтах 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5 и 7,5 м на рейдовой станции с помощью многопараметрического анализатора жидкости *Multi 3420* фирмы *WTW* (Германия). Также были отобраны пробы воды для определения содержания взвешенного вещества, биогенных элементов, БПК₅ и ХПК.

Выделение взвеси проводилось методом мембранный ультрафильтрации под вакуумом через чистые (обработанные 4%-ной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой) ядерные фильтры (диаметр фильтра – 47 мм; диаметр пор – 0,45 мкм; изготовлены в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна)). Фильтрация каждой пробы воды проводилась через три параллельных ядерных фильтра при помощи прибора вакуумного фильтрования (ТУ 9471-002-00212038-00) с поликарбонатными фильтродержателями (*Sartorius AG*, Германия) и вакуумного мембранных насоса НВМ 2×2-К (ЗАО «ВЛАДИСАРТ», г. Владимир) с предельным остаточным давлением 50 мм рт. ст.

Количество содержания взвеси в профильтрованном объеме воды ($\text{мг}/\text{дм}^3$) определялось гравиметрическим методом как среднее значение разностей между конечным и начальным весом каждого из трех фильтров. Взвешивание ядерных фильтров осуществлялось на электронных лабораторных весах Adventurer Pro model RV214 (OHAUS Europe, Швейцария) со специальным классом точности и ценой деления 0,1 мг.

При определении биогенных элементов пробы воды предварительно фильтровались через ядерные фильтры диаметром 47 мм с диаметром пор 0,45 мкм. Колориметрическое определение массовой концентрации нитритной формы азота ($\text{мг}/\text{дм}^3$) проводилось по методу, основанному на образовании азокраски, при взаимодействии нитрита с сульфаниламидом и α -нафтилэтиленидамином солянокислым. Метод колориметрического определения массовой концентрации нитратной формы азота ($\text{мг}/\text{дм}^3$) основан на восстановлении нитратов до нитритов в кадмийевых колонках, причем в качестве восстановителя применялся металлический кадмий, а комплексующего агента – динатриевая соль ЭДТА (трилон Б). При определении массовой концентрации фосфатного фосфора ($\text{мг}/\text{дм}^3$) использовался модифицированный метод Морфи – Райли. Концентрации биогенных элементов измерялись на спектрофотометре модели DR3900 (HACH-LANGE, Германия).

Для определения биохимического потребления кислорода использовался стандартный скляночный метод. Значение БПК₅ определялось как величина разности содержания растворенного кислорода в исходной (контрольной) пробе и в пробе после пятисуточной инкубации. Определение ХПК в нефильтрованных пробах воды осуществлялось по ГОСТ 31859-2012 на спектрофотометре модели DR3900 (HACH-LANGE, Германия). Градуировка анализатора проводилась в диапазоне 10–160 $\text{мг}/\text{дм}^3$.

Результаты исследования и их обсуждение

В период работ толщина льда на рейдовой станции составила 48 см. Приливные трещины были выражены очень слабо. По середине протоки Маймакса располагался поддерживаемый ледоколом судоходный ход с битым льдом.

Величина прилива в период наблюдений составила 0,7 м.

В изменениях температуры воды поверхностного слоя ($-0,1$ – $-0,3$ $^{\circ}\text{C}$) в течение суток прослеживался полусуточный приливной цикл. Ее минимумы хорошо совпадали с максимумами солености.

Соленость на участке проводимых исследований колебалась в диапазоне 5,1–15,0 %. На исследуемом участке, как и в марте прошлого года, наблюдалась двухслойная стратификация устьевых вод с наличием сильно распредненного верхнего слоя (соленость – 5,1–5,9 %) и осолоненного нижнего придонного слоя (соленость – 10,3–15,0 %).

Анализ связей распределения солености дельтовых вод по вертикали с содержанием взвешенных веществ и гидрохимическими показателями показал следующее.

Содержание взвешенных веществ на рейдовой станции по вертикали в период отбора проб воды колебалось в диапазоне 2,4–9,2 $\text{мг}/\text{дм}^3$. Их минимум фиксировался на горизонте 1,5 м, максимум – в придонном слое. Связь содержания взвешенных веществ с вертикальным распределением солености на исследуемом участке протоки Маймакса носила сложный характер (рис. 1) и не отвечала классической структуре маргинального фильтра, если ориентироваться на его распределение вдоль устьевой области р. Северной Двины. Такую ситуацию можно объяснить гидродинамической спецификой влияния ледового покрова на потоки устьевых вод в различные фазы приливного цикла. Она определяет интенсивность взмучивания донных отложений, которое способно формировать концентрации взвешенного вещества в дельтовых водах выше уровня, типичного для чисто речных вод. Тем не менее можно предположить наличие более интенсивной седиментации взвеси в поверхностном слое, ограниченном интервалом 1,5–3,5 м. Этот слой, с одной стороны, находится под влиянием ледового покрова и в зоне вертикального скачка плотности, которые заметно снижают скорости течений.

Данная ситуация должна приводить к формированию иловых отложений в виде прибрежных полос, вытянутых вдоль руслового потока на глубинах 1,5–3,5 м. На меньших глубинах формирование таких отложений зависит от характера контакта донного субстрата с ледовым покровом, который под действием приливов в прибрежной зоне протоки Маймакса периодически садится на грунт.

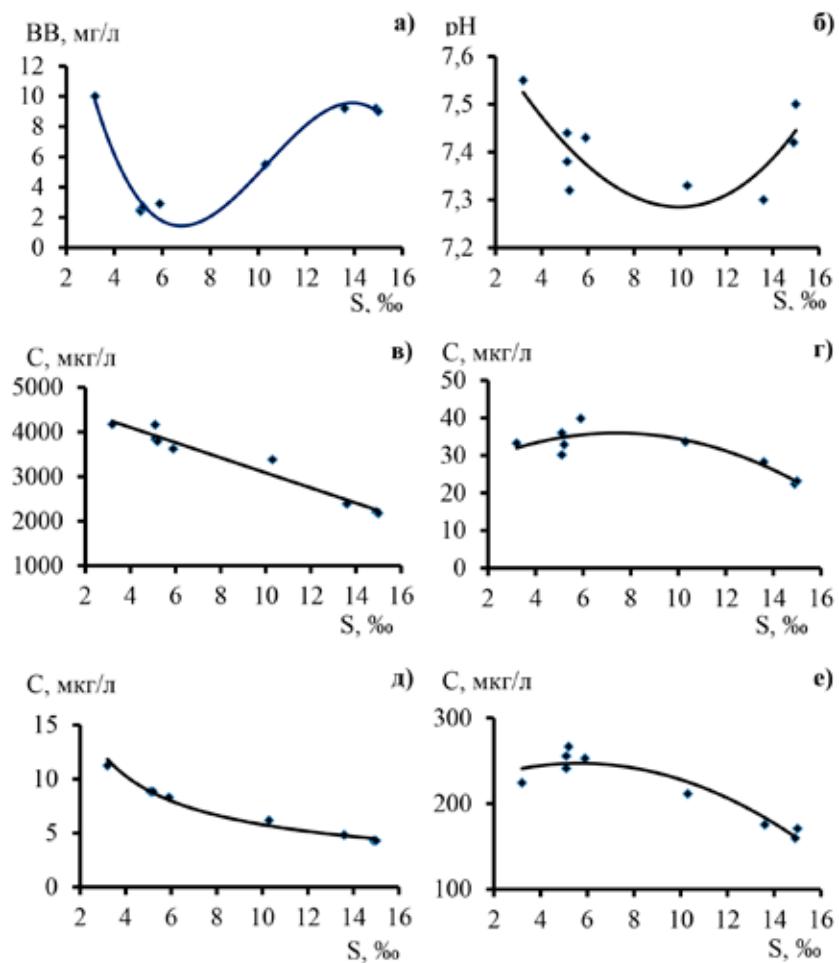


Рис. 1. Графики связи солености на вертикали в протоке Маймакс около п. Лапоминки 18.03.2022 г.:
 а) с концентрацией взвешенного вещества, б) с pH, в) с содержанием кремния,
 г) с содержанием фосфатного фосфора, д) с содержанием нитритного азота,
 е) с содержанием нитратного азота

Связь биогенных элементов, за исключением кремния, с вертикальным распределением солености носила нелинейный характер. Это в целом соответствует представлениям классической модели маргинального фильтра академика А.П. Лисицына в отношении диапазона коагуляционно-сорбционной ступени с соленостью 5–20 %. При этом нелинейность связей нитритов и нитратов с соленостью имела обратный характер (рис. 1), что указывает на наличие процессов нитрификации вод дельты р. Северной Двины даже при отрицательной температуре воды. Для фосфатного фосфора наблюдался процесс «выделения», по всей вероятности, связанный с гидрохимическими процессами.

Связь вертикального распределения солености с параметрами БПК₅ и ХПК в целом имела линейный характер, указы-

вая на возрастание содержания органики с увеличением степени осолонения устьевых вод, что приходит в противоречие с базовым взглядом на обмен органическим веществом между Северной Двиной и морем [5]. Анализ связи значений БПК₅ и ХПК с содержанием взвешенных веществ фиксирует наличие тенденции к повышению содержания органики по мере возрастания мутности дельтовых вод (рис. 2). Это может служить объяснением аномальной корреляции солености с параметрами БПК₅ и ХПК на первых двух ступенях маргинального фильтра устьевой области р. Северной Двины. Наблюданная ситуация, в свою очередь, влечет за собой формирование процессов обогащения органикой иловых отложений в зоне седиментации в виде прибрежных полос, вытянутых вдоль руслового потока на глубинах 1,5–3,5 м.

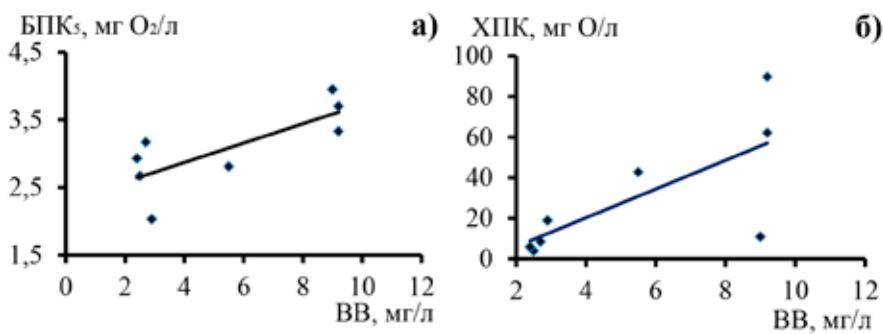


Рис. 2. Графики зависимости содержания взвеси с параметрами BPK_s (а) и $ХПК$ (б) на вертикали в протоке Маймакса около п. Лапоминки 18.03.2022 г.

Иловые отложения являются хорошим сорбентом для многих видов поллютантов, что может являться причиной значительного загрязнения мелкодисперсных донных отложений прибрежных зон дельтовых проток в зимний период. Здесь необходимо заметить, что в безледоставный период максимальное загрязнение донных отложений отмечается на устьевом взморье р. Северной Двины вне ее дельты [6]. Быстрее всего аккумуляция загрязняющих веществ в донных грунтах дельтовых проток носит сезонный характер, так как мощные весенние паводки должны смыть накопленные зимой иловые отложения в Двинский залив [7]. С другой стороны, на отдельных участках дельты за счет особенностей геоморфологии водотоков, где формируются локальные вихреобразные структуры с масштабом метры – десятки метров, способствующие консервации зимних иловых отложений, их высокий уровень загрязнения может наблюдаться более одного года.

Заключение

Таким образом, проведенные в дельте р. Северной Двины в зимнюю межень наблюдения показали, что структура маргинального фильтра, если ориентироваться на вертикальное и пространственное распределение солености, при наличии слоя скачка плотности может иметь заметные различия в содержании взвешенных веществ. В зимнюю межень в дельтовых протоках на глубинах расположения данного водного слоя может наблюдаться выпадение взвеси с формированием полос ила, обогащенных органическими веществами. Для содержания растворенных веществ соблю-

даются позиции, предусмотренные классической моделью маргинального фильтра.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания по теме «Современные и древние донные осадки и взвеси 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» № FMWE-2021-0006.

Список литературы

- Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Гордеев В.В., Филиппов А.С., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Покровский О.С., Шевченко В.П., Дара О.М. Особенности геохимии речного стока в Белое море // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012. С. 225–308.
- Mikhailova M.V. Processes of seawater intrusion into river mouths. Water Resources. 2013. Vol. 40. No. 5. P. 483–498. DOI: 10.1134/S0097807813050059.
- Мискевич И.В., Лещев А.В., Моеев Д.С. Биогеохимические характеристики экосистемы дельты реки Северная Двина в зимний период // Естественные и технические науки. 2021. № 7 (158). С. 144–148.
- Бреховских В.Ф., Брезгунов В.С., Волкова З.В., Пекральский В.М., Абрамов Н.Н., Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В. Процессы массопереноса в водных объектах. Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2019. 156 с.
- Котова Е.И., Коробов В.Б., Шевченко В.П., Иглин С.М. Экологическая ситуация в устьевой области реки Северной Двины (Белое море) // Успехи современного естествознания. 2020. № 5. С. 121–129.
- Иглин С.М., Коробов В.Б. Пространственно-временные особенности заносимости канала Мудьюгских башен в морском порту Архангельск // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 48–58.