

УДК 556.54

СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ МАРГИНАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ В ПРИЛИВНЫХ УСТЬЯХ МАЛЫХ РЕК В ЗИМНИЙ ПЕРИОД НА ПРИМЕРЕ РЕКИ СОЛЗА В ДВИНСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ

Мискевич И.В., Лохов А.С., Чульцова А.Л.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: szoiran@mail.ru

Приведены результаты исследований микроприливного устья малой реки Солза в Двинском заливе Белого моря в конце зимней межени (в начале апреля 2021 г.). Данный водный объект представляет собой мало-рукавную дельту с мелководным взморьем, где глубины на малой воде приливного цикла не превышают 1 м. Было выполнено два разреза вдоль устьевого водотока на полной и малой воде приливного цикла на пяти станциях и полусуточные наблюдения на рейдовой станции. В состав наблюдений входили гидрологические (уровень, температура воды, соленость, мутность и течения) и гидрохимические (кислород, pH, биогенные вещества) параметры. Содержание взвешенных веществ помимо воды также определялось в кернах льда, толщина которых колебалась в интервале 0,4–0,6 м. Дальность осолонения вод устья р. Солза в зимнюю межень на полной воде приливного цикла составляет 2–3 км. Максимум солености в дельте реки достигал 10,7 ‰, минерализация речных вод составляла 110 мг/л. Содержание взвеси в устьевых водах было низким и колебалось в диапазоне 1,6–3,2 мг/л. Максимальная концентрация взвеси отмечалась на морской границе дельты реки. Содержание взвеси в кернах льда имело иной характер. Её концентрации во льду были значительно выше (до 10,7 мг/л), и их максимум был зафиксирован в вершине дельты реки. Для содержания минеральных солей в устье реки отмечалась нехарактерная для зон смешения речных и морских вод картина – их концентрации линейно возрастали по мере осолонения устьевых вод. Предположено, что в устьях рек с микроприливыми условиями и мелководным устьевым взморьем пространственная структура маргинального фильтра в зимний период заметно отличается от характеристик, наблюдаемых в другие сезоны года. Подчеркнуто, что при наличии льда различные зоны маргинального фильтра на таких водных объектах начинают практически концентрироваться на одном участке – на морской границе устьевого участка реки.

Ключевые слова: Белое море, устье реки, Солза, гидрология, гидрохимия, прилив, маргинальный фильтр

SPECIFICITY OF FORMATION OF MARGINAL FILTERS IN TIDAL MOUNTAINS OF SMALL RIVERS IN THE WINTER PERIOD THE EXAMPLE OF THE RIVER OF SOLZA IN THE DVINSKY GULF OF THE WHITE SEA

Miskevich I.V., Lokhov A.S., Chultsova A.L.

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: szoiran@mail.ru

The results of studies of the microtidal mouth of the small Solza River in the Dvina Bay of the White Sea at the end of the winter low-water period (early April 2021) are presented. This water body is a small-flowed delta with a shallow seashore, where the depths in low water of the tidal cycle do not exceed 1 meter. Two transects were made along the estuary watercourse in full and low tidal cycle water at 5 stations and semi-daily observations at the roadstead station. The observations included hydrological (level, water temperature, salinity, turbidity and currents) and hydrochemical (oxygen, pH, nutrients) parameters. The content of suspended solids in addition to water was also determined in ice cores, the thickness of which varied in the range of 0,4-0,6 meters. The range of salinization of the waters of the mouth of the river. Solza in winter low-water period full tidal cycle is 2-3 km. The maximum salinity in the river delta reached 10,7 ‰, the mineralization of river waters was 110 mg / l. The content of suspended matter in estuary waters was low and fluctuated in the range of 1,6-3,2 mg / l. The maximum concentration of suspended matter was noted at the sea border of the river delta. The content of suspended matter in ice cores had a different character. Its concentrations in ice were significantly higher (up to 10,7 mg / l), and their maximum was recorded at the top of the river delta. For the content of mineral salts in the mouth of the river, a picture was noted that was not typical for the zones of mixing of river and sea waters – their concentrations linearly increased as the estuarine waters became saline. It is assumed that the spatial structure of the marginal filter in the winter period differs markedly from the characteristics observed in other seasons of the river estuaries with microtidal conditions and shallow estuarine nearshore areas. It is emphasized that in the presence of ice, various stages of the marginal filter on such water bodies begin to practically concentrate in one area – on the sea border of the river mouth area.

Keywords: White Sea, river mouth, Solza, hydrology, hydrochemistry, tide, marginal filter

Согласно модели маргинального фильтра, разработанной академиком А.П. Лисицыным [1], в устьях рек геобиохимические процессы по мере возрастания солености формируют три последовательные зоны – мутьевую, химическую и биологическую «пробки». Однако данная модель была разработана на основе исследований характеристик устьев больших незамерзающих рек или в периоды отсутствия на них ледового

покрова. Как показали исследования Северо-Западного отделения Института океанологии РАН (СЗО ИО РАН) [2–4], пространственная структура маргинального фильтра в устьях малых рек приливных морей может заметно отличаться от картины, наблюдаемой в устьях больших рек. При этом наименее изученной остается ситуация с формированием такого фильтра в зимний период при наличии льда.

Таблица 1

Координаты станций наблюдений в устье р. Солзы в апреле 2021 г.

Номер станции	Расстояние от морской границы дельты реки, км	Координаты (градусы)	
		сев. широта	восточ. долгота
1с	0	64,546358	39,575725
2с	1	64,543463	39,562078
3с	2	64,537473	39,553158
4с	3	64,530793	39,543134
5с	4	64,521795	39,539461

В настоящей статье приведены результаты исследований устья малой реки Солза в Белом море зимой 2021 г., позволяющие сделать определенный вклад в решение данной проблемы.

Целью проведенных исследований было определение специфики формирования структуры маргинального фильтра в микроприливном устье реки с мелководным устьевым взморьем при наличии ледового покрова.

Материалы и методы исследования

Экспедиция в устье реки Солза проводилась в конце зимней межени 5–6 апреля 2021 г. Координаты станций, на которых были выполнены наблюдения, приведены в табл. 1.

В состав наблюдений входили:

- синхронные измерения температуры воды, солености (минерализации), кислорода, величины рН с помощью многопараметрического анализатора жидкости *Multi 3420* фирмы *WTW* (Германия), а также отбор проб воды для определения содержания взвеси и биогенных веществ на поверхностном горизонте на трех створах в малую воду и на пяти створах в полную воду приливного цикла;

- полусуточная серия наблюдений с дискретностью 0,5 ч с измерением уровня, температуры воды, солености, мутности, направления и скорости течений на придонном горизонте при использовании зонд-регистратора *SeaGuard RCM SW* фирмы *AANDERAA* (Норвегия), установленного на шесте на створе 2 км выше морской дельты реки (станция 3с);

- отбор проб ледяных кернов на пяти створах для определения содержания в них взвешенных веществ.

Пробы воды для определения взвешенных веществ отбирались в чистые пластиковые бутылки ёмкостью 1,5 л для даль-

нейшей фильтрации. Выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации под вакуумом через чистые обработанные 4%-ной соляной кислотой и тщательно промытые бидистиллированной водой ядерные фильтры диаметром 47 мм и диаметром пор 0,45 мкм. Их взвешивание осуществлялось на электронных лабораторных весах «*Adventurer Pro*» модели *RV214* фирмы «*OHAUS Europe*» (Швейцария). Количество содержания взвеси в профильтрованном объёме воды (мг/л) определялось как среднее значение разностей между конечным и начальным весом каждого из трёх фильтров.

При определении биогенных элементов пробы воды предварительно фильтровались через ядерные фильтры диаметром 47 мм с диаметром пор 0,45 мкм. Их концентрации измерялись на спектрофотометре модели *DR3900* фирмы «*HACH-LANGE*» (Германия). Для определения фосфатного фосфора применялся модифицированный метод Морфи – Райли. Анализ проб воды на содержание кремния (силикатов) проводился колориметрическим методом по голубому кремнево-молибденовому комплексу (метод Королёва). Определение концентрации нитритной формы азота осуществлялось по методу, основанному на взаимодействии нитрита с сульфаниламидом и α -нафтилэтилендиамином солянокислым. Метод определения концентраций нитратной формы азота использовал восстановление нитратов до нитритов в кадмиевых колонках, в качестве восстановителя применялся металлический кадмий, а комплексообразующего агента – трилон Б.

Результаты исследования и их обсуждение

Устье малой реки Солзы в геоморфологическом отношении разделяется на устьевое взморье, выходящее в Двинский залив,

небольшую малорукавную дельту протяженностью около 2 км и устьевой участок реки с малоизменяемой шириной русла водотока длиной в несколько километров. Здесь необходимо напомнить, что под малой рекой в соответствии с ГОСТ 19179-73 «Гидрология суши. Термины и определения» принято понимать «реку, бассейн которой располагается в одной географической зоне, и гидрологический режим ее под влиянием местных факторов может быть нехарактерен для рек этой зоны». Глубины здесь небольшие, и на малой воде приливного цикла они преимущественно не превышают 1 м. На этом водном объекте, как и в устье реки Северная Двина, тоже впадающей в вершину Двинского залива, наблюдаются микроприливные условия, когда средняя величина прилива в сизигию не превышает 1,6 м. Толщина льда на станциях наблюдений колебалась в интервале 0,4–0,6 м при минимальной величине на морской границе дельты. Здесь следует заметить, что какие-либо сведения в научной литературе об экосистеме устья р. Солзы отсутствуют.

Анализ полученных результатов (табл. 2–4) позволяет предположить следующее. Приливная волна зимой при заходе в дельту реки из-за её большой мелководности претерпевает большую трансформацию. Уже на створе 2 км выше её морской границы продолжительность фазы прилива становится крайне малой (менее 1 ч), а его величина составляет всего 0,1 м, тогда как табличное значение величины прилива на морской границе дельты достигало 0,9 м. При этом припай на устьевом взморье реки в Двинском заливе отсутствовал.

Спецификой осолонения вод устья р. Солзы в зимнюю межень является трансформация временной изменчивости солёности, обычно представленной квазисинусоидальной формой, в «импульс» с короткими фазами увеличения и уменьшения солёности устьевых вод. Дальность осолонения вод устья р. Солзы в зимнюю межень следует признать незначительной. Она на полной воде приливного цикла составляет 2–3 км. Содержание взвеси в устьевых водах было низким и колебалось в диапазоне 1,6–3,2 мг/л (табл. 2, 3).

Таблица 2

Результаты полусуточной серии гидрологических наблюдений на придонном горизонте на рейдовой станции 3с в устье р. Солзы 5 апреля 2021 г.

№	Дата	Время	H, м	t °C	Мутность, усл. ед.	S, ‰	V, см/с	V, °
1	05.04.2021	14:30	1,12	-0,02	0,127	0,021	9,3	356,1
2	05.04.2021	15:00	1,10	-0,02	0,127	0,021	10,7	3,7
3	05.04.2021	15:30	1,09	-0,02	0,122	0,021	9,6	2,3
4	05.04.2021	16:00	1,08	-0,02	0,118	0,021	10,8	358,0
5	05.04.2021	16:30	1,07	-0,02	0,118	0,022	8,4	356,7
6	05.04.2021	17:00	1,06	-0,02	0,117	0,022	9,9	351,3
7	05.04.2021	17:30	1,04	-0,03	0,115	0,023	10,0	7,3
8	05.04.2021	18:00	1,03	-0,03	0,115	0,022	8,8	351,8
9	05.04.2021	18:30	1,03	-0,04	0,115	0,025	10,2	354,9
10	05.04.2021	19:00	1,02	-0,04	0,125	0,024	8,4	3,3
11	05.04.2021	19:30	1,01	-0,05	0,119	0,026	8,1	357,5
12	05.04.2021	20:00	1,01	-0,05	0,113	0,023	7,4	341,5
13	05.04.2021	20:30	1,01	-0,05	0,116	0,024	7,9	355,8
14	05.04.2021	21:00	1,01	-0,05	0,117	0,023	9,5	359,2
15	05.04.2021	21:30	1,01	-0,05	0,118	0,026	7,7	354,2
16	05.04.2021	22:00	1,01	-0,05	0,114	0,025	2,9	32,0
17	05.04.2021	22:30	1,02	-0,05	0,111	0,026	1,7	325,3
18	05.04.2021	23:00	1,02	-0,05	0,119	0,03	7,5	210,3
19	05.04.2021	23:30	1,13	-0,07	0,121	0,333	4,4	211,5
20	06.04.2021	0:00	1,12	-0,11	0,128	0,021	5,0	200,4

Таблица 3

Результаты гидролого-гидрохимических наблюдений
на поверхностном горизонте вдоль устья р. Солзы 5 апреля 2021 г.

Показатель	Створы, км				
	0	1	2	3	4
<i>Малая вода (17–05)</i>					
Соленость, ‰	1,9	1,7	0,12	–	–
Взвесь, мг/л	2,8	2,1	2,0	–	–
Величина рН	7,50	7,40	7,21	–	–
Кислород, мг/л	12,66	12,87	13,53	–	–
Кислород, %	107,1	103,7	106,3	–	–
Кремний, мкг/л	1581	1561	1839	–	–
Фосфор фосфатный, мкг/л	7,6	6,4	6,1	–	–
Фосфор общий, мкг/л	21,7	19,1	18,0	–	–
Нитритный азот, мкг/л	3,2	2,5	2,9	–	–
Нитратный азот, мкг/л	53,0	58,0	41,7	–	–
<i>За 1 час до полной воды (23–14)</i>					
Соленость, ‰	10,7	9,3	0,18	0,11	0,11
Взвесь, мг/л	2,3	2,1	1,6	1,5	3,2
Величина рН	8,17	7,97	7,65	7,88	7,92
Кислород, мг/л	12,51	12,84	13,34	13,54	13,74
Кислород, %	95,3	98,1	108,3	108,6	104,
Кремний, мкг/л	2398	2101	1542	1928	1969
Фосфор фосфатный, мкг/л	12,5	11,6	6,4	6,4	5,5
Фосфор общий, мкг/л	20,0	21,4	26,5	24,2	20,8
Нитритный азот, мкг/л	2,9	2,4	3,2	3,4	3,1
Нитратный азот, мкг/л	186,1	157,2	30,2	38,9	39,9

Таблица 4

Характеристика содержания взвеси в кернах льда в устье р. Солзы в апреле 2021 г.

Параметр	Створы, км				
	0	1	2	3	4
Толщина льда, м	0,38	0,48	0,57	0,55	0,46
Концентрация взвеси, мг/л	4,7	7,2	10,8	1,6	1,3

Максимальная концентрация взвеси отмечалась на морской границе дельты реки, где наблюдается наибольшая величина прилива, способная вызвать взмучивание донных отложений. Однако содержание взвешенных веществ в кернах льда вдоль устьевого водотока имело иной характер. Во-первых, их концентрации во льду были значительно выше (до 10,7 мг/л), во-вторых, максимум его загрязненности взвесью отмечался не на морской границе дельты, а в её вершине (створ – 2 км выше морской

границы дельты). Такой максимум быстрее всего соответствует центру мутьевой пробки маргинального фильтра, которая формируется в период *конец осени – начало зимы*.

Обращает на себя внимание высокое содержание в устье р. Солзы кислорода. Перенасыщением вод этим газом здесь достигало 107–109%. Это, с одной стороны, обусловлено отсутствием припая на примыкающей к нему акватории Двинского залива, с другой стороны, наличием плотины и перекаатов выше по реке, обеспе-

чивающих хорошую аэрацию речных вод, а также наличием больших запасов питательных веществ для ранневесенней вегетации фитопланктона.

Для содержания минеральных солей в устье реки зафиксирована нехарактерная для зон смешения речных и морских вод картина – их концентрации возрастали по мере осолонения устьевых вод. В монографии В.В. Гордеева [5], в которой приведен наиболее полный обзор связей биогенных веществ с соленостью в устьях различных рек, подобные зависимости отсутствуют. Такие связи отсутствуют и в рядом расположенном устье р. Северной Двины [6]. Наиболее вероятной причиной аномального распределения фосфатов и нитратов в устье р. Солзы является их поступление из донных отложений на очень мелководном устьевом взморье реки за счет нарушения их целостности приливными течениями и приливными подвижками льда.

В свою очередь, обогащение солями фосфора и азота донных отложений устьевого взморья р. Солзы, очевидно, происходит в осенний период за счет дренажного стока с территории одноименной деревни, расположенной непосредственно в устье реки. Также не исключается вклад в процесс обогащения донных осадков биогенными солями сброса стоков Солзенского производственно-экспериментального лососевого завода, расположенного выше по реке.

Формирование заметных отличий структуры маргинального фильтра в устье р. Солзы от параметров, предусмотренных классической моделью академика А.П. Лисицына, можно связать с влиянием граничных условий на разделах *вода – берег*, *вода – дно* и *вода – лед* при наличии величины прилива, сопоставимой с глубиной устьевого водотока. Такое влияние охватывает всю водную толщу в зоне смешения речных и морских вод. В устьях больших и средних рек подобная картина, как правило, не наблюдается из-за наличия большой ширины устьевого водотока и значительных глубин.

В устьях малых рек вышеуказанные условия не позволяют маргинальному фильтру получать продольное развитие, при котором протяженность каждой из трех «пробок» фильтра достигает нескольких километров и даже нескольких десятков километров. В устьях малых рек тенденция к концентрации мутьевой, химической и биологической «пробок» на одном локальном участке водотока в зимний период формирует специфический

характер массопереноса вещества из реки в море, который в настоящее время практически изучен. С другой стороны, достоверная информация об этом процессе в зоне смешения речных и морских вод имеет большую практическую значимость, например, для выбора створа сброса сточных вод, и поэтому исследования в данном направлении должны получить дальнейшее развитие.

Заключение

Таким образом, можно предположить, что в устьях рек с микроприливными условиями и мелководным устьевым взморьем пространственная структура маргинального фильтра в зимний период заметно отличается от характеристик, наблюдаемых в другие сезоны года. При этом при наличии льда различные стадии маргинального фильтра начинают практически концентрироваться на одном участке – на границе устьевого участка реки и её устьевого взморья.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания по теме «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» № 0128-2021-0006.

Список литературы / References

1. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
2. Lisitsyn A.P. Oceans marginal filter // Okeanologiya. 1994. V. 34. No. 5. P. 735–747 (in Russian).
3. Хоменко Г.Д., Лещев А.В., Коробов В.Б. Особенности гидрологического режима устьевых областей малых рек Белого моря (по данным экспедиционных наблюдений 2010–2012 гг.) // Геология морей и океанов: материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М., 2013. С. 266–268.
4. Khomenko G.D., Leschev A.V., Korobov V.B. Peculiarities of the hydrological regime of the estuarine areas of small rivers of the White Sea (according to the data of expeditionary observations in 2010–2012) // Geologiya morey i okeanov: materialy XX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoy geologii. V. III. M., 2013. P. 266–268 (in Russian).
5. Коробов В.Б. Исследования режима устьевых областей рек Белого моря // Геология морей и океанов: материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М., 2015. С. 199–202.
6. Korobov V.B. Study of the regime of estuarine areas of the rivers of the White Sea // Geologiya morey i okeanov: materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoy geologii. V. III. M., 2015. P. 199–202 (in Russian).

4. Ружникова Н.Н., Мискевич И.В. Оценка роли малых рек в геохимических процессах Белого моря // Геология морей и океанов: материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М., 2019. С. 217–220.

Ruzhnikova N.N., Miskevich I.V. Assessment of the role of small rivers in the geochemical processes of the White Sea // Geologiya morey i okeanov: materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoy geologii. V. III. M., 2019. P. 217–220 (in Russian).

5. Гордеев В.В. Геохимия системы река – море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.

Gordeev V.V. Geochemistry of the river-sea system. M.: IP Matushkina I.I., 2012. 452 p. (in Russian).

6. Шевченко В.П., Филиппов А.С., Новигатский А.Н., Гордеев В.В., Горюнова Н.В., Демина Л.Л. Рассеянное осадочное вещество пресноводных и морских льдов // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Отв. ред. Лисицын А.П., ред. Немировская И.А. М.: Научный мир, 2012. С. 169–200.

Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatskiy A.N., Gordeev V.V., Goryunova N.V., Demina L.L. Dispersed sedimentary matter of freshwater and sea ice // Sistema Belogo morya. V. II. Vodnaya tolshcha i vzaimodeystvuyushchiye s ney atmosfera, kriosfera, rechnoy stok i biosfera / Otв. red. Lisitsyn A.P., red. Nemirovskaya I.A. M.: Nauchnyy mir, 2012. P. 169–200 (in Russian).