ОКЕАНОЛОГИЯ, 2018, том 58, № 6, с. 933–947

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.465

ГЕОХИМИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В МАРГИНАЛЬНОМ ФИЛЬТРЕ РЕКИ ПРЕГОЛИ (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ)

© 2018 г. В. Н. Лукашин[1, *], В. А. Кречик[1], А. А. Клювиткин[1], Д. П. Стародымова[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: lukashin@ocean.ru

Поступила в редакцию 04.12.2017 г.

В статье рассматриваются результаты исследования маргинального фильтра (МФ) р. Преголи в разные сезоны. Выделяются все три этапа (гравитационный, коллоидно-сорбционный и биогенный) преобразования рассеянного осадочного вещества. Изучение химического состава взвеси на всех этапах маргинального фильтра показало изменение состава взвесеобразующих элементов, а также сильное обогащение взвеси рядом микроэлементов, что объясняется техногенным загрязнением. Матричный корреляционный анализ концентраций химических элементов показал прочные связи между элементами.

DOI: 10.1134/S0030157418060102

Одна из самых крупных рек Калининградской области Преголя впадает в Вислинский залив. Это река со снеговым весенним половодьем и паводочным режимом. Самые многоводные месяцы – март, апрель – по 17% от годового стока каждый месяц, самые маловодный период с июня по октябрь – по 4...5% в месяц. Осенний подъем уровня связан с обложными дождями, зимние паводки случаются во время оттепелей. Ледовые явления начинаются в декабре, ледостав – в январе. Весенний ледоход начинается в начале, а заканчивается в конце марта. Из-за преобладающих юго-западных ветров часты нагонные явления, направляющие воду залива в русло реки [8].

Речное взвешенное вещество изучалось с 70-х годов прошлого столетия, было установлено, что р. Преголя выносит в основном мелкоалевритовый, преимущественно литогенный материал [4, 5]. Процессы преобразования вещества при смешении речных и морских вод здесь практически не рассматривались.

Река Преголя соединяется с Гданьским заливом Балтийского моря Калининградским морским каналом. Сам канал является частью Вислинского залива, от которого отделен системой насыпных островов с мелководными проливами между ними. По гидрологическому режиму и другим показателям канал является продолжением реки, ее эстуарием [11], что обусловливает единство гидродинамических и гидрохимических процессов и изменчивость их характеристик. Нижнее течение реки, Калининградский морской канал, Балтийский пролив и прилегающая часть Балтийского моря представляют в совокупности маргинальный фильтр р. Преголи.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование маргинального фильтра этой реки проводилось нами в разные сезоны: в апреле, июле и ноябре 2015 г., а также в апреле 2016 г. Отбор проб воды проводился с маломерных судов по схеме, приведенной на рис. 1: от стоянки НИС “Витязь” (центральная часть г. Калининграда) до выхода в море – 0.5 мили за Балтийским проливом. Эта схема отбора проб, проведенного 23 апреля 2015 г., при работах в другие сезоны мы старались придерживаться данной схемы (табл. 1).

Точки отбора проб воды выбирались с учетом изменения солености, которая определялась в поверхностном слое с помощью портативного солемера EcoScan Salt 6. После этого выполнялось зондирование мультипараметрическим зондом Sea&Sun CTD90M, оснащенного датчиком кислорода DO41M18 фирмы OxyGuard International, а осенью 2015 и весной 2016 гг.– еще и датчиком мутности Seapoint Bulkhead. Помимо дополнительных сенсоров на устройстве установлен стандартный набор датчиков: электропроводность (SST 7-pole), температура (SST PT100) и давление (Keller PA7-50 Progress). Скорость опускания прибора составляла около 0.5 м/с при частоте регистрации данных 4 Гц. Такой метод дает возможность регистрации изменений параметров с высоким разрешением. Затем 10-литровым батометром HYDRO-BIOS отбирались пробы воды из поверхностного слоя. В апреле 2016 г. вода отби-

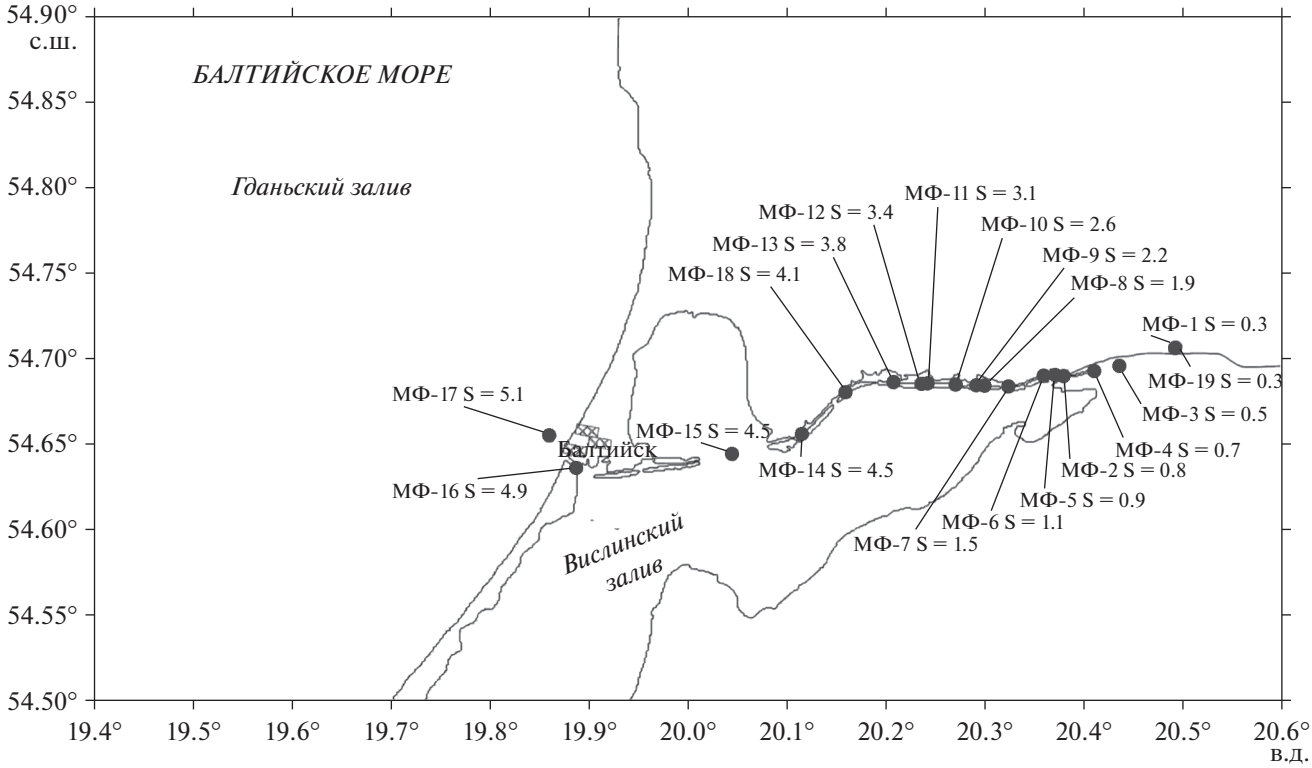

Рис. 1. Схема отбора поверхностных проб воды на маргинальном фильтре р. Преголи 22—23.04.2015 г. Для каждой пробы указана соленость.

ралась также из среднего и придонного горизонтов. Вода из батометра переливались в чистые специально подготовленные емкости для транспортировки проб в береговую лабораторию.

В лаборатории взвесь выделялась мембранной ультрафильтрацией воды под вакуумом 0.4 атм на фильтрационных воронках фирмы Millipore через ядерные фильтры с размером пор 0.45 мкм и диаметром 47 мм. Химический состав взвеси определялся под руководством В.В. Гордеева разными методами: спектрофотометрическим – Si, Al, P (точность 2–5%), кулонометрическим – $C_{орг}$ (точность 5–10%), атомно-абсорбционным и ICP MS методами (точность до 10%). Для контроля правильности анализов использовались международные стандарты СДО-1, СДО-3 (СССР), GSD-2, GSD-6 (КНР), BCR-414 (Канада). Аморфный кремнезем рассчитывался методом терригенной матрицы, за терригенную матрицу принимался состав глин и глинистых сланцев Русской платформы [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование распределения солености в поверхностных водах всегда показывало ее увеличение от низовья реки (место стоянки НИС “Витязь”) до выхода в море (рис. 2). Минимальные значения солености 0.27–0.30 psu наблюдались только весной (в апреле 2015 и 2016 гг.) в реке в начальных точках разреза. Это обусловлено весенним половодьем, когда поток воды особенно велик и пресная речная вода распространяется сравнительно далеко. В устье, при смешении в канале с водами Вислинского залива соленость увеличивается почти до 1 psu. Затем значения возрастают до величин, характерных для вод залива весной и становятся наиболее высокими в Балтийском проливе и в прибрежном районе моря.

В летнюю межень, в июле 2015 г., соленость в реке (в начальной точке – НИС “Витязь”) составляла 2.2 psu и увеличивалась к устью Преголи до 4.3 psu, солености, характерной для вод залива. В Балтийском проливе и в море соленость повышалась до 5.7–5.8 psu. В ноябре 2015 г. значения солености на всем разрезе были еще выше. Столь высокие значения солености в реке и в Калининградском морском канале обусловлены нагонными явлениями из-за преобладающих здесь юго-западных и западных ветров.

Результаты гидрофизического зондирования, представленные на рис. 3, показывают распределение значений солености водной толщи по всему району исследования. Здесь хорошо заметно поступление в канал морских вод, а в реку, соответственно, – вод канала, особенно в ноябре.

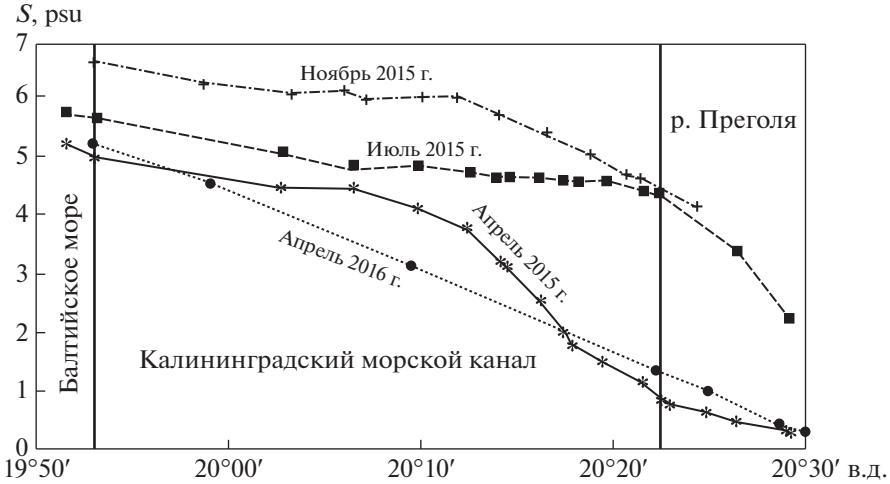

Рис. 2. Распределение солености в поверхностных водах в разные сезоны на разрезе река–море.

Смешение в канале разных по происхождению вод характеризуется наличием градиентных зон, распространяющихся в вертикальном и горизонтальном направлениях. Высокие градиенты солености образуются в зоне смешения морской воды с водами канала между станциями МФ-1 – МФ-3, а также в районе станций МФ-11 и МФ-12, где речная вода смешивается с водой канала.

В июле 2015 г. для распределения солености также характерно наличие высоких градиентов и в зоне смешения морской воды с водами канала, и особенно при смешении с ними речной воды.

В апреле 2016 г. высокие градиенты солености отмечены только в зоне смешения морских вод с водами канала, тогда как в устьевой части реки они отсутствовали. Это указывает на то, что распределение солености в системе море–канал–река в данный период зависит от весеннего речного стока (конец половодья), напор которого наклоняет изохалины вод в канале по всей его протяженности и в толще воды в сторону моря. И только в Балтийском проливе (ст. МФ-29) на глубинах более 3 м видно поступление в залив морских вод.

Полученные значения основных гидрологических характеристик (температуры и солености) позволяют выделить на термохалинной кривой четыре различных типа воды: вода р. Преголи; вода канала; вода устьевой части канала; вода прибрежной части моря. (рис. 4). В связи со сравнительной однородностью значений температуры, выделение проводилось в основном по изменению значений солености. Выбор критериев основывался также на результатах предыдущих работ на данном разрезе с учетом предшествующей исследованиям метеорологической обстановки. Воды, составляющие толщу маргинального фильтра р. Преголи, показаны на рис. 5.

Таким образом, маргинальный фильтр р. Преголи – сложная гидрологическая система, представленная водами реки, Вислинского залива и Гданьского бассейна. Калининградский морской канал является продолжением реки и выходит через Балтийский пролив в море. Смешение вод и их преобразование происходит непосредственно в канале.

Маргинальные фильтры рек являются зонами преобразования терригенного рассеянного осадочного вещества (взвеси), выносимого реками, в морское взвешенное осадочное вещество, проходя главным образом три этапа трансформации вещества [6]. Для маргинальных фильтров других рек бассейна Балтийского моря (р. Вента, Даугава, а также зоны смешения пресных вод Куршского залива с морскими водами) все три этапа преобразования речной взвеси присутствовали. Пресная вода смешивалась непосредственно с морской водой [7]. В случае с р. Преголей ее вода сначала смешивается с водой малосоленого залива с высокой первичной продукцией, который в современный период относится к эвтрофным водоемам [3], содержащим много биогенной взвеси.

Следует отметить, что на концентрации взвеси в канале влияет судоходство. При прохождении крупнотоннажных судов ее концентрации ненадолго (30–40 мин) могут значительно увеличиваться, что показали натурные наблюдения Чечко [10]. Поэтому измерения и отбор проб воды для фильтрации проводились с учетом этого фактора.

На рис. 6 представлены зависимости концентраций поверхностной взвеси от распределения солености. Невысокие концентрации взвеси соответствуют небольшим значениям солености в русле реки весной 4.12 мг/л при солености 0.3 psu в апреле 2015 г. и 5.6 мг/л при солености 0.27 psu в апреле 2016 г. Весной в обоих случаях концентра-

Таблица 1. Данные по отбору проб и значения солености, концентраций взвеси и взвесеобразующих химических элементов в маргинальном фильтре р. Преголи

Станция	Время	Горизонт, м	Координаты		Соленость, psu	Концентрации взвеси, мг/л	Si	Al	$C_{орг}$	P	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni
			с.ш.	в.д.											
22 апреля 2015 г.															
МФ-1	11:00	0	54°42.36′	20°29.53′	0.3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-2		0	54°41.39′	20°22.79′	0.8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-3		0	54°41.74′	20°26.16′	0.5	8.66	17.27	5.69	12.3	0.7	1.89	0.58	62	н.о.	45
МФ-4		0	54°41.56′	20°24.63′	0.7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-5		0	54°41.42′	20°22.26′	0.9	7.98	13.26	4.68	14.7	0.74	1.69	0.57	74	н.о.	69
МФ-6		0	54°41.38′	20°21.58′	1.1	7.80	18.35	5.07	10.4	0.69	1.49	0.56	54	н.о.	70
МФ-7		0	54°41.02′	20°19.44′	1.5	10.37	4.53	1.89	34.8	0.73	1.33	0.52	36	н.о.	34
МФ-8		0	54°41.06′	20°17.99′	1.8	9.07	5.76	2.85	32.5	0.64	0.97	0.45	32	н.о.	34
МФ-9		0	54°41.06′	20°17.50′	2.2	3.57	10.05	3.16	22.8	0.61	0.87	0.42	35	н.о.	45
МФ-10		0	54°41.08′	20°16.24′	2.6	3.51	11.04	3.53	20.9	0.61	0.84	0.41	28	н.о.	35
МФ-11		0	54°41.12′	20°14.55′	3.1	12.60	10.95	3.23	22.1	0.63	0.72	0.41	22	н.о.	32
МФ-12		0	54°41.11′	20°14.16′	3.4	9.39	12.32	3.88	19.6	0.56	0.71	0.38	30	н.о.	32
МФ-13		0	54°41.16′	20°12.49′	3.8	9.97	9.48	2.99	27.4	0.59	0.70	0.37	29	н.о.	54
МФ-14		0	54°39.35′	20°06.95′	4.5	7.98	10.28	3.23	23.5	0.7	0.48	0.23	23	н.о.	28
МФ-15		0	54°38.65′	20°02.73′	4.5	6.46	11.46	3.79	24.7	0.42	0.59	0.18	22	н.о.	35
МФ-16		0	54°38.17′	19°53.30′	4.9	11.75	11.84	3.66	22.7	0.47	0.57	0.17	23	н.о.	27
МФ-17		0	54°39.29′	19°51.66′	5.1	8.37	10.95	3.23	24.8	0.47	0.60	0.21	35	н.о.	39
МФ-18	18:30	0	54°40.82′	20°09.59′	4.1	6.80	10.43	3.25	27.5	0.52	0.63	0.36	23	н.о.	31
МФ-19	9:00	0	54°42.39′	20°29.56′	0.3	4.18	32.32	10.22	3.4	0.69	1.49	0.58	110	н.о.	26
14 июля 2015 г.															
МФ-3	18.36	0	54°41.74′	20°26.16′	3.4	7.31	6.32	2.2	42.7	0.64	4.31	1.19	48	н.о.	30
МФ-5	18.05	0	54°41.42′	20°22.26′	4.3	9.38	7.04	2.23	44.7	0.36	3.29	0.61	14	н.о.	20
МФ-6	17.58	0	54°41.38′	20°21.58′	4.3	13.8	7.04	1.96	51.7	0.62	2.66	0.55	14	н.о.	28
МФ-7	17.19	0	54°41.02′	20°19.44′	4.5	10.3	7.18	2.01	48.8	0.66	3.66	0.66	19	н.о.	24
МФ-8	17.06	0	54°41.06′	20°17.99′	4.5	8.85	8.62	2.48	44.6	0.65	3.47	0.61	17	н.о.	26
МФ-9	16.57	0	54°41.06′	20°17.50′	4.5	12.8	7.27	2.01	45.7	0.59	7.03	0.61	18	н.о.	32
МФ-10	16.36	0	54°41.08′	20°16.24′	4.6	7.77	10.38	2.99	42.7	0.61	4.36	0.64	18	н.о.	33
МФ-11	16.28	0	54°41.12′	20°14.55′	4.6	6.45	6.94	2.38	38.9	0.6	2.90	0.63	18	н.о.	38
МФ-12	16.19	0	54°41.11′	20°14.16′	4.6	11.4	4.55	1.88	42.0	0.65	3.01	0.53	18	н.о.	25
МФ-13	16.10	0	54°41.16′	20°12.49′	4.7	12.7	7.66	2.74	31.1	н.о.	3.66	0.63	19	н.о.	31
МФ-14	15.19	0	54°39.35′	20°06.95′	4.8	8.18	4.98	2.23	35.6	0.69	3.48	0.75	19	н.о.	30

Таблица 1. Продолжение

Станция	Время	Горизонт, м	Координаты		Соленость, psu	Концентрации взвеси, мг/л	Si	Al	$C_{орг}$	P	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni
			с.ш.	в.д.											
МФ-15	14.46	0	54°38.65′	20°02.73′	5.1	9.8	6.51	1.94	46.9	0.69	4.08	0.56	21	н.о.	27
МФ-16	13.48	0	54°38.17′	19°53.30′	5.7	7.88	5.74	1.79	43.8	0.66	3.31	0.56	17	н.о.	28
МФ-17	13.20	0	54°39.29′	19°51.66′	5.8	10.6	6.94	1.91	52.8	0.66	3.21	0.55	15	н.о.	25
МФ-18	15.44	0	54°40.82′	20°09.59′	4.8	11.1	5.94	1.87	52.9	0.69	3.11	0.66	17	н.о.	26
МФ-19	19.06	0	54°42.39′	20°29.56′	2.2	6.00	9.81	4.68	21.7	1.24	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
04 ноября 2015 г.															
МФ-1	11:54	0	54°38.17′	19°53.30′	6.8	4.9	14.93	5.96	9.4	0.54	3.6	0.64	170	760	63
МФ-2	11:14	0	54°38.23′	19°59.10′	6.1	21	14.46	3.34	16.6	1.03	3.7	0.71	270	880	54
МФ-3	10:45	0	54°38.51′	20°03.13′	6.0	15	13.45	4.79	24.3	1.53	3.2	0.61	165	650	42
МФ-4	9:48	0	54°41.03′	20°09.99′	6.0	15	9.38	3.01	23.1	0.42	4	0.38	160	580	60
МФ-5	10:23	0	54°39.13′	20°06.11′	6.0	14	9.72	3.23	35.3	0.67	3.3	0.71	200	460	52
МФ-6	10:16	0	54°39.35′	20°06.95′	6.1	10	10.1	4.01	20.5	0.59	2.4	0.56	150	350	86
МФ-7	9:35	0	54°41.23′	20°11.87′	6.0	19	18.33	4.66	13.2	0.74	4	0.59	170	700	115
МФ-8	9:20	0	54°41.13′	20°14.24′	5.7	30	18.33	4.66	13.2	0.63	3.8	0.83	н.о.	450	130
МФ-9	9:05	0	54°41.08′	20°16.40′	5.4	14	10.2	3.81	18.1	0.66	3.2	0.77	190	830	210
МФ-10	8:49	0	54°41.02′	20°18.70′	5.0	14	9.48	3.41	19.1	0.55	3.5	0.69	100	700	180
МФ-11	8:34	0	54°41.23′	20°20.91′	4.7	11	20.2	9.93	21.7	0.52	2.9	0.63	95	1200	100
МФ-12	7:48	0	54°41.39′	20°22.67′	4.6	9.5	5.79	5.01	22.6	0.54	3.4	0.19	170	1100	73
МФ-13	8:04	0	54°41.50′	20°24.24′	4.1	9.6	9.42	7.47	18.7	0.4	2.7	0.52	92	450	32
29 апреля 2016 г. *															
МФ-1	10:19	0	54°42.33′	20°30.45′	0.27	5.60	24.2	8.46	8.8	0.71	7.1	0.87	70	1100	110
		3				8.33	15.1	5.13	13.2	0.70	4.3	0.54	130	660	70
		6				5.48	13.8	4.53	12.8	0.73	3.8	0.54	70	1100	110
МФ-2	10:28	0	54°42.39′	20°29.56′	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-3	10:46	0	54°42.25′	20°28.63′	0.32	9.83	13.2	4.41	12.9	0.69	3.7	0.45	70	430	62
		3				10.67	12.9	5.13	10.3	0.67	4.3	0.54	70	230	30
		6				21.68	6.2	2.62	9.7	0.71	2.2	0.54	20	300	60
МФ-4	10:56	0	54°42.18′	20°27.35′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-5	11:06	0	54°41.67′	20°26.22′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-6	11:28	0	54°41.52′	20°24.82′	0.91	11.37	12.9	4.31	8.8	0.64	4.2	0.51	43	215	18
		4				16.95	12.9	5.48	13.3	0.61	4.6	0.53	125	280	17
		7.7				19.51	12.2	6.44	14.1	0.69	5.4	0.63	150	350	<10
МФ-7	11:37	0	54°41.38′	20°23.41′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.

Таблица 1. Окончание

Станция	Время	Горизонт, м	Координаты		Соленость, psu	Концентрации взвеси, мг/л	Si	Al	$C_{орг}$	P	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni
			с.ш.	в.д.											
МФ-8	11:57	0	54°41.38′	20°21.99′	1.33	10.27	15.3	4.77	13.6	0.61	4	0.52	70	290	<15
		3				15.13	11.6	4.17	13.2	0.64	3.5	0.6	26	170	44
		5				22.53	10.2	5.36	22.9	0.64	4.5	0.63	70	185	58
МФ-9	12:07	0	54°41.12′	20°20.63′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-10	12:16	0	54°41.04′	20°19.22′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-11	12:25	0	54°41.07′	20°17.78′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-12	12:34	0	54°41.12′	20°16.34′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-13	12:44	0	54°41.16′	20°14.90′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-14	13:19	0	54°41.20′	20°13.47′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-15	13:29	0	54°41.24′	20°12.03′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-16	13:39	0	54°41.17′	20°10.58′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-17	14:06	0	54°40.72′	20°09.38′	3.22	14.15	12.4	3.81	13.8	0.61	3.2	0.51	65	210	76
		3				16.15	11.7	3.34	19.5	0.61	2.8	0.43	26	240	<10
		5				24.33	6.32	2.62	13.4	0.62	2.2	0.49	13	135	10
МФ-18	14:19	0	54°40.12′	20°08.38′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-19	14:31	0	54°39.52′	20°07.38′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-20	14:42	0	54°39.15′	20°06.12′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-21	14:53	0	54°38.92′	20°04.75′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-22	15:06	0	54°38.70′	20°03.37′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-23	15:19	0	54°38.46′	20°01.91′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-24	15:28	0	54°38.36′	20°00.49′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-25	15:50	0	54°38.26′	19°59.06′	4.56	13.70	8.77	2.74	27.7	0.58	2.3	0.28	25	125	<10
		4				18.90	8.63	2.38	21.7	0.49	2	0.34	4.5	90	27
		8.6				24.90	7.10	2.03	14.2	0.52	1.7	0.33	16	105	60
МФ-26	16:02	0	54°38.21′	19°57.63′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-27	16:17	0	54°38.08′	19°56.22′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-28	16:28	0	54°37.97′	19°54.80′		н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
МФ-29	16:48	0	54°38.12′	19°53.50′	5.12	12.05	6.90	1.91	27.8	0.44	1.6	0.25	135	900	<20
		4				7.08	1.58	0.30	15.5	0.41	0.25	0.033	10	35	1.5
		9.3				3.58	6.96	1.55	18.2	0.35	1.3	0.25	17	80	60

* На всех станциях проводилось мультипараметрическое зондирование зондом Sea&Sun CTD90M.

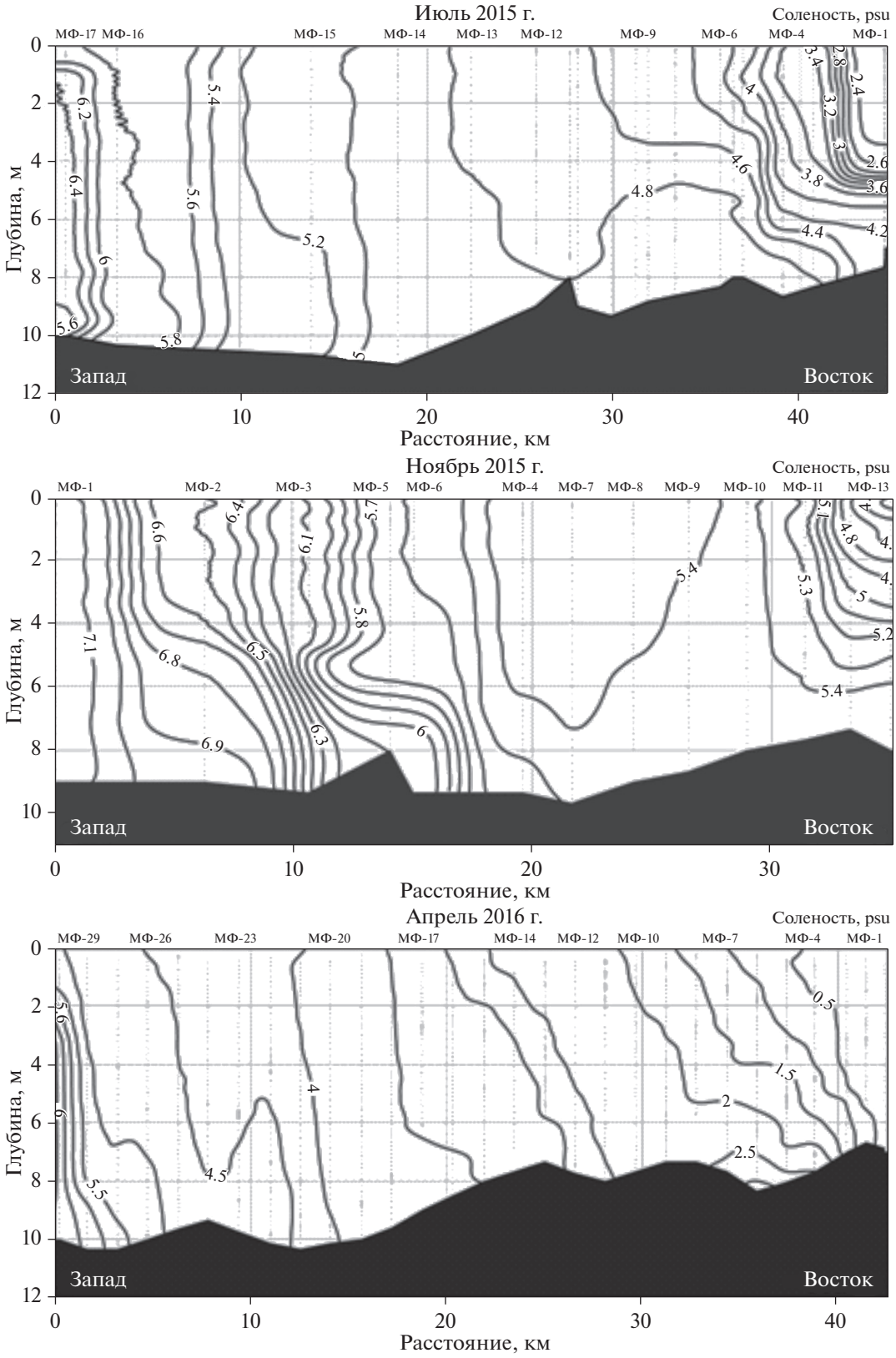

Рис. 3. Распределение солености в толще вод маргинального фильтра р. Преголи в разные сезоны.

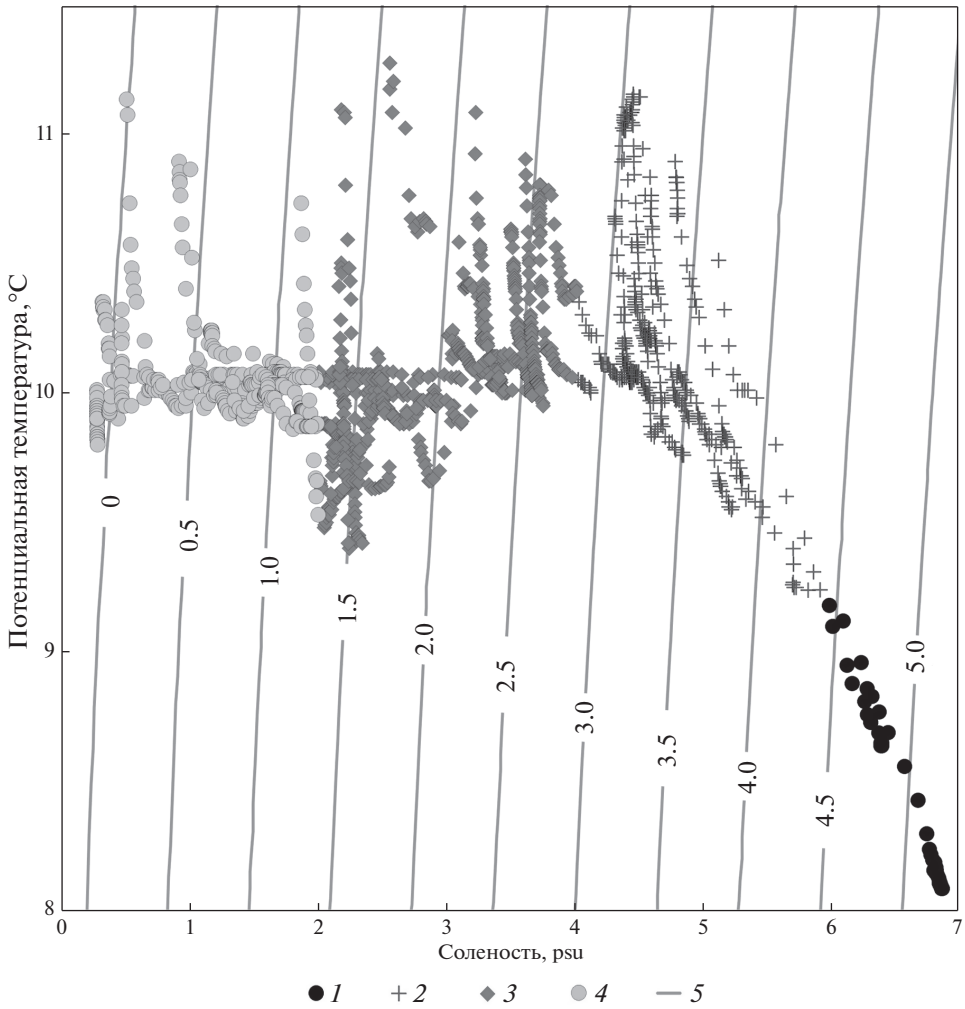

Рис. 4. Термохалинная кривая по данным станций МФ-1 – МФ-2. *1* – вода прибрежной части моря; *2* – вода устьевой части канала; *3* – вода канала; *4* – вода р. Преголи; *5* – изопикны условной плотности.

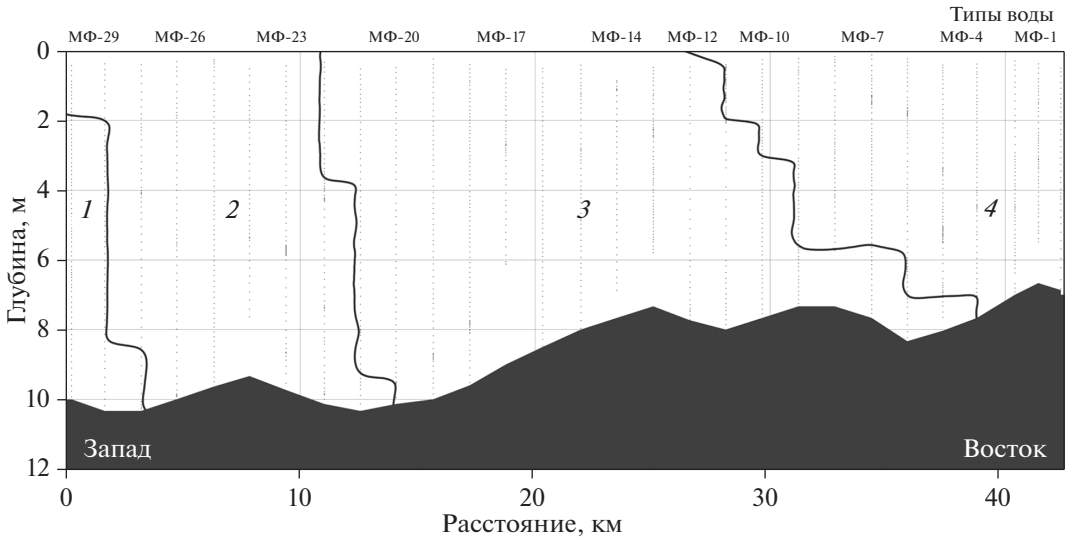

Рис. 5. Типы воды на гидрологическом разрезе МФ-1–МФ-29 (29.04.2016). *1* – вода прибрежной части моря; *2* – вода устьевой части канала; *3* – вода канала: *4* – вода р. Преголи.

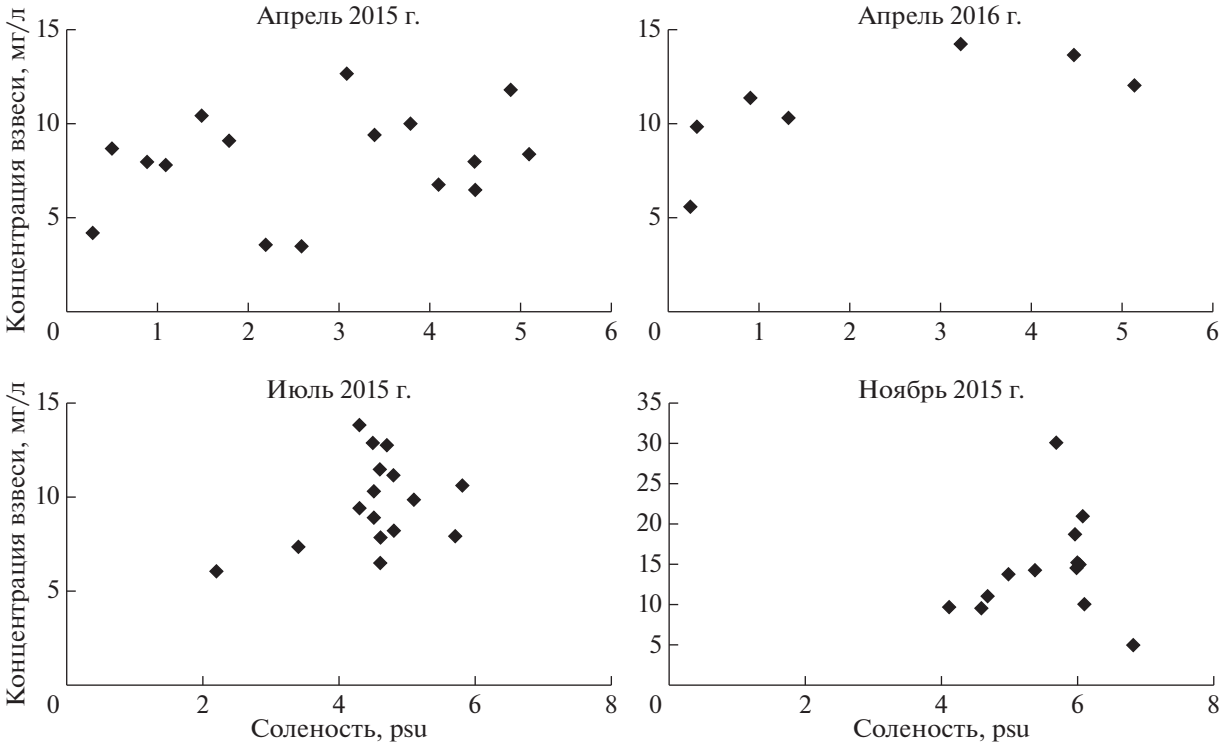

Рис. 6. Распределение концентраций взвеси в зависимости от солености.

ции взвеси растут с увеличением солености, что обусловлено смешением речной воды с низкой концентрацией взвеси с насыщенной биогенной взвесью водой Вислинского залива. При дальнейшем увеличении солености концентрации взвеси возрастают незначительно на всем протяжении разреза. При максимальных значениях солености в конце разреза концентрации взвеси уменьшаются, что обусловлено смешением вод канала с морскими водами, характеризующимися значительно меньшими содержаниями взвеси.

В июле 2015 г., в летнюю межень, соленость в реке была более 2 psu, концентрации взвеси – 6 мг/л. В канале соленость увеличивается, повышаются и концентрации взвеси. Следует отметить, что соленость в канале изменяется незначительно, увеличение от 4 до 5 psu происходит на расстоянии около 20 км (см. рис. 1, табл. 1). В этом диапазоне солености концентрации взвеси значительно варьируют (от 6 до 14 мг/л), что может быть связано с разными причинами, например, отстояние точек отбора от обрамляющей канал суши. При увеличении солености больше 5 psu концентрации взвеси немного уменьшаются, что связано со смешением воды канала с морской водой.

В ноябре 2015 г. при нагоне в залив морской воды соленость воды в реке составляла более 4 psu, а концентрации взвеси были вдвое выше, чем в других случаях. Это связано с интенсивным нагоном в реку вод залива, воздействующих на донные осадки, взмучивая их и увеличивая концентрации взвеси в воде. Распределение взвеси показывает повышение концентраций с увеличением солености в канале и дальнейшее понижение при смешении вод канала с морскими водами на морском конце разреза.

Таким образом, в маргинальном фильтре р. Преголи для распределения взвеси в зависимости от солености характерно, как для маргинальных фильтров других рек, впадающих в Балтийское море [7], повышение концентраций взвеси от речного конца МФ к его центральной части и последующее уменьшение в сторону моря.

Распределение концентраций взвеси на разрезе по Калининградскому морскому каналу, по данным съемки 29 апреля 2016 г., показывает (рис. 7а), что в речном русле концентрации незначительны (5.5–8.3 мг/л). В начале канала, при смешении пресных и солоноватых вод концентрации взвеси растут до более 20, выклиниваясь вверх в соответствии с распределением солености (см. рис. 6). Далее почти на всем протяжении канала в верхних 3-х метрах толщи воды распределение концентраций взвеси практически постоянное, они увеличиваются от поверхности к дну, достигая значений 22–24 мг/л (ниже 5 м водной толщи). В мористой части канала (маргинального фильтра) при смешении вод канала с морской во-

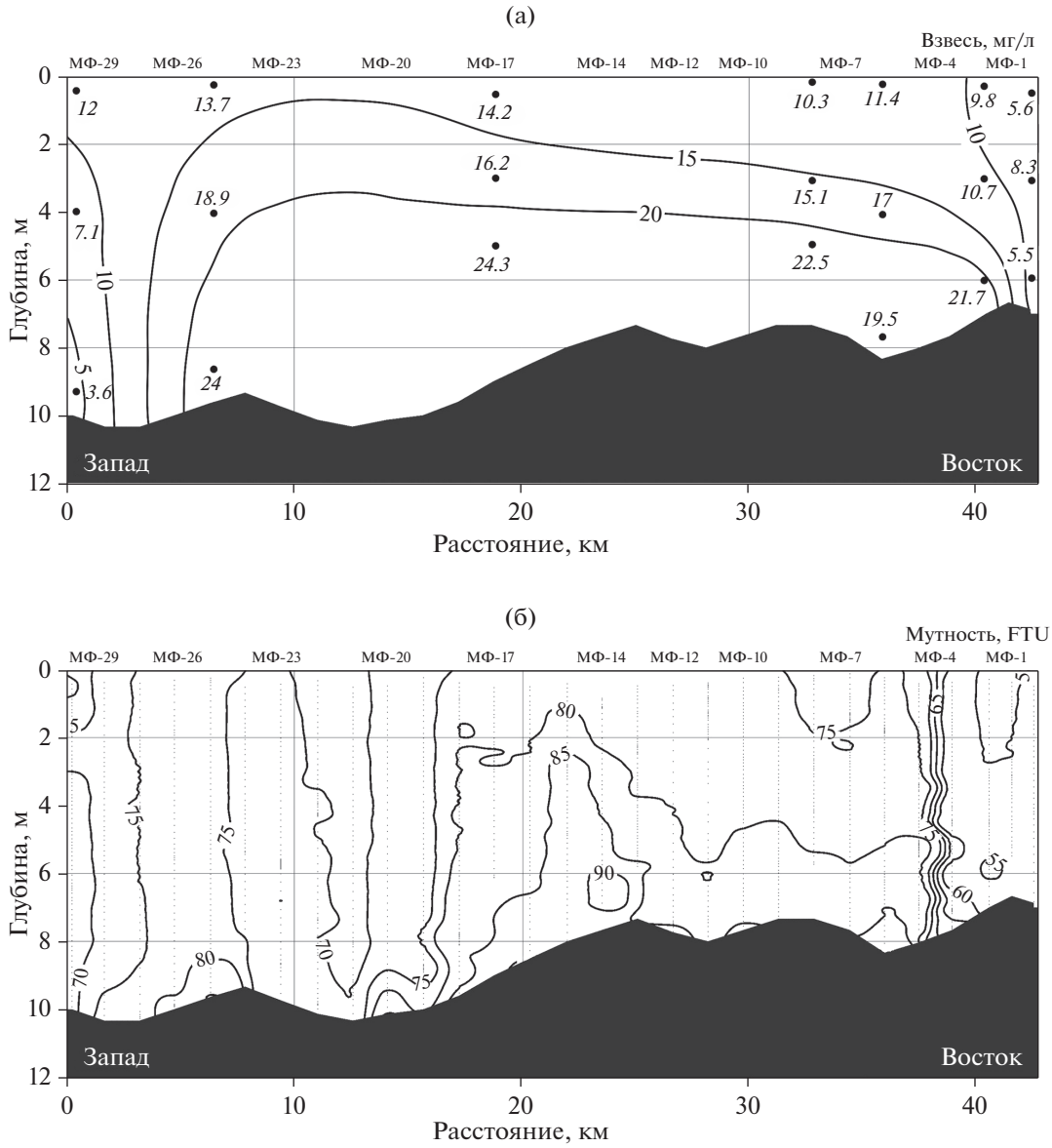

Рис. 7. Распределение концентраций взвеси (мг/л) в маргинальном фильтре р. Преголи (а), и мутности, по данным зондирования датчика мутности Seapoint Bulkhead (б).

дой концентрации взвеси резко уменьшаются – до менее 5 мг/л.

Рисунок 7б показывает распределение мутности, полученное по данным зондирования мультипараметрическим зондом Sea&Sun CTD90M с датчиком мутности Seapoint Bulkhead. Зондирование, в отличие от отбора проб, проводилось на всех станциях, поэтому распределение мутности подробнее, чем распределение концентраций взвеси. Для распределения мутности (единицы по стандарту мутности для формазина – ftu) характерны те же черты, что и для распределения концентраций взвеси. Небольшие значения в реке, затем резкое увеличение значений в диапазоне солености от 1.5 до 3 psu с выклиниванием вверх и минимальные значения на западном конце разреза при смешении вод канала с морскими водами.

Распределения концентраций некоторых взвесеобразующих элементов-индикаторов, характеризующих литогенную и биогенную компоненты взвешенного вещества (Al, Fe, $C_{орг}$), по данным съемки 29 апреля 2016 г., показаны на рис. 8.

Все элементы показывают невысокие концентрации в реке и устье. Затем в зоне максимальных градиентов солености наблюдается резкий рост концентраций с выклиниваем вверх и на восток, что обусловлено процессами, характерными для второго этапа маргинального фильтра (коагуляция и флоккуляция растворенных высокомолеку-

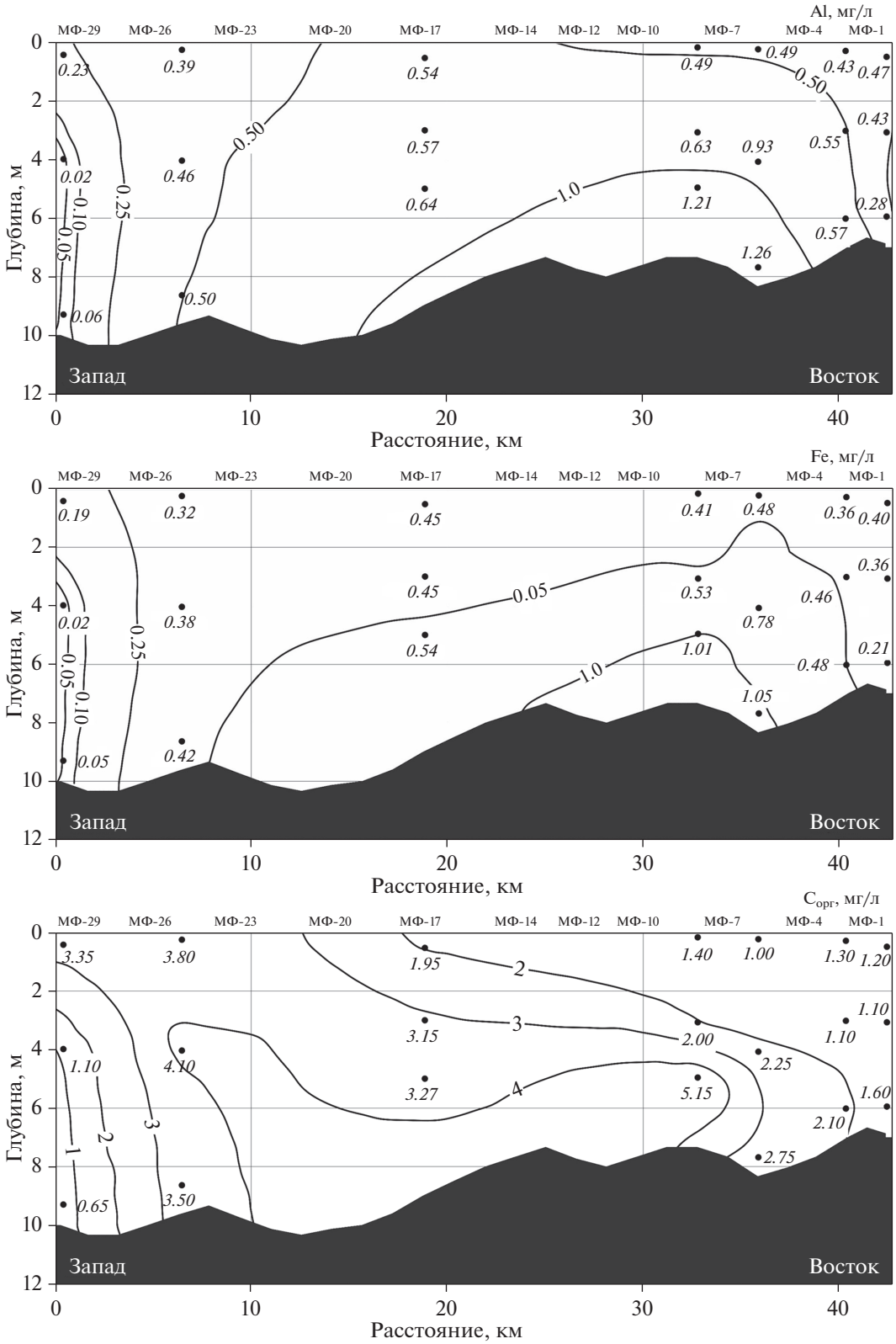

Рис. 8. Распределение концентраций взвешенных Al, Fe и $C_{орг}$ (мг/л) в маргинальном фильтре р. Преголи.

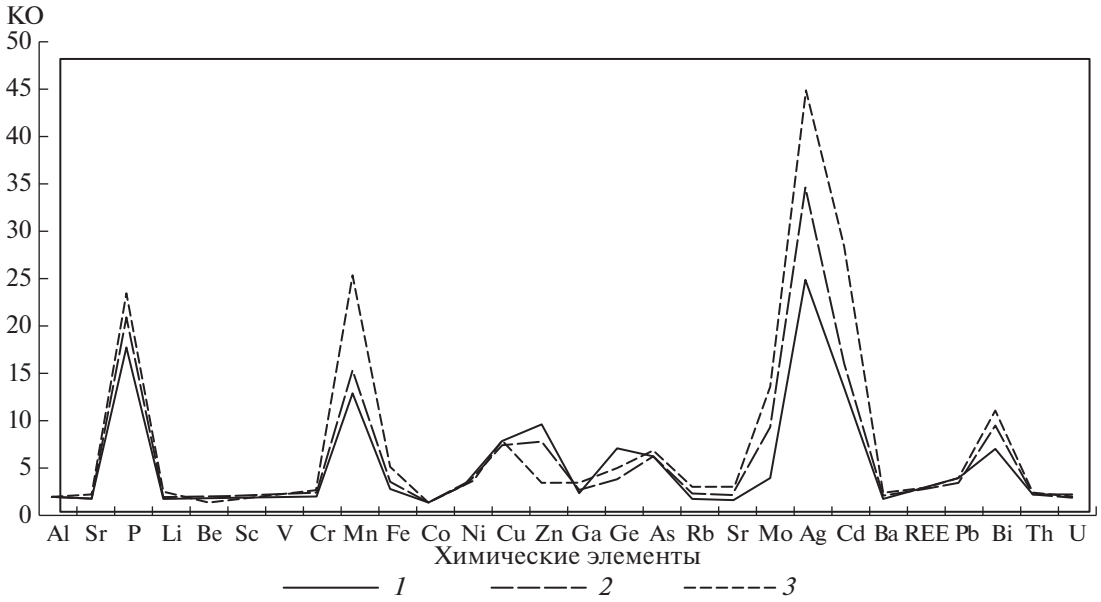

Рис. 9. Распределение коэффициентов обогащения химических элементов на разных этапах маргинального фильтра р. Преголи. *1* – гравитационный; *2* – коагуляционно-сорбционный; *3* – биологический.

лярных металлорганических соединений), приводящих к образованию новой взвеси с повышенными концентрациями рассматриваемых элементов [1, 2, 13, 15 и др.]. Далее концентрации элементов выравниваются и остаются постоянными на значительном протяжении разреза. Это обусловлено распространением здесь вод канала, занимающих центральную часть разреза (см. рис. 5). При продвижению к Балтийскому проливу концентрации всех элементов значительно уменьшаются в результате смешения вод канала с морскими водами. Здесь концентрации Fe и Mn уменьшаются более чем на порядок величины, а $C_{орг}$ – в 3–5 раз. Это биогенный этап маргинального фильтра. Взвесь становится существенно морской.

Таким образом, в маргинальном фильтре р. Преголи наблюдаются те же процессы преобразования речной взвеси, что и для других рек, впадающих в моря и океаны, в том числе в Балтийское море. Здесь также выделены все три этапа (гравитационный, коллоидно-сорбционный и биогенный) преобразования рассеянного осадочного вещества.

В маргинальном фильтре р. Преголи был изучен химический состав взвеси, включая ряд микроэлементов. Данные по химическому составу были сгруппированы и усреднены раздельно для каждого этапа МФ (русло и устье – гравитационный этап, основная часть канала – коллоидно-сорбционный этап, мористая часть канала и море – биологический этап). По средним значениям элементов для каждой части канала были рассчитаны коэффициенты обогащения (КО) взвеси относительно земной коры. Они рассчитывались как отношение нормализованных по Al элементов во взвеси и в земной коре [14]. Коэффициенты обогащения показали (рис. 9), что на первой гравитационной ступени (в устье реки) существенного обогащения химических элементов практически не происходит: значения КО для большинства элементов не превышают 2. Это большой ряд элементов (Al, Si, Be, Sc, V, Cr, Fe, Co, Ni, Rb, Sr, Ba, редкоземельные элементы, Th и U), связанный с терригенным веществом, поставляемым рекой. Несколько элементов обогащают взвесь на этом этапе более чем в 5 раз (Cu, Zn, Ge, As, Pb и Bi), что обусловлено биогеохимическими процессами взаимодействия терригенных и биогенных компонент взвеси. Четыре элемента – P, Mn, Ag и Cd – обогащают здесь взвесь более чем в 10 раз, что обусловлено, вероятней всего, техногенным загрязнением.

В основной части канала, на коллоидно-сорбционном этапе, распределение КО близко к распределению на первом этапе МФ. Несколько увеличились значения для элементов с высокими КО, а также Mo, As и Bi, что связано с их участием в физико-химических процессах на этом этапе, а также с удалением из состава взвеси значительной части терригенного материала.

На третьей биологической ступени КО для этих элементов еще выше – для Bi – 10, P, Mn, и Cd – 23–26, а для Ag – 44. Наиболее обогащены элементы, связанные с техногенным загрязнением. Такое обогащение обусловлено, во-первых, выведением из взвеси большой доли литогенного

Таблица 2. Корреляционная матрица содержаний химических элементов в МФ р. Преголи

	Si	Al	Corg	P	Li	Be	Sc	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Ga	Ge	As	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	Ba	REE	Pb	Bi	Th	U
Si	1																											
Al	**0.85**	1																										
C_{org}	–0.06	–0.05	1																									
P	0.22	0.51	–0.18	1																								
Li	0.38	0.38	–0.70	0.09	1																							
Be	0.29	0.54	–0.62	0.35	**0.81**	1																						
Sc	0.42	0.31	–0.64	0.00	**0.93**	**0.70**	1																					
V	0.48	0.39	–0.69	0.03	**0.92**	**0.73**	**0.96**	1																				
Cr	0.37	0.36	–0.55	0.04	**0.80**	**0.66**	**0.72**	**0.75**	1																			
Mn	0.13	0.22	–0.25	**0.60**	–0.42	0.07	–0.48	–0.36	–0.19	1																		
Fe	**0.60**	**0.66**	–0.32	**0.63**	**0.84**	0.41	**0.94**	**0.95**	**0.54**	**0.67**	1																	
Co	0.20	0.15	–0.13	–0.20	–0.10	0.02	–0.16	–0.06	0.06	–0.23	**0.88**	1																
Ni	0.28	0.27	–0.19	–0.10	–0.03	0.25	–0.17	–0.05	0.18	0.19	0.34	**0.92**	1															
Cu	0.22	0.37	–0.13	0.12	0.06	**0.51**	–0.13	–0.04	0.11	0.10	0.20	–0.12	0.26	1														
Ga	0.32	0.25	–0.62	0.02	**0.85**	**0.62**	**0.89**	**0.88**	0.69	–0.43	**0.68**	–0.27	–0.24	–0.04	1													
Ge	0.18	0.00	0.01	–0.29	0.05	–0.17	0.11	0.18	0.20	**0.52**	0.43	**0.87**	**0.68**	–0.58	–0.08	1												
As	0.46	**0.51**	–0.73	0.15	**0.89**	0.34	**0.88**	**0.92**	**0.86**	–0.21	**0.53**	**0.93**	**0.73**	**0.62**	**0.84**	**0.62**	1											
Rb	0.47	0.50	–0.83	–0.06	**0.78**	0.41	**0.87**	**0.82**	**0.63**	–0.58	**0.86**	**0.69**	0.49	0.46	**0.82**	–0.42	**0.70**	1										
Sr	0.21	0.25	–0.75	0.03	**0.79**	0.25	**0.79**	**0.75**	**0.68**	–0.47	–0.08	**0.61**	**0.56**	0.30	**0.86**	0.00	**0.70**	**0.80**	1									
Mo	0.25	0.45	–0.47	0.15	0.27	**0.53**	0.06	0.12	0.38	–0.10	0.03	–0.16	0.19	**0.80**	0.15	–0.54	**0.70**	**0.56**	**0.55**	1								
Ag	0.24	0.50	–0.65	0.30	0.51	**0.56**	0.31	0.37	**0.51**	–0.36	–0.42	0.06	0.29	**0.54**	0.37	–0.23	**0.82**	**0.68**	**0.72**	**0.72**	1							
Cd	0.29	0.31	–0.67	0.15	**0.54**	0.34	**0.62**	**0.60**	**0.60**	–0.30	–0.03	**0.59**	**0.60**	0.44	**0.62**	0.11	**0.57**	**0.61**	**0.55**	**0.51**	**0.72**	1						
Ba	0.04	–0.18	–0.43	–0.10	**0.69**	0.50	**0.85**	**0.79**	0.46	0.41	–0.21	–0.33	–0.54	–0.62	**0.96**	0.09	0.30	0.08	**0.58**	–0.42	–0.25	0.00	1					
REE	0.28	0.18	–0.60	0.07	**0.85**	**0.62**	**0.81**	**0.93**	**0.74**	**0.88**	0.63	–0.16	–0.27	–0.37	**0.68**	0.21	**0.82**	–0.16	0.03	–0.15	0.01	0.16	**0.62**	1				
Pb	0.44	0.29	–0.48	0.02	**0.78**	–0.26	**0.88**	**0.90**	**0.67**	–0.29	–0.05	–0.14	–0.21	–0.25	**0.81**	0.20	**0.85**	**0.76**	**0.69**	–0.11	0.11	**0.60**	**0.81**	**0.89**	1			
Bi	0.10	–0.04	–0.25	–0.06	**0.68**	–0.50	**0.79**	**0.76**	**0.57**	–0.37	0.06	–0.21	–0.33	–0.44	**0.72**	0.18	**0.78**	**0.65**	**0.76**	–0.23	–0.02	**0.54**	**0.81**	**0.74**	0.84	1		
Th	0.43	0.26	–0.46	–0.04	**0.82**	–0.32	**0.93**	**0.92**	**0.62**	–0.37	**0.85**	–0.17	–0.26	–0.28	**0.83**	0.18	**0.87**	**0.74**	**0.65**	–0.13	0.11	**0.54**	**0.83**	**0.86**	**0.95**	**0.83**	1	
U	0.35	0.17	–0.39	–0.07	**0.76**	–0.51	**0.90**	**0.88**	**0.59**	–0.38	**0.54**	–0.21	–0.32	–0.38	**0.81**	0.19	**0.87**	**0.78**	**0.73**	–0.20	0.02	**0.59**	**0.85**	**0.81**	**0.95**	**0.89**	**0.97**	1

вещества, принесенного в море рекой. Концентрации взвеси становятся меньше, из-за чего концентрации микроэлементов, не связанных с литогенным материалом, относительно увеличиваются. Во-вторых, происходит обогащение рядом микроэлементов на втором этапе МФ за счет физико-химических процессов – коагуляция коллоидов и адсорбция микроэлементов [2, 12, 13, 15]. Этот процесс обогащения наблюдается и на третьей ступени МФ.

Для установления связей между химическими элементами во взвеси была построена корреляционная матрица (табл. 2) для всех проб, отобранных на разрезе. Высокие коэффициенты корреляции между элементами выделены полужирным шрифтом. Наиболее тесная корреляция наблюдалась между Si и Al. Это вполне ожидаемо, поскольку Si и Al являются главными породообразующими элементами алюмосиликатов, составляющих континентальную земную кору, а также продукты ее деградации – обломочные и глинистые минералы, выносимые реками. Оба элемента хорошо коррелируются с Fe, а Al еще – с Be, P и As. По-разному ведет себя Fe, так как присутствует в составе взвеси в литогенной форме (в составе обломочных и глинистых минералов) и в гидрогенной форме, образующейся в воде в процессе миграции, а также на втором этапе МФ. С его литогенной формой связаны Li, Sc, V, Co, Cr, As, REE, Rb, Th, а с его гидрогенной формой – Mn, P, U и, вероятно, ряд других элементов, сорбированных на оксигидроксидах Fe и Mn. Для элементов, имеющих высокие КО, также наблюдаются сильные связи: между Mo, Ag, Cd, Bi и отдельно – Mn, P. По-видимому, высокие КО обогащения в первом случае обусловлены техногенным загрязнением взвеси, а во втором – природным процессом коагуляции и адсорбции, происходящими в канале, являющемся коагуляционно-сорбционным этапом маргинального фильтра р. Преголи.

Таким образом, характерной особенностью, отличающей р. Преголи от других крупных рек Юго-Восточной Балтики, является то, что она впадает в солоноватый Вислинский залив, содержащий много биогенной взвеси. Метеоусловия в значительной степени определяют положение маргинального фильтра, его миграцию в сторону моря или реки. Весной 2016 г. по TS характеристикам впервые были выделен воды, составляющие маргинальный фильтр. Они четко разделяются высокоградиентными зонами. Исследования, проведенные нами в разные сезоны, показали, что во всех случаях здесь также выделяются все три этапа (гравитационный, коллоидно-сорбционный и биогенный) преобразования рассеянного осадочного вещества, в процессе прохождения которых речное взвешенное вещество превращается в морское. Последнее, в отличие от речной взвеси, характеризуется значительно меньшими концентрациями и преобладанием во взвеси биогенного вещества над литогенным. Это свидетельствует о том, что непосредственно в море (за пределами маргинального фильтра) поступает значительно меньше литогенного осадочного материала, чем поставляется реками.

Изучение химического состава взвеси на всех этапах маргинального фильтра показало сильное обогащение ее рядом элементов относительно литогенного материала, что объясняется техногенным загрязнением взвеси. Матричный корреляционный анализ концентраций химических элементов показал прочность связей между элементами и позволил определить для некоторых элементов генетический характер связей.

Работа по получению экспедиционного материала выполнена в рамках государственного задания ФАНО России № 0149-2018-0016, а его обработка и написание статьи выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проекты № 14-27-00114 и № 14-27-00114-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012. 452 с.
2. *Гордеев В.В., Лисицын А.П.* Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 721–744.
3. *Дмитриева О.А., Семенова О.С.* Сезонная динамика и трофические взаимоотношения фито- и зоопланктона в Вислинском заливе Балтийского моря // Океанология. 2012. Т. 52. № 6. С. 851–856.
4. *Емельянов Е.М.* Геохимия взвеси и осадков в Гданьском бассейне и процессы седиментации // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море / Ред. Емельянов Е.М., Лукашин В.Н. М.: Наука, 1986. С. 57–114.
5. *Емельянов Е.М., Пустельников О.С.* Химический состав речной и морской взвеси в Балтийском море // Геохимия. 1975. № 6. С. 674–687.
6. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
7. *Лукашин В.Н., Стрюк В.Л., Гурвич Е.Г.* Микроэлементы в зонах смешения вод Куршского залива, рек Даугавы и Венты, Балтийского моря // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М.: Наука, 1986. С. 25–45.
8. *Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
9. *Ронов А.Б., Ярошевский А.А.* Химическое строение земной коры // Геохимия. 1967. № 11. С. 1285–1309.
10. *Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Курченко В.Ю.* О натурных исследованиях взвешенного вещества, образующегося в судоходном канале под воздействием

движущихся судов // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 297–305.

11. *Чубаренко Б.В.* Зонирование Калининградского залива и устьевого участка реки Преголи по показателям гидролого-экологического состояния в целях оптимизации мониторинга // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы "Исследование природы Мирового океана" федеральной целевой программы "Мировой океан"). Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2007. Вып. 2. С. 591–602.
12. *Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Viers1 J. et al.* Fate of colloids during estuarine mixing in the Arctic // Ocean Sci. 2014. V. 10. P. 107–125.
13. *Sholkovitz E.R.* Flocculation of dissolved organic and inorganic matter during the mixing of river water and seawater // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1976. V. 40. P. 831–845.
14. *Rudnic R.L., Gao S.* Composition of continental crust // Tretise on Geochemistry / Eds. Holland H.D., Turekian K.K. V. 3. The Crust. Amsterdam, Boston et oth.: Elsevier Pergamon, 2004. P. 1–64.
15. *Turner A.* Trace metal partitioning in estuaries: importance of salinity and particle concentration // Marine Chemistry. 1996. V. 54. P. 27–39.

Geochemistry of Suspended Matter in Marginal Filter of the Pregel River

V. N. Lukashin, V. A. Krechik, A. A. Klyuvitkin, D. P. Starodymova

This article discusses the results of a study of marginal filter (MF) Pregel River in different seasons. Three steps (gravitational, sorption-colloid and -biogenic) of transformation of dispersed sedimentary matter are selected. Study of chemical composition of suspended matter at all stages of a marginal filter showed change in the composition of the suspension forming elements, as well as strong enrichment suspended material by a number of trace elements, what can be explained by pollution. Matrix correlation analysis of chemical elements concentrations revealed strong links between elements.