

УДК 550.42

ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В КАРСКОМ МОРЕ И В ЭСТУАРИЯХ ОБИ И ЕНИСЕЯ

© 1994 г. А.П. Лисицын*, В.П. Шевченко*, М.Е. Виноградов*, О.В. Северина*,
В.В. Вавилова*, И.Н. Мицкевич**

* Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

** Институт микробиологии РАН, Москва

Поступила в редакцию 10.05.94 г.

В сентябре 1993 г. в 49-м рейсе «Дмитрий Менделеев» в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея впервые были определены потоки осадочного вещества и изучен его состав. Были выставлены 23 донные станции с седиментационными ловушками; материал получен на 13 станциях. В открытой части Карского моря, мористее эстуариев Оби и Енисея, потоки осадочного вещества составляли $9.0-62.6 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, в юго-западной части моря - $18.7-60.2 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. В эстуарии Оби - до $1321 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, а в эстуарии Енисея - до $22156 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. При этом потоки органического углерода в данных районах составляли 0.71-3.29; 4.28-9.04; 26.7 и $368 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ соответственно. Осадочный материал в основном представлен pellets планктонных рачков и хлопьями «морского снега», состоящими главным образом из диатомей. Быстро осаждающиеся в водной толще частицы обильно заселены бактериями.

Поток осадочного вещества в океане из поверхностных вод на дно является важным звеном для геохимических циклов многих элементов. Знание величин потоков осадочного вещества и его компонентов, а также состава осаждающихся частиц позволяет использовать количественные методы при решении задач биогеохимии, литологии, экологии, охраны окружающей среды. Существование всех биоценозов в глубинах океана прямо или косвенно зависит от вертикального потока частиц ко дну. В ходе осаждения из поверхностных вод эти частицы влияют на химический состав, формы химических элементов и соединений морской воды, а в дальнейшем - донных осадков и иловых вод. Ведущая роль в образовании взвеси в океане и в транспортировке осадочного вещества на дно принадлежит живому веществу планктона [Лисицын, 1986].

Особый интерес представляет изучение потоков осадочного вещества в Арктике. Крупные сибирские реки и шельфовые моря являются основными источниками не только терригенного (минерального) вещества, но и органического углерода ($C_{\text{орг}}$), поступающего в центральную часть Северного Ледовитого океана и накапливающегося в его донных осадках [Bienfang & Ziemann, 1992]. Знание баланса органического углерода в Арктике

крайне необходимо для построения моделей глобальных изменений климата [Vezina & Platt, 1987]. В Арктике (в том числе и Карском море) измерение потоков осадочного материала с помощью седиментационных ловушек ранее не проводилось [Honjo, 1990]. В сентябре 1993 г. в 49-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев» в рамках международной программы JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study) было выполнено первое исследование потоков осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея.

Отсутствие данных по потокам вещества в Арктике не случайно: оно определяется трудностями получения материала в ледовых условиях, а также частыми и продолжительными штормами. Это делает исследование с длительными постановками очень опасными, в особенности при постановке приборов на длительные сроки на небольших глубинах шельфа, находящихся под воздействием волн. При исследовании почти неизбежны потери приборов. Так в 49-м рейсе были выставлены ловушки на двух западных разрезах, после чего судно было вынуждено следовать в Мурманск для частичной смены состава. За это время прошел сильный шторм, которым были сорваны несколько буйковых постановок, ловушки не удалось поднять.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для изучения потоков осадочного вещества были использованы малые седиментационные ловушки (МСЛ). МСЛ представляют собой винипластовые цилиндры с диаметром 185 мм и высотой рабочей части - 490 мм (рис. 1). В верхней части цилиндров вставлены бафлеры для гашения турбулентных вихрей и предотвращения вымывания из ловушки осевшего материала при ее подъеме к поверхности [Gardner, 1980]. Нижняя часть цилиндров заканчивается конической вставкой, в которую ввинчиваются полиэтиленовые флаконы емкостью 100 мл, где накапливается осадочный материал. Для предотвращения бактериальной деструкции и выедания зоопланктоном собранного материала [Gardner et al., 1983] в большинство флаконов перед постановкой добавляли 5 мл 40% формалина. Для изучения сравнительного материала некоторые цилиндры не были отравлены. Это позволяет оценить микробную активность и влияние мигрирующего зоопланктона ("swimmers") на сохранность собранного материала. Во флаконы неотравленных цилиндров вкладывались также обезжиренные покровные стекла для изучения микробного обрастания.

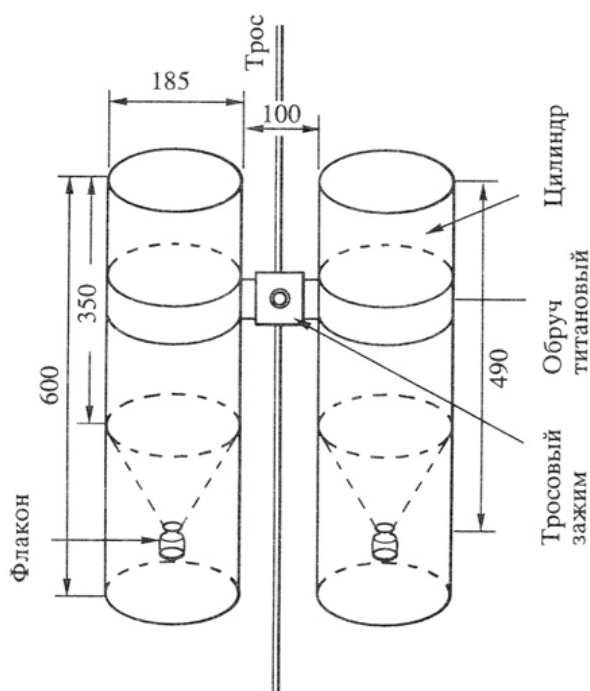


Рис. 1. Схема малой седиментационной ловушки.

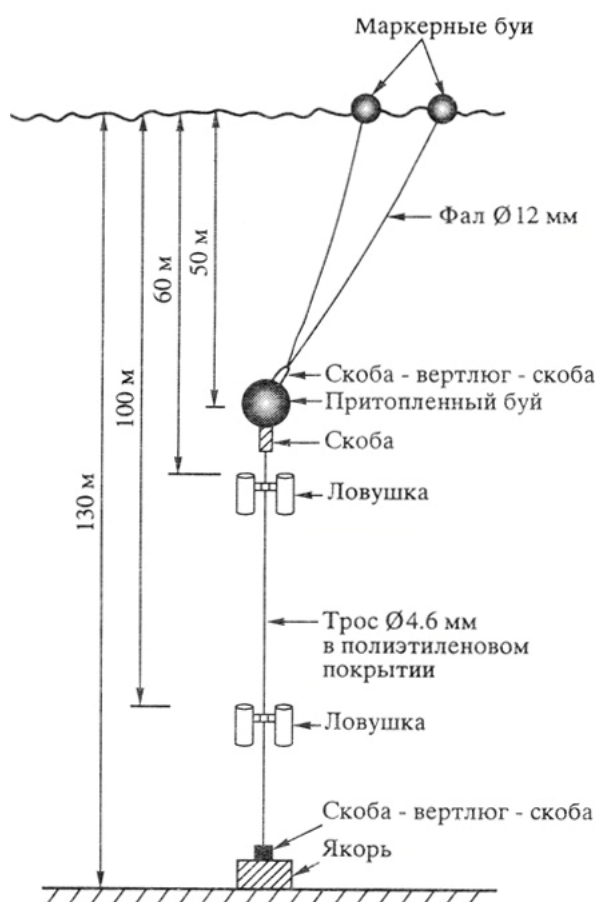


Рис. 2. Схема постановки седиментационной станции 4382.

Постановка седиментационной станции (рис. 2) начинается с выведения за борт с помощью лебедки тяжелого якоря, весом около 200 кг. Затем вытравливается трос в полиэтиленовом покрытии (04.6 мм) до рабочего горизонта, где на тросовых зажимах закрепляются ловушки. Далее к тросу (в 10-20 м от поверхности моря) прикрепляется притопленный буй, имеющий подъемную силу около 100 кг. От притопленного буя два 50-метровых конца (фал 12 мм) ведут к маркерным буйам, плавающим на поверхности. В качестве маркерных буйев использовались пластмассовые кухтыли и самодельные буйи, имеющие мачту с металлическим отражателем (для поиска буя с помощью радара). Координаты места постановки седиментационной станции регистрировали в момент касания дна якорем (появление слабины фала), используя GPS навигацию (табл. 1).

При поиске седиментационных станций для их подъема по координатам GPS судно выводилось на место постановки. После нахождения маркерных буйев один из них захватывался с помощью «кошки» и лебедкой поднимался на борт. Сразу же после подъема станции отворачивали флаконы и закрывали их крышками. До начала дальнейшей обработки пробы хранятся в холодильнике.

Таблица 1. Координаты, экспозиция седиментационных станций в Карском море и эстуариях Енисея и Оби (сентябрь 1993 г.) и потоки

№ станции	Координаты		Даты		Экспозиция, сут	Глубина моря на ст., м	Горизонт, м	Вес пробы, мг	Поток $C_{орг}$ мг $C/m^2/сут$		Поток, мг/ $m^2/сут$		$C_{орг}$, % (сух. веш.)	⟨⟩-отношение				
	с.ш.	в.д.	постановка	снятие					первич. прод.*	поток на дно**	осадочное вещество	$C_{орг}$						
4382	74°36.10'	63°54.26'	02.09	14.09	12.03	130	60	8.1	115	35	25.0	5.54	22.12	0.05				
							100	17.1			52.8	0.04	17.11					
4386	72°41.21'	64°30.51'	04.09	30.09	26.04	73	33	13.1			18.7	4.28	22.90					
							43	43.15			60.2	7.49	12.44					
4389	70°34.14'	64°30.58'	05.09	30.09	25.05	78	28	26.05	34	13	38.7	6.75	17.47	0.20				
4394	70°35.47'	60°32.12'	07.09	01.10	23.66	146	76	34.9			55.0	4.37	7.95					
							116	30.4			47.8	5.37	11.24					
4395	74°13.90'	73°00.08'	15.09	25.09	10.31	30	15	2.5	60	50	9.0	1.05	11.68	0.02				
							20	4.5			16.2	3.29	20.29					
4396	75°00.00'	73°01.22'	15.09	25.09	9.50	35	15	16.0	37	18	62.6	0.71	1.14	0.02				
							20	5.85			22.9	1.51	6.58					
4400	74°14.33'	79°58.17'	17.09	22.09	5.34	35	15	1.35			9.4	1.58	16.81					
4401	74°00.15'	79°56.64'	17.09	22.09	4.95	34	14	9.95	148	60	109.2	7.25	6.64	0.05				
							19	3.05			54.4	6.29	11.57					
4402	73°32.33'	79°57.32'	17.09	22.09	4.34	40	20	18.5	106		158.5							
							25	68.35			856							
4403	73°00.10'	79°55.61'	18.09	21.09	3.78	25	10	4.65	127	55	103.4	14.78	14.3	0.12				
							15	15.8			227.2	11.79	5.2					
4404	70°31.45'	79°49.51'	18.09	21.09	3.15	16	8	372.5			9937							
4405	71°38.50'	83°26.90'	18.09	20.09	1.71	17	9	450.85			22156	368	1.66					
4415	72°45.80'	73°28.33'	26.09	29.09	3.31	32	22	117.6			1321	26.7	2.02					
Саргассово море																		
SS***												4200	3200			36.2	1.81	5.0

* Ведерников и др. [2].

** Лебедева, Шушкина [4].

*** Deuser et al. [9].

По одной параллельной пробе с каждого горизонта немедленно после их получения было просмотрено специалистами-планктологами и микробиологами под микроскопом в камерах Богорова и Науманна. При этом изучался вещественный состав осадочного материала и выполнялось определение организмов зоо- и фитопланктона. Затем для определения весовых значений потока осадочного вещества пробы из полиэтиленовых флаконов, зафиксированных формалином, фильтровались через предварительно взвешенные стекловолкнистые фильтры GF/F (после пропускания через капроновую сеть с ячейками 500 мкм для отделения зоопланктона). Фильтры с осадочным веществом одни сутки находились в сушильном шкафу при температуре 55°C. После высушивания фильтры взвешивались, и рассчитывались потоки осадочного вещества; 1/4 часть каждого фильтра была использована для анализа $C_{орг}$ на приборе АН-7529 (аналитик

Л.В. Демина). Из фильтров с пробами также были приготовлены образцы для изучения под электронным сканирующим микроскопом JSM-US (оператор В.А. Карлов). Подсчет бактериальных клеток проводился по известной методике [Кузнецов и Дубинина, 1980]. Расположение станций с определением потоков вещества в Карском море показано на рис. 3, а данные о значениях потоков - в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На ст. 4382, расположенной вблизи Новоземельского желоба (рис. 3), поток осадочного вещества составлял 25 мг $m^{-2} сут^{-1}$ на горизонте 60 м и 52.8 мг $m^{-2} сут^{-1}$ на горизонте 100 м, а потоки $C_{орг}$ - 5.54 и 9.04 мг $C m^{-2} сут^{-1}$ соответственно. Основную часть осадочного вещества составляют pellets (рис. 4). При этом преобладают pellets калянусов (палочки длиной 0.1-0.8 мм и шириной 0.05-0.12 мм), реже встречаются овальные pellets зуфаузид (длина 0.5-0.7 мм,

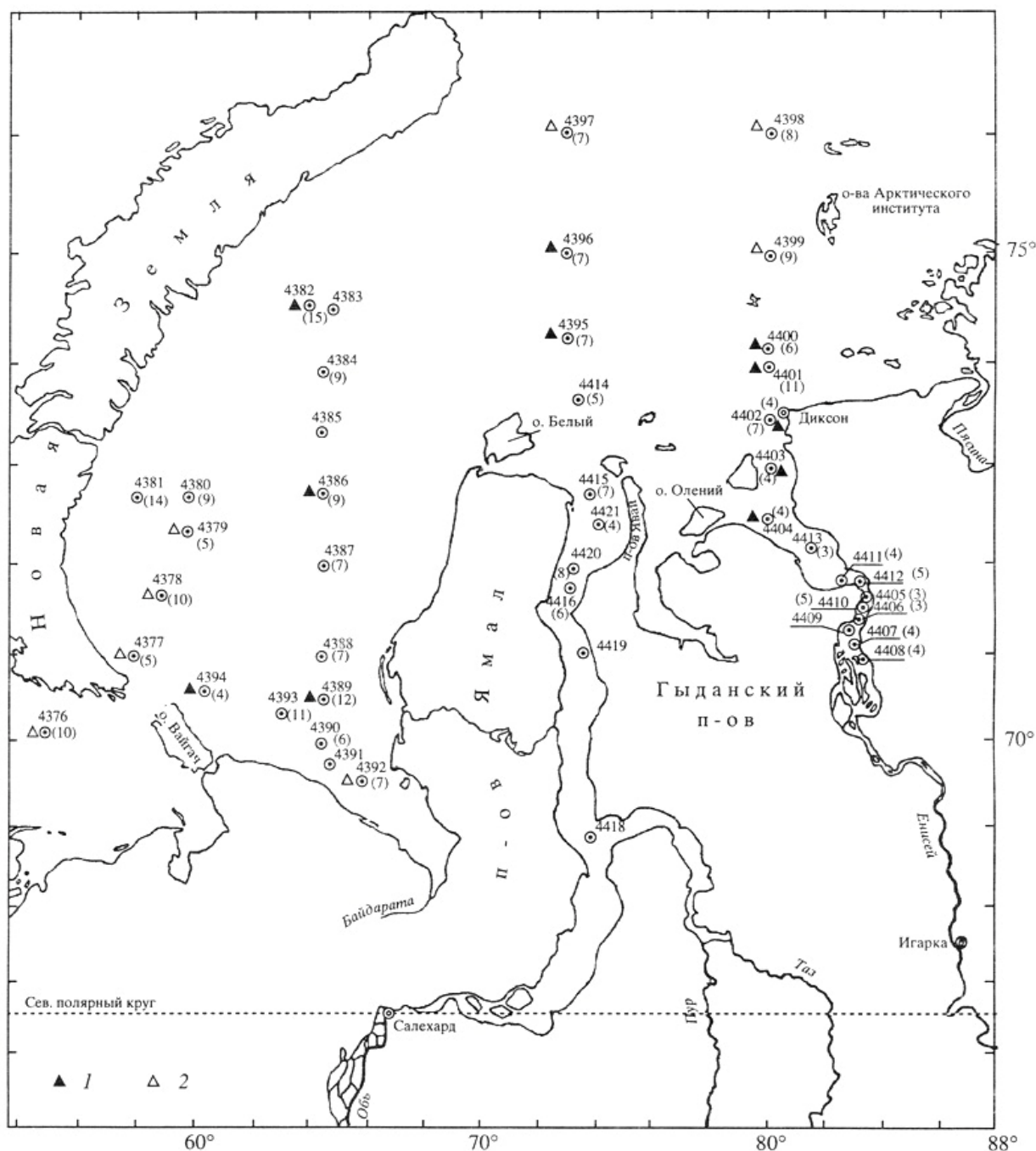


Рис. 3. Схема расположения седиментационных станций: 1 – удачные постановки; 2 – станции утеряны.

ширина 0.15-0.25 мм). Отмечены отдельные диатомеи и тинтиниды. Если принять поток взвешенного S_{org} под эвфотической зоной на глубине 60 м как новую продукцию, то, используя данные Ведерникова и Демидова [Ведерников и др., 1994] по первичной продукции, можно рассчитать f -отношение, выражающее долю новой продукции НП от общей первичной продукции ПП [Knauer et al., 1979]: $f = НП/ПП$.

По нашим данным, на ст. 4382 $f=0.05$ (табл. 1). Это значение, наряду с низкими величинами первичной продукции и потока S_{org} , соответствует представлению об олиготрофности Карского моря [Усачев, 1968;

Биогеохимия..., 1982]. Ранее было показано [Eppley & Peterson, 1979; Smetacek, 1980], что f -отношение пропорционально связано с первичной продукцией, достигая максимума (0.5) для уровня продуктивности $5509 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ и, наоборот, имеет низкие значения в олиготрофных районах. Увеличение потока осадочного материала на горизонте 100 м по сравнению с горизонтом 60 м, вероятно, связано с деятельностью придонных течений или с особенностями распределения зоопланктона (на обоих горизонтах преобладают пеллеты).

Сравнение количества бактериальных клеток в отравленных формалином и

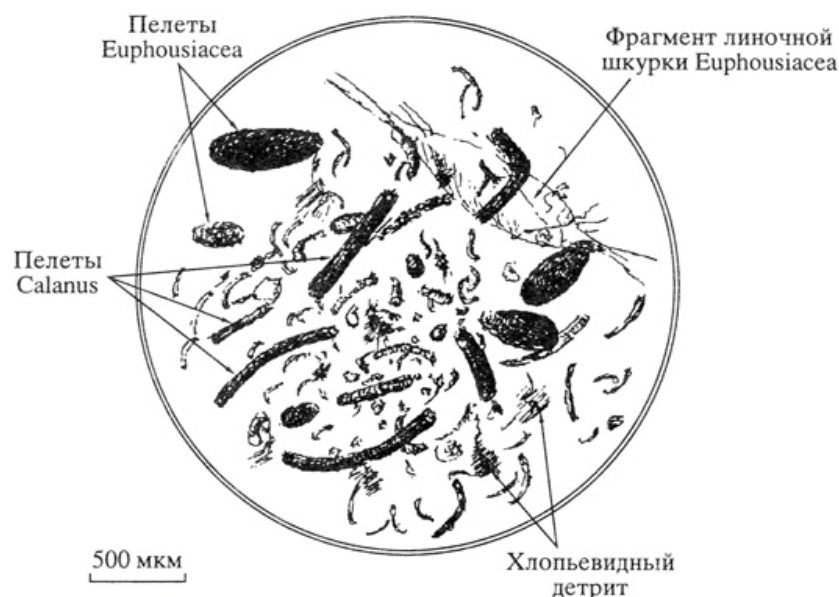


Рис. 4. Состав осадочного вещества на ст. 4382, горизонт 60 м.

неотравленных флаконах на ст. 4382, горизонт 100 м (рис. 5) показало, что в отравленном флаконе, где бактерии не могут развиваться, содержится $1\,000 \times 10^3$ кл/мл. Безусловно, эти бактерии опустились на частицах взвеси и затем были зафиксированы. Это количество значительно выше, чем в пробе воды, отобранной батометром на данной станции с того же горизонта (20×10^3 кл/мл). Таким образом, на примере этой пробы можно видеть, что быстро осаждающиеся в водной толще частицы заселены бактериями, которые осуществляют деструкцию осадочного материала. В параллельном флаконе, не отравленном формалином, оказалось $5\,000 \times 10^3$ кл/мл, т.е. в 5 раз больше, чем в отравленном, что свидетельствует о продолжающемся росте числа бактерий в богатых питательными веществами ловушечных пробах.

На ст. 4386, расположенной южнее ст. 4382 («Западный» разрез) в зоне слабого влияния речного стока (соленость на поверхности 21.39‰), поток осадочного вещества на горизонте 33 м составлял $18.7 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, а на горизонте 43 м - $60.2 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, а поток $S_{\text{орг}}$ - 4.28 и $7.49 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ соответственно. При этом на обоих горизонтах в ловушках было отмечено много диатомей *Thalassiosira nordenskioldii* (табл. 2), цветение которых наблюдалось в эвфотической зоне. При этом отношение количества клеток с хлоропластами к количеству пустых клеток составляет 1 : 3. В этих пробах встречены только единичные

пеллеты копепод. Таким образом, на этой станции отмечен случай, когда основную роль в седиментации играет не пеллетный материал, а остатки диатомей. Более высокое значение потока на горизонте 43 м по сравнению с горизонтом 33 м вызвано, вероятно, влиянием взмучивания донных осадков придонным течением. Об этом свидетельствуют как более низкое содержание $S_{\text{орг}}$ в осадочном веществе (см. табл. 1), так и высокое содержание пеллитового материала (по данным электронно-микроскопических исследований).

Также невысокие величины потоков осадочного вещества и $S_{\text{орг}}$ отмечены на ст. 4389 и 4394, расположенных в юго-западной части Карского моря (табл. 1). Осадочное вещество на этих станциях, как и на ст. 4382, представлено в основном пеллетами. На ст. 4389 (горизонт 28 м) это овальные черные пеллеты длиной до 0.6 мм, шириной до 0.2 мм и оливково-зеленые пеллеты копепод длиной около 0.8 мм и толщиной 0.05 мм. Диатомей мало. Для этой станции установлено наименьшее для Карского моря расхождение измеренных ловушкой величин потоков $S_{\text{орг}}$ ($6.75 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) и рассчитанных по модели потоков биогенного детрита ($13 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) [Лебедева и Шушкина, 1994].

На ст. 4394 в пробах преобладают овальные черные детритные пеллеты длиной до 0.8 мм и шириной до 0.25 мм, а также палочковидные оливково-зеленые пеллеты копепод длиной до 2 мм и толщиной до 0.25 мм.

Таблица 2. Результаты микроскопического изучения осадочного вещества, собранного седиментационными ловушками

Ст. 4382 60 м	Водорослей немного, из диатомей отдельные <i>Thalassiosira</i> spp. $d = 25 - 30$ мкм Редко встречаются диофлагелляты <i>Peridinium grami</i> $d = 120$ мкм, <i>Peridinium pellucidum</i> $d = 40$ мкм, <i>Peridinium</i> sp.
100 м	Тинтиниды родов <i>Tintinnopsis</i> , <i>Ptychocylics</i> , <i>Parafavella</i>
Ст. 4386 33 м	Много диатомей <i>Thalassiosira nordenskioldii</i> , цветение которых наблюдалось в фотической зоне выше. В водной толще на этой глубине отмечались единицы клеток этого вида. Отношение количества клеток с хлоропластами к количеству пустых клеток = 1 : 3 Споры <i>Chaetoceros subsecundus</i>
43 м	То же самое, что на 33 м Отдельные клетки <i>Chaetoceros</i> spp., <i>Nitzschia</i> sp., <i>Cylindrotheca closterium</i>
Ст. 4389 28 м	Диатомей немного. Отдельные колонии <i>Melosira</i> spp., <i>Chaetoceros</i> spp., <i>Jeptocylindrus danicus</i> ; <i>Melosira sulcata</i> . Встречаются тинтиниды р. <i>Tintinnopsis</i>
48 м	Очень мелкая взвесь (порошкообразная). Редкие колонки диатомей <i>Melosira</i> spp., <i>Jeptocylindrus danicus</i>
Ст. 4394 77 м	Незначительное количество диатомей. Обнаружены колонии диатомей <i>Melosira sulcata</i> , <i>Thalassiosira gravida</i> , <i>Navicula</i> sp., <i>Melosora</i> spp., <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Bacterosira frogilis</i> ; кремнежгутиковые <i>Distephanus speculum</i> <i>Cysta</i>
117 м	Немного диатомей, колонии <i>Melosira granulata</i> , <i>M. sulcata</i> , <i>Jeptocylindrus danicus</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Navicula</i> spp., <i>Nitzschia</i> sp. Редкие тинтиниды.
Ст. 4395 20 м	Очень мало взвеси, почти чистая проба В подпробе объем 1 мл обнаружена только одна колония <i>Melosira</i> sp.
15 м	Взвеси очень мало; хлопья слизи $d = 50 - 60$ мкм Единичные клетки диатомей <i>Asterionella</i> sp., <i>Chaetoceros gracilis</i> , одна колония <i>Melosira</i> sp.
Ст. 4396 15 м	Много комочков слизи; редкие клетки <i>Chaetoceros gracilis</i> Много <i>Cysta</i> золотисто-коричневого цвета
20 м	Диатомей мало. <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Navicula</i> sp., <i>Cylindrotheca closterium</i> . Тинтиниды р. <i>Tintinnopsis</i>
Ст. 4400 15 м	Среди диатомей обнаружены <i>Nitzschia</i> sp., <i>Chaetoceros socialis</i> , <i>Cylindrotheca closterium</i> , <i>Thalassiorira</i> sp., <i>Asterionella formosa</i> , <i>Chaetoceros gracilis</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Ch. compressus</i> , <i>Cyanophyta</i>
Ст. 4401 14 м	Комочки слизи. Обнаружены следующие диатомеи: Колонии <i>Melosira italica</i> , <i>M. granulata</i> , <i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Asterionella bleakelegi</i> , <i>Ast. formosa</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Kh. delicatula</i> , клетки <i>Thalassiosira</i> sp., <i>Nitzschia</i> sp., <i>Navicula dicecta</i> , <i>Synedra ulna</i> , <i>Synedra acus</i> ; <i>Cyanophyta</i>
19 м	Примерно то же самое, что и на 14 м.
Ст. 4402 20 м	Диатомей немного. Среди диатомей обнаружены <i>Melosira granulata</i> , <i>Asterionella bleakelegi</i> , <i>Ch. gracilis</i> , <i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Ch. socialis</i> , <i>Fragilaria capucina</i> , <i>Asterionella formosa</i> , <i>Cylindrotheca closterium</i> , <i>Synedra pulchella</i> Тинтиниды р. <i>Tintinnopsis</i>
25 м	Отдельные клетки диатомей <i>Synedra</i> sp., <i>Synedra ulna</i> , <i>Jicmophora</i> sp., <i>Thalassiosira</i> sp., <i>Navicula</i> sp. Колонки <i>Melosira</i> sp. Тинтиниды р. <i>Tintinnopsis</i>
Ст. 4403 10 м	Немногочисленные диатомеи: <i>Thalassiosira</i> sp., <i>Asterionella formosa</i> , <i>Cest. bleakeleyi</i> , <i>Melosira juergensii</i> , <i>Melosira italica</i> , <i>M. granulata</i> . Тинтиниды
15 м	Немногочисленные пресноводные диатомеи: <i>Melosora</i> spp., <i>Cyanophyta</i> , <i>Cystoc</i>
Ст. 4404	Немного диатомей: <i>Melosira</i> spp., <i>Navicula</i> sp., <i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Synedra</i> sp., <i>Fragilaria capucina</i> , <i>Asterionella bleakelegi</i>
Ст. 4415	Много комочков слизи. Диатомей мало
16 м	<i>Melosira</i> spp.
19 м	Отдельные колонки <i>Melosira</i> spp.

Самые низкие величины потоков осадочного вещества и $C_{орг}$ отмечены на северных станциях обского и енисейского разрезов (ст. 4395, 4396, 4400 - см. табл. 1). Для этих станций характерна также и низкая

первичная продукция - $60 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ на ст. 4395 и $37 \text{ мг С м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ на ст. 4396 [Ведерников и др., 1994].

На этих трех станциях осадочное вещество в ловушках было представлено пеллетами

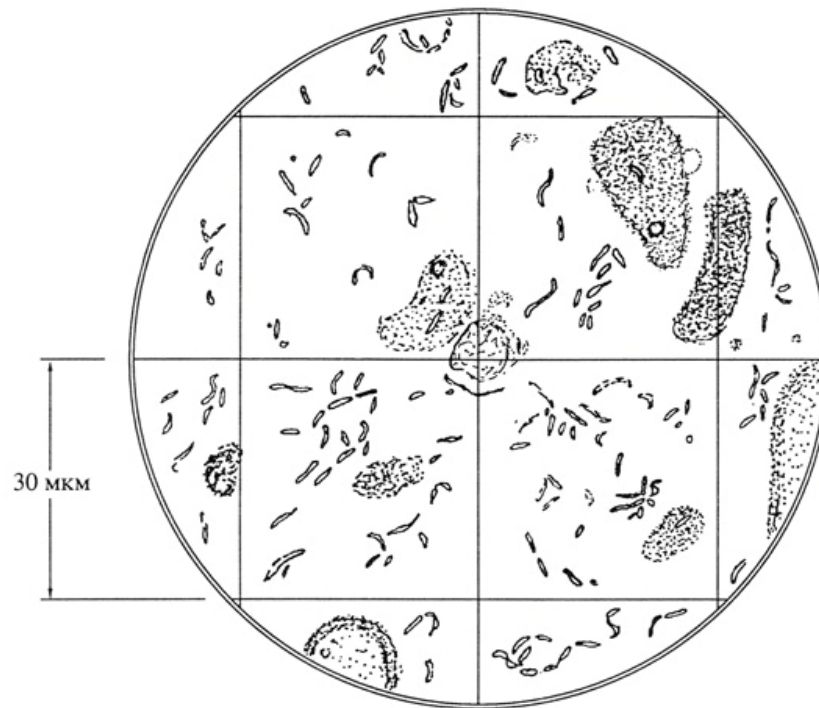


Рис. 5. Бактериальные клетки в пробе осадочного вещества (ст. 4382, горизонт 100 м).

ракообразных, комочками вещества, состоящими из диатомей (табл. 2). На ст. 4395 и находящейся с ней на одной параллели ст. 4400 преобладают диатомовые и пеллеты, а при этом содержание $C_{орг}$ высокое (от 11.68 до 20.29%). В то же время на ст. 4396 общий поток выше, чем на ст. 4395 и 4400 (до $62.6 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$), осадочный материал состоит в основном из минеральных зерен, а содержание $C_{орг}$ незначительно - 1.14% на горизонте 15 м и 6.58% на горизонте 20 м. Велика вероятность того, что на ст. 4396 происходит взмучивание донных осадков.

Намного более высокие значения потоков отмечены в устьевых зонах Оби и Енисея - в области развития маргинальных фильтров. На ст. 4415, расположенной во внешней части зоны смешения речных вод Оби и морских вод, поток осадочного вещества на горизонте 22 м (т.е. в 10 м от дна), достигает $1321 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$, и поток $C_{орг}$ - $26.7 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Осадочный материал в основном представлен мелкозернистым детритом и глинистыми частицами, содержание $C_{орг}$ низкое - 2.02%. Это материал, осаждающийся на соленостном барьере (соленость поверхностных вод здесь составляет 8.19‰), в области развития «иловой пробки».

На енисейском разрезе отмечено увеличение потоков осадочного вещества от $9.4 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ на ст. 4400, расположенной в олиготрофном районе открытого моря севернее о. Диксон, до $158.5 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ на ст. 4402, на

транверсе Диксона на внешней границе эстуария Енисея, и до лавинных значений $22156 \text{ мг м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ в зоне развития «иловой пробки» [Лисицын, 1982] на ст. 4405.

Осадочное вещество на ст. 4401, 4403 представлено крупными (длиной до 2 мм) черными пеллетами копепоидов и хлопьевидным детритом, а на ст. 4402 - мелкозернистым детритом (глинистыми частицами) и длинными (до 5 мм) оливково-черными пеллетами копепоидов (рис. 6). В то же время на ст. 4404 и 4405 в эстуарии осадочное вещество представлено в основном пелитовым материалом. Содержание $C_{орг}$ в пробе на ст. 4405 составляет всего 1.66%. Это свидетельствует о преобладании в осадочном веществе потока речной взвеси и флоккул.

На енисейском разрезе отмечено также изменение видового состава диатомовых в пробах, собранных седиментационными ловушками (табл. 5). Если на ст. 4400 отмечены только морские виды, то в эстуарии преобладают пресноводные (*Synedra ulna*, *Melosira italica*), а также пресноводные и солоноватоводные виды (*Fragilaria capucina*, *F. crotonensis*, *Melosira juergensii*, *Synedra pulchella*).

В экспедиции была проведена методическая работа по оценке возможности использования формалина для защиты проб в седиментационных ловушках от выедания их зоопланктоном. При сравнении содержимого флаконов-пробосборников двух цилиндров

одной и той же ловушки - отравленного формалином и неотравленного - было обнаружено, что на ряде станций (4386, 4389, 4394, 4395) в отравленных флаконах собрано много зоопланктона, в то время как в соседних неотравленных флаконах его практически нет. Например, необычайно много (до 100) копепод *Calanus finmarchicus*, *Metridia longa*, а также гипериид *Themisto abyssorium* (3 экземпляра), птеропод *Limacina helicina* (10 экземпляров) было собрано в отравленном флаконе на ст. 4394, горизонте 77 м. На ст. 4395 на горизонте 20 м в ловушку попала мертвая гипериида *Themisto libellata*, а затем там собрались 4 гаммариды *Gammarus locusta*, которые ее съели и вместе с остатками добычи свалились во флакон, отравленный формалином. Таким образом, зоопланктон, заплывавший в ловушки ("swimmers"), благополучно покидал неотравленные флаконы, вероятно, съев часть собранного осадочного материала, а из отравленных флаконов животные уйти не могли.

Итак, полученные нами данные о влиянии формалина как консерванта согласуются с литературными [Gardner et al., 1983]: формалин предохраняет собранные пробы не только от бактериальной деструкции, но и от выедания зоопланктоном.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Насколько показательны полученные в ходе 49-го рейса результаты в сопоставлении с другими данными по потокам в высоких широтах северного и южного полушарий? Наиболее надежные данные приведены в табл. 3, 4, из которых следует несколько выводов.

1. Полученные первые данные о потоках в Карском море оказались в 2-20 раз ниже, чем в Норвежском море в районе гибели атомной подводной лодки «Комсомолец». Здесь Институт океанологии РАН проводит исследования в летний сезон несколько лет подряд с НИС «Академик Мстислав Келдыш» с применением подводных обитаемых аппаратов «Мир». В настоящее время здесь действует буйковая станция для круглогодичных определений потоков, которая будет поднята на поверхность летом 1994 г.

Значения потоков в Норвежском и Гренландском морях близки к Карскому морю и к заливу Аляска, т.е. полученные показатели величины потока характерны для высокоширотных морей северного полушария.

2. Значение потока вещества в маргинальном фильтре Енисея относится к

самым высоким показателям потоков из известных, высокая величина потока отмечена и в фильтре Оби.

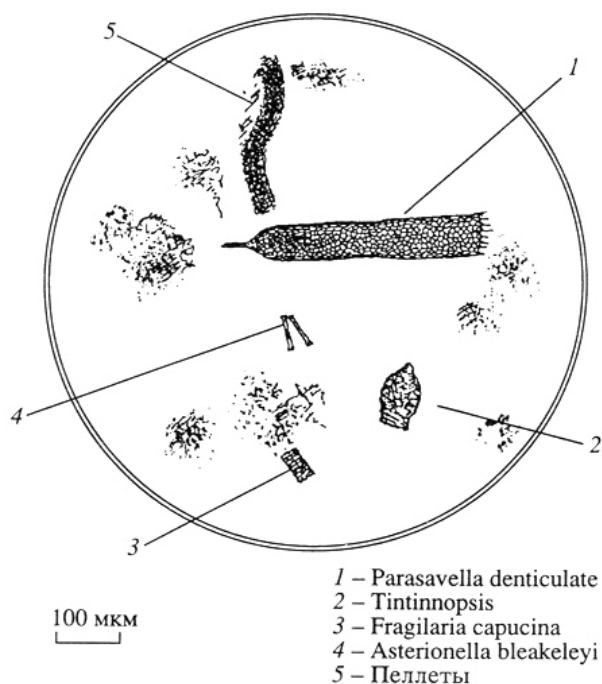


Рис. 6. Состав осадочного вещества на ст. 4402, горизонт 20 м.

3. В Антарктике величины потока в море Уэдделла оказались еще ниже, чем в Карском море.

4. По значениям потока осадочного вещества, а также органического углерода Карское море близко к олиготрофному Саргассову морю и даже несколько ниже значений потоков в этом море.

Все приведенные в табл. 1 цифры относятся к летнему сезону и не характеризуют годовичные значения потока, поскольку, как известно, северные части Карского моря покрыты льдом около 9 месяцев в году и в основную часть года величины потоков должны быть значительно ниже, чем во время летнего цветения планктона.

Второе обстоятельство, которое нужно иметь в виду при обсуждении таблицы: основная часть данных относится к ловушкам, установленным не на поверхности, а приблизительно в 400 м от дна, кроме мелководных морей типа Карского.

Для перехода к средним за год значениям потоков вещества для большинства районов данных недостаточно. Для этого нужна установка ловушек с круглогодичным циклом работы, что сделано пока только для незначительного количества мест. В табл. 5 приведены данные о средних годовых значениях потоков для фиордов Норвегии и

Таблица 3. Потоки осадочного вещества и $C_{орг}$ в Арктике и Субарктике (ловушки – 400 м от дна)

Район	Экспозиция	Поток суммарный, мг/м ² /сутки	Поток $C_{орг}$, мг/м ² /сутки	Источник
Карское море ¹⁾	2 - 26	9 - 50 – внешние части шельфа 22156 – в депоцентре маргинального фильтра в устье р. Енисей		49-й рейс НИС “Дмитрий Менделеев”
Норвежское море близ о. Медвежий (район АПЛ-Комсомолец)	10 - 11 сут	130 - 138	–	24-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”
»	13 сут	228 - 231	–	31-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”
Норвежское море р-н о. Медвежий ст. В-1	4 мес	89.3 24 - 136	–	[15] [14]
Гренландское море р-н Гренландского течения (GB-1, GB-2)		20 - 60	0.4 - 2.4	[14]
р-н пролива Фрама (FS-1, FS-2)	5 мес	5 - 45	0.5 - 4	[14]
Норвежское море Норвежское течение (LB-1, 2)	6 мес	10 - 170	2 - 8	[14]
		Поверхность		
Перуанский апвеллинг			2200	
Саргассово море			60	[9]

¹⁾ Поток аэрозольного материала с дождевыми врами по определениям в 49-м рейсе 14 мг/м²/день, т. е. составляет более половины потока водной взвеси.

Кильской бухты. Обращает на себя внимание значительно меньший разброс величин, а также заметное снижение величины потока в ловушках из придонного слоя в сравнении с установленными близ поверхности. В среднем для фиордов Норвегии потоки на глубинах 70-85 м снижаются в 5-10 раз.

Второй круг вопросов, требующих обсуждения, связан с сопоставлением трех методов определения потоков: седиментационных ловушек, ториевого (²³⁴Th) и биологического - по выходу детрита из пищевых цепей. Эти методы основаны, как видим, на разных принципах и в подсчет включается разный по гранулометрическому составу материал.

Определения ториевым методом основаны, по существу, на определении вклада сорбированного на частицах новообразованного изотопа тория, т.е. отражают сорбционную емкость, которая определяется в первую очередь вкладом наиболее тонких частиц с развитой поверхностью. В то же время, как видно из сказанного, в пробах полученных ловушками, преобладают крупные частицы со значительной скоростью осаждения - pellets рачков и частицы морского снега. Таким образом,

данные о потоках, полученные ловушками, должны быть значительно ниже, чем полученные ториевым методом, что и получается в действительности для всех станций в Карском море.

Биологический метод определения потоков на основе количественных моделей с определением выхода из системы показывает лишь количество вещества без характеристики крупности его частиц, т.е. полученные цифры должны быть ближе к данным ториевого метода, поскольку, как показывают исследования взвеси под микроскопом, более 90% ее частиц состоит из материала размером менее 1 мкм. Это положение также подтверждается всеми полученными при работах в Карском море материалами - значения потоков по торию и биологическими методами близки между собою и в несколько раз - иногда в десятки раз - выше, чем по данным седиментационных ловушек.

Известно, что пеллетный транспорт взвеси является главным в ее переносе от поверхности в глубинные слои и таким образом данные по ловушкам характеризуют только ту часть взвеси, которая транспортируется в глубинные слои (поток взвеси). Два других метода характеризуют содержание взвешенных частиц

на разных горизонтах, и величина потока определяется из сопоставления значений для разных горизонтов, т.е. при этом не улавливается наиболее важная для транспортной системы взвеси часть. Нам представляется, что в дальнейшем необходимо учитывать все три показателя и при более детальных исследованиях создать модель, наиболее адекватную природным условиям. Пеллетный поток имеет наибольшее значение для верхних слоев водной толщи и для мелководных морей, а на глубинах в несколько тысяч метров его роль снижается, он уступает место потоку с хлопьями «морского снега».

Таблица 4. Максимальные и минимальные значения потоков осадочного вещества [23]

Район, станция	Значения потока, мг/м ² /сутки	
	максимальные	минимальные
Норвежское море (абиссальная равнина), ст. NA	69	6.4
Норвежское море, западная часть, ст. NB	103	2.8
Норвежское море, близ о. Медвежий, ст. VI	136	24
Норвежское море, р-н Лофотенских о-ов, ст. LB	162	4.5
Гренладское море, ст. GB	36	0.1
Пролив Фрама	56	4.9
Залив Аляска, ст. SP	415	10
Море Уэдделла, ст. WS	11	0.001
Саргассово море, ст. SS	120	16
Черное море, ст. BS	336	1
Тропики Тихого океана ст. TPC	77	48
Панамский бассейн, ст. PB	876	169

Таблица 5. Годовые потоки вещества в Северной Атлантике и фиордах Норвегии (г/м²/год)

Фиорды Норвегии	Поверхность	Придонный слой 70 - 85 м	Источник
Линдасполене (апрель - ноябрь)	224 - 538	147 - 156	[21]
Фанафьорд		825 - 885	[20]
Фрамверен		90	[16]
Кильская бухта	611 - 1811		[17]
Бедфордский залив	791 - 1356		[13]

Наконец, третий круг вопросов связан с необходимостью перехода от мгновенных значений потока, которые получены за период наблюдений - (несколько дней или месяцев) - к средним годовым и многолетним.

Как уже указывалось, многолетние наблюдения ведутся только в нескольких

точках Мирового океана и пока еще мало попыток по кратковременным наблюдениям восстановить наиболее вероятное значение годового потока. Представляется, что здесь те же трудности и те же решения, что и при определениях первичной продукции в рейсе и необходимости наиболее достоверного определения ее для года или среднего многолетнего. Для потоков взвеси эта задача пока не решена, но вероятно на основе экосистемного подхода могут быть созданы численные модели потоков для разных климатических зон.

Поскольку главная часть вещества, входящего в потоки, биогенная (углерод клеток, кремнистые панцири, карбонатные раковинки и др. в форме тонкого детрита и пеллетов), то необходимы методы перехода от карт синтетической цветности поверхности океана, полученных со спутников, к первичной продукции и далее к потокам вещества. В таком случае на основе глобальных и региональных карт цветности и моделей - с постановкой серии контрольных станций с прямыми определениями потоков для контроля - можно будет перейти к глобальным определениям потоков, что является задачей завтрашнего дня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение потоков осадочного вещества, проведенное в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея в сентябре 1993 г., показало:

1. В открытой части Карского моря измерены низкие значения потока осадочного вещества и органического углерода, соответствующие представлениям об ультраолиготрофности этого водоема. В составе осадочного вещества в открытой части Карского моря преобладают пеллеты копепод и эуфаузиид, а также хлопьевидные агрегаты («морской снег»).

2. В эстуариях Оби и Енисея потоки осадочного вещества на два-три порядка выше, чем в открытой части моря, что является результатом осаждения взвеси на первом глобальном уровне лавинной седиментации. Осадочное вещество здесь в основном состоит из терригенного материала пелитовой и алевритовой фракций.

3. Быстро осаждающиеся в водной толще частицы богато заселены бактериями, которые осуществляют деструкцию осадочного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-05-9280).

Авторы благодарят А.А. Буровкина, А.Ф. Кулешова за активное участие в постановке седиментационных станций. Авторы признательны капитану НИС «Дмитрий Менделеев» М.А. Боровкову, старшему

помощнику капитана Е.Б. Еганову, боцману В.И. Хрипуну и палубной команде за помощь, Е.М. Волковой, Л.В. Деминой, В.А. Карлову за участие в анализе проб, Г.И. Семиной за консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биогеохимия органического вещества арктических морей. Отв. ред. *И.С. Грамберг, Е.А. Романкевич*. М.: Наука, 1982. 240 с.
2. *Ведерников В.И., Демидов А.Б., Судьбин А.И.* Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 693-703.
3. *Кузнецов С.И., Дубинина Г.А.* Методы изучения водных микроорганизмов / Под ред. Сорокина Ю.И. М.: Наука, 1980. 286 с.
4. *Лебедева Л.П., Пушкина Э.А.* Оценка потока автохтонного детрита через планктонные сообщества Карского моря // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 730-734.
5. *Лисицын А.П.* Лавинная седиментация // *Лавинная седиментация в океане*. Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета, 1982. С. 3-59.
6. *Лисицын А.П.* Биодифференциация осадочного вещества в океане и осадочный процесс // *Биодифференциация осадочного вещества в морях и океанах*. Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского университета, 1986. С. 3-66.
7. *Усачев П.И.* Фитопланктон Карского моря // *Планктон Тихого океана*. М.: Наука, 1968. С. 6-28.
8. *Bienfang P.K., Ziemann D.A.* The role of coastal high latitude ecosystems in global export production // *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea*. N.Y.: Plenum Press, 1992. P. 285-297.
9. *Deuser W.G., Ross E.H., Anderson R.F.* Seasonality in the supply of sediment to the deep Sargasso Sea and implications for the rapid transfer of matter to the deep ocean // *Deep-Sea Research*. 1981. V. 28. P. 495-505.
10. *Eppley R.W., Peterson B.J.* Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean // *Nature*. 1979. V. 282. P. 677-680.
11. *Gardner W.D.* Field assessment of sediment traps // *J. Mar. Res.* 1980. V. 38. P. 41-52.
12. *Gardner W.D., Hinga K.R., Marra J.* Observations on the degradation of biogenic material in the deep ocean with implications on accuracy of sediment trap fluxes // *J. Mar. Res.* 1983. V. 41. P. 195-214.
13. *Hargrove B.T., Phillips G.A., Taguchi S.* Sedimentation measurements in Bedford Basin, 1973- 1974 // *Fisheries and Marine Service Tech. Rep.* 608. 1976. P. 1-110.
14. *Honjo S.* Particle fluxes and modern sedimentation in the Polar Oceans // *Polar Oceanography. Part B: Chemistry, Biology and Geology*. Academic Press, 1990. P. 678-739.
15. *Honjo S., Manganini S.J., Wefer G.* Annual particle flux and a winter outburst of sedimentation in the northern Norwegian Sea // *Deep-Sea Research*. 1988. V. 35. P. 1223-1234.
16. *Knauer G.A., Martin J.H., Bruland K.W.* Fluxes of particulate carbon, nitrogen and phosphorus in the upper water column of the north-east Pacific // *Deep-Sea Research*. 1979. V. 26. P. 97-108.
17. *Skei J.M.* Geochemical and sedimentological considerations of a permanently anoxic fjord-Framvaren, South Norway // *J. Sedim. Geol.* 1983. V. 36. P. 131-145.
18. *Smetacek V.* Annual cycle of sedimentation in relation to plankton ecology in Western Kiel Bight // *Ophelia*. 1980. V. 1 (Suppl.). P. 65-76.
19. *Vezina A.F., Piatt T.* Small-scale variability of new production and particulate fluxes in the ocean // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1987. V. 44. P. 198-205.
20. *Walsh J.J.* Arctic carbon sinks: present and future // *Global Biogeochemical Cycles*. 1989. V. 3. P. 393-411.
21. *Wassmann P.* Sedimentering og benthosmetabolisme i den indre dele av Fanafjorden. 1981. 210 P. Thesis for the candidatus realium degree, University of Bergen, Norway.
22. *Wassmann P., Peinert R., Smetacek V.* Patterns of production and sedimentation in the boreal and polar Northeast Atlantic // *Polar Research*. 1991. P. 209-228.
23. *Wefer G.* Particle flux in the Ocean: effects of episodic production // *Productivity of the Ocean: Present and Past*. Willey and Sons, 1989. P. 139-153.

Particle Fluxes in the Kara Sea and Ob and Yenisei Estuaries

A.P. Lisitzin, V.P. Shevchenko, M.E. Vinogradov, O.V. Severina, V.V. Vavilova, I.N. Mitzkevich

Particle fluxes in the Kara sea and Ob and Yenisei estuaries were determined in September 1993 during the 49-th cruise of the R/V "Dmitry Mendeleev" for the first time. Composition of particles was studied. 23 sedimentological stations were deployed. Samples were obtained at 13 stations. In the open Kara Sea off Ob and Yenisei estuaries particle fluxes were equal to 9.0-62.6 mg m⁻² d⁻¹, in Ob estuary - up to 1321 mg m⁻² d⁻¹, and in Yenisei estuary - up to 22 156 mg m⁻² d⁻¹. Fluxes of organic carbon in these regions were 0.71-3.29; 4.28-9.04; 26.7-368 mg m⁻² d⁻¹ correspondingly. Particulate material is represented mainly by pellets of crustacea and by "marine snow", consisting mainly of diatoms.

Ссылка на статью:



Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е., Северина О.В., Вавилова В.В., Мицкевич И.Н. Потoki осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея // Океанология. 1994. Том 34. № 5. С. 748-758.