

УДК 551.465

ДИАТОМЕИ И ВОДНЫЕ ПАЛИНОМОРФЫ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ЗАЛИВОВ БЕЛОГО МОРЯ КАК ИНДИКАТОРЫ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАРГИНАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАХ РЕК

© 2016 г. Е. И. Полякова¹, Е. А. Новичкова², А. П. Лисицын²,
В. П. Шевченко², М. Д. Кравчишина²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: ye.polyakova@mail.ru

e-mail: enovichkova@mail.ru, lisitzin@ocean.ru, vshevch@ocean.ru, kravchishina@ocean.ru

Поступила в редакцию 23.03.2014 г.

Изучены диатомовые водоросли, водные палиноморфы и гранулометрический состав поверхностных донных осадков из заливов Белого моря в рамках программы исследований областей маргинальных фильтров (МФ) рек Северная Двина, Онега и Кемь. Выделено три фазы формирования ассоциаций микроводорослей в поверхностных осадках по мере удаления от устьев рек, которые характеризуются последовательным сокращением доли пресноводных видов диатомей и зеленых водорослей, резкими изменениями концентраций морских диатомей и диноцист, что определяется изменениями солености вод, гранулометрического состава осадков, количественным распределением взвеси и продуктивностью вод на различных ступенях МФ.

DOI: 10.7868/S0030157416020180

ВВЕДЕНИЕ

Современный подход к изучению донных осадков Белого моря основывается на комплексном изучении системы водосбор—море, который успешно применяется на практике с 2000 г. Лабораторией физико-геологических исследований ИО РАН [18, 19]. Полученные к настоящему времени данные показали, что основные процессы трансформации взвешенных и растворенных веществ водосборных бассейнов происходят в пределах устьев рек и в заливах моря, представляющих собой типичные маргинальные фильтры (МФ) [4, 7, 11, 12, 14–17, 20, 21, 38]. Эти фильтры представляют собой природную систему, состоящую из гравитационной, физико-химической (коагуляционно-сорбционной) и биологической частей, последовательно сменяющих друг друга. Одним из основных компонентов взвеси в пределах МФ арктических морей является речной и морской фитопланктон, аккумуляция которого в осадках, также как и биологическая продуктивность вод, контролируются физико-химическими процессами в зоне смешения речных и морских вод [16, 17, 21, 22, 25, 28, 37].

В настоящем сообщении представлены новые результаты детальных исследований микроводорослей в поверхностных осадках крупнейших за-

ливов Белого моря и рассмотрены особенности формирования их ассоциаций на различных ступенях МФ. Объектами исследований стали диатомовые водоросли и водные палиноморфы (цисты морских видов диофлагеллат и пресноводные зеленые водоросли), которые являются надежными индикаторами ледово-гидрологических и седиментационных обстановок в Белом море [22, 23, 36].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены 55 образцов грунта (верхние 0–5 см), полученных в рейсах НИС “Профессор Штокман”, “Эколог” и “Иван Петров” в 2001–2006 гг. (таблица, рис. 1) сотрудниками Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН из заливов Белого моря — Двинского, Онежского и Кемской губы (рис. 1). Отбор проб проводился дночерпателем с глубин моря от 0.3 до 80 м.

После предварительного вакуумного высушивания образцов в российско-германской Лаборатории полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта (АНИИ, С.-Петербург) их техническая обработка для целей диатомового анализа была выполнена в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН по методике Battar-

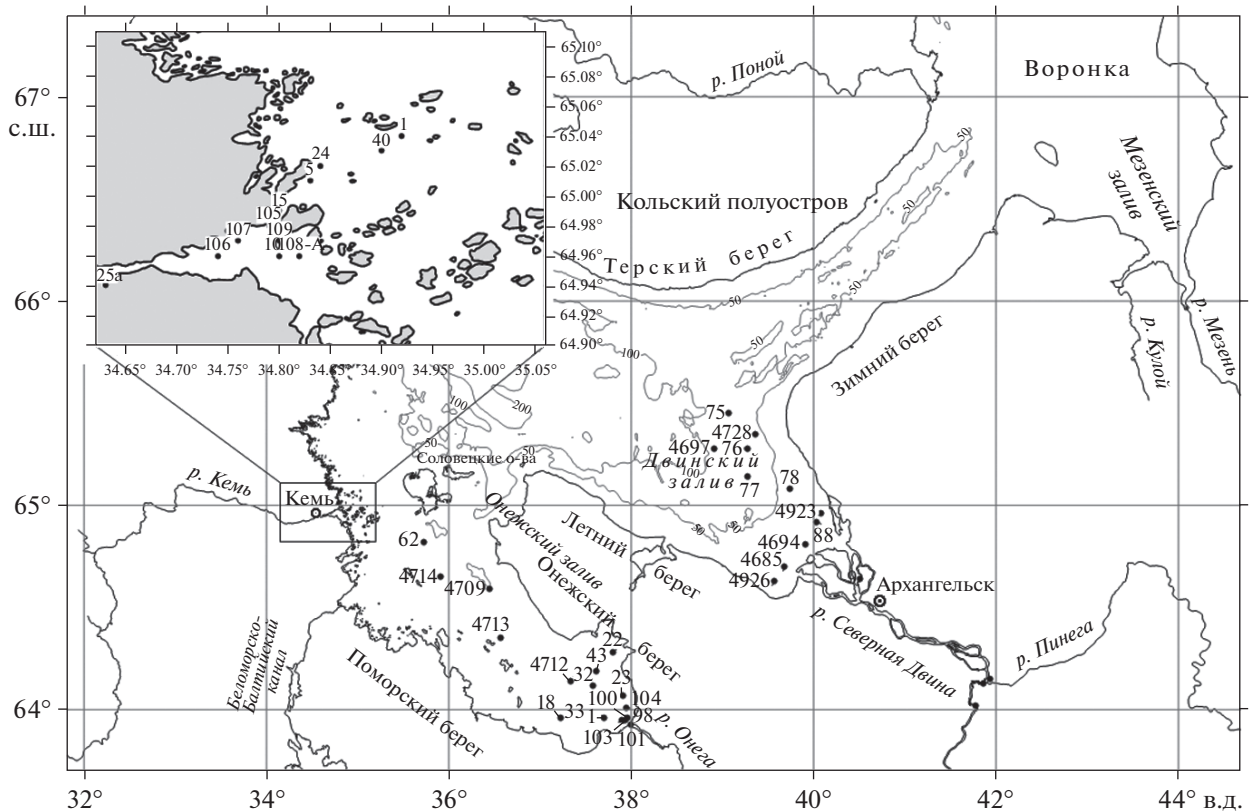


Рис. 1. Карта отбора проб донных осадков из Двинского, Онежского заливов и залива Кемская губа (на врезке).

bee [29], а постоянные препараты приготовлены с использованием смолы Narthax с индексом рефракции 1.68. Диатомеи изучались в световом микроскопе Axioskop-40 (Zeiss) при увеличении $\times 1000$ раз. В каждом исследованном образце проводился подсчет концентраций диатомей в осадках и процентное соотношение основных экологических групп диатомей (морские, ледово-морские, пресноводные виды). Обработка образцов для анализа водных палиноморф выполнена по методике, используемой в Институте полярных и морских исследований им. А. Вегенера (AWI, Потсдам) [23, 33]. Для определения концентраций диноцист на начальной стадии обработки образцов в предварительно взвешенный осадок добавлялись таблетки с фиксированным количеством спор *Lycopodium clavatum* [23, 33].

Для оценки влияния речного стока помимо содержания в диатомовых ассоциациях пресноводных речных видов [30, 37] использовался CD-критерий [34, 35], который представляет соотношение содержания в составе ассоциаций водных палиноморф пресноводных зеленых водорослей и цист морских видов динофлагеллат. Проведены также подсчеты АН-критерия (отношение содержания в ассоциациях водных палиноморф цист автотрофных видов динофлагеллат к цистам гете-

ротрофных видов), который используется в арктических морях в качестве индикатора поступления Североатлантических вод [10]. Полученные по микроводорослям данные рассматривались в зависимости от среднемноголетней летней солености и температуры поверхностных вод [2, 40 (<https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>)], глубины бассейна и удаленности от устьев рек (таблица). При построении профилей по различным параметрам ассоциаций микроводорослей, часть данных, расположенных на одинаковом расстоянии от устья реки, не использовалась.

Гранулометрический состав донных осадков заливов определялся в Аналитической лаборатории ИО РАН А.Н. Рудаковой и Т.Н. Алексеевой по стандартной методике [24]. Определение содержания общего углерода проводились В.П. Шевченко в Институте полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Бремерхафен, Германия). Органический углерод (C_{org}) определялся методом кулонометрического титрования углекислого газа, выделяющегося при высокотемпературном сжигании ($t = 800^\circ C$) проб, предварительно лишенных при помощи 3 M HCl неорганического углерода карбонатов, в потоке кислорода. Содержание органического углерода определялось на приборе LECO CS 125 [4].

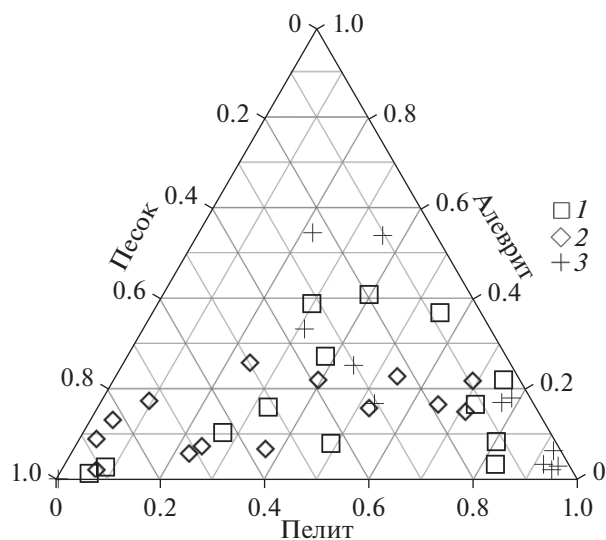


Рис. 2. Гранулометрический состав осадков заливов Кемская губа (1), Онежский (2) и Двинский (3).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОСАДКОВ В ЗАЛИВАХ БЕЛОГО МОРЯ

Речной сток, поставка биогенных элементов, продукционно-деструкционные и многие другие процессы в Белом море имеют ярко выраженный сезонный характер, что определяет пространственно-временные изменения состава и количественного распределения взвеси в пределах его акватории [3, 14, 21, 31, 32]. Для рек, впадающих в Белое море, характерны в основном низкие среднегодовые или летние концентрации взвеси – от 1 до 50 мг/л, при среднем содержании взвеси для рек мира 490–500 мг/л [17, 18, 21]. Средняя концентрация взвеси в поверхностных водах Бассейна Белого моря за пределами МФ рек летом обычно не превышает 1 мг/л [18]. Максимальная концентрация взвеси соответствует весеннему половодью и весеннему цветению фитопланктона (апрель–май) [13, 18, 31]. Второй, менее выраженный максимум, наблюдается в сентябре и связан обычно с осенним половодьем и некоторым увеличением биомассы фитопланктона [8, 13, 18, 31]. Начало биологической весны в Белом море отмечается в первой половине апреля, когда подо льдом происходит бурное развитие ледово-морских диатомей. Максимум “цветения” диатомового планктона в море наблюдается в мае–июне, а динофлагеллат – в июле. Осенняя вспышка фитопланктона обычно выражена слабо [8].

Благодаря системным исследованиям последних лет [18, 19], проводившимся в акватории Белого моря, установлены следующие региональ-

ные особенности распределения концентраций и состава взвеси в заливах Белого моря – Двинском, Онежском и Кемской губе. Для области МФ р. Северной Двины отмечена значительная межгодовая изменчивость в поступлении и концентрации взвеси в половодье (от 9 до 16 мг/л за 2000–2006 гг.) [11, 13–15, 21–23]. Во время половодья МФ растянут на большие расстояния, в отличие от сезона летней межени, а его внешняя граница у Зимнего берега может достигать Горла [13, 31]. В связи с различным объемом поступления речных вод в течение года, границы зоны МФ Северной Двины меняются, однако оценка количественного и вещественного состава взвеси показала, что его положение ограничено изохалинами 1 и 24 епс [21, 31]. В Онежском заливе влияние речного стока не столь существенно, как в Двинском, однако также наблюдается резкое сокращение среднесезонных концентраций взвеси на границе река–море с 31.9 мг/л до 1.55 мг/л при повышении солёности до 21–22 епс (2002, 2008 гг. [7, 18]). Исследование взвеси в области МФ р. Кемь показало, что в пределах изохалин 0.1 и 17 епс ее концентрация варьирует от 3.2 до 0.9 мг/л соответственно. В водах с солёностью ~7 епс значение концентрации может увеличиваться и достигать 14.4 мг/л. Но причиной такого повышения является не солёность, а рельеф дна. В этом месте на мелководье (глубины ~0.5 м) идут процессы ресуспензии вследствие волнения [9].

Исследованный нами поверхностный слой (0–5 см) донных осадков заливов отличается пестрым гранулометрическим составом с преобладанием песчаной фракции (рис. 2). Для Двинского залива по мере удаления от устья р. Северной Двины характерно уменьшение содержания песчаных фракций и, наоборот, увеличение содержания пелитовых фракций в составе донных осадков, что обусловлено гидродинамическим режимом и выпадением крупных фракций взвеси в осадок на первой ступени маргинального фильтра реки [15, 21]. В Онежском заливе на большей части станций в поверхностном слое донных осадков преобладают грубозернистые пески (рис. 2) [7], что обусловлено относительно небольшими глубинами и наличием интенсивных приливных течений [21]. Для Кемской губы также характерны песчаные осадки [4, 38].

Содержание $S_{орг}$ в поверхностном слое осадков в Онежском и Кемском заливах изменяется от 0.05 до 3.1% (рис. 2). Минимальное значение $S_{орг}$ отмечено в песчаных осадках Онежского залива, а максимальное – в алеврито-пелитовых осадках (>90% фракции <0.1 мм) района МФ р. Кемь (рис. 2). Коэффициент корреляции между $S_{орг}$ и суммой алевритовых (0.1–0.01 мм) и пелитовых (<0.01 мм) фракций для 19 проб составил 0.3, что меньше среднего значения для арктиче-

Географическое положение исследованных проб поверхностного слоя донных осадков в Двинском и Онежском заливах и Кемской губе Белого моря; концентрации водных палиноморф (единицы клеток/г сухого осадка) и диатомей (10^3 створок/г сухого осадка); значения средней многолетней солености и температуры поверхностных вод [40] и granulометрического состава осадков

№ станции	Широта северная, град	Долгота восточная, град	Рейс*	Концентрации водных палиноморф, ед/г	Концентрации диатомей, $10^3 \times$ створок/г	Глубина моря, м	T летняя, °C	S летняя, епс	Песок, %	Алеврит, %	Пелит, %
1	65.04	34.92	ЭК01	7950.2	3513.5	7.8	6.61	26.647	7.89	36.48	54.85
5	65.01	34.83	ЭК01	4087.0	3603.4	8.6	6.61	22	29.15	35.93	27.53
9	64.64	40.51	ДВ08	0.0	972.7	река	—	0	33.12	30.91	28.98
24	65.02	34.84	ЭК02-1	2434.7	3799.1	8.7	6.61	24	60.57	9.94	25.92
15	64.99	34.8	ЭК01	583.8	221.2	11	6.61	20	86.19	2.64	8.05
16	64.97	34.8	ЭК02-1	1619.8	3523.8	5	6.61	20	11.45	8.1	79.17
18	63.96	37.22	ЭК04	2401.3	82.0	9.5	7.595	24.0405	65.73	1.43	5.05
19	64.13	41.86	ДВ08	0.0	4475.8	река	—	0	99.35	0.1	0.55
22	64.28	37.8	ЭК04	4205.8	2039.5	7	7.97	23.254	31.26	15.35	51.09
23	64.07	37.91	ЭК04	15354.7	4939.0	7.8	8.07	22.9955	17.18	15.36	60.35
25	64.15	41.93	ДВ08	0.0	4.4	река	—	0	—	—	—
29	64.02	41.77	ДВ08	0.0	4.0	река	—	0	—	—	—
32	64.12	37.58	ЭК02-2	9780.2	2031.2	15.8	7.87	23.385	9.11	21.3	67.98
33.1	63.96	37.7	ЭК02-2	12728.2	182.6	9	8.07	22.9955	86.8	8.74	3.48
40	65.03	34.9	ЭК02-1	5192.4	2415.5	20.8	6.61	25	17.92	37.44	36.31
43	64.19	37.61	ЭК02-2	2401.3	3733.3	15.03	7.87	23.385	—	—	—
62	64.82	35.72	ЭК02-2	7700.9	—	20	6.62	26.3545	39.16	20.29	19.23
75	65.45	39.07	ЭК02-2	19473.5	4680.8	75.8	6.99	23.815	6.03	16.83	76.61
76	65.28	39.28	ЭК02-2	12001.2	1706.6	66.2	6.965	23.5215	4.87	3.29	91.45
77	65.14	39.28	ЭК02-2	2936.7	1185.0	75	7.39	22.706	29.82	16.22	51.3
78	65.08	39.74	ЭК02-2	17887.3	581.4	31.8	7.375	22.3375	1.51	6.18	92.18
88	64.92	40.03	ЭК02-2	605.1	750.7	12.7	7.85	20.561	23.47	54.19	22.09

Таблица. Окончание

№ станции	Широта северная, град	Долгота восточная, град	Рейс*	Концентрации водных палиноморф, ед/г	Концентрации диатомей, $10^3 \times$ × створок/г	Глубина моря, м	T летняя, °С	S летняя, епс	Песок, %	Алеврит, %	Пелит, %
98	63.93	38	ЭК04	2776.5	305.8	4.2	11.836	12.089	—	—	—
100	63.96	37.96	ЭК04	3203.7	389.5	3.9	8.215	21.484	—	—	—
101	63.95	37.93	ЭК04	436.9	74.4	2.7	8.215	21.484	67.36	15.87	8.62
103	63.95	37.9	ЭК04	5269.4	146.9	4	8.07	22.9955	61.93	9.91	3.44
104	64.01	37.94	ЭК04	10101.8	2197.1	4.6	8.07	22.9955	13.97	14.71	70.57
105	64.98	34.79	ЭК04	8270.9	7931.1	3	2.92	17	32.44	25.39	35.82
106	64.96	34.74	ЭК04	0.0	1647.6	1.1	2.92	8	13.8	3.17	80.47
107	64.97	34.76	ЭК04	8808.9	8585.3	0.8	2.92	12	3.23	21.11	72.13
108	64.96	34.8	ЭК04	1315.0	981.5	3.4	2.92	20	38.75	7.09	43.86
109	64.97	34.8	ЭК04	386.9	1672.5	3.9	2.92	20	44.62	13.83	28.49
4685	64.7	39.68	ПШ01	—	363.4	10	8.275	20.6025	10.45	53.74	35.81
4694	64.81	39.91	ПШ01	4232.8	—	10	7.865	21.089	3.75	17.88	78.38
4697	65.28	38.91	ПШ01	5339.5	1396.5	87	7.015	24.103	3.97	2.14	93.89
4709	64.59	36.44	ПШ01	1368.2	—	56.3	6.945	25.8855	49.56	5.79	32.39
4712	64.14	37.33	ПШ01	596.7	—	36.1	7.685	23.7905	66.38	7.15	23.84
4713	64.35	36.57	ПШ01	—	—	26.7	7.155	25.412	67.57	5.35	21.64
4714	64.65	35.91	ПШ01	5903.8	—	51.9	6.675	26.2825	16.95	16.48	39.44
4728	65.35	39.36	ПШ01	2208.8	795.0	56.5	6.965	23.5215	30.17	25.04	44.4
4923	64.96	40.08	ПШ55	6154.1	4162.6	12	7.85	20.561	2.36	2.85	93.81
4926	64.63	39.57	ПШ55	897.4	361.0	15	8.275	20.6025	—	—	—
108-A	64.96	34.82	ЭК04	6159.0	3125.8	0.3	2.92	20	10.97	15.84	69.54
25a	64.94	34.63	ЭК01	—	138.2	2.7	—	0	92.08	1.3	5.9

* ЭК01 – Эколог, 2001 г.; ЭК02 – Эколог, 2002 г. (1, 2 этапы); ЭК04 – Эколог, 2004 г.; ДВ08 – Северная Двина, 2008 г.; ПШ01 – Профессор Штокманн, 2001 г.; ПШ55 – Профессор Штокманн 55, 2003 г.

ских морей в целом [26]. Вероятнее всего, низкая корреляционная зависимость связана с активным гидродинамическим режимом в Онежском заливе.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ЗАЛИВОВ БЕЛОГО МОРЯ

Анализ количественного распределения диатомей и водных палиноморф в поверхностных осадках Двинского и Онежского заливов и Кемской губы, а также прилегающих эстуариях рек выявил закономерное повышение концентраций микроводорослей в более тонкозернистых осадках (таблица, рис. 3), что обусловлено, в первую очередь, размерностью доминирующих видов диатомей (10–100 мкм) и диноцист (32–100 мкм). При содержании алеврито-пелитовой фракции <35–40% суммарная численность диатомей обычно не превышает 200 тыс. створок/г сухого осадка, а при увеличении доли этой фракции (>40%) резко возрастает практически на порядок. Максимальные концентрации диатомей и водных палиноморф (до 8.6 млн створок/г и 19.5 тыс. ед./г) приурочены к илам с содержанием алеврито-пелитовой фракции 80–100%.

Исследованные пробы микроводорослей получены из различных по гидрологическим и физико-географическим условиям районов заливов (таблица, рис. 3), на расстоянии от устьев рек до 110 км (Двинский залив), 160 км (Онежский залив), 18 км (Кемская губа), где глубины моря достигают 75.8, 36.1 и 20.8 м, соответственно (рис. 3). Среднегодовалая летняя (апрель–сентябрь) соленость поверхностных вод в этих заливах варьирует [2, 40] от 0 до 26.3 (Двинский), от 0 до 23.4 (Онежский) и от 0 до 26.7 епс (Кемская губа), а среднегодовалая летняя температура поверхностных вод составляет 2.9°–7.6°; 6.6°–11.8° и 2.9°–7.7°С соответственно. Однако большая часть проб во всех заливах получена в диапазоне солености 20–27 епс, температур 6–8°С и с глубин до 20 м (таблица, рис. 3).

Установлены следующие региональные особенности формирования ассоциаций диатомей и водных палиноморф в исследованных заливах.

Двинский залив (рис. 1) ежегодно получает более половины всего речного стока в Белое море [27], амплитуда приливно-отливных изменений уровня моря составляет 0.5–1.2 м [5] (рис. 3). В протоках дельты р. Северной Двины при солености ~0 епс установлены в основном пресноводные диатомей, в составе которых доминируют планктонные виды (*Aulacoseira italica*, *A. subarctica*, *A. granulata*) и разнообразные перифитонные и бентосные виды (*Fragilaria construens*, *F. capucina*, *Tabellaria flocculosa*, *Amphora ovalis*), типичные для северных рек, и единичные створки морских ви-

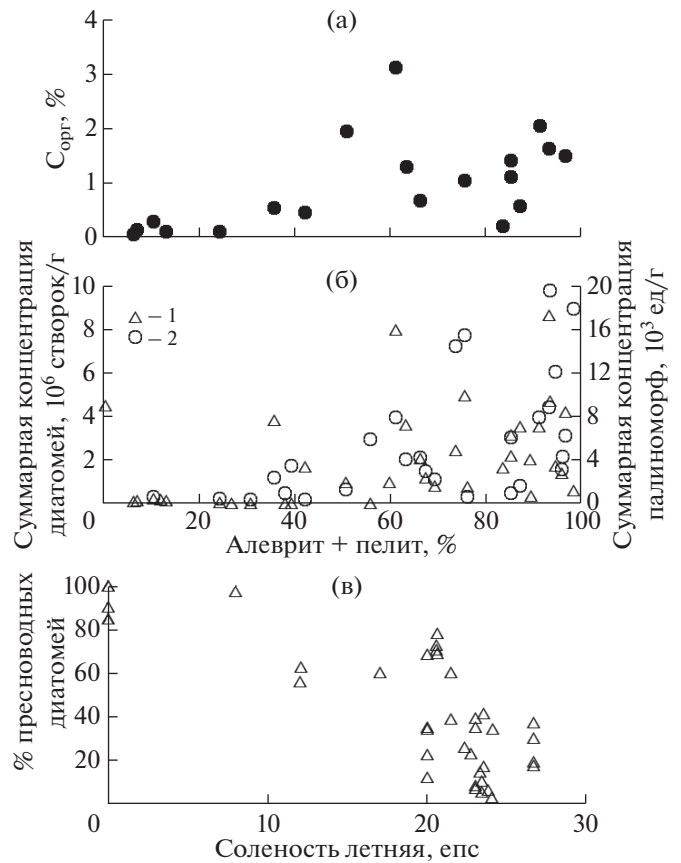


Рис. 3. Зависимости суммы алевритовой и пелитовой фракций (%) от а) содержания C_{орг} (%) в осадках заливов; б) суммарных концентраций диатомей (1; 10⁶ створок/г) и водных палиноморф (2; 10³ ед./г). в) Зависимости среднегодовой летней солености поверхностных вод (епс) и содержания пресноводных диатомей (%) в осадках заливов.

дов. Аномально высокие концентрации диатомей (до 4.4 млн. створок/г осадка, рис. 3) установлены в излучине р. Северной Двины (рис. 4, 5), что соответствует, вероятно, 1-й (гравитационной) ступени МФ, где при замедлении скорости речного потока происходит лавинное выпадение терригенной части взвеси, включая взвешенный органический углерод (ВОУ) [17, 26]. Подтверждением этого служит высокое содержание песчаной фракции в исследованной пробе (99.4%, таблица).

На барьере река–море, на расстоянии 15–20 км от устья реки наблюдается быстрое увеличение среднегодовой летней солености поверхностных вод до 18–20 епс и происходит резкое снижение концентрации взвеси, что соответствует II-й, физико-химической (или коагуляционно-сорбционной) ступени МФ [14, 17, 21]. Ассоциации микроводорослей в поверхностных осадках из этого района характеризуются низкими концентрациями диатомей (<0.75 млн створок/г) и водных палиноморф (< 100 ед./г) (рис. 3, 4), что в це-

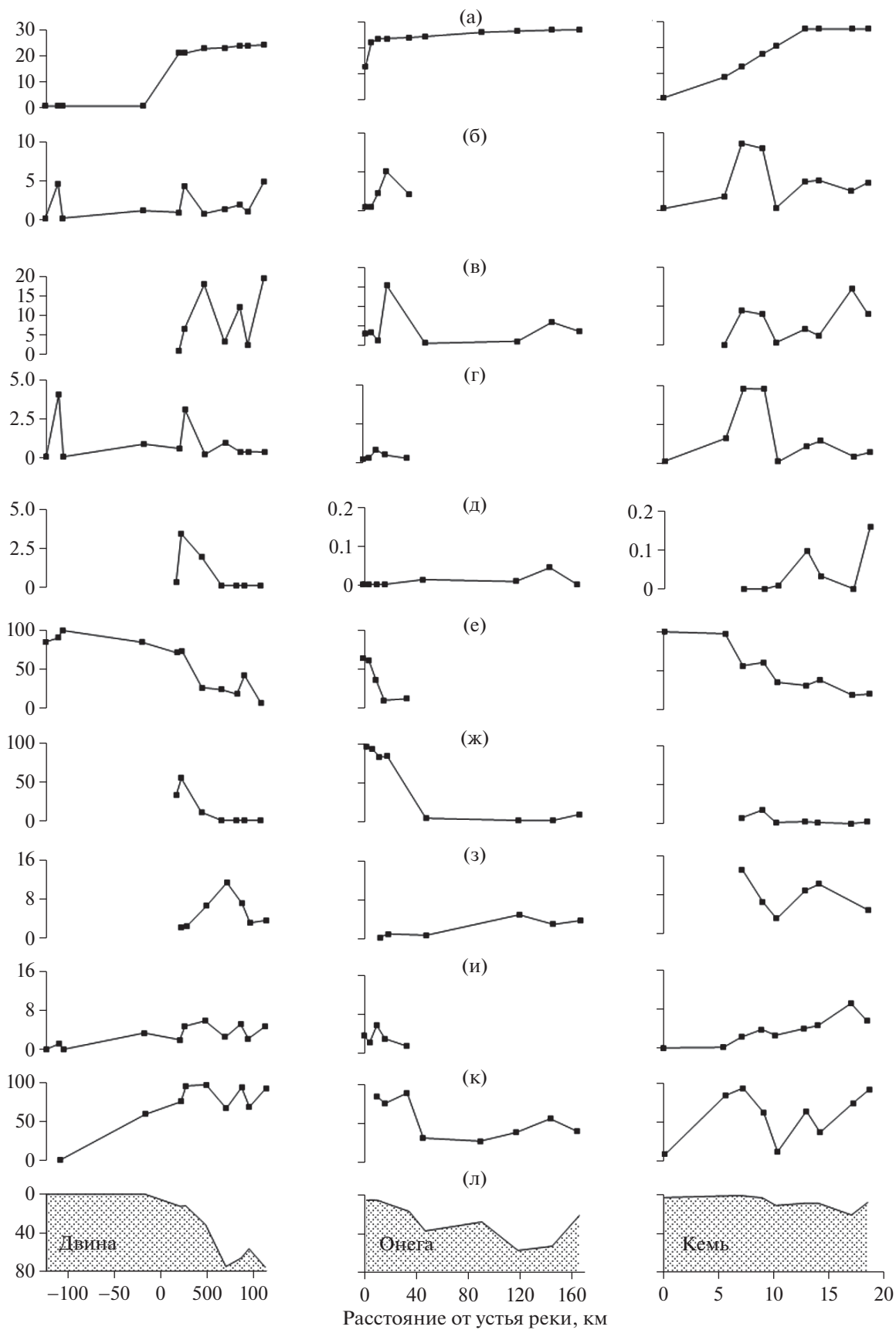


Рис. 4. Зависимости распределения различных параметров ассоциаций микроводорослей в поверхностных осадках Двинского, Онежского заливов и Кемской губы по направлению суша—море от (а) средней многолетней летней солености поверхностных вод (с апреля по сентябрь, епс), (б) суммарной концентрации диатомей, 10^6 створок/г (в) суммарной концентрации водных палиноморф, 10^3 ед./г, (г) суммарной концентрации пресноводных диатомей, 10^6 створок/г, (д) суммарной концентрации пресноводных зеленых водорослей, 10^3 ед./г, (е) содержания пресноводных диатомей, %, (ж) содержания пресноводных зеленых водорослей, %, (з) АН критерия, у.е., (и) содержания ледово-морских диатомей, %, (к) содержания алеврито-пелитовой фракции в осадках, %, (л) глубины заливов, м.

лом соответствует гранулометрическому составу осадков (рис. 5к) с относительно низким содержанием алеврито-пелитовой фракции (50–60%). В диатомовых ассоциациях преобладают пресноводные виды (71–78%, рис. 4), преимущественно планктонные речные из рода *Aulacoseira*, при высоком таксономическом разнообразии бентосных видов. Влияние речного стока отражается также на относительно высоком содержании пресноводных зеленых водорослей (до 54%, CD-критерий – до 1.2). В группе морских диатомей преобладают планктонные виды из рода *Thalassiosira* (*T. gravida*, *T. nordenskioldii*, *T. hyperborea*, *T. lineata*). Суммарное содержание ледово-морских диатомей (*Fragilariopsis oceanica*, *Fossula arctica*, *Nitzschia frigida*) не превышает 1.5–2% (рис. 4). В составе ассоциаций водных палиноморф преобладают цисты морских эвригаллиных гетеротрофных видов динофлагеллат (*Islandinium minutum*, *Echinidinium karaense*). Значения АН-критерия не превышают значений 2 у.е.

Наиболее значительные изменения концентрации взвеси и состава микрофоссилий в поверхностных осадках обнаружены на расстоянии около 26 км от устья р. Северной Двины. Здесь в период летней межени в 2001–2005 гг. в пределах солености от 19 до 25 епс обнаружена четко выраженная ($R^2 = 0.80$ при $n = 12$) обратная линейная зависимость между объемной концентрацией взвеси и соленостью вод, и снижение объемной концентрации взвеси в 4–5 раз [14]. Взвешенное вещество выводилось из воды в результате коагуляции и за счет биофильтрационной системы планктона [14, 16, 17, 21]. В поверхностных осадках в данном районе установлено резкое увеличение алеврито-пелитовой фракции (до 96.7%, рис. 5к), суммарной концентрации диатомей (до 4.16 млн створок/г, рис. 5) и водных палиноморф (до 6.15 тыс. ед./г). Необходимо отметить, что ассоциации микрофоссилий в данном районе характеризуются вторым “пиком” численности пресноводных диатомей и пресноводных зеленых водорослей, суммарные концентрации которых достигают 3.04 млн. створок/г и 3.5 тыс. ед./г соответственно (рис. 5, б).

По мере удаления от устья р. Северной Двины за пределами коагуляционно-сорбционной ступени МФ соленость поверхностных вод в Двинском заливе меняется незначительно (от 22.3 до 23.8 епс), достигая максимальных значений во внешней части залива (таблица, рис. 5). В данном

диапазоне солености отмечено увеличение концентраций взвеси, главным образом, за счет фитопланктона [14, 21]. В поверхностных донных осадках из этого района содержание алеврито-пелитовой фракции в основном высокое (до 93.4%). Суммарные концентрации морских диатомей, представленных преимущественно морскими планктонными видами (*Thalassiosira antarctica*, *T. baltica*, *T. angulata*, *T. oestrupii*, *Thalassionema nitzschioides*, споры рода *Chaetoceros*) достигают 4.38 млн створок/г, а содержание ледово-морских видов (*Fragilariopsis cylindrus*, *F. oceanica* и другие) 4–6%. Следует отметить, что, пресноводные диатомеи были встречены почти во всех исследованных пробах поверхностных осадков в данной части залива, что подтверждает поступление вод р. Северной Двины в период весеннего половодья в эту часть акватории Двинского залива [18, 21]. Здесь практически полностью исчезают зеленые водоросли (CD-критерий 0.1–0.5) и возрастают концентрации диноцист в осадках (до 19.5 тыс. цист/г, рис. 5). Значения АН-критерия достигают 8–10, отражая преобладание цист фотосинтезирующих видов динофлагеллат (*Operculodinium centrocarpum*, *Pentapaharsodinium dalei*, *Spiniferites ramosus*).

Онежский залив (рис. 1) – самый большой по площади и наиболее мелководный залив, получающий около трети пресноводного стока в Белое море, характеризуется максимальной гидродинамической активностью вод за счет приливов-отливных течений, амплитуда которых достигает 2.7 м, что приводит к осушению значительной части его акватории во время отливов [1, 7, 27]. В рукавах р. Онеги, функционирующих в период отливов, и на взморье при значениях солености от 0 до 11.8 епс (таблица, рис. 5, [7]) концентрации водных палиноморф и диатомей в осадках минимальны: <2–3 тыс. ед./г и <0.4 млн створок/г соответственно (таблица, рис. 5, б). Преобладают разнообразные пресноводные виды диатомей (*Aulacoseira italica*, *Fragilaria capucina*, *F. construens*, до 63%) и зеленые водоросли (до 100%, значения CD-критерия чрезвычайно высоки – до 18–20, рис. 5).

По мере удаления от устья р. Онеги и повышения солености поверхностных вод (до 21–23 епс) на барьере река—море осаждаются основная часть взвеси, а ее концентрации резко снижаются в 10–15 раз (II ступень МФ) [6, 7, 21]. Основная масса выносимых рекой пресноводных диатомей и зеленых водорослей также осаждаются на этой сту-

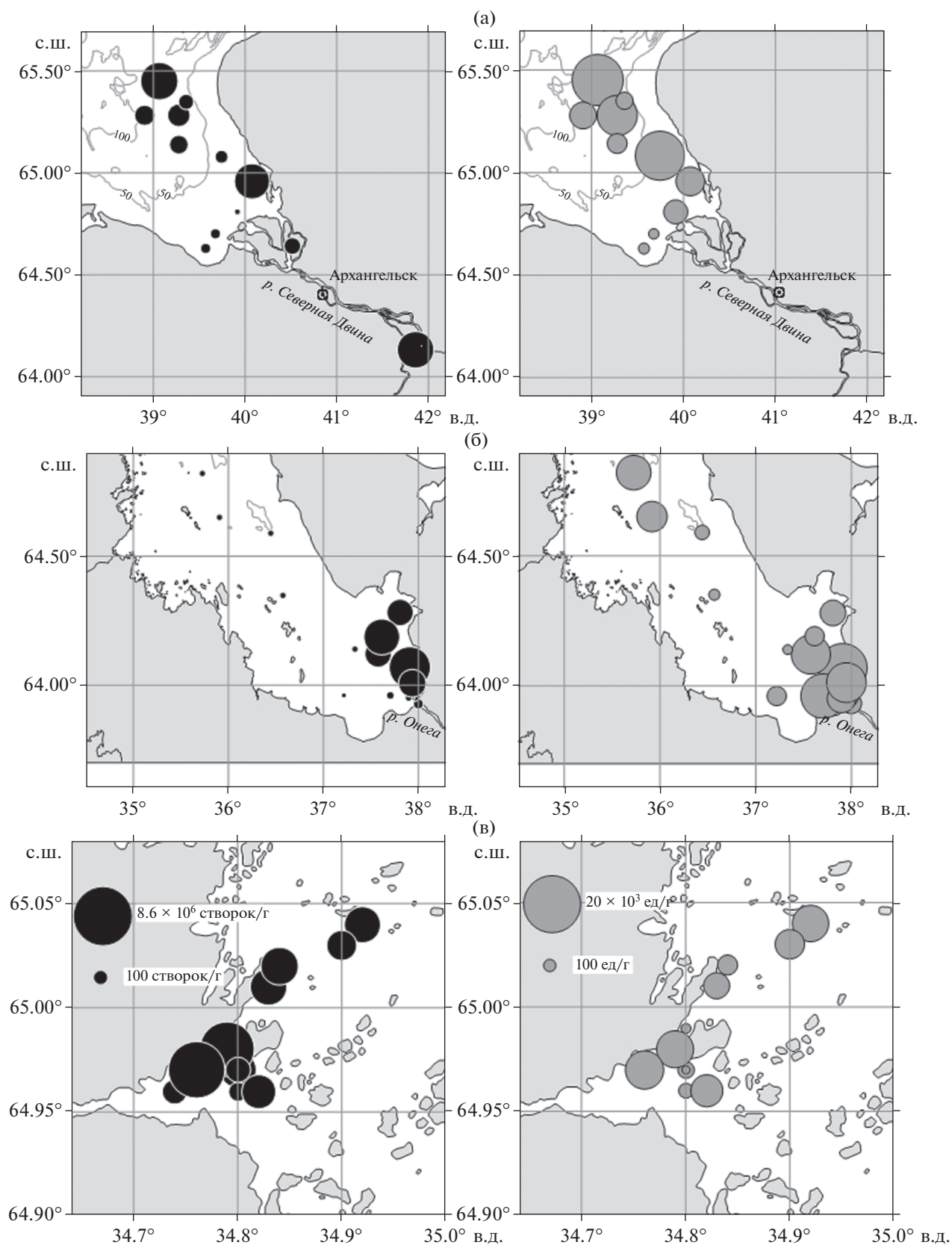


Рис. 5. Распределение концентраций диатомей (слева) и водных палиноморф (справа) в поверхностных осадках заливов Белого моря: (а) – Двинский, (б) – Онежский, (в) – Кемская губа.

пени МФ, о чем свидетельствует резкое сокращение их процентного содержания (до 8–15% и до 20–30% соответственно, рис. 5) в ассоциациях из поверхностного слоя донных осадков и максимально высокие значения CD-критерия (до 60). Вместе с тем, необходимо отметить, что численность пресноводных водорослей в осадках на II-й, коагуляционно-сорбционной ступени МФ в Онежском заливе остается крайне низкой (рис. 5), что обусловлено, скорее всего, интенсивностью приливно-отливных течений.

При дальнейшем удалении от устья р. Онеги (рис. 6) глубины исследованной части залива достигают 20 м в дренируемом в период отлива подводном русле реки и не превышают 2.7 м в прибрежных районах (таблица, рис. 5). Среднеголетняя летняя соленость поверхностных вод в данном районе изменяется незначительно (21.5 – 23.3°C, таблица), а суммарное содержание алеврито-пелитовой фракции в поверхностных осадках варьирует в широких пределах от 13.4 до 89.3% (таблица, рис. 5). Максимальные концентрации диатомей (до 3.7 млн. створок/г) и водных палиноморф (до 2.4 тыс. ед./г) приурочены к осадкам с наиболее высоким содержанием алеврито-пелитовой фракции (до 75.7%). Доминирующим видом в группе морских диатомей в кутовой части Онежского залива в отличие от Двинского является меропланктонный эвригалинный вид *Paralia sulcata*, что обусловлено, вероятно, высокой прогреваемостью (до 20–22°C) мелководного Онежского залива в летний период [7].

Во внешней части Онежского залива (удаление от устья реки до 160 км, глубины моря – до 36.1 м; таблица, рис. 5), в ассоциациях микроводорослей из поверхностного слоя донных осадков доминируют цисты морских видов динофлагеллат (до 80%), в составе которых преобладают автотрофные виды (до 4 тыс. ед./г, АН критерий 4–5) *Operculodinium centrocarpum*, *Pentapharsodinium dalei*, *Spiniferites ramosus*.

Кемская губа (рис. 1) – типичный эстуарий, характеризующийся в исследованной части последовательным увеличением глубин (до 11 м) и среднеголетней летней солености поверхностных вод (до 26.7 епс) (рис. 5) [6, 38, 39]. В песчаных осадках устьевой части р. Кеми (содержание песчаной фракции до 92.1%; рис. 6) встречаются лишь пресноводные, преимущественно перифитонные диатомей, суммарные концентрации которых не превышают 0.14 млн. створок/г (*Tabellaria flocculosa*, *Eunotia pectinalis*, *E. faba*, *Fragilaria capucina*; рис. 5). Во внешней части эстуария, на барьере река–море при повышении солености вод до 18–22 епс наблюдается резкое сокращение концентраций взвеси (до <1 мг/л), что соответствует II-й коагуляционно-сорбционной ступени МФ [21, 38]. В осадках с содержанием

алеврито-пелитовой фракции до 93.2% установлены максимальные концентрации диатомей (до 8.6 млн. створок/г) и водных палиноморф (до 8.8 тыс. ед./г). Содержание пресноводных диатомей последовательно сокращается от 69% до 13%, также как и зеленых водорослей (CD-критерий <0.2). В составе водных палиноморф доминируют диноцисты (до 8.2 тыс. цист/г) преимущественно автотрофных видов (*Operculodinium centrocarpum*, *Pentapharsodinium dalei*, *Spiniferites ramosus*) (АН-критерий до 11.2–13). В составе диатомовых ассоциаций доминирует морской сублиторальный меропланктонный вид *Paralia sulcata*, виды рода *Thalassiosira*, в значительных количествах (до 10.3%) присутствуют ледово-морские виды (*Fossula arctica*, *Fragilariopsis cylindrus*, *Navicula vanhoeffenii*).

За пределами Кемской губы, в прилегающей части акватории моря (соленость вод 22–27 епс), при общем сокращении концентраций взвеси наблюдается последовательное увеличение в ее составе БОУ (19–52.6%) [38] – III-я биологическая ступень МФ. Основную часть БОУ составляет, вероятно, морской фитопланктон (диатомей, динофлагеллаты), о чем свидетельствует значительное увеличение в поверхностных осадках концентраций диатомей и цист динофлагеллат (до 3.6 млн. створок/г и 6.7 тыс. цист/г соответственно, рис. 5, 6). В составе морских диатомей доминируют (до 2.8 млн. створок/г) морские планктонные виды из родов *Thalassiosira* (*T. gravida*, *T. nordenskioldii*, *T. angulata*, *T. oestrupii*, *T. constricta*) и *Coscinodiscus* (*C. oculus-iridis*, *C. radiatus*, *C. asteromphalus*). Значительную часть ассоциаций составляют ледово-морские виды (до 12%). Ассоциации диноцист характеризуются высокими концентрациями автотрофных видов *O. centrocarpum* (АН-критерия – до 14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные данные по распределению диатомей и водных палиноморф в поверхностных осадках заливов Белого моря отражают последовательную смену седиментационных и биологических процессов в заливах по мере удаления от устьев рек и повышении солености вод, и, вместе с тем, имеют специфические региональные особенности. Однако, несмотря на имеющиеся различия количественного и видового состава ассоциаций микроводорослей, обусловленные объемами речного стока, глубинами заливов и интенсивностью приливно-отливных течений, установлена одинаковая последовательность их изменений на различных ступенях МФ рек. На I-й, гравитационной ступени, которая установлена в приустьевых районах рек, встречаются почти исключительно пресноводные виды диатомей, численность которых в отдельных пробах

(р. Северная Двина) достигала нескольких млн створок/г осадка. На барьере река–море, на II-ой коагуляционно-сорбционной ступени МФ, в кутовой части заливов наблюдается резкое сокращение численности и процентного содержания пресноводных диатомей и зеленых водорослей, поступающих в море с речным стоком. Суммарная численность диатомей в поверхностных осадках из этих районов в Двинском и Онежском заливах варьирует в широких пределах, оставаясь в основном низкими, что обусловлено высокой мутностью вод, препятствующей вегетации водорослей, и интенсивностью приливно-отливных течений. В составе морских диатомей преобладают эвригалитные виды, а в составе диноцист – гетеротрофные виды. Максимальные концентрации микроводорослей приурочены к тонкодисперсным осадкам с содержанием алевроито-пелитовой фракции >70–80%. На III ступени МФ происходит нормальная вегетация морских планктонных видов, что отражается в составе танатоценозов донных осадков.

Авторы благодарят экипажи НИС “Профессор Штокман”, “Эколог” и “Иван Петров”, А.С. Филиппова и А.Н. Новигатского за помощь при отборе образцов и сборе материалов для статьи, чл.-корр. РАН Ю.С. Долотова за предоставление части проб и возможность участия в рейсах, J. Matthiessen и А.А. Андреева за помощь при определении водных и наземных палиноморф и Н.А. Беляева за консультацию по содержанию углерода в осадках.

Исследования поддержаны программой фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 5 “Наночастицы: условия образования, методы анализа и извлечения из минерального сырья”, грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-2493.2014.5 и грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-6982.2015.5. Материалы получены в рамках выполнения государственного задания для Лаборатории физико-геологических исследований: проект № 0149-2014-0026 “Системное исследование процессов осадкообразования в морях России, Северном Ледовитом и Атлантическом океанах”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белое море: Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования. Ч. 1 / Под ред. Скарлато О.А., Бергера В.Я. СПб.: ЗИН РАН, 1995. 79 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / Под ред. Глуховского Б.Х. Л.: Гидрометеоздат, 1991. Т. 2. Вып. 2. 240 с.
3. Гордеев В.В. Реки российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан // Новые идеи в океанологии. Т. 2. М.: Наука, 2004. С. 113–166.
4. Демина Л.Л., Филипьева К.В., Шевченко В.П. и др. Геохимия донных осадков в зоне смешения р. Кемь (Белое море) // Океанология. 2005. Т. 45. № 6. С. 851–865.
5. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
6. Долотов Ю.С., Римский-Корсаков Н.А., Теликовский А.А. и др. Особенности рельефа, поверхностных донных осадков и строения осадочной толщи в различных зонах эстуария реки Кемь (Белое море) // Океанология. 2005. Т. 45. № 6. С. 927–935.
7. Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Шевченко В.П. и др. Комплексные исследования в Онежском заливе Белого моря и эстуарии реки Онега в летний период // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 276–289.
8. Ильях Л.В., Житина Л.С., Федоров В.Д. Фитопланктон Белого моря. М.: Янус–К, 2003. 168 с.
9. Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С. и др. Комплексные исследования Белого моря в июле 2012 г. в экспедиции НИС “Эколог” // Океанология. 2013. Т. 53. № 6. С. 854–856.
10. Кловиткина Т.С., Баух Х.А. Изменения палеоокеанологических условий в море Лаптевых в голоцене по материалам исследования водных палиноморф // Океанология. 2006. Т. 46. № 6. С. 911–921.
11. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С. и др. Вещественный состав водной взвеси устья реки Северной Двины (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.
12. Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 264 с.
13. Кравчишина М.Д., Буренков В.И., Копелевич О.В. и др. Новые данные о пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла “а” в Белом море // Докл. РАН. 2013. Т. 448. № 3. С. 342–348.
14. Кравчишина М.Д., Лисицын А.П. Гранулометрический состав взвешенных веществ в маргинальном фильтре р. Северной Двины // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 94–109.
15. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П. Первые определения гранулометрического состава взвеси Белого моря // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 3. С. 387–391.
16. Лисицын А.П. Биофильтры Северного Ледовитого океана и осадочный процесс // Система моря Лаптевых: современное состояние и история развития / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 71–121.
17. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34 № 5. С. 735–747.
18. Лисицын А.П. Процессы в водосборе Белого моря: подготовка, транспортировка и отложение осадочного материала, потоки вещества, концепция “живого водосбора” // Система Белого моря / Под ред. Лисицына А.П. М.: Научный мир, 2010. Т. 1. С. 353–445.
19. Лисицын А.П. Рассеянное осадочное вещество в геосферах Земли и в системе Белого моря // Систе-

- ма Белого моря / Под ред. Лисицына А.П. М.: Научный мир, 2012. Т. 2. С. 19–48.
20. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // *Мировой океан*. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли / Под ред. Лобковского Л.И., Лисицына А.П. М.: Научный мир, 2014. С. 331–548.
 21. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. и др. Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // *Актуальные проблемы океанологии* / Под ред. Лаверова Н.П. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
 22. Новичкова Е.А., Полякова Е.И. Ассоциации микроводорослей в донных осадках областей маргинальных фильтров заливов Белого моря // *Докл. РАН*. 2013. Т. 449. № 4. С. 474–479.
 23. Новичкова Е.А., Полякова Е.И. Цисты динофлагеллат в поверхностных осадках Белого моря // *Океанология*. 2007. Т. 5. № 47. С. 709–719.
 24. Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
 25. Полякова Е.И., Кассенс Х., Штайн Р. и др. Диатомеи сибирских морей Арктики как индикаторы постгляциальных изменений речного стока, ледово-гидрологического режима и седиментационных обстановок на шельфе // *Система моря Лаптевых: современное состояние и история развития* / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 427–447.
 26. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
 27. Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С. и др. Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря) // *Докл. РАН*. 2010. Т. 430. № 5. С. 686–692.
 28. Aagaard K., Carmack E.C. The Arctic Ocean and Climate: a perspective // *The Polar Oceans and the Role in Shaping the Global Environment: The Nansen centennial volume*. Geophysical Monograph. 1994. American Geophysical Union. V. 85. P. 5–20.
 29. Battarbee R.W. A new method for estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms // *Limnol. Oceanogr.* 1973. V.18. P. 647–654.
 30. Bauch H.A., Polyakova Ye.I. Diatom-inferred salinity records from the Arctic Siberian margin: implications for fluvial runoff patterns during the Holocene // *Paleoceanography*. 2003. № 18 (2). P. 501–510.
 31. Burenkov V.I., Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Shebertov S.V. Space-time variability of suspended particulate matter in the White Sea derived from satellite ocean color data // *Proceeding VI International conference Current problems in optics of natural waters*. Saint-Petersburg: Nauka, 2011. P. 143–146.
 32. Gordeev V.V. River input of water, sediment, major ions, nutrients and trace metals from Russian territory to the Arctic Ocean // *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* / Eds. Lewis E.L. et al. Kluwer Academic Publisher Dordrecht. 2000. P. 297–322.
 33. Kunz-Pirring M. Distribution of aquatic palynomorphs in surface sediments from the Laptev Sea, eastern Arctic Ocean // *Land Ocean System in the Siberian Arctic: Dynamics and History* / Eds. Kassens H. et al. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 561–575.
 34. Matthiessen J., Kunz-Pirring M., Mudie P.J. Freshwater chlorophycean algae in recent marine sediments of the Beaufort, Laptev and Kara Seas (Arctic Ocean) as indicators of river runoff // *International Journal of Earth Sciences*. 2000. № 89. P. 470–485.
 35. Mudie P.J., Rochon A. Distribution of dinoflagellate cysts in the Canadian Arctic marine region // *J. of Quaternary Science*. 2001. V. 16(7). P. 603–620.
 36. Polyakova Ye.I., Dzhinoridze R.N., Novichkova T.S. et al. Diatoms and palynomorphs in the White Sea Sediments as Indicators of Ice and Hydrological Conditions // *Oceanology*. 2003. V. 43. Suppl. P. 144–158.
 37. Polyakova Ye.I. Diatom assemblages in surface sediments of the Kara Sea (Siberian Arctic) and their relation to oceanological conditions // *Siberian river runoff in the Kara Sea. Characterization, quantification, variability and environmental significance* / Eds. Stein R. et al. Elsevier, 2003. P. 375–400.
 38. Shevchenko V.P., Dolotov Y.S., Filatov N.N. et al. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia) // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005a. V. 9. P. 57–66.
 39. Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Belyaev N.A. et al. Seasonality particulate matter distribution in the White Sea // *Arctic Coastal Dynamics*. Ber. Polarforsch. Meeresforsch. 2004. V. 482. P. 142–144.
 40. Boyer T.P., Antonov J.I., Baranova O.K. et al. World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72. Silver Spring, 2013. 209 p.

Diatoms and Aquatic Palynomorphs in the Surface Sediments of the White Sea Bays as Sedimentation Processes Indicators in the Rivers Marginal Filter

Ye. I. Polyakova, Ye. A. Novichkova, A. P. Lisitzin, V. P. Shevchenko, M. D. Kravchishina

Diatoms, aquatic palynomorphs and granulometric composition have been analyzed in the the White sea bays surface sediments in the framework of the research program areas of marginal filter (MF) of the rivers Northern Dvina, Onega and Kem'. Three formation phases of the microalgae associations in surface sediments with distance from river mouths were identify. They are characterized by a consistent reduction in the proportion of freshwater species of diatoms and green algae such as sudden changes in concentrations of marine diatoms and dinocysts, which is determined by changes in salinity, grain size composition of sediments, quantitative distribution of suspended matter and water productivity at different stages of MF.