УДК 551.463.8

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕСИ В МАРГИНАЛЬНОМ ФИЛЬТРЕ
СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ В КОНЦЕ ЛЕТА****Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В.***Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва, e-mail: kochen.a@mail.ru*

В статье представлены результаты определения концентраций взвешенного вещества и органического углерода в его составе в зоне маргинального фильтра реки Северная Двина в конце лета. Основной целью исследования является получение детальных данных в зоне смешения морских и речных вод в разные годы и сезоны года. Пробы поверхностной воды были получены в трех рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в августе 2015, 2016 и 2017 гг. Данные показывают, что на разрезах происходит снижение концентрации взвеси в сторону моря. Так, было зафиксировано снижение концентраций взвеси с ростом солёности, однако зависимости концентраций взвеси от солёности в каждом случае имели свои особенности. Если в августе 2017 г. поведение взвешенного вещества в зоне смешения вод было вполне типичным для многих крупных рек и соответствовало модели МФ А.П. Лисицына, то в 2016 г. и особенно в 2015 г. характер зависимости указывал на то, что имеет место дополнительный подток взвешенного материала в эту зону. Вопрос о причинах такого подтока на сегодня остается открытым. Выполнены оценки потерь осадочного материала в зоне МФ, показывающие, что в открытую часть моря проникает порядка 50–60 % от общего количества взвеси в речном стоке. Примерно такие же потери испытывает взвешенный органический углерод. Эти данные могут представлять интерес для экологии зоны МФ и открытой части моря.

Ключевые слова: Северная Двина, маргинальный фильтр, взвешенное вещество, взвешенный органический углерод, потоки взвеси в море

**DISTRIBUTION OF SUSPENDED MATTER IN THE MARGINAL FILTER
OF THE NORTHERN DVINA AT THE END OF SUMMER****Kochenkova A.I., Novigatskiy A.N., Gordeev V.V.***Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: kochen.a@mail.ru*

The results of suspended particulate matter (SPM) concentrations and organic carbon content, in this matter in the river-sea mixing zone of the Northern Dvina (the marginal filter zone of the river) at the end of summer are presented. The main aim of this investigation is a collection of detailed data about the river-sea mixing zone activity in different years and seasons. The samples of surface water were obtained in the expedition of the research vessel «Academik Mstislav Keldysh» in August 2015, 2016 and 2017. The results show that SPM concentrations are decreasing with salinity, however, the dependencies from salinity in every cases had its own regularities. If in August 2017 the SPM behavior in the mixing zone was quite typical for many big rivers and according to the MF model by Lisitzin, then in 2016 and especially in 2015 the character of dependences pointed on an additional influx of SPM into this zone. Several possible reasons of such influx as of natural (transformation of dissolved Fe and OM into SPM, increased phytoplankton biomass, stirring of bottom depending works and so on). The assessments of SPM losses in the MF zone were done. They show that about 50–60 % of riverine SPM quantity may penetrate into the open part of the sea. The losses of suspended form of organic carbon are of the same order. These data may be interesting for the ecology of the MF zone and open part of the sea.

Keywords: Northern Dvina, marginal filter, suspended matter, suspended organic carbon, the fluxes of suspended matter in the sea

Многодисциплинарные исследования по программе «Система Белого моря» под руководством академика А.П. Лисицына проводятся в Институте океанологии им. П.П. Шишова РАН (ИО РАН) начиная с 2000 г. На примере Белого моря проведены системные четырехмерные исследования (три координаты и время) с применением нового источника информации, касающегося микро- и наночастиц во всех геосферах Земли – гидросфере (речном стоке), атмосфере (аэрозоли), криосфере (лед и снег), литосфере, биосфере, антропофере [1, 2]. Важнейшее место в исследованиях занимали работы по изучению взвешенного вещества в речных и морских водах. Особый интерес представляют

исследования в зонах смешения речных и морских вод – маргинальных фильтрах (МФ) по терминологии А.П. Лисицына [3]. Многолетние исследования показали, что маргинальные фильтры рек являются глобальными эффективными барьерами на пути речного осадочного материала с континента в море и океан, в этой зоне задерживается основная масса твёрдого и значительная масса растворённого материала [3–5]. В результате в открытую часть моря проникает далеко не весь речной материал, приносимый рекой к морской границе. Учёт объёмов задерживаемого зоной МФ осадочного вещества имеет важное для экологии моря значение при оценках реально поступающих в море веществ.

Рис. 1. Расположение станций отбора проб воды в маргинальном фильтре р. Северная Двина:
 ▲ – разрез от 26.08.2015 (АМК-63), ■ – разрез от 25.08.2016 (АМК-67),
 ● – разрез от 18.08.2017 (АМК-68)

Исследования взвешенного вещества (включая взвешенный органический углерод) в устьевой зоне крупнейшей реки бассейна Белого моря Северной Двины эпизодически проводились с конца 1960-х гг. [6–9]. Для получения детальных данных о сезонных и межгодовых вариациях количества, состава и особенностей геохимического поведения взвешенных частиц в стоке Северной Двины и зоне её МФ на базе Северо-Западного отделения ИО РАН весной 2015 г. была создана «Обсерватория – маргинальный фильтр Северной Двины». С мая 2015 г. по настоящее время в рамках этого проекта проводятся ежемесячные круглогодичные отборы проб воды и взвеси в нижнем течении реки и дважды в год (весной, сразу после схода льдов при

высокой воде, и в конце лета, при низкой воде) в зоне МФ.

В данной статье представлены данные о поведении взвеси в зоне МФ Северной Двины в конце летнего периода.

Материалы и методы исследования

Пробы взвеси были получены в рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» 26 августа 2015 г. (63-й рейс), 25 августа 2016 г. (67-й рейс) и 18 августа 2017 г. (68-й рейс) на разрезе река – море в Двинском заливе (рис. 1). Отбор проводился по ходу движения судна пластиковым ведром на капроновом фале в носовой части палубы.

После подъёма пробы на борт измеряли солёность портативным солемером HI 8734N (HANNA, Германия) и Cond 330i (WISSENSCHAFTLICH – TECHNISCHE WERKSTATTEN GmbH, Германия), после чего вода фильтровалась на фильтровальной установке Sartorius (Германия) через предварительно

взвешенные ядерные фильтры (диаметр пор 0,45 мкм) и стекловолоконистые фильтры GF/F (для определения взвешенного органического углерода – БОУ). После высушивания до постоянного веса при $t = +60-65^{\circ}\text{C}$ ядерные фильтры взвешивались на весах с точностью до 0,01 мг. Разница весов между фильтром с взвесью и его весом до фильтрации и объём профильтрованной воды использовались при подсчёте концентрации взвеси. Содержание БОУ определяли на анализаторе углерода АН-7529М.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в трех рейсах данные о концентрациях взвеси и БОУ в зоне смешения речных и морских вод (МФ Северной Двины) представлены в таблице и на рис. 2 и 3.

Хотя все три разреза были выполнены в одно и то же время года, между ними имеются определённые различия. Ближе к другим к «классическому» типу распределения взвеси в зонах МФ рек относится разрез 68-го рейса судна (рис. 2, в), когда происходит ускоренное снижение концентрации взвеси при низкой солёности с последующим более плавным уменьшением концентраций до точки нормальной для данного моря солёности [9]. По модели МФ [3] на начальном этапе смешения вод, когда заметно снижается скорость речных вод, происходит быстрое осаждение на дно более крупных и тяжёлых частиц взвеси. При дальнейшем увеличении солёности вод начинаются процессы флоккуляции, приводящие к переходу растворённых форм железа и растворённого органического углерода (главным образом их коллоидной формы) во взвешенное состояние. Ещё в 1976 г. английские морские геохимики Д. Бартон и П. Лисс [10] предложили простой способ определения потерь как растворённых элементов, так и взвеси и взвешенных форм элементов (при условии, что последние выражены в единицах мг/л). Способ заключается в том, что в случае «классического» типа зависимости концентрации от солёности проводится касательная к кривой зависимости в области высокой солёности до пересечения с осью концентраций. Точка пересечения даёт так называемую «эффективную» концентрацию (ту, которая была бы при консервативном поведении, т.е. при линейной зависимости).

Отношение $\frac{C_{\text{река}} - C_{\text{эфф.}}}{C_{\text{река}}} \cdot 100\% = G$ представляет собой количественное выражение потерь вещества или элемента в зоне МФ реки. Применение этого подхода к нашим результатам показывает, что в августе 2017 г. потери взвеси в зоне МФ Северной Двины составляли около 52% от объёма, принесённого рекой к границе реки и моря.

Концентрация взвеси и взвешенного органического углерода (БОУ), температура (Т) и солёность (S) поверхностного слоя воды в зоне МФ Северной Двины

№ п/п	Станция, проба	Т, °C	S, епс	Взвесь, мг/л	БОУ	
					мг/л	%
1	6301	14,2	0,5	4,14	0,34	8,28
2	6302	14,2	1,4	3,89	0,36	9,34
3	6303	14,0	2,9	4,0	0,42	10,60
4	6304	13,7	6,4	4,63	0,32	6,91
5	6305	13,6	8,7	3,45	0,24	7,09
6	6306	13,3	12,0	3,21	0,32	9,97
7	6307	13,2	14,5	2,27	0,12	5,46
8	6308	12,5	18,5	1,40	0,20	14,48
9	6309	13,0	21,0	1,13	0,12	10,96
10	6310	10,1	25,7	0,73	0,16	22,19
11	6701	19,1	0,1	4,95	0,63	12,77
12	6702	19,1	1,95	4,24	0,51	11,95
13	6703	18,4	5,0	3,85	0,55	14,20
14	6704	18,0	7,6	3,19	0,42	13,12
15	6705	17,5	9,3	2,37	0,41	17,10
16	6706	17,0	12,5	3,90	0,41	10,60
17	6707	16,2	14,6	3,95	0,46	11,61
18	6708	17,1	18,3	1,81	0,22	11,93
19	6709	17,1	19,7	1,01	0,16	15,90
20	6710	17,3	22,3	0,62	0,10	15,68
21	6801	12,6	24,5	0,64	0,14	21,59
22	6802	15,0	18,6	1,45	0,21	14,28
23	6803	14,5	21,1	1,0	0,12	12,13
24	6804	15,3	16,0	2,52	0,31	12,19
25	6805	15,8	10,5	3,48	0,30	8,51
26	6806	16,2	6,7	4,31	0,39	9,05
27	6807	16,6	3,8	5,80	0,55	9,46
28	6808	17,3	1,3	5,56	0,37	6,57
29	6809	17,9	0	8,80	0,50	5,67

Примечание. *Отбор проб в рейсах АМК-63 и АМК-67 проводился при выходе судна из порта в море, в АМК-68 – при входе из открытого моря в порт.

Картина зависимости концентрации взвеси от солёности в августе 2016 г. (рис. 2, б) похожа на ту, что имела место в 2017 г. Однако из общей зависимости выбиваются две точки с повышенной по сравнению с ожидаемой концентрацией взвеси примерно в 2 раза (пробы 6706 и 6707 с солёностью 12,5 и 14,6 епс). Повышенные концентрации означают, что в области вод с данной солёностью имел место какой-то дополнительный источник поставки взвеси. Возможные причины будут рассмотрены при обсуждении разреза 2015 г. Сейчас допустим, что эти две «аномальные» пробы

оказались ошибочными в результате, например, загрязнения их при отборе и фильтрации. В таком случае мы имеем право выполнить оценку потерь взвеси в зоне МФ ($G \approx 42\%$).

Заметно отличается разрез 2015 г. (рис. 2, а). Кривая зависимости в диапазоне

солёности от 2,9 до 18,5 епс проходит гораздо выше линии простого смешения вод, что указывает на существование дополнительного подтока взвеси. При этом выпадают из обычной зависимости уже 5 точек, что трудно связывать с ошибками методического характера.

а)

б)

в)

Рис. 2. Зависимость концентрации взвеси (мг/л) от солёности (епс):
(а) – разрез от 6.08.2015; (б) – разрез от 25.08.2016; (в) – разрез от 18.08.2017

Выполненные ранее в рамках программы «Система Белого моря» разрезы за период с 2001 по 2008 гг. с разных судов («Профессор Штокман», «Иван Петров», «Акванавт-2») показали, что из семи разрезов похожими на разрез 2015 г. оказались три: в октябре 2001 г., марте 2005 г., августе 2006 г. [9]. Обращает на себя внимание, что такие аномальные зависимости наблюдались в разные сезоны года – и в марте, и в августе, и в октябре. Были рассмотрены наиболее вероятные причины повышенных концентраций взвеси, как природные (переход во взвесь растворённого Fe и растворенный органический углерод (РОУ), возможная вспышка биомассы фитопланктона, взмучивание донных осадков течениями), так и антропогенные (залповые сбросы жидкостей с высокой мутностью, взмучивание донных осадков при дноуглубительных работах или ледоколами при вскрытии льдов зимой). Рассмотрение возможных причин наблюдаемых зависимостей показало, что на данном этапе ни один из упомянутых возможных источников не может быть принят без серьёзных оговорок [9]. Таким образом, оценки потерь взвеси в зоне МФ, по крайней мере по двум разрезам (2016 и 2017 гг.), показывают, что выбывает из транзита через эту зону порядка 40–50% от валового потока речной взвеси. Предыдущие оценки по семи экспедициям в 2001–2008 гг. показали, что потери в среднем за год составляют 23% [9]. Это в несколько раз меньше, чем в эстуариях крупных рек мира – 80–95% [4]. Более низкие потери в МФ Северной Двины связаны с особенностями водосборного бассейна Се-

верной Двины (слабое физическое выветривание, высокая заболоченность, низкая мутность реки, богатая растительность и др.).

Рассмотрим кратко поведение взвешенного органического углерода, имеющего наряду с РОУ важнейшее значение для экологии как зоны МФ, так и всего моря. Данные таблицы показывают, что при низкой концентрации взвеси – от 5–8 мг/л в речной воде до 0,6–0,8 мг/л в морской воде – концентрация ВОУ, выраженная в мг/л, колеблется в довольно узких пределах – от 0,1 до 0,6 мг/л. Содержание ВОУ, выраженное в % на сухую взвесь, при этом довольно высокое от 6–7% при почти нулевой солёности до 16–22% на морской кромке разрезов.

Зависимости ВОУ от солёности показаны на рис. 3. Выраженные в мг/л, концентрации ВОУ демонстрируют сходное с концентрацией взвеси поведение в зоне МФ для всех трёх разрезов, хотя разброс фигуративных точек на графиках заметно больше, чем у взвеси. Делать оценки потерь ВОУ по таким зависимостям достаточно сложно. Однако можно предположить, что потери ВОУ мало отличаются от потерь взвешенного материала, т.е. находятся в пределах 40–50% от валового содержания ВОУ в речной воде.

Совсем иная картина наблюдается для ВОУ, выраженного в % на сухую взвесь (рис. 4). Ясно видно, что с увеличением расстояния от берегов происходит обогащение взвеси органикой, причём в разной степени на разных разрезах. Выделяется разрез 2016 г., на котором диапазон колебаний ВОУ наименьший – от 10,6 до 17,1% (рис. 5).

Рис. 3. Зависимость концентрации ВОУ (в мг/л) от солёности (‰)

Рис. 4. Зависимость содержания БОУ (в %) от солёности (епс)

Рис. 5. Взаимосвязь между концентрацией взвеси и содержанием БОУ (%) на разрезах река – море (обозначение смотри рис. 1)

Возрастание содержаний $C_{\text{орг}}$ во взвеси с ростом солёности, особенно при >10 – 15 епс, объясняется тем, что активизируется биотическая часть МФ, когда создаются наиболее благоприятные условия для активного развития фитопланктона – повышенная прозрачность воды, достаточная инсоляция, высокая концентрация биогенных элементов. В результате резко возрастает биомасса фитопланктона и автохтонной взвешенной органики, обогащающей взвешенное вещество. Менее выраженный рост БОУ (в %) в августе 2016 г. связан, скорее всего, с менее благоприятными для фитопланктона условиями по сравнению с 2015 и 2017 гг.

Заключение

Представлены результаты изучения концентрации взвешенного вещества и ор-

ганического углерода в его составе на трёх разрезах река – море (в зоне МФ Северной Двины), выполненных с борта НИС «Академик Мстислав Келдыш» в конце лета 2015 г. (63-й рейс), 2016 г. (67-й рейс) и 2017 г. (68-й рейс). Данные показывают, что на разрезах происходит снижение концентрации взвеси в сторону моря, однако у каждого разреза имеются свои особенности. Если в 2017 г. наблюдалась обычная для МФ крупных рек картина – быстрое осаждение крупной взвеси на начальном этапе смешения вод с последующим более медленным монотонным снижением мутности вод, то в 2015 г. характер зависимости мутности от солёности указывал на существование дополнительных источников взвеси в диапазоне солёности примерно от 3 до 18 епс. Возможные причины обсуждаются, но окончательно не

установлены. Разрез 2016 г. занимает промежуточное положение между двумя другими. По имеющимся данным потери взвеси в зоне МФ близки к 40–50% от исходной речной концентрации. Концентрации органического углерода во взвеси (в мг/л) ведут себя в зоне МФ аналогично концентрации самой взвеси [4], тогда как обогащаемость взвеси органикой (в%) возрастает в сторону моря.

Авторы выражают благодарность академику А.П. Лисицыну за поддержку, В.П. Шевченко за ценные советы, экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за помощь при отборе проб. Исследования проведены при финансовой поддержке Отделения наук о Земле РАН (Программа IV.8.5, тема № 0149-2015-0060).

Список литературы

1. Лисицын А.П. Процессы в водосборе Белого моря: подготовка, транспортировка и отложение осадочного материала, потоки вещества, концепция «живого водосбора» // Система Белого моря. Т. 1. – М.: Научный мир, 2010. – С. 353–445.
2. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. 2. Физика, химия и биология океанов. Осадкообразование в океане, взаимодействие геосфер Земли. Л.И. Лобковский, Р.И. Нигматулин – ред. – М.: Научный мир, 2014. – С. 331–571.
3. Lisitsyn A.P. The marginal filter of the ocean // Oceanology. – 1995. – Vol. 34. № 5. – P. 671–681.
4. Гордеев В.В. Геохимия системы река – море. – М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. – 452 с.
5. Gordeev V.V., Lisitzin A.P. Geochemical interaction between the freshwater and marine hydrospheres // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55. – № 5–6. – P. 562–581.
6. Artemyev V.E., Romankevich E.A. Seasonal variations in the transport of organic matter in North Dvina estuary // SCOPE/UNEP Sonderband. – Heft 66. – Hamburg: University Hamburg, 1988. – P. 177–184.
7. Kravchishina M.D., Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatsky A.N., Dara O.M., Alekseeva T.N., Bobrov V.A. Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period // Oceanology. – 2010. – Vol. 50. – № 3. – P. 365–385.
8. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Filippov A.S., Lisitsyn A.P., Bobrov V.A., Bogunov A.Yu., Zavernina N.N., Zolotykh E.O., Isaeva A.B., Kokryatskaya N.M., Korobov V.B., Kravchishina M.D., Novigatsky A.N., Politova N.V. On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea region) // Doklady Earth Sciences. – 2010. – Vol. 430. – Part 2. – P. 228–234.
9. 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. 2. Водная толща и взаимодействующая с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. – М.: Научный мир, 2012. – С. 225–308.
10. Burton J.D., Liss P.S. Estuarine chemistry. – London: Academic Press, 1976. – 230 p.
1. Lisitsyn A.P. Processy v vodosbore Belogo morja: podgotovka, transportirovka i otlozhenie osadochnogo materiala, potoki veshchestva, koncepcija «zhivogo vodosbora» // Sistema Belogo morja. T. 1. M.: Nauchnyj mir, 2010. pp. 353–445.
2. Lisitsyn A.P. Sovremennye predstavlenija ob osadkoobrazovanii v okeanah i morjah. Okean kak prirodnyj samopisec vzaimodejstvija geosfer Zemli // Mirovoj okean. T. 2. Fizika, himija i biologija okeanov. Osadkoobrazovanie v okeane vzaimodejstvie geosfer Zemli. L.I. Lobkovskij, R.I. Nigmatulin red. M.: Nauchnyj mir, 2014. pp. 331–571.
3. Lisitsyn A.P. The marginal filter of the ocean // Oceanology. 1995. Vol. 34. no. 5. pp. 671–681.
4. Gordeev V.V. Geohimija sistemy reka-more. M.: I.P. Matushkina I.I., 2012. 452 p.
5. Gordeev V.V., Lisitzin A.P. Geochemical interaction between the freshwater and marine hydrospheres // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55. no. 5–6. pp. 562–581.
6. Artemyev V.E., Romankevich E.A. Seasonal variations in the transport of organic matter in North Dvina estuary // SCOPE/UNEP Sonderband. Heft 66. Hamburg: University Hamburg, 1988. pp. 177–184.
7. Kravchishina M.D., Shevchenko V.P., Filippov A.S., Novigatsky A.N., Dara O.M., Alekseeva T.N., Bobrov V.A. Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period // Oceanology. 2010. Vol. 50. no. 3. pp. 365–385.
8. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Filippov A.S., Lisitsyn A.P., Bobrov V.A., Bogunov A.Yu., Zavernina N.N., Zolotykh E.O., Isaeva A.B., Kokryatskaya N.M., Korobov V.B., Kravchishina M.D., Novigatsky A.N., Politova N.V. On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea region) // Doklady Earth Sciences. 2010. Vol. 430. Part 2. pp. 228–234.
9. Gordeev V.V., Filippov A.S., Kravchishina M.D., Novigatskij A.N., Pokrovskij O.S., Shevchenko V.P., Dara O.M. Osobennosti geohimii rechnogo stoka v Beloe more // Sistema Belogo morja. T. 2. Vodnaja tolshha i vzaimodejstvujushhaja s nej atmosfera, kriosfera, rechnoj stok i biosfera. M.: Nauchnyj mir, 2012. pp. 225–308.
10. Burton J.D., Liss P.S. Estuarine chemistry. London: Academic Press, 1976. 230 p.

References