

УДК 550.47

ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД ВОДЫ, ВЗВЕСИ И ВЕРХНЕГО СЛОЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

© 2015 г. Н. А. Беляев, М. С. Поняев, А. М. Кирютин

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва**e-mail: belyaev@ocean.ru*

Поступила в редакцию 22.04.2013 г.

На основании материалов, полученных в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”, определено содержание органического углерода в воде (РОУ), взвеси (ВОУ) и донных осадках Енисейского эстуария и центральной части Карского моря в осенне-летний период 2011 г. Показано определяющее влияние вод речного стока на изменение концентраций РОУ и ВОУ в акватории моря. Выявлено обогащение ВОУ автохтонной компонентой в зонах фронтов, увеличение концентраций РОУ в фронтальной зоне у северной оконечности Новой Земли. На основе анализа собственных и литературных данных построена карта распределения органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в верхнем слое донных осадков центральной части Карского моря. Установлено существенное обогащение (>20%) органическим углеродом тонкого верхнего (0–0.5 см) слоя донных осадков, зафиксированное на большинстве станций и не зависящее как от литологического состава осадков, так и от расположения точек отбора.

DOI: 10.7868/S0030157415040012

ВВЕДЕНИЕ

Программа изучения цикла углерода Карского моря в 59-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” формировалась с учетом выявленной по результатам экспедиции 2007 г. океанологической, биологической и геохимической обстановок [13]. Перед авторами статьи – участниками экспедиции – стояла задача исследовать главные особенности и факторы, определяющие распределение органического вещества (ОВ) в системе Карского моря. Анализ образцов, отобранных в эстуарии Енисея и центральной части Карского моря, позволил провести сравнение результатов с ранее полученными данными по западной части моря и Обской губе, а фокусировка исследований на изменениях ОВ в различных барьерных зонах (вода–дно, зоны смешения) – локализовать процессы его трансформации. В данной работе рассматривается поступление органического углерода (ОУ) с речным стоком в растворенной и взвешенной форме, изменение его концентраций в зоне маргинального фильтра и системе вода–осадок. Расположение станций (разрезы и точки отбора проб представлены на рис. 1) на выбранных разрезах позволяет проследить судьбу органического углерода ($C_{\text{орг}}$) от мест его выноса с речным стоком до захоронения у подножия континентального склона. Енисейский разрез (рис. 1, I), совместно с разрезом через восточный отрог желоба Святой Анны (рис. 1, II), формируют субмеридиональный профиль, пересекающий область внутреннего шельфа и выхо-

дящий на континентальный склон. Разрез у северной оконечности Новой Земли (рис. 1, III) замыкает область исследований с севера, а Таймырский разрез (рис. 1, IV) маркирует распространение речного стока на восток вдоль береговой линии Карского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для отбора и предварительной обработки образцов морской воды, взвешенного вещества и донных осадков была применена стандартная методика, описанная в работах [например 1, 7]. Применение мультикорера позволило исключить нарушение поверхностного слоя донных осадков. Всего была отобрана и проанализирована на содержание органического углерода 91 проба морской воды и 157 проб донных осадков на 22 станциях.

Основным усовершенствованием методики обработки собранного материала от предыдущих методов аналитических определений [1] являлось исключение сушки образцов для определения содержания $C_{\text{орг}}$ и карбонатного углерода ($C_{\text{карб}}$) в пробах взвешенного вещества и донных осадков. Применение лиофилизации глубоководных образцов непосредственно перед анализом позволило свести к минимуму изменение состава ОВ при пробоподготовке, унифицировать методы пробоподготовки образцов взвешенного вещества морской воды и донных осадков, а также достоверно определять концентрации и состав

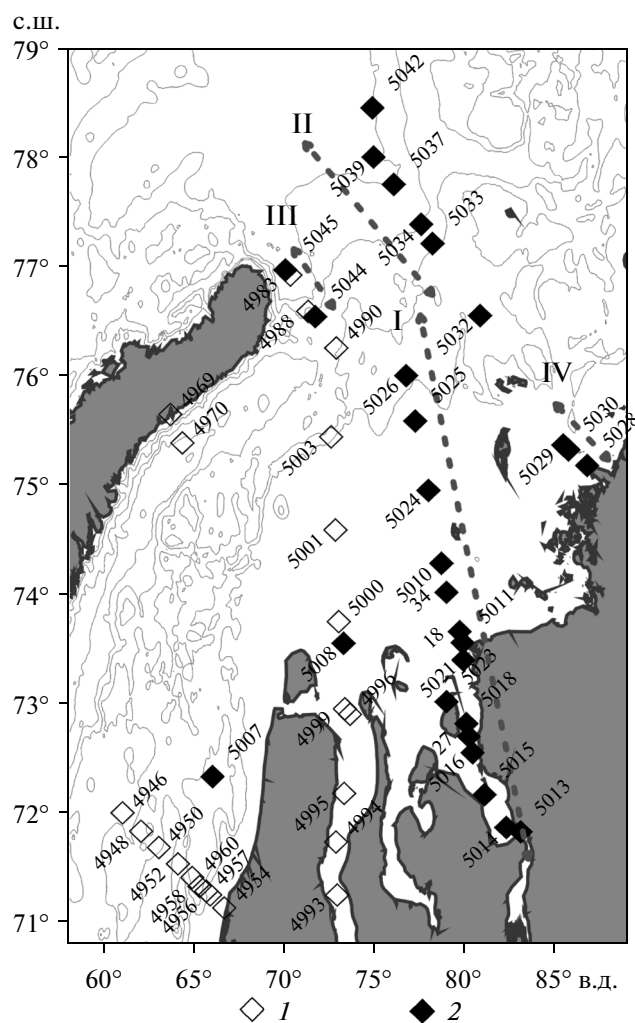


Рис. 1. Схема расположения станций пробоотбора. 1 – рейс АМК-54, сентябрь 2007 г., 2 – рейс АМК-59, сентябрь 2011 г.
I – Енисейский разрез, II – разрез через восточный отрог желоба Св. Анны, III – разрез у северной оконечности Новой Земли, IV – Таймырский разрез.

ОВ в сильно обводненных верхних слоях колонок донных осадков – наилка и поднаилка.

Определение $C_{\text{орг}}$ и карбонатного углерода ($C_{\text{карб}}$) выполнялось на анализаторе ТОС-Vсрh фирмы Shimadzu с приставкой SSM-5000A. Для растворенного органического углерода диапазон измеряемых концентраций составляет 0.05–25 000 мг С/л, объем вводимого образца 100 мкл. Для донных осадков диапазон измеряемых концентраций углерода 0.05–30 мас. % (на сухой вес), навеска 100 мг. Для взвешенного органического углерода диапазон измеряемых концентраций составляет 5–10 000 мкг С/л. Погрешность прибора 1%. Воспроизводимость результатов анализов $\pm 5\%$. Перед началом серии анализов проводилась калибровка прибора по стандартным образцам дон-

ных осадков (СДО2, СДО1, СДО3). Для верификации метода лиофильной сушки образцов был повторно проанализирован ряд проб донных осадков, отобранных в 54-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш”. Результаты повторных определений стабильно укладывались в 5% доверительный интервал.

Следует отметить, что для количественного определения содержания взвешенного вещества используются поликарбонатные ядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм, а для определения содержания углерода – стекловолоконистые фильтры Whatman GF/F с условным размером пор 0.7 мкм. Из-за разницы в форме и диаметре пор фильтров представленная величина содержания ВОУ во взвеси (табл. 1) не является строгой количественной величиной, но выражает закономерности содержания $C_{\text{орг}}$ в составе взвешенного вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Растворенный и взвешенный органический углерод. Результаты аналитических определений содержания в морской воде РОУ и ВОУ представлены в табл. 1. Данные о массовых концентрациях взвеси представлены М.Д. Кравчишиной [4]. Максимальные концентрации как РОУ (10.8 мг/л), так и ВОУ (566 мкг/л) зафиксированы в начале маргинального фильтра реки Енисей на ст. 5015, причем максимум растворенного ОВ приходился на пресный поверхностный горизонт, а взвешенного – на солонowodный придонный. Минимальное содержание РОУ выявлено у северной оконечности Новой Земли (0.77 мг С/л, ст. 5044), а ВОУ – у восточного отрога желоба Святой Анны (22 мкг/л, ст. 5042) на горизонтах 110–150 м. Среднее содержание РОУ в поверхностном слое воды составляло 4.5 мг/л (число определений $n = 22$, среднее квадратичное отклонение $\sigma = 2.3$), ВОУ – 188 мкг/л ($n = 25$, $\sigma = 118$), а в придонном 3.1 мг/л ($n = 19$, $\sigma = 2.4$) и 145 мкг/л ($n = 21$, $\sigma = 144$) соответственно. Для всех исследованных проб среднее содержание РОУ составляло 3.4 мг/л ($n = 69$, $\sigma = 1.99$), ВОУ – 129 мкг/л ($n = 77$, $\sigma = 110$).

Концентрации органического углерода в слоях наддонной воды, отобранных из трубок мультикорера, варьировали в широких пределах: взвешенного – 74–3290 мкг/л, растворенного – 0.89–12.03 мг/л. Необходимо отметить, что если концентрации РОУ в слое наддонной воды в целом не сильно отличаются от концентраций в соответствующем ему слое придонной, то концентрации ВОУ наддонной воды на порядок превосходили придонные. Возможно, частично это было связано с взмучиванием осадка в процессе отбора, однако отличие химического состава ОВ взвешенного вещества наддонного слоя как от ОВ придонных горизонтов, так и от ОВ наилка [7]

Таблица 1. Содержание растворенного и взвешенного органического вещества в центральной части Карского моря

№ станции	Глубина, м	Горизонт, м	Соленость, psu	РОУ, мг С/л	Взвешенное вещество			РОУ/ВОУ
					мкг С/л	мг/л	ВОУ/ВВ, %	
5007	138	0	24.0	12.03	164	0.43	38	
		135	34.6		137			
		Надд.						
5008	22	Надд.	31.8	5.81	3290			2
Енисейский разрез								
5013	30	0	0.1	7.85	394	2.55	15	20
		27.5	0.1	7.95		3.95		
		Надд.		6.88	518			13
5014	10	2	0.0	7.96	407	2.93	14	20
		8	0.1		187	1.81	10	
5015	14	0	0.5	10.78	345	2.73	13	31
		12	21.0	4.69	567	10.31	5	8
		Надд.	23.4	4.78	1569			3
27		0		7.19	381	2.05	19	19
5018	22	0	15.8	5.11	279	1.15	24	18
		6	24.9	3.27	153	0.97	16	21
		14	28.3	4.77	171	1.53	11	28
		20	31.1	3.25	367	5.53	7	9
		Надд.	31.0	2.26	2906			1
5021	34	3	17.1		363	1.04	35	
		31.5	31.5	1.91	283	7.63	4	7
5011-2	36	0	13.6	4.72	311			15
		5	14.1		238	1.27	19	
		12	29.7	2.39	224	0.51	44	11
		25	31.3	3.42	246	1.20	21	14
		33.5	32.4	2.12	151	1.73	9	14
		Надд.	32.5	1.57	2207			1
5023	29	2–2.5	16.5	4.55	120	0.82	15	38
		5	25.0	4.59	121	0.83	15	38
		22	31.9	2.74	83	0.80	10	33
		27	32.1	4.49	127	2.50	5	35
		Надд.	32.1	1.65	640			3
18		0		3.53	188	0.78	24	19
34		0		3.90	150	0.81	18	26
5010		0	26.2	4.94	152	0.44	35	32
		5	26.3	5.81	96	0.31	31	61
		10	26.3	3.23	141	0.35	40	23
		20	31.2	2.28	82	0.58	14	28
		27.5	32.1	2.06	149	2.06	7	14
		Надд.	32.2	1.88	2538			1

Таблица 1. Продолжение

№ станции	Глубина, м	Горизонт, м	Соленость, psu	РОУ, мг С/л	Взвешенное вещество			РОУ/ ВОР
					мкг С/л	мг/л	ВОУ/ВВ, %	
5025	47	0	22.9	3.36	118	0.47	25	28
		45	33.5	1.33	46	0.71	7	
		Надд.	33.5	1.54	74			21
5026	62	0		2.99				
		2	24.2	3.24	113	0.34	33	29
		6	25.3	2.88	80	0.40	20	36
		20	32.9	1.77	65	0.16	41	27
		60	34.0	1.11	45	0.38	12	25
		Надд.	34.0	1.40	1251			1
Разрез через восточный отрог желоба Святой Анны								
5032	59	1.5	28.7	2.24	72	0.28	25	31
		16	32.9	1.12	44	0.29	15	26
		40	33.7	4.71	37	0.17	21	126
		56	34.,04	7.64	37	0.42	9	208
		Надд.	34.0	4.58	684			7
5033	122	2.5(0)	27.3	2.48	79	0.31	26	31
		9.5	27.6	2.79	84	0.37	23	33
		55	34.2		38	0.26	15	
		120	34.4	1.23	37	0.36	10	33
		Надд.	34.4	3.35	974			3
5034	219	1	31.3		74	0.26	29	
		15	32.9		40	0.16	25	
		110	34.7		38	0.22	17	
		215	34.9		63	0.35	18	
		Надд.	34.9	3.83	2705			1
5039	361	1	31.6	2.54	63	0.16	39	40
		20	34.4	2.29	49	0.29	17	46
		150	34.8	3.62	31	0.31	10	116
		355	34.9	1.26	37	0.25	15	34
		Надд.	34.9	1.37	1270			1
5042	465	1	32.2	3.62	66	0.15	44	55
		9	33.3	3.95	65	0.15	42	60
		35	34.4	2.81	43	0.13	33	65
		100	34.9	3.04	22	0.10	22	139
		280	34.9	1.10		0.12		
		460	34.9	3.25	34	0.27	12	97
		Надд.		0.89				

Таблица 1. Окончание

№ станции	Глубина, м	Горизонт, м	Соленость, psu	РОУ, мг С/л	Взвешенное вещество			РОУ/ ВОУ
					мкг С/л	мг/л	ВОУ/ВВ, %	
Станции у северной оконечности Новой Земли								
58(5044)		0		5.81	135	0.51	27	43
5044	150	2(0)	33.2		124	0.35	35	
		4	33.2	2.89	120	0.28	42	24
		110	34.6	1.31	46	0.12	37	29
		147	34.8	0.77	45	0.26	18	17
		Надд.	34.8	2.28	620			4
5045	530.5	7	33.6	1.05	77	0.13	58	14
		20	34.3	1.15	58	0.15	40	20
		100	34.9	1.07	34	0.13	26	32
		527.5	34.9	1.40	35	0.15	24	40
		Надд.		1.12				
Таймырский разрез								
5028	40	1	18.2	3.98	141	0.82	17	28
		8	21.5	3.92	103	0.65	16	38
		20	31.8	2.21	44	0.19	23	50
		38	33.4	1.55	104	0.90	12	15
5030	41	0.5	25.5	3.33	126	0.58	22	27
		3	28.2	5.02	69	0.71	10	73
		14	30.6	2.61	59	0.21	28	44
		38	33.5	3.06	131	0.90	15	23
5029	54	0(1.5)	29.1	2.36	52	0.24	22	45
		8	29.2	1.96	56	0.31	18	35
		51	33.7	1.29	63	0.92	7	21

Примечание. Данные о массовых концентрациях взвешенного вещества предоставлены М.Д. Кравчишиной [4], Надд. – проба воды, отобранная из трубки мультикорера.

позволяет предполагать постоянное существование обогащенного ВОУ наддонного слоя.

Большинство исследованных станций (15 из 22) располагалось на субмеридиональном профиле Енисейский залив–восточный отрог желоба Святой Анны. Также были выполнены вспомогательные разрезы: от п-ва Таймыр до начала восточного отрога (3 из 22) и от северной оконечности Новой Земли до центральной части желоба (2 из 22).

Для Таймырского разреза характерны значения РОУ и ВОУ близкие к средним величинам по морю (РОУ – 2.8 мг/л, ВОУ – 86 мкг/л, $n = 11$). Некоторое увеличение концентраций взвешенного органического углерода в поверхностном слое вблизи берега связано с затоком Енисейских вод, а в придонном – с возможными процессами береговой абразии и взмучиванием слоя донных осадков. Данная зависимость выражена слабо и практически не отражается на изменениях кон-

центраций РОУ. Повышение концентраций ВОУ связано с переносом терригенного материала и подтверждается уменьшением доли ОВ в составе взвеси как придонного, так и поверхностного горизонтов.

С использованием данных, полученных в 54-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” [1], были построены схемы распределения содержания РОУ и ВОУ в поверхностном, подповерхностном (~20 м) и придонном слоях (рис. 2). Несмотря на отличающуюся структуру циркуляции вод Карского моря в сезонах 2007 и 2011 гг. [14], можно провести сравнение двух различных типов поставки терригенного органического вещества со стоком рек Оби и Енисея. Как уже отмечалось в работе [1], для р. Обь было показано существование горизонтального маргинального фильтра. Здесь, распространяясь далеко на север, слабо распресненные воды речного стока с высоким со-

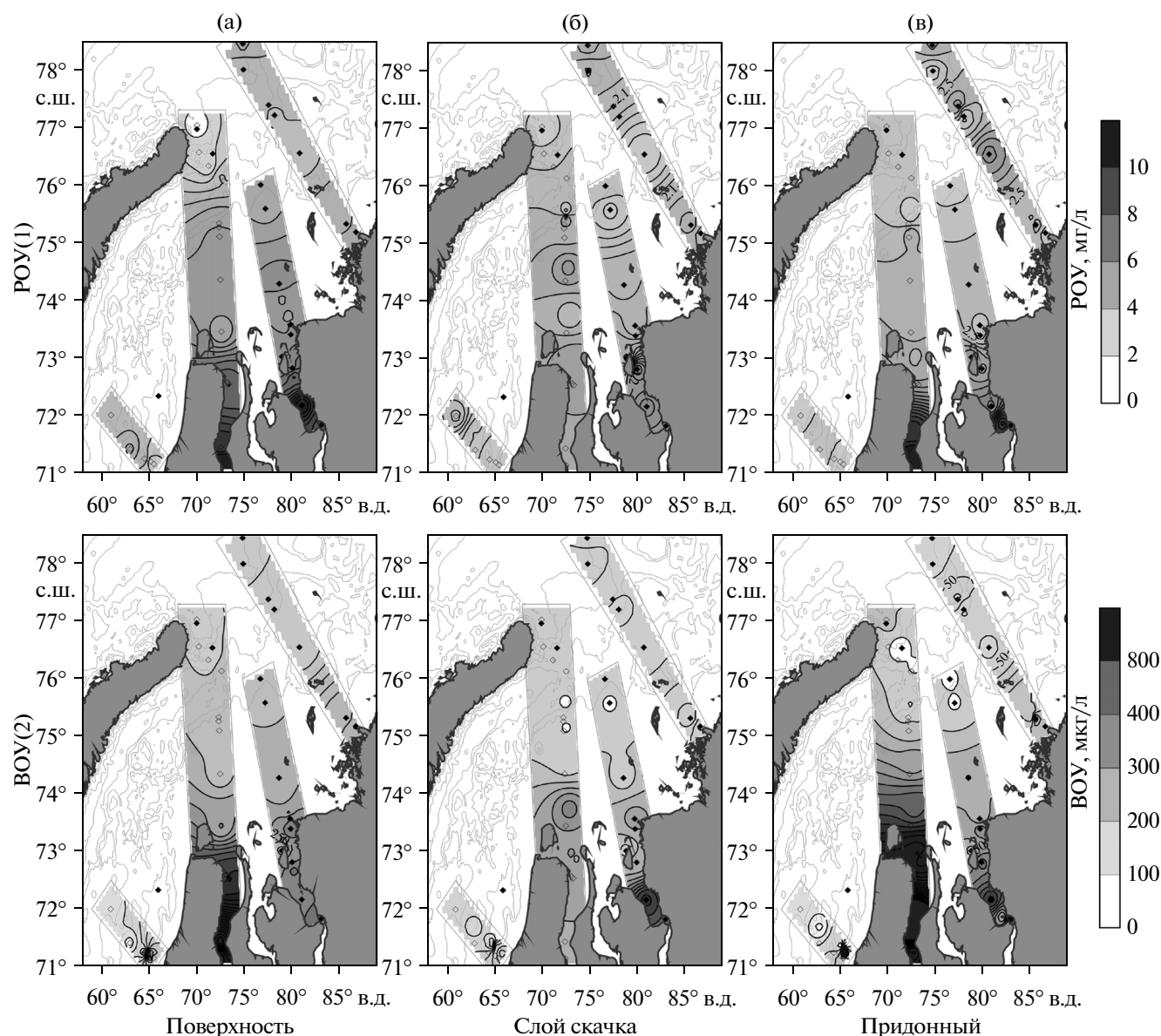


Рис. 2. Схемы распределения содержания растворенного РОУ (1) и взвешенного БОУ (2) углерода в поверхностном (а), подповерхностном (~20 м) (б) и придонном (в) слоях.

держанием РОВ и БОВ затекают на подстилающие их морские воды. В результате гидродинамического перемешивания (горизонтально расположенная зона высоких градиентов солёности) происходит активная коагуляция и флокуляция РОУ. Это приводит к новообразованию БОУ и увеличивает его концентрацию в подстилающих слоях. Таким образом, прослеживается обогащение поверхностных горизонтов растворённым органическим веществом речного стока (рис. 2, 1а), а придонных — взвешенным (рис. 2, 2в). В результате зона накопления терригенного ОБ в донных осадках проецируется на всю область внутреннего шельфа. Для Енисейского эстуария характерно существование классической системы маргинального фильтра,

описанной в работе [9]. В ходе экспедиционных исследований 2011 г. по ряду гидрохимических параметров было зафиксировано более сложное строение эстуарной фронтальной зоны, которая состояла из вертикальной и горизонтальной зон смешения [10]. При этом осаждение основной массы БОВ происходило в эстуарной зоне (рис. 2, 2в), а оставшаяся часть распространялась в верхнем слое и мало отражалась на подстилающем (рис. 2, 2а, 2б).

Зависимость содержания РОУ в водах Енисейского разреза (ст. 5013–5026 $\mu\text{M}\text{C}/\text{л}$) от солёности представлена на рис. 3а. Обратная линейная зависимость содержания РОУ от солёности была по-

казана в работе [19] для сезонов 1997, 1999, 2000 гг. как для Оби, так и для Енисея, и подтверждена в работе [1] для 2007 г. Уравнение зависимости $Y = -17.4X + 715$, полученное для всех образцов РОУ поверхностных вод, отобранных в 2011 г. и представленных на рис. За черными ромбами, демонстрирует устойчивую корреляцию ($r^2 = 0.85$) между концентрацией РОУ и соленостью. При расчете с учетом проб из придонных горизонтов станций внутреннего шельфа 5013–5026 (рис. 3а, белые квадраты), корреляция остается высокой, но ухудшается ($r^2 = 0.79$) из-за точек, лежащих выше линии тренда (выделены пунктиром, станции 5010, 5018, 5011-2 и 5023). Они расположены на внешней границе маргинального фильтра и приурочены к зонам биологических фронтов. Расчетное значение содержания РОУ в Енисейских водах по данным измерений 2011 года составило $715 \mu\text{MC}/\text{л}$ и находилось в пределах значений, ранее установленных в работе [19] (1997 г. – $560 \mu\text{MC}/\text{л}$, 1999 г. – $740 \mu\text{MC}/\text{л}$ и 2000 г. – $679 \mu\text{MC}/\text{л}$). Объем речного стока в 2011 г. также не превышал среднегодовых значений [12].

Диаграмма связи концентраций ВОУ и солености для всех исследованных проб, отобранных на станциях внутреннего шельфа (5013–5026), представлена на рис. 3б. Аппроксимирование всех имеющихся данных обратной логарифмической зависимостью не приводит к положительному результату ($r^2 = 0.24$). При исключении точек в пределах выделенной пунктиром области с высоким содержанием ВОУ применение уравнения зависимости ВОУ от солености ($Y = -58.6 \ln X + 262$) демонстрирует положительный результат ($r^2 = 0.91$). Таким образом, представленное уравнение отражает минимально возможные концентрации ВОУ для данных значений солености, маркирует выпадение ВОУ и исключает его новообразование. Анализ поля значений, образованного исключенными точками (белые квадраты), показывает, что все они относятся к станциям 5018, 5021, 5011-2. Эти станции располагаются в зоне жестких градиентов поверхностной солености, которая сначала уменьшается от 18 psu в районе ст. 5017 до 0.8 psu между станциями 5018 и 5019, а потом резко возрастает до 24.3 на ст. 5021 [14]. Превышение реально зафиксированных концентраций ВОУ над теоретической кривой для станций 5018, 5021, 5011-2 достигает 500 отн. % при среднем $\sim 250\%$. Картина распространения Енисейских вод и положение рассматриваемого разреза позволяет отметить, что все эти станции расположены в зоне жестких гидрологических фронтов, образованных взаимодействием пресноводного стока, прижимающегося к побережью п-ва Таймыр, и умеренно распресненных вод шельфа Карского моря [14]. При рассмотрении зависимости общей концентрации взвеси от со-

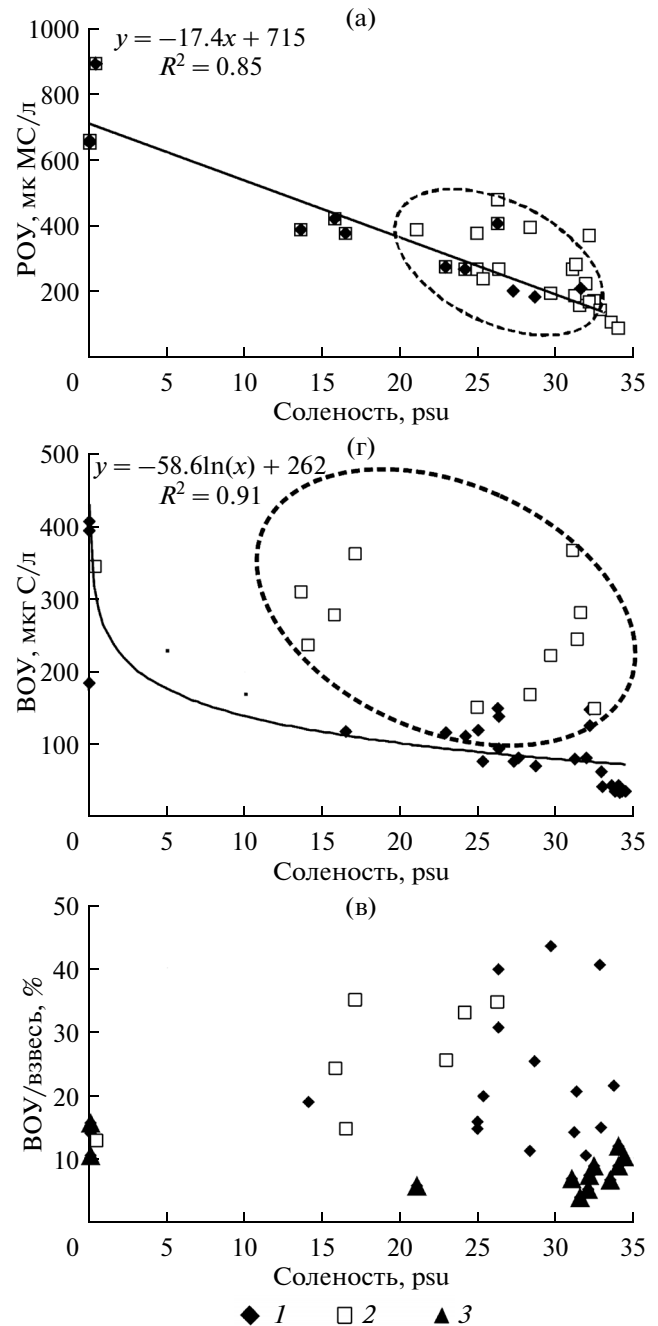


Рис. 3. Графики зависимости содержания РОУ (а).

1 – поверхностные пробы, 2 – пробы всех горизонтов разреза. ВОУ (б) 1 – все пробы разреза, 2 – пробы станций фронтальной зоны, отношения содержания $C_{\text{орг.взвеш.}}/\text{взвесь}$ (в % на сухую взвесь). (в) От солености: 1 – все пробы разреза, 2 – пробы станций фронтальной зоны, 3 – придонные горизонты.

лености исключенные точки не выделяются из общего ряда данных.

Зависимость отношения ВОУ/взвесь от солености для эстуарных зон Оби и Енисея была обоснована в работе [2]. График зависимости распре-

деления содержания $C_{\text{орг}}$ во взвеси (в % $C_{\text{орг}}$ на сухой вес) от солености для станций внутреннего шельфа приведен на рис. 3в. Анализ этого отношения для придонных проб (черные треугольники на рис. 3в) показывает обеднение состава взвеси ОВ. Это явление характерно для всех сезонов наблюдений в эстуариях рек Оби и Енисея [2]. Полученные данные позволили установить, что взвешенное вещество (ВВ) поверхностных горизонтов на “аномальных” станциях (белые квадраты) обогащено органической компонентой, а сами пробы расположены в интервале солености, характерном для биотической части маргинального фильтра [8].

Повышенное содержание ОВ в составе взвеси зафиксировано на большинстве горизонтов станций, располагающихся в северо-западной области исследованного региона (5044, 5045, 5039 и 5042). Для этих станций характерно также увеличение доли растворенного ОВ по отношению к взвешенному. В исследованиях сезона 2007 г. максимум содержания ОВ во взвеси также был зафиксирован в данном районе на ст. 4983, практически совпадающей по своему местоположению со ст. 5045. Минимальная доля ОВ во взвеси выявлена на ряде придонных горизонтов и станциях коллоидной и гравитационной части маргинального фильтра. В результате процессов взмучивания донных осадков приливными и присклоновыми течениями взвешенное вещество придонных горизонтов приближается по составу к веществу донных осадков [2]. В область маргинального фильтра поставляемые массы минеральной взвеси значительно превосходят органическую, несмотря на значительные концентрации ВОУ.

Таким образом, обогащение взвеси органической компонентой зафиксировано в четко локализованных областях исследованного района: в крайней северо-западной области (граничащей с зоной залива Атлантических вод, Новоземельского апвеллинга и таянья льдов), а также в Енисейском эстуарии в зоне, относящейся к биотической части маргинального фильтра [8].

Внешняя зона маргинального фильтра Енисея организована сложно. Помимо явлений горизонтального и вертикального перемешивания выявлены заливы распресненных вод как на, так и под слой пикноклина. Для этой зоны зафиксированы самые большие градиенты изменения значения поверхностной солености, достигающие в районе станций 5022–5011 значений 13.9 psu/миля [14]. Для района станций 5016–5010 отмечены максимумы биомассы мезопланктона под m^2 поверхности, достигающие максимальных значений на ст. 5021 [15], и содержания морских видов фитопланктона в поверхностном слое вод станций 5010, 5019 [16]. Для этой области характерны также повышенные значения концентрации хлоро-

филла [17]. Таким образом, для станций, расположенных в биотической части маргинального фильтра (5018–5011-2), повышенные концентрации ВОУ можно связать с вновь образованным взвешенным веществом автохтонного происхождения.

Для крайней северо-западной области, включающей станции 5044, 5045, 5039, 5041, повышенные содержания как фито-, так и зоопланктона отмечены на ст. 5044. Вблизи этой станции также наблюдается увеличение в морской воде концентрации хлорофилла [14]. В районе расположения ст. 5044 зафиксированы повышенные содержания РОУ и ВОУ. Для ст. 5044 также заметно увеличение доли растворенного вещества относительно взвешенного и превышение значений РОУ и ВОУ верхних горизонтов относительно расчетных консервативных значений. Это дает основание считать, что увеличение концентраций ОВ происходит в основном за счет отмеченной повышенной продуктивности планктонных сообществ.

Необходимо отметить, что рост биомассы фито- и зоопланктона, выявленный на станциях 5033–5035 и обусловленный перестройкой структуры сообществ в присклоновой фронтальной зоне [15, 16], не нашел отражения в изменении концентраций РОУ и ВОУ. Возможно, это связано с четкой локализацией биологического фронта на ст. 5035, обозначенной существенным ростом концентраций хлорофилла в поверхностном слое [17].

Содержание $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое донных осадков. Концентрации $C_{\text{орг}}$ в пробах верхнего слоя донных осадков исследованного района приведены в табл. 2. На основании собственных данных, полученных в 2-х экспедициях [1] (41 станция), с привлечением информации из Базы данных “Углерод” [18] (более 600 станций), была построена карта содержания $C_{\text{орг}}$ в верхнем слое донных осадков (рис. 4). Для построения карты было проведено осреднение содержания углерода для верхнего пятисантиметрового слоя донных осадков исследованных станций и верификация информации, содержащейся в базе данных.

Было подтверждено, что концентрации органического углерода тесно связаны с гранулометрическим составом осадков (рис. 5, [3]). Минимальные концентрации относятся к пескам и песчанистым алевритам, располагающимся выше 50-ти метровой изобаты, повышенные — в зонах накопления алевропелитового материала, располагающихся в эстуарных областях и депо осадко-накопления в средней части желоба Святой Анны. Содержание $C_{\text{орг}}$ в алевритах Новоземельского желоба в целом ниже, чем в алевропелитах желоба Святой Анны, но превышает содержание углерода в песках начала континентального склона.

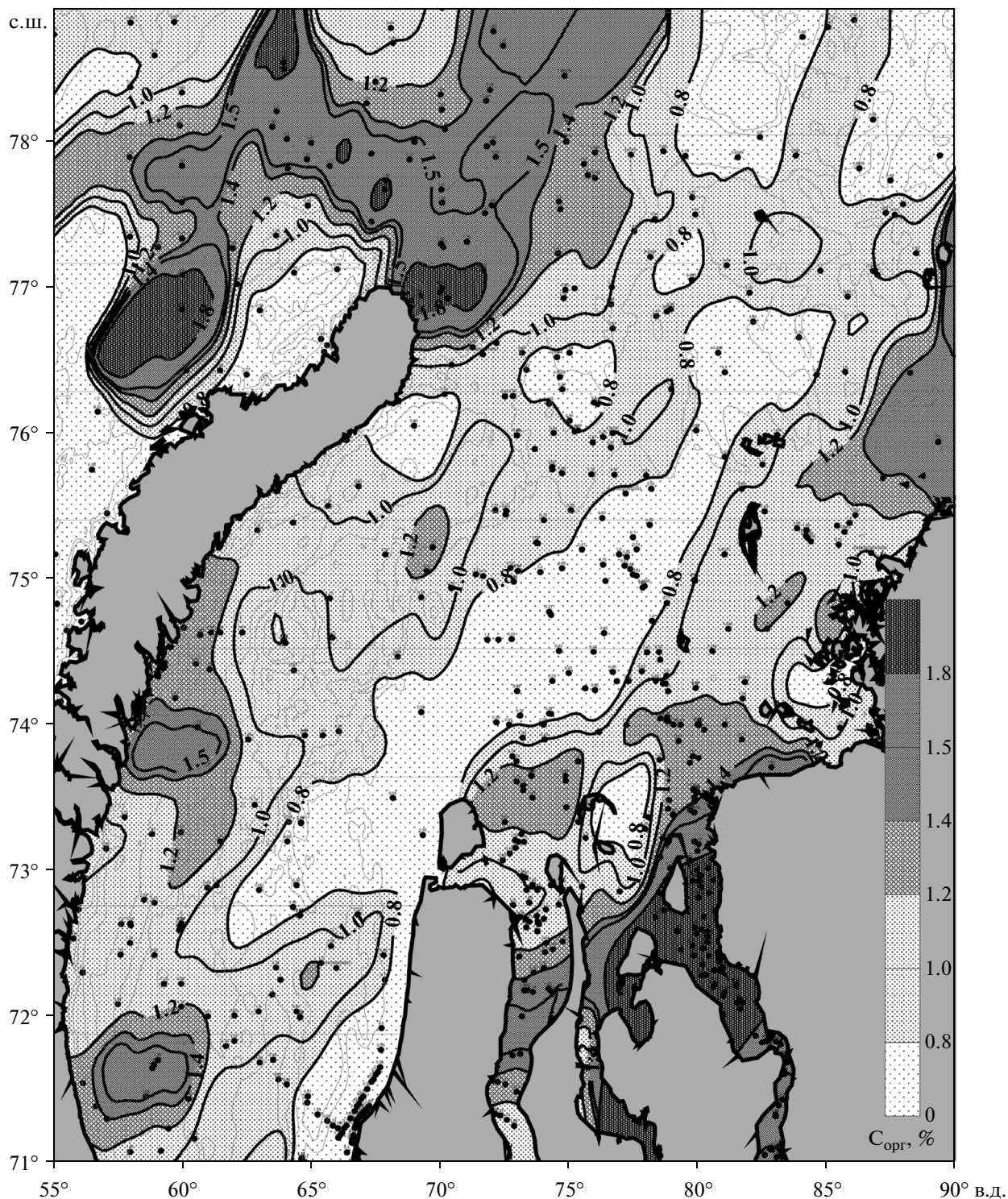


Рис. 4. Карта распределения $C_{\text{орг}}$ в верхнем (0–5 см) слое донных осадков.

На Енисейском профиле (рис. 5, 16) максимумы содержания $C_{\text{орг}}$ отмечены в алевропелитах эстуарной области, в зоне, относящейся к гравитационной части маргинального фильтра (ст. 5018 ср. сод. 2.4% $C_{\text{орг}}$ на сухой вес). Необходимо отме-

тить, что накопление более тонкозернистого алевропелитового материала и повышенное содержание ОУ в донных осадках практически совпадает с зоной проекции маргинального фильтра на дно в осенне-летний период. Пиковое увели-

Таблица 2. Содержание $C_{орг}$ в донных осадках

№ станции	Глубина, м	Литол. гор., см	Горизонт, см	$C_{орг}$, %	№ станции	Глубина, м	Литол. гор., см	Горизонт, см	$C_{орг}$, %	
5007	138	0–0.5	Наилкок	1.42	5016	13.0	0–0.5	Наилкок	2.23	
		0.5–6	0.5–1	1.75			0–0.5	2.20		
			2–6	1.71			0.5–4	2.10		
		6–33	6–8	1.74			4–28	1.96		
			8–13	1.73			4–10	2.03		
			13–20	0.12			10–15	1.89		
			20–33	1.37			15–20	1.81		
5008	22	Наилкок	Наилкок	1.73	5018	11.7	0–2	Наилкок	2.42	
		0.1–5	0.1–0.5	1.14			0–2	2.40		
			0.5–1	1.96			2–32	2–5	2.34	
			1–5	1.31				5–10	2.27	
		5–22	5–10	1.03				10–15	2.38	
		10–15	1.18	15–20			2.16			
		15–22	1.11	25–32			2.56			
5010	28	0–1	Наилкок	1.69	5011-2	31.7	0–1	Наилкок	1.55	
			0.1–0.5	2.08			0–1	1.52		
			0.5–1	1.49			1–3	1.33		
		1–5	1–2	1.52			3–28	3–5	1.46	
			2–5	1.57				5–10	1.32	
		5–33	5–10	1.81				10–15	1.20	
			10–15	0.88				15–20	1.27	
			15–20	1.09				20–28	1.13	
			20–25	1.39			5021	31.0	0–5	Наилкок
		25–33	1.53	0–1			1.89			
5013	28	Наилкок	Наилкок	0.73	1–5	2.01				
		0–5	0–1	0.62	5023	27.0	0–1	Наилкок	0.32	
			1–5	0.51			0–1	0.17		
		5–12	5–12	0.44			1–5	0.25		
		12–16	12–16	1.16			5–10	0.63		
		16–25	16–20	0.17			10–12	10–12	0.45	
20–25	0.24		5024	33.7				0–1	Наилкок	0.47
5014	4	0–1	Наилкок	1.07	0–1	0.59				
			0–1	0.47	1–5	0.46				
		1–13	1–5	0.61	5025	48.0	0–1	Наилкок	0.61	
5–13	5–13	0.61	0–1	0.40						
	1–6	1–2	0.46							
	2–6	0.45								
5015	7.8	0–1	Наилкок	2.80			6–16	6–10	0.35	
			0.5–1	2.66	10–16	0.29				
		1–10	1–2	2.30						5026
			2–5	1.42	0–1	0.85				
			5–10	2.45	1–2	0.85				
		10–32	10–15	2.24	2–28	2–5	0.77			
			15–20	2.38	5–10	0.65				
20–25	3.45									
25–32	2.55									

Таблица 2. Окончание

№ станции	Глубина, м	Литол. гор., см	Горизонт, см	C _{орг} , %	№ станции	Глубина, м	Литол. гор., см	Горизонт, см	C _{орг} , %
			10–15	0.69				0–2	2.42
			15–20	0.64				2–5	1.33
			20–28	0.66			5–8	5–8	1.23
5028	34.5	0–3	Наиллок	1.44			8–26	8–26	
			0–1	0.99	5039	362.0	0–2	Наиллок	1.89
			1–3	0.77			0–1		1.81
		3–8	3–8	0.82			1–2		1.79
5030	41.0	0–5	Наиллок	1.12			2–5	2–5	1.51
			0–1	1.39			5–9	5–9	1.07
			1–5	0.99			9–30	9–15	1.21
		5–20	5–20	0.69				15–20	1.42
5032	54.0	0–1	Наиллок	0.54				20–25	1.19
			0–1	0.39	5042	470.0	0–4	Наиллок	1.56
		1–2	1–2	0.48			0–1		1.61
		2–21	2–5	0.38			1–4		1.41
			5–10	0.29			4–7	4–7	1.42
			10–15	0.35			7–30	7–10	1.49
			15–21	0.62				10–15	1.69
5033	118.0	0–5	Наиллок	0.86				15–20	1.51
			0–1	0.83				20–25	1.58
			1–2	0.81				25–30	1.83
			2–5	0.17	5044	154.0	0–3	Наиллок	0.91
		5–6	5–6	0.68			0–1		0.83
		6–28	6–10	0.48			1–3		0.86
			10–15	0.53			3–12	3–7	0.62
			15–20	0.56				7–12	0.75
			20–28	0.84	5045	537.0	0–0.5	Наиллок	1.59
5034	216.0	0–2	Наиллок	1.43			0–0.5		2.41
			0–1	1.31			0.5–2	0.5–2	1.50
			1–2	1.63			2–28	2–5	2.25
		2–4	2–4	1.36				5–10	2.13
		4–29	4–10	1.24				10–15	2.01
			10–15	0.95				15–20	2.00
			15–20	0.77				20–25	2.08
			20–29	0.74				25–28	2.15
5037	317.0	0–5	Наиллок	1.85					

Примечание. Литол. гор. – горизонт осадка, выделенный согласно литологическому описанию по литологическим признакам.

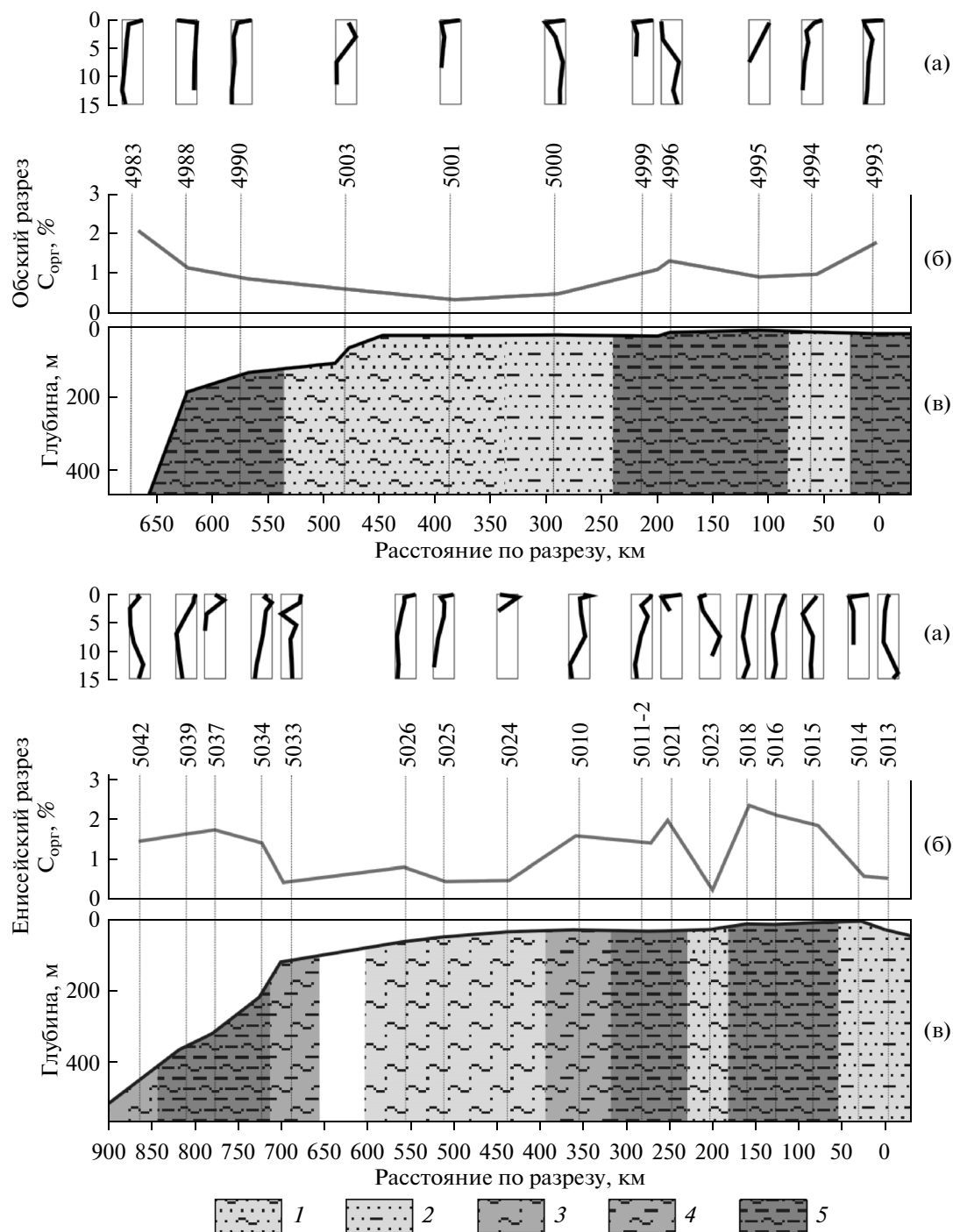


Рис. 5. (а) – Относительные вертикальные изменения содержания C_{org} по колонке донных осадков, (б) – распределение C_{org} в верхнем слое донных осадков по разрезу, (в) – профиль дна и гранулометрическая характеристика осадка. 1 – алевритовый песок, 2 – пелитовый песок, 3 – песчаный алеврит, 4 – пелитовый алеврит, 5 – алевропелит.

чение стока в паводковый период не выявляется в осаднении обогащенного ОВ тонкозернистого материала за пределами эстуарной зоны. Таким образом, можно предположить, что осадочный материал, поступающий с водами весеннего паводка, не захоранивается в ближней шельфовой зоне, а сразу транспортируется с паводковыми

водами в более глубоководные районы шельфа Карского моря.

Второй максимум содержания C_{org} относится к промежуточному депо накопления осадочного материала в транзитной зоне желоба Святой Анны у северной оконечности Новой Земли на глубинах более 150 м, причем осадочный материал

поступает туда не только из бассейна Карского моря, но и из северо-восточной части Баренцева [5]. Для хорошо перемытых песчаных осадков глубин 30–50 м характерны пониженные концентрации $C_{орг}$ (например на ст. 5032 – 0.4% $C_{орг}$).

Актуальной проблемой для исследования цикла углерода является трансформация ОВ на границе вода–осадок. Изменения концентраций и состава ОВ были отмечены в работах [6]. Однако распространенность этого явления оценена не была. Тщательное разделение колонок донных осадков при отборе позволило установить масштабы обогащения их верхних горизонтов органическим веществом.

Обогащение органическим углеродом слоев наилка (0–0.1 см) или поднаилка (0.1–0.5 см) относительно среднего содержания $C_{орг}$ в верхнем 5-см слое осадка выявлено в большинстве исследованных проб (рис. 5а). Увеличение концентрации $C_{орг}$ чаще всего фиксируется в слое поднаилка (табл. 2), реже смещаясь в наилку. Обогащение $C_{орг}$ этих слоев относительно среднего содержания $C_{орг}$ по всем станциям Енисейского разреза составило 21% ($r^2 = 23\%$), Обского разреза – 49% ($r^2 = 52\%$). Максимальные значения достигали величин 80% в песках эстуарной зоны Енисея (5014) и 150% (ст 4994) в песках устья Оби. Данное явление отмечается во всех типах осадков (пески, алевропелиты, пелиты), не локализуется в каком-либо районе исследованного бассейна и характерно для всей исследованной области. Для этого слоя также характерно наличие максимумов биомассы микроорганизмов, рост их интегральной активности, изменение изотопного состава и состава молекулярных маркеров [7]. Таким образом, можно говорить что процессы, описанные выше, характерны не только для рассмотренных в работе [7] станций, но и для всей исследованной акватории. Открытым остается вопрос о сезонной изменчивости концентраций $C_{орг}$ в поверхностном слое (0–0.5 см). Все исследованные пробы были отобраны в осенне-летний сезон, существенно позже окончания весеннего пика цветения фитопланктона [11]. Увеличение содержания углерода может быть связано с сезонной локализацией поступившего автохтонного ОВ в верхнем слое осадка с последующей его биогеохимической трансформацией. Для выявления сезонности процессов трансформации ОВ в верхнем слое осадков, региональных особенностей седиментогенеза и начальных стадий диагенеза необходимо проведение исследований в конце зимнего периода, которое позволит сделать вывод о постоянном или временном существовании, видимо, очень активной трансформационной зоны.

ВЫВОДЫ

Распределение ВОУ Карского моря тесно связано как с распространением вод речного стока, так и с локальными изменениями обилия планктона. Наибольшие концентрации ВОУ зафиксированы для вод гравитационной части маргинального фильтра, расположенной на выходе из Енисейской губы (станции 5007–5015), а наиболее заметное обогащение взвеси органической компонентой – в биотической части маргинального фильтра [8] (станции 5010, 5018, 5011-2, 5021) и в районе залива атлантических вод и Новоземельского апвеллинга (станции 5039–5045). Обогащение взвеси автохтонной компонентой тесно связано с наблюдаемыми максимумами численности планктона в выявленных в ходе экспедиции фронтальных зонах.

Распределение РОУ в поверхностных водах носит консервативный характер, изменение его концентраций происходит за счет смешения речных и морских вод. На придонных горизонтах станций 5010, 5018, 5011-2 и 5021, приуроченных к зонам биологических фронтов, выявлено превышение содержания РОУ относительно рассчитанных консервативных значений. Для северо-западной области исследованного района, в зоне смешения вод Карского моря с водами Центрального Арктического бассейна станций 5042, 5044, 5045 зафиксировано увеличение содержания как РОУ, так и ВОУ в толще воды, маркирующее существование зоны повышенной биопродуктивности.

Подтверждена связь содержания ОУ в донных осадках с их гранулометрическим составом. Повышенные содержания ОУ фиксируются в алевропелитовых осадках эстуарных зон рек и локальных депо осадконакопления желоба Святой Анны. Пониженные содержания ОУ наблюдаются в переотлагаемых песках, залегание которых приурочено к 50-метровой изобате.

Выявлено обогащение верхнего тонкого слоя осадков (наилка и поднаилка) органическим углеродом. Увеличение содержания ОУ в поверхностном слое осадков характерно для всех типов осадков всего исследованного района. Анализ вертикального распределения углерода в верхнем слое донных осадков четко локализует барьерную зону вода–осадок в верхнем слое толщиной менее 1 см.

Авторы благодарят за предоставленные данные о массовых концентрациях взвеси М.Д. Кравчишину [4], научный состав экспедиции в целом, М.В. Флинта и А.Ю. Леин в отдельности за ценные советы и критику, а также экипаж НИС “Академик Мстислав Келдыш” за постоянную помощь. Особая благодарность Е.А. Романкевичу за консультации и определение направления исследований.

Работа выполнена в рамках государственного заказа № 0149-2014-0036. Аналитическая обработ-

ка выполнена при поддержке правительства РФ (грант № 14.Z50.31.0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Н.А., Пересыткин В.И., Поняев М.С.* Органический углерод воды, взвеси и донных осадков западной части Карского моря // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5. С. 748–757.
2. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море // Отв. ред. Лисицын А.П. М.: Изд-во ИП Матушкина И.И., 2012. С. 284–288.
3. *Кошелева В.А., Яшин Д.С.* Донные осадки Арктических морей России / Под ред. Грамберга И.С. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. С. 112.
4. *Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова А.Ю. и др.* Генезис и пространственное распределение концентрации взвеси в Карском море в период наибольшего сокращения Арктической ледовой шапки // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 687–708.
5. *Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р.* Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
6. *Леин А.Ю., Беляев Н.А., Кравчишина М.Д. и др.* Изотопные маркеры трансформации органического вещества на геохимическом барьере вода–осадок // Докл. РАН. 2011. Т. 436. № 2. С. 228–232.
7. *Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С. и др.* Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море в сентябре 2011 г. // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 643–679.
8. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
9. *Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е. и др.* Потоки осадочного вещества в Карском море // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 748–758.
10. *Маккавеев П.Н., Мельникова З.Г., Полухин А.А. и др.* Гидрохимическая характеристика вод Западной части Карского моря // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 540–551.
11. *Макаревич П.Р.* Годовой сукцессионный цикл пелагических фитоценозов эстуарных экосистем северных морей России // *Альгология*. 2008. Т. 18. № 4. С. 386–392.
12. Обзор состояния загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2011 г. / Под ред. Израэля Ю.А. и др. М.: Росгидромет, 2012. С. 19.
13. Спецвыпуск // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 5.
14. *Завьялов П.О., Ижицкий А.С., Осадичев А.А. и др.* Структура термохалинных и биооптических полей на поверхности Карского моря в сентябре 2011 г. // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 514–525.
15. *Арашкевич Е.Г.* Отчет отряда зоопланктона // Научный отчет по 59 рейсу НИС “Академик Мстислав Келдыш” (12 сентября–7 октября 2011 г.). Т. II. Архив ИО РАН.
16. *Суханова И.Н.* Отчет отряда фитопланктона // Научный отчет по 59 рейсу НИС “Академик Мстислав Келдыш” (12 сентября–7 октября 2011 г.). Т. II. Архив ИО РАН.
17. *Демидов А.Б., Мошаров С.А., Маккавеев П.Н.* Роль абиотических и биотических факторов в формировании первичной продукции Карского моря в осенний период // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 4. С. 592–604.
18. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
19. *Kohler H., Meon B., Gordeev V.V. et al.* Dissolved organic matter (DOM) in the estuaries of Ob and Yenisei and the adjacent Kara Sea, Russia // *Siberian river runoff in the Kara Sea* / Ed. Stein R. et al. Amsterdam: Elsevier Science, 2003. P. 281–308.

Organic Carbon in Waters, Suspended Matter, and Upper Layer Bottom Sediments of the Central Part of the Kara Sea

N. A. Belyaev, M. S. Ponyaev, A. M. Kiriutin

Based on materials of 59 cruise of the R/V “Academic Mstislav Keldysh” to the central part of the Kara Sea in the autumn–summer season of 2011, concentrations of dissolved (DOC), particulate (POC) organic carbon and total organic carbon (TOC) in surface sediments were estimated. The river runoff determining influence to DOC and POC concentrations changes in the Kara Sea was shown. POC concentrations autochthonous component enrichment in the areas of biological fronts was detected. An increasing DOC concentrations in the Novaya Zemlya northern tip frontal zone was marked. Based on the analysis of collected and published data an upper layer of bottom sediments TOC distribution map of the the central part of the Kara Sea was made. A significant TOC enrichment (>20%) of thin upper (0–0.5 cm) layer of bottom sediments was found. It was noticed in most of the investigated stations, independent of both the lithological composition of the sediments and the location of the sampling stations.